

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

C22C 33/04 (2006.01)

C21C 7/10 (2006.01)

C22C 38/00 (2006.01)



# [12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200610095813.9

[43] 公开日 2007年5月23日

[11] 公开号 CN 1966751A

[22] 申请日 2001.6.5

[21] 申请号 200610095813.9

分案原申请号 200510078577.5

[30] 优先权

[32] 2000.6.5 [33] JP [31] 2000-167085

[32] 2000.6.5 [33] JP [31] 2000-167086

[32] 2000.6.5 [33] JP [31] 2000-167087

[32] 2000.6.5 [33] JP [31] 2000-167088

[32] 2000.6.5 [33] JP [31] 2000-167089

[71] 申请人 山阳特殊制钢株式会社

地址 日本兵库县

[72] 发明人 佐藤一郎 石堂嘉一郎 森知巳

入江敏弘 儿玉和哉 川上洁

北野修平

[74] 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任公司  
代理人 陈长会

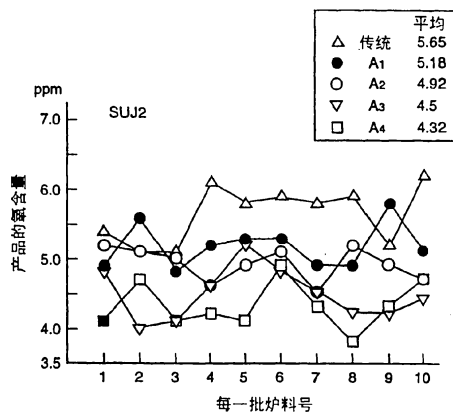
权利要求书1页 说明书82页 附图24页

[54] 发明名称

高洁净度钢及其生产方法

[57] 摘要

提供了一种能够生产高洁净度钢的方法，该方法无需进行成本高昂的重熔工艺，得到的钢产品具有足够高的洁净度，从而满足在更加恶劣的环境条件下使用的机械构件的性能的需要。该生产方法包括如下步骤：将电弧熔化炉或转炉中生成的钢水转移到钢包炉中以精炼钢水；将钢水循环脱气；然后将钢水浇铸成钢锭，其中在将钢水向钢包炉中转移时，向钢水中加入包括锰、铝和硅的脱氧剂以预先脱氧，即，在钢包精炼炉中精炼之前进行出钢脱氧。



1、一种高洁净度钢的生产方法，其包括下述步骤：将电弧熔化炉或转炉中生成的钢水转移到钢包精炼炉中精炼钢水；将精炼后的钢水进行循环式真空脱气；然后将脱气后的钢水浇铸成钢锭，其中，在钢包炉中进行精炼的时间不大于 60 分钟，在循环式真空脱气装置中的钢水的循环量至少是钢水总量 8 倍的条件下，在循环式真空脱气装置中进行的脱气时间不小于 25 分钟。

2、根据权利要求 1 的方法，其中，钢水转移到钢包炉中的方式是要转移的钢水的温度至少比钢的熔点高 100℃。

3、一种高洁净度钢，它是用权利要求 1 或 2 的方法生产的。

4、根据权利要求 3 的高洁净度钢，其中，钢的氧含量不大于 10ppm。

5、根据权利要求 3 的高洁净度钢，其中，通过将钢产品溶解在酸中检测的粒度不小于 20 μ m 的氧化物夹杂体的数量在每 100g 钢产品中不大于 40。

6、根据权利要求 3 的高洁净度钢，其中，根据极值的统计学计算得到的 30000mm<sup>2</sup> 中最大夹杂体直径的预测值不大于 60 μ m。

## 高洁净度钢及其生产方法

### 技术领域

本发明涉及一种高洁净度钢，其适用作要求具有疲劳强度、疲劳寿命和镇静度(quietness)的机械零件用钢，特别适用作如滚动轴承用钢、恒速接头用钢、齿轮用钢、环形连续变速传动用钢、用于冷锻的机械结构用钢、工具钢和弹簧钢，本发明还涉及高洁净度钢的生产方法。

要求具有疲劳强度和疲劳寿命的机械零件用钢应当是高洁净度(钢中的非金属夹杂体含量低)钢。这些高洁净度钢的传统生产方法包括：(A)在电弧熔化炉或转炉中氧化精炼钢水；(B)在钢包(ladle)炉(LF)中还原精炼；(C)在循环式真空脱气装置(RH)中进行循环真空脱气(RH处理)；(D)用连铸或传统的铸锭法浇铸钢锭；和(E)通过压锻法加工钢锭，然后对钢产品进行热处理。在步骤(A)中，通过电弧加热熔化废钢，或者将钢水加入正在进行氧化精炼的转炉中，然后将钢水转移到钢包炉中。转移钢水时的温度一般是比钢的熔点高约30-100℃的高温。在步骤(B)中，铝、锰、硅等脱氧剂合金加入到已经移入钢水的钢包炉中，在这里利用脱氧反应进行还原精炼，并且用脱硫剂进行脱硫反应以调节合金构成。一般大家都认为处理效果随处理时间的延长而增加。在该步骤中采用超过60分钟的很长的处理时间，处理温度一般比钢的熔点高50℃。在步骤(C)的RH处理中，在循环真空脱气槽中进行真空脱气，同时通过循环真空脱气槽循环钢水以脱氧和脱氢。在这种情况下，钢水的循环量约为钢水总量的5-6倍。在步骤(D)中，RH处理后的钢水转移到中间包中，在这里将钢水连铸成大钢坯、毛坯、板坯等。也可以将钢包炉中的钢水直接注入钢锭模中浇铸成钢锭。在步骤(E)中，轧制或锻造如大钢坯、毛坯、板坯或钢锭，然后进行热处理制成可以随后将其运走的钢产品。

当需要具有特定高洁净度的钢时，在上述方法中，将浇铸的钢锭作为原料，然后进行真空重熔或电渣重熔以制备这些钢。

近年来，机械零件在越来越严酷的条件下使用。这就对钢产品的性能有越来越苛刻的要求，本领域需要具有更高洁净度的钢产品。但是，上述传统生产方法(A)-(E)难以满足这样的要求。为了满足这样的要求，人们已经通过真空重熔或电渣重熔生产出这些钢产品。但是，这些方法存在的问题是生产成本大幅提高。

在这些条件下产生了本发明，本发明的目的是在不依赖重熔工艺的情况下提供具有高洁净度的钢产品。

## 发明公开

为了达到上述目的，本发明的发明人对高洁净度钢的生产方法进行了广泛而深入的研究。结果他们发现用下述方法可以大幅改善钢的洁净度。

### 第一个发明

下面描述本发明解决现有技术中所存在的上述问题的方法。在使用精炼炉如电弧熔化炉或转炉的传统方法中，熔化和氧化精炼主要在如电弧熔化炉或转炉中进行，还原过程(脱氧反应)在钢包精炼炉中进行。另一方面，第一个发明涉及高洁净度钢的生产方法，其包括下述步骤：将电弧熔化炉或转炉中生成的钢水转移到钢包炉中精炼钢水；将钢水脱气，优选进行循环式真空脱气；然后将钢水浇铸成钢锭，其中加入包括锰、铝和硅的脱氧剂(锰、铝、硅等的合金形式并不重要)，每吨钢水中纯基脱氧剂的加入量不小于 1kg，加入方式是预先将脱氧剂置于钢包炉中，和/或在将电弧熔化炉或转炉中的钢水转移到钢包炉中的过程中将脱氧剂加入到钢水中，并且在某些情况下同时加入造渣剂如 CaO 进行出钢脱氧，其中，钢水在钢包炉中进行还原精炼之前进行预脱氧。

根据第一个本发明的一个优选实施方案，钢水转移到钢包炉中的条件是钢水的出炉温度比钢的熔点至少高 100℃，优选至少高 120℃，更优选至少高 150℃。

在钢包精炼炉中进行精炼的时间不大于 60 分钟，优选不大于 45 分钟，更优选 25-45 分钟，脱气的进行时间不低于 25 分钟。具体来说，大家都知道：在循环式真空脱气装置中，当钢水的循环量不小于钢水总量的 5 倍时能够得到令人满意的结果。另一方面，在本发明中，在循环式真空脱气

装置中，脱气过程中钢水的循环量比钢水总量至少大 8 倍，优选至少大 10 倍，更优选至少大 15 倍。

本发明涉及用上述生产方法生产的高洁净度钢。

根据本发明，钢中的氧含量优选不大于 10ppm。优选地是，当钢中的碳含量低于 0.6%(质量)时，钢中的氧含量不大于 8ppm。更优选地是，在 C  $\geq$  0.6%(质量)的情况下，氧含量不大于 6ppm。

优选地是，在本发明的钢中，通过将钢产品溶解在酸中检测的粒度不小于 20  $\mu$  m 的氧化物夹杂体，例如 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量不低于 50%的氧化物夹杂体的数量在每 100g 钢产品中不大于 40，优选不大于 30，更优选不大于 20。

在本发明的钢中，例如，当在 100mm<sup>2</sup> 的钢产品表面上的 30 处测定最大夹杂体直径时，根据这些极值的统计学计算得到的 30000mm<sup>2</sup> 中最大夹杂体直径的预测值不大于 60  $\mu$  m，优选不大于 40  $\mu$  m，更优选不大于 25  $\mu$  m。

## 第二个发明

下面描述第二个发明。在使用精炼炉如电弧熔化炉或转炉的传统方法中，熔化和氧化精炼主要在如电弧熔化炉或转炉中进行，还原过程(脱氧反应)在钢包精炼炉中进行。另一方面，本发明涉及高洁净度钢的生产方法，其包括下述步骤：将电弧熔化炉或转炉中生成的钢水转移到钢包中脱气，优选进行循环式真空脱气；将脱气后的钢水转移到钢包炉中精炼钢水；再进行脱气，优选在循环式真空脱气装置中进行循环式真空脱气。

根据本发明的一个优选实施方案，钢水转移到钢包中的条件是钢水的出炉温度比钢的熔点至少高 100℃，优选至少高 120℃，更优选至少高 150℃。

在钢包炉中进行精炼的时间不大于 60 分钟，优选不大于 45 分钟，更优选 25-45 分钟，脱气的进行时间不低于 25 分钟。具体来说，大家都知道：在循环式真空脱气装置中，当钢水的循环量不小于钢水总量的 5 倍时能够得到令人满意的结果。另一方面，在本发明中，在循环式真空脱气装置中，脱气过程中钢水的循环量比钢水总量至少大 8 倍，优选至少大 10 倍，更优选至少大 15 倍。

本发明涉及用上述生产方法生产的高洁净度钢。

根据本发明，钢中的氧含量优选不大于 10ppm。优选地是，当钢中的

碳含量低于 0.6%(质量)时,钢中的氧含量不大于 8ppm。更优选地是,在  $C \geq 0.6\%$ (质量)的情况下,氧含量不大于 6ppm。

优选地是,在本发明的钢中,通过将钢产品溶解在酸中检测的粒度不小于  $20 \mu\text{m}$  的氧化物夹杂体,例如  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量不低于 50%的氧化物夹杂体的数量在每 100g 钢产品中不大于 40,优选不大于 30,更优选不大于 20。

在本发明的钢中,例如,当在  $100\text{mm}^2$  的钢产品表面上的 30 处测定最大夹杂体直径时,根据这些极值的统计学计算得到的  $30000\text{mm}^2$  中最大夹杂体直径的预测值不大于  $60 \mu\text{m}$ ,优选不大于  $40 \mu\text{m}$ ,更优选不大于  $25 \mu\text{m}$ 。

### 第三个发明

下面描述第三个发明。在使用精炼炉如电弧熔化炉或转炉的传统方法中,熔化和氧化精炼主要在如电弧熔化炉或转炉中进行,还原过程(脱氧反应)在钢包精炼炉中进行。另一方面,本发明涉及高洁净度钢的生产方法,其包括下述步骤:在电弧熔化炉或转炉中氧化精炼钢水;在钢水出钢前在同一个炉子中向钢水中加入包括锰、硅和铝的脱氧剂(锰、硅、铝等的合金形式并不重要),使钢水脱氧,每吨钢水中脱氧剂的加入量不小于 2kg;将脱氧后的钢水转移到钢包炉中进行钢包精炼;然后通过循环式真空脱气装置循环精炼后的钢水,将钢水脱气。

根据本发明的一个优选实施方案,钢水转移到钢包炉中的条件是钢水的出炉温度比钢的熔点至少高  $100^\circ\text{C}$ ,优选至少高  $120^\circ\text{C}$ ,更优选至少高  $150^\circ\text{C}$ 。

根据本发明,在钢包炉中进行精炼的时间优选不大于 60 分钟,优选不大于 45 分钟,更优选 25-45 分钟。该步骤后的脱气步骤一般在循环式真空脱气装置中进行,钢水的循环量不小于钢水总量的 5 倍。另一方面,在本发明中,在循环式真空脱气装置中,脱气过程中钢水的循环量比钢水总量至少大 8 倍,优选至少大 10 倍,更优选至少大 15 倍,脱气时间至少是 25 分钟。

本发明涉及用上述生产方法生产的高洁净度钢。

根据本发明,钢中的氧含量优选不大于 10ppm。优选地是,当钢中的碳含量低于 0.6%(质量)时,钢中的氧含量不大于 8ppm。更优选地是,在  $C \geq 0.6\%$ (质量)的情况下,氧含量不大于 6ppm。

优选地是，在本发明的钢中，通过将钢产品溶解在酸中检测的粒度不小于  $20\ \mu\text{m}$  的氧化物夹杂体，例如  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量不低于 50% 的氧化物夹杂体的数量在每 100g 钢产品中不大于 40，优选不大于 30，更优选不大于 20。

在本发明的钢中，例如，当在  $100\text{mm}^2$  的钢产品表面上的 30 处测定最大夹杂体直径时，根据这些极值的统计学计算得到的  $30000\text{mm}^2$  中最大夹杂体直径的预测值不大于  $60\ \mu\text{m}$ ，优选不大于  $40\ \mu\text{m}$ ，更优选不大于  $25\ \mu\text{m}$ 。

#### 第四个发明

下面描述第四个发明。在使用精炼炉如电弧熔化炉或转炉的传统方法中，熔化和氧化精炼主要在如电弧熔化炉或转炉中进行，还原过程(脱氧反应)在钢包精炼炉中进行。另一方面，本发明涉及高洁净度钢的生产方法，其包括下述步骤：将电弧熔化炉或转炉中生成的钢水转移到钢包炉中精炼钢水；将精炼后的钢水进行循环式真空脱气；然后将脱气后的钢水浇铸成钢锭，其中，在钢包炉中进行精炼的时间不大于 60 分钟，优选不大于 45 分钟，更优选 45-25 分钟，在钢水的循环量不小于钢水总量 5 倍的循环式真空脱气装置中，精炼步骤后的脱气进行时间一般低于 25 分钟。但是，在本发明中，在循环式真空脱气装置中，脱气过程中钢水的循环量比钢水总量至少大 8 倍，优选至少大 10 倍，更优选至少大 15 倍，脱气时间至少是 25 分钟。

根据本发明的一个优选实施方案，钢水转移到钢包炉中的条件是钢水的出炉温度比钢的熔点至少高  $100^\circ\text{C}$ ，优选至少高  $120^\circ\text{C}$ ，更优选至少高  $150^\circ\text{C}$ 。

本发明涉及用上述生产方法生产的高洁净度钢。

根据本发明，钢中的氧含量优选不大于 10ppm。优选地是，当钢中的碳含量低于 0.6%(质量)时，钢中的氧含量不大于 8ppm。更优选地是，在  $\text{C} \geq 0.6\%$ (质量)的情况下，氧含量不大于 6ppm。

优选地是，在本发明的钢中，通过将钢产品溶解在酸中检测的粒度不小于  $20\ \mu\text{m}$  的氧化物夹杂体，例如  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量不低于 50% 的氧化物夹杂体的数量在每 100g 钢产品中不大于 40，优选不大于 30，更优选不大于 20。

在本发明的钢中，例如，当在  $100\text{mm}^2$  的钢产品表面上的 30 处测定最大夹杂体直径时，根据这些极值的统计学计算得到的  $30000\text{mm}^2$  中最大夹杂

体直径的预测值不大于  $60\ \mu\text{m}$ ，优选不大于  $40\ \mu\text{m}$ ，更优选不大于  $25\ \mu\text{m}$ 。

### 第五个发明

下面描述第五个发明。在使用精炼炉如电弧熔化炉或转炉的传统方法中，熔化和氧化精炼主要在如电弧熔化炉或转炉中进行，还原过程(脱氧反应)在钢包精炼炉中进行。另一方面，本发明涉及高洁净度钢的生产方法，其包括下述步骤：将电弧熔化炉或转炉中生成的钢水转移到作为出炉精炼炉(out-furnace refining furnace)的钢包中进行精炼；将钢水进行循环式钢包脱气；然后将脱气后的钢水浇铸成钢锭，其中，在钢包中进行精炼的条件是：除了用从钢包底部引入的气体进行搅拌外，还通过电磁感应进行搅拌，钢包精炼进行的时间是 50-80 分钟，优选 70-80 分钟。

根据本发明，优选在惰性气氛中通过气体搅拌和电磁搅拌在钢包中进行钢包精炼。

本发明涉及用上述生产方法生产的高洁净度钢。

根据本发明，钢中的氧含量优选不大于 10ppm。优选地是，当钢中的碳含量低于 0.6%(质量)时，钢中的氧含量不大于 8ppm。更优选地是，在  $C \geq 0.6\%$ (质量)的情况下，氧含量不大于 6ppm。

优选地是，在本发明的钢中，通过将钢产品溶解在酸中检测的粒度不小于  $20\ \mu\text{m}$  的氧化物夹杂体，例如  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量不低于 50%的氧化物夹杂体的数量在每 100g 钢产品中不大于 40，优选不大于 30，更优选不大于 20。

在本发明的钢中，例如，当在  $100\text{mm}^2$  的钢产品表面上的 30 处测定最大夹杂体直径时，根据这些极值的统计学计算得到的  $30000\text{mm}^2$  中最大夹杂体直径的预测值不大于  $60\ \mu\text{m}$ ，优选不大于  $40\ \mu\text{m}$ ，更优选不大于  $25\ \mu\text{m}$ 。

### 附图简述

图 1A 是进行或没有进行出钢脱氧的 SUJ 2 钢和产品中氧含量的关系图，其中， $A_1$  示出只采用根据本发明权利要求 1 定义の出钢脱氧的数据， $A_2$  示出采用根据本发明权利要求 2 定义の出钢脱氧+高温出钢的数据， $A_3$  示出采用根据本发明权利要求 3 定义の出钢脱氧+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据， $A_4$  示出采用根据本发明权利要求 3 定义の出钢脱氧+高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据，图 1A 中还示出现有技术中的传统

数据;

图 1B 是进行或没有进行出钢脱氧的 SCM 435 钢和产品中氧含量的关系图, 其中,  $B_1$  示出只采用根据本发明权利要求 1 定义出的钢脱氧的数据,  $B_2$  示出采用根据本发明权利要求 2 定义出的钢脱氧+高温出钢的数据,  $B_3$  示出采用根据本发明权利要求 3 定义出的钢脱氧+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据,  $B_4$  示出采用根据本发明权利要求 3 定义出的钢脱氧+高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据, 图 1B 中还示出现有技术中的传统数据;

图 1C 是进行或没有进行出钢脱氧的 SUJ 2 钢和最大预测夹杂体直径的关系图, 其中,  $A_1$  示出只采用根据本发明权利要求 1 定义出的钢脱氧的数据,  $A_2$  示出采用根据本发明权利要求 2 定义出的钢脱氧+高温出钢的数据,  $A_3$  示出采用根据本发明权利要求 3 定义出的钢脱氧+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据,  $A_4$  示出采用根据本发明权利要求 3 定义出的钢脱氧+高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据, 图 1C 中还示出现有技术中的传统数据;

图 1D 是进行或没有进行出钢脱氧的 SCM 435 钢和最大预测夹杂体直径的关系图, 其中,  $B_1$  示出只采用根据本发明权利要求 1 定义出的钢脱氧的数据,  $B_2$  示出采用根据本发明权利要求 2 定义出的钢脱氧+高温出钢的数据,  $B_3$  示出采用根据本发明权利要求 3 定义出的钢脱氧+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据,  $B_4$  示出采用根据本发明权利要求 3 定义出的钢脱氧+高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据, 图 1D 中还示出现有技术中的传统数据;

图 1E 是进行或没有进行出钢脱氧的 SUJ 2 钢和  $L_{10}$  寿命的关系图, 其中,  $A_1$  示出只采用根据本发明权利要求 1 定义出的钢脱氧的数据,  $A_2$  示出采用根据本发明权利要求 2 定义出的钢脱氧+高温出钢的数据,  $A_3$  示出采用根据本发明权利要求 3 定义出的钢脱氧+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据,  $A_4$  示出采用根据本发明权利要求 3 定义出的钢脱氧+高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据, 图 1E 中还示出现有技术中的传统数据;

图 1F 是进行或没有进行出钢脱氧的 SCM 435 钢和  $L_{10}$  寿命的关系图, 其中,  $B_1$  示出只采用根据本发明权利要求 1 定义出的钢脱氧的数据,  $B_2$  示

出采用根据本发明权利要求 2 定义的出钢脱氧+高温出钢的数据, B<sub>3</sub> 示出采用根据本发明权利要求 3 定义的出钢脱氧+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据, B<sub>4</sub> 示出采用根据本发明权利要求 3 定义的出钢脱氧+高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据, 图 1F 中还示出现有技术中的传统数据;

图 2A 是进行或没有进行 W-RH 处理的 SUJ 2 钢和产品中氧含量的关系图, 其中, A<sub>1</sub> 示出只采用本发明的 W-RH 处理的数据, A<sub>2</sub> 示出采用本发明的 W-RH 处理+高温出钢的数据, A<sub>3</sub> 示出采用本发明的 W-RH 处理+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据, A<sub>4</sub> 示出采用本发明的 W-RH 处理+高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据, 图 2A 中还示出现有技术中的传统数据;

图 2B 是进行或没有进行 W-RH 处理的 SCM 435 钢和产品中氧含量的关系图, 其中, B<sub>1</sub> 示出只采用本发明的 W-RH 处理的数据, B<sub>2</sub> 示出采用本发明的 W-RH 处理+高温出钢的数据, B<sub>3</sub> 示出采用本发明的 W-RH 处理+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据, B<sub>4</sub> 示出采用本发明的 W-RH 处理+高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据, 图 2B 中还示出现有技术中的传统数据;

图 2C 是进行或没有进行的 W-RH 处理 SUJ 2 钢和最大预测夹杂体直径的关系图, 其中, A<sub>1</sub> 示出只采用本发明的 W-RH 处理的数据, A<sub>2</sub> 示出采用本发明的 W-RH 处理+高温出钢的数据, A<sub>3</sub> 示出采用本发明的 W-RH 处理+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据, A<sub>4</sub> 示出采用本发明的 W-RH 处理+高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据, 图 2C 中还示出现有技术中的传统数据;

图 2D 是进行或没有进行 W-RH 处理的 SCM 435 钢和最大预测夹杂体直径的关系图, 其中, B<sub>1</sub> 示出只采用本发明的 W-RH 处理的数据, B<sub>2</sub> 示出采用本发明的 W-RH 处理+高温出钢的数据, B<sub>3</sub> 示出采用本发明的 W-RH 处理+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据, B<sub>4</sub> 示出采用本发明的 W-RH 处理+高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据, 图 2D 中还示出现有技术中的传统数据;

图 2E 是进行或没有进行 W-RH 处理的 SUJ 2 钢和 L<sub>10</sub> 寿命的关系图, 其中, A<sub>1</sub> 示出只采用本发明的 W-RH 处理的数据, A<sub>2</sub> 示出采用本发明的 W-RH 处理+高温出钢的数据, A<sub>3</sub> 示出采用本发明的 W-RH 处理+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据, A<sub>4</sub> 示出采用本发明的 W-RH 处理+高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据, 图 2E 中还示出现有技术中的传统数据;

图 2F 是进行或没有进行出钢脱氧的 SCM 435 钢和  $L_{10}$  寿命的关系图，其中， $B_1$  示出只采用本发明的 W-RH 处理的数据， $B_2$  示出采用本发明的 W-RH 处理+高温出钢的数据， $B_3$  示出采用本发明的 W-RH 处理+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据， $B_4$  示出采用本发明的 W-RH 处理+高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理的数据，图 2F 中还示出现有技术中的传统数据；

图 3A 是示出根据本发明的方法在处理钢水过程中进行炉内脱氧的 10 炉 SUJ 2 钢产品中氧含量的折线图，图 3A 还示出根据传统方法不进行炉内脱氧的 10 炉 SUJ 2 钢产品中的氧含量；

图 3B 是示出根据本发明的方法在处理钢水过程中进行炉内脱氧的 10 炉 SCM 435 钢产品中氧含量的折线图，图 3B 还示出根据传统方法不进行炉内脱氧的 10 炉 SCM 435 钢产品中的氧含量；

图 3C 是示出根据本发明的方法在处理钢水过程中进行炉内脱氧的 10 炉 SUJ 2 钢产品中根据这些极值统计得到的最大预测夹杂体直径的折线图，图 3C 还示出根据传统方法不进行炉内脱氧的 10 炉 SUJ 2 钢产品中的最大预测夹杂体直径；

图 3D 是示出根据本发明的方法在处理钢水过程中进行炉内脱氧的 10 炉 SCM 435 钢产品中根据这些极值统计得到的最大预测夹杂体直径的折线图，图 3D 还示出根据传统方法不进行炉内脱氧的 10 炉 SCM 435 钢产品中的最大预测夹杂体直径；

图 3E 是示出根据本发明的方法在处理钢水过程中进行炉内脱氧的 10 炉 SUJ 2 钢产品的根据止推辊使用寿命实验测定的  $L_{10}$  寿命的折线图，图 3E 还示出根据传统方法不进行炉内脱氧的 10 炉 SUJ 2 钢产品的  $L_{10}$  寿命；

图 3F 是示出根据本发明的方法在处理钢水过程中进行炉内脱氧的 10 炉 SCM 435 钢产品的根据止推辊使用寿命 (thrust rolling service life) 实验测定的  $L_{10}$  寿命的折线图，图 3F 还示出根据传统方法不进行炉内脱氧的 10 炉 SCM 435 钢产品的  $L_{10}$  寿命；

图 4A 是示出根据本发明的方法在处理钢水过程中进行短时间 LF 处理和长时间 RH 处理的 10 炉 SUJ 2 钢产品中氧含量的折线图，图 4A 还示出根据传统方法进行长时间 LF 处理和短时间 RH 处理的 10 炉 SUJ 2 钢产品中的氧含量；

图 4B 是示出根据本发明的方法在处理钢水过程中进行短时间 LF 处理和长时间 RH 处理的 10 炉 SCM 435 钢产品中氧含量的折线图, 图 4A 还示出根据传统方法进行长时间 LF 处理和短时间 RH 处理的 10 炉 SCM 435 钢产品中的氧含量;

图 4C 是示出根据本发明的方法在处理钢水过程中进行短时间 LF 处理和长时间 RH 处理的 10 炉 SUJ 2 钢产品中根据这些极值统计得到的最大预测夹杂体直径的折线图, 图 4C 还示出根据传统方法进行长时间 LF 处理和短时间 RH 处理的 10 炉 SUJ 2 钢产品中的最大预测夹杂体直径;

图 4D 是示出根据本发明的方法在处理钢水过程中进行短时间 LF 处理和长时间 RH 处理的 10 炉 SCM 435 钢产品中根据这些极值统计得到的最大预测夹杂体直径的折线图, 图 4C 还示出根据传统方法进行长时间 LF 处理和短时间 RH 处理的 10 炉 SCM 435 钢产品中的最大预测夹杂体直径;

图 4E 是示出根据本发明的方法在处理钢水过程中进行短时间 LF 处理和长时间 RH 处理的 10 炉 SUJ 2 钢产品的根据止推辊使用寿命实验测定的  $L_{10}$  寿命的折线图, 图 3E 还示出根据传统方法进行长时间 LF 处理和短时间 RH 处理的 10 炉 SUJ 2 钢产品的  $L_{10}$  寿命;

图 4F 是示出根据本发明的方法在处理钢水过程中进行短时间 LF 处理和长时间 RH 处理的 10 炉 SCM 435 钢产品的根据止推辊使用寿命实验测定的  $L_{10}$  寿命的折线图, 图 3E 还示出根据传统方法进行长时间 LF 处理和短时间 RH 处理的 10 炉 SCM 435 钢产品的  $L_{10}$  寿命。

## 本发明的最佳实施方案

### 第一个发明

根据第一个发明, 高洁净度钢的优选生产方法包括下述步骤(1)-(5):

(1) 在使用精炼炉如电弧熔化炉或转炉的传统的钢生产方法中, 熔化和氧化精炼主要在电弧熔化炉或转炉中进行, 还原过程(脱氧反应)在钢包精炼炉中进行。另一方面, 根据本发明, 在电弧熔化炉或转炉中氧化精炼钢水。然后使钢水具有预定的化学组成和预定温度, 在将钢水从熔化炉中出炉过程中, 加入包括锰、铝和硅的脱氧剂(锰、铝、硅等的合金形式并不重要), 每吨钢水中纯基脱氧剂的加入量不小于 1kg, 加入方式是预先将

脱氧剂置于钢包中，和/或在将钢水转移到钢包炉中的过程中将脱氧剂加入到钢水中，并且在某些情况下同时加入造渣剂如  $\text{CaO}$ 。加入脱氧剂在本发明中是最重要的步骤。在钢包精炼前加入脱氧剂(以前认为没有必要)以在钢包炉中的还原精炼前在一定程度上降低氧含量可以最终实现具有低氧含量的钢的生产。其原因如下：在钢水中的溶解氧存在量是令人满意的不低于 100ppm 的系统中进行的脱氧反应能够形成较多的脱氧产品，这些脱氧产品易于浮选和分离。因此，钢水中氧的总含量可大幅降低，降到不大于 50ppm。

(2) 将预脱氧钢水转移到钢包炉中，在钢包炉中进行还原精炼，并调节钢的化学组成。

(3) 将进行了还原精炼和化学组成调节的钢水脱气，特别是通过循环式真空脱气装置进行循环脱气，并且最终调节钢的化学组成。

(4) 将进行了脱气和最终化学组成调节的钢水浇铸成钢锭。

(5) 将钢锭轧制或锻造成产品形状，然后可以任选地进行热处理，产生钢产品。

在根据本发明的高洁净度钢的优选生产方法中，在步骤(1)-(5)中，将钢水转移到钢包炉中的步骤(2)的方式是：虽然钢水的出炉温度一般比钢的熔点高约  $50^{\circ}\text{C}$ ，但是在本发明中，钢水的出炉温度比钢的熔点至少高  $100^{\circ}\text{C}$ ，优选至少高  $120^{\circ}\text{C}$ ，更优选至少高  $150^{\circ}\text{C}$ 。在出钢时加入的脱氧剂和在先处理中加入的金属和矿渣能够因此而完全溶解或分离，所以能够防止由于在钢包精炼过程中在预精炼状态下分离和滴入钢水中的金属或矿渣造成的氧含量升高。同时在精炼炉中能够改善初始成渣性能和反应性。具体来说，在在先处理和这次处理之间的期间内氧化在在先处理中沉积的还原金属，在这次还原期操作中，当金属开始溶解时，特别是在还原期操作结束时，平衡状态被打破。结果是钢水部分被污染。因此，沉积的金属溶解在还原前出炉的钢水中，这种溶解的金属和出炉的钢水一起被脱氧。

在上述步骤中，虽然一般都认为超过 60 分钟的精炼时间能够产生较好的效果，但是在根据本发明的高洁净度钢的优选生产方法中，在钢包精炼炉中进行精炼的时间不大于 60 分钟，优选不大于 45 分钟，更优选 25-45 分钟，虽然一般都认为少于 25 分钟的脱气时间足以产生令人满意的结果，

但是在本发明优选的生产方法中，脱气的进行时间不低于 25 分钟。具体来说，大家都知道：当钢水的循环量是钢水总量的约 5 倍时能够得到令人满意的结果。但是另一方面，在本发明中，在循环式真空脱气装置中，脱气过程中钢水的循环量比钢水总量至少大 8 倍，优选至少大 10 倍，更优选至少大 15 倍。利用这样的设置可以使加热的同时进行精炼的钢包精炼时间是最小的必要时间，在不涉及加热的脱气步骤中可以确保氧化物夹杂体的浮选分离时间。这可以防止由于受到钢包炉内壁上的耐火材料或矿渣的污染而造成的氧含量的升高，同时可以防止粒度不小于约  $20\ \mu\text{m}$  的大夹杂体的形成。在循环式真空脱气中，特别是因为喷嘴浸在钢水中并且只循环钢水，所以钢水上表面上的矿渣处于令人满意的静止状态。因此，从矿渣进入钢水中的氧化物夹杂体数目少于在钢包精炼炉中进行的还原过程中的氧化物夹杂体数目。因此，在预脱氧钢水中采用令人满意的长脱气时间能够大幅还原甚至较少的脱氧产品。

本发明涉及用上述生产方法生产的高洁净度钢。

根据本发明，高洁净度钢优选是特别是具有优秀滚动疲劳寿命的高洁净度钢，其特征在于：钢中的氧含量不大于 10ppm；优选地是，当钢中的碳含量低于 0.6%(质量)时，钢中的氧含量不大于 8ppm；更优选地是，在  $C \geq 0.6\%$ (质量)的情况下，氧含量不大于 6ppm。大家都知道降低氧含量有助于改善滚动疲劳寿命。在用本发明的方法生产的钢中，氧含量不大于 10ppm，优选地是，当钢中的  $C < 0.6\%$ (质量)时，氧含量不大于 8ppm，更优选地是，在  $C \geq 0.6\%$ (质量)的情况下，氧含量不大于 6ppm 的高洁净度钢稳定地显示出优秀的滚动疲劳寿命。

在上述高洁净度钢中，本发明还涉及具有优秀滚动疲劳寿命(rolling fatigue life)和疲劳强度的高洁净度钢，其特征在于：通过将钢产品溶解在酸中检测的粒度不小于  $20\ \mu\text{m}$  的氧化物夹杂体，例如  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量不低于 50%的氧化物夹杂体的数量在每 100g 钢产品中不大于 40，优选不大于 30，更优选不大于 20。钢产品的这种测定方法反映了预定体积中的氧含量和最大夹杂体直径。至于疲劳强度、疲劳寿命和镇静度，在氧含量一样的钢中，大粒度的氧化物夹杂体是有害的，具体来说，粒度不小于  $20\ \mu\text{m}$  的氧化物夹杂体是有害的。因此，在用本发明的方法生产的钢中，将钢产品

溶解在酸中检测的粒度不小于  $20\ \mu\text{m}$  的氧化物夹杂体的数量在每  $100\text{g}$  钢产品中不大于 40, 优选不大于 30, 更优选不大于 20 的钢是具有优秀滚动疲劳寿命和优秀疲劳强度及优秀镇静度的高洁净度钢。

本发明的高洁净度钢还包括特别是具有优秀旋转弯曲疲劳强度 (rotating bending fatigue strength) 和周期应力疲劳强度 (cycle stress fatigue strength) 的高洁净度钢, 其特征在于: 当在  $100\text{mm}^2$  的钢产品横截面上的 30 处测定最大夹杂体直径时, 根据这些极值的统计学计算得到的  $30000\text{mm}^2$  中最大夹杂体直径的预测值不大于  $60\ \mu\text{m}$ , 优选不大于  $40\ \mu\text{m}$ , 更优选不大于  $25\ \mu\text{m}$ 。大家都知道: 周期应力疲劳强度和疲劳极限在很大程度上取决于预定体积内的最大夹杂体直径。这公开在日本特许公开专利 194121/1999 中, 该专利的申请人与本发明的申请人相同。例如, 一般当在  $100\text{mm}^2$  的钢产品横截面上的 30 处测定最大夹杂体直径时, 根据这些极值的统计学计算得到的  $30000\text{mm}^2$  中最大夹杂体直径的预测值不大于  $60\ \mu\text{m}$ , 优选不大于  $40\ \mu\text{m}$ , 更优选不大于  $25\ \mu\text{m}$  的高洁净度钢稳定地显示出优秀的疲劳强度。在这种情况下, 高洁净度钢中的氧含量不大于  $10\text{ppm}$ , 优选地是, 在钢中的  $C < 0.6\%$  (质量) 的情况下, 氧含量不大于  $8\text{ppm}$ , 更优选地是, 在  $C \geq 0.6\%$  (质量) 的情况下, 氧含量不大于  $6\text{ppm}$ , 最大夹杂体直径的预测值不大于  $60\ \mu\text{m}$ , 优选不大于  $40\ \mu\text{m}$ , 更优选不大于  $25\ \mu\text{m}$ 。用本发明的方法生产的钢是具有优秀滚动疲劳寿命和优秀疲劳强度的高洁净度钢。虽然酸溶解是非常费时和麻烦的工作, 但是有利的是, 不进行钢产品溶解加工的上述方法能够在显微镜下观察一定的面积来统计性地预测最大夹杂体直径, 这种方法很简单。另外, 具体来说, 至于拉伸压缩的周期应力 (cycle stress) 所造成的疲劳, 大家都知道: 在易于断裂处存在的夹杂体的最大直径是非常大的决定强度的因素。这种能够统计性地预测该最大直径的方法是有益的。

## 第二个发明

根据第二个发明, 高洁净度钢的优选生产方法包括下述步骤 (1) - (6):

(1) 在电弧熔化炉或转炉中氧化精炼钢水, 制备具有预定化学组成和预定温度的钢水。

(2) 然后将钢水进行预脱气。具体来说, 例如, 钢水的脱气方法是

钢水通过循环式真空脱气装置进行循环。这个脱气步骤在本发明中是最重要的。一般是在钢包炉中直接将步骤(1)中生产的钢水还原精炼。而本发明却相反，钢水是在还原精炼前进行预脱气。这种预脱气能够大幅改善最终得到的钢的洁净度。

(3) 在钢包炉中还原精炼在步骤(2)中脱气的钢水并调节其化学组成。

(4) 将在步骤(3)中进行了还原精炼和化学组成调节的钢水进一步脱气，方法是通过循环式真空脱气装置循环钢水，并且最终调节钢的化学组成。

(5) 将进行了脱气和最终化学组成调节的钢水浇铸成钢锭。

(6) 将钢锭轧制或锻造成产品形状，然后可以任选地进行热处理，产生钢产品。

在根据本发明的高洁净度钢的优选生产方法中，在步骤(1)-(6)中，在将步骤(2)后的钢水转移到钢包炉中进行步骤(3)时，虽然钢水的出炉温度一般比钢的熔点高约 50℃，但是在本发明中，钢水的出炉温度比钢的熔点至少高 100℃，优选至少高 120℃，更优选至少高 150℃。在本发明的说明书中，高温下的出炉指的是高温出钢。在出钢时加入的脱氧剂和在先处理中加入的金属和矿渣能够因此而完全溶解或分离，所以能够防止由于在钢包精炼过程中在预精炼状态下分离和滴入钢水中的金属或矿渣造成的氧含量升高。同时在精炼炉中能够改善初始成渣性能和反应性。具体来说，在在先处理和这次处理之间的期间内氧化在在先处理中沉积的还原金属，在这次还原期操作中，当金属开始溶解时，特别是在还原期操作结束时，平衡状态被打破。结果是钢水被部分污染。因此，沉积的金属溶解在还原前出炉的钢水中，这种溶解的金属和出炉的钢水一起被脱氧。

在步骤(3)的钢包精炼中，虽然一般都认为超过 60 分钟的精炼时间能够产生较好的效果，但是在本发明中，在步骤(3)的钢包炉中进行精炼的时间不大于 60 分钟，优选不大于 45 分钟，更优选 25-45 分钟，至于钢包精炼后的脱气，虽然一般都认为少于 25 分钟的脱气时间足以产生令人满意的结果，但是在本发明优选的生产方法中，脱气的进行时间不低于 25 分钟。具体来说，大家都知道：当钢水的循环量是钢水总量的约 5 倍时能够得到令人满意的结果。但是另一方面，在本发明的优选生产方法中，在

循环式真空脱气装置中,脱气过程中钢水的循环量比钢水总量至少大8倍,优选至少大10倍,更优选至少大15倍。利用这样的设置可以使加热的同时进行精炼的钢包精炼时间是最小的必要时间,在不涉及加热的脱气步骤中可以确保氧化物夹杂体的浮选分离时间。这可以防止由于受到钢包炉内壁上的耐火材料或矿渣的污染而造成的氧含量的升高,同时可以防止粒度不小于约 $20\mu\text{m}$ 的大夹杂体的形成。在循环式真空脱气中,特别是因为喷嘴浸在钢水中并且只循环钢水,所以钢水上表面上的矿渣处于令人满意的静止状态。因此,从矿渣进入钢水中的氧化物夹杂体数目少于在钢包精炼炉中进行的还原过程中的氧化物夹杂体数目。因此,在预脱氧钢水中采用令人满意的长脱气时间能够大幅还原甚至较少的脱氧产品。在本发明的说明书中,这种方法称为短时间LF、长时间RH处理或短LF、长RH处理。

本发明涉及用上述生产方法生产的高洁净度钢。

根据本发明,高洁净度钢优选是特别是具有优秀滚动疲劳寿命的高洁净度钢,其特征在于:钢中的氧含量不大于10ppm;优选地是,当钢中的碳含量低于0.6%(质量)时,钢中的氧含量不大于8ppm;更优选地是,在 $C\geq 0.6\%$ (质量)的情况下,氧含量不大于6ppm。大家都知道降低氧含量有助于改善滚动疲劳寿命。在用本发明的方法生产的钢中,氧含量不大于10ppm,优选地是,当钢中的 $C<0.6\%$ (质量)时,氧含量不大于8ppm,更优选地是,在 $C\geq 0.6\%$ (质量)的情况下,氧含量不大于6ppm的高洁净度钢稳定地显示出优秀的滚动疲劳寿命。

根据一个优选实施方案,用本发明的方法生产的钢包括具有优秀滚动疲劳寿命和疲劳强度的高洁净度钢,其特征在于:通过将钢产品溶解在酸中检测的粒度不小于 $20\mu\text{m}$ 的氧化物夹杂体,例如 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量不低于50%的氧化物夹杂体的数量在每100g钢产品中不大于40,优选不大于30,更优选不大于20。钢产品的这种测定方法反映了预定体积中的氧含量和最大夹杂体直径。至于疲劳强度、疲劳寿命和镇静度,在氧含量一样的钢中,大粒度的氧化物夹杂体是有害的,具体来说,粒度不小于 $20\mu\text{m}$ 的氧化物夹杂体是有害的。因此,在用本发明的方法生产的钢中,将钢产品溶解在酸中检测的粒度不小于 $20\mu\text{m}$ 的氧化物夹杂体的数量在每100g钢产品中不大于40,优选不大于30,更优选不大于20的钢是具有优秀滚动疲劳寿

命和优秀疲劳强度及优秀镇静度的高洁净度钢。

根据一个优选实施方案,本发明的高洁净度钢还包括特别是具有优秀旋转弯曲疲劳强度和周期应力疲劳强度的高洁净度钢,其特征在于:当在 $100\text{mm}^2$ 的钢产品横截面上的30处测定最大夹杂体直径时,根据这些极值的统计学计算得到的 $30000\text{mm}^2$ 中最大夹杂体直径的预测值不大于 $60\mu\text{m}$ ,优选不大于 $40\mu\text{m}$ ,更优选不大于 $25\mu\text{m}$ 。大家都知道:周期应力疲劳强度和疲劳极限在很大程度上取决于预定体积内的最大夹杂体直径。这公开在日本特许公开专利194121/1999中,该专利的申请人与本发明的申请人相同。例如,一般当在 $100\text{mm}^2$ 的钢产品横截面上的30处测定最大夹杂体直径时,根据这些极值的统计学计算得到的 $30000\text{mm}^2$ 中最大夹杂体直径的预测值不大于 $60\mu\text{m}$ ,优选不大于 $40\mu\text{m}$ ,更优选不大于 $25\mu\text{m}$ 的高洁净度钢稳定地显示出优秀的疲劳强度。在这种情况下,高洁净度钢中的氧含量不大于 $10\text{ppm}$ ,优选地是,在钢中的 $C < 0.6\%$ (质量)的情况下,氧含量不大于 $8\text{ppm}$ ,更优选地是,在 $C \geq 0.6\%$ (质量)的情况下,氧含量不大于 $6\text{ppm}$ ,最大夹杂体直径的预测值不大于 $60\mu\text{m}$ ,优选不大于 $40\mu\text{m}$ ,更优选不大于 $25\mu\text{m}$ 。用本发明的方法生产的钢是具有优秀滚动疲劳寿命和优秀疲劳强度的高洁净度钢。虽然酸溶解是非常费时和麻烦的工作,但是有利的是,不进行钢产品溶解加工的上述方法能够在显微镜下观察一定的面积来统计性地预测最大夹杂体直径,这种方法很简单。另外,具体来说,至于拉伸压缩的周期应力所造成的疲劳,大家都知道:在易于断裂处存在的夹杂体的最大直径是非常大的决定强度的因素。这种能够统计性地预测该最大直径的方法是有利的。

### 第三个发明

根据第三个发明,高洁净度钢的优选生产方法包括下述步骤(1)-(5):

(1)在电弧熔化炉或转炉中氧化精炼钢水。然后在同一个炉子中加入包括锰、硅和铝的脱氧剂(锰、铝、硅等的合金形式并不重要),每吨钢水中脱氧剂的加入量不小于 $2\text{kg}$ ,并且在某些情况下同时加入造渣剂如 $\text{CaO}$ 将钢水脱氧。然后将脱氧后的钢水转移到钢包中。在炼钢炉如电弧熔化炉或转炉中进行脱氧在本发明中是最重要的步骤。在钢包精炼前脱氧(以前认为没有必要)以在钢包精炼前在一定程度上降低氧含量可以最终实现具

有低氧含量的钢的生产。

(2)在钢包精炼炉中对转移到钢包中的钢水进行还原精炼，并调节其化学组成。

(3)将在步骤(2)中进行了还原精炼和化学组成调节的钢水脱气，方法是通过循环式真空脱气装置循环钢水，此外，最终调节钢的化学组成。

(4)将在步骤(3)中进行了脱气和最终化学组成调节的钢水浇铸成钢锭。

(5)将钢锭轧制或锻造成产品形状，然后可以任选地进行热处理，产生钢产品。

在根据本发明的高洁净度钢的优选生产方法中，在步骤(1)-(5)中，至于将钢水转移到钢包炉中的步骤(1)，虽然钢水的出炉温度一般比钢的熔点高约 50℃，但是在本发明中，钢水的转移温度比钢的熔点至少高 100℃，优选至少高 120℃，更优选至少高 150℃。利用这样的设置可以使钢包周围沉积的金属完全溶解在钢水中，矿渣也能够完全浮选，所以能够防止由于在钢包精炼过程中在预精炼状态下分离或滴入钢水中的金属或矿渣造成的氧含量升高。

根据一个优选实施方案，在上述步骤的钢包精炼中，虽然一般都认为超过 60 分钟的精炼时间能够产生较好的效果，但是在本发明中，在钢包炉中进行精炼的时间不大于 60 分钟，优选不大于 45 分钟，更优选 25-45 分钟，至于步骤(3)中的脱气，虽然一般都认为少于 25 分钟的脱气时间足以产生令人满意的结果，即，一般都认为：当钢水的循环量是钢水总量的约 5 倍时能够得到令人满意的结果，但是在本发明中，在循环式真空脱气装置中，钢水的循环量比钢水总量至少大 8 倍，优选至少大 10 倍，更优选至少大 15 倍，以进行长时间的脱气，即，不小于 25 分钟的脱气。利用这样的设置可以使加热的同时进行精炼的钢包精炼时间是最小的必要时间，在不涉及加热的脱气步骤中可以令人满意地确保氧化物夹杂体的浮选分离时间。这可以防止由于受到钢包炉内壁上的耐火材料或矿渣的污染而造成的氧含量的升高，同时可以防止粒度不小于约 20 μm 的大夹杂体的形成。在循环式真空脱气中，特别是因为喷嘴浸在钢水中并且只循环钢水，所以钢水上表面上的矿渣处于令人满意的静止状态。因此，从矿渣进入钢

水中的氧化物夹杂体数目少于在钢包精炼炉中进行的还原过程中的氧化物夹杂体数目。因此，在预脱氧钢水中采用令人满意的长脱气时间能够大幅还原甚至较少的脱氧产品。在本发明的说明书中，这种方法称为短时间 LF、长时间 RH 处理或短 LF、长 RH 处理。

本发明涉及用上述生产方法生产的高洁净度钢。

根据一个优选实施方案，本发明的高洁净度钢是特别是具有优秀滚动疲劳寿命的高洁净度钢，其特征在于：钢中的氧含量不大于 10ppm；优选地是，当钢中的碳含量低于 0.6%(质量)时，钢中的氧含量不大于 8ppm；更优选地是，在  $C \geq 0.6\%$ (质量)的情况下，氧含量不大于 6ppm。大家都知道降低氧含量有助于改善滚动疲劳寿命。在用本发明的方法生产的钢中，氧含量不大于 10ppm，优选地是，当钢中的  $C < 0.6\%$ (质量)时，氧含量不大于 8ppm，更优选地是，在  $C \geq 0.6\%$ (质量)的情况下，氧含量不大于 6ppm 的高洁净度钢稳定地显示出优秀的滚动疲劳寿命。

根据一个优选实施方案，用本发明的方法生产的钢还包括具有优秀滚动疲劳寿命和疲劳强度的高洁净度钢，其特征在于：通过将钢产品溶解在酸中检测的粒度不小于  $20 \mu m$  的氧化物夹杂体，例如  $Al_2O_3$  含量不低于 50% 的氧化物夹杂体的数量在每 100g 钢产品中不大于 40，优选不大于 30，更优选不大于 20。钢产品的这种测定方法反映了预定体积中的氧含量和最大夹杂体直径。至于疲劳强度、疲劳寿命和镇静度，在氧含量一样的钢中，大粒度的氧化物夹杂体是有害的，具体来说，粒度不小于  $20 \mu m$  的氧化物夹杂体是有害的。因此，在用本发明的方法生产的钢中，将钢产品溶解在酸中检测的粒度不小于  $20 \mu m$  的氧化物夹杂体的数量在每 100g 钢产品中不大于 40，优选不大于 30，更优选不大于 20 的钢是具有优秀滚动疲劳寿命和优秀疲劳强度及优秀镇静度的高洁净度钢。

根据一个优选实施方案，本发明的高洁净度钢还包括特别是具有优秀旋转弯曲疲劳强度和周期应力疲劳强度的高洁净度钢，其特征在于：当在  $100mm^2$  的钢产品横截面上的 30 处测定最大夹杂体直径时，根据这些极值的统计学计算得到的  $30000mm^2$  中最大夹杂体直径的预测值不大于  $60 \mu m$ ，优选不大于  $40 \mu m$ ，更优选不大于  $25 \mu m$ 。大家都知道：周期应力疲劳强度和疲劳极限在很大程度上取决于预定体积内的最大夹杂体直径。这公开

在日本特许公开专利 194121/1999 中, 该专利的申请人与本发明的申请人相同。例如, 一般当在  $100\text{mm}^2$  的钢产品横截面上的 30 处测定最大夹杂体直径时, 根据这些极值的统计学计算得到的  $30000\text{mm}^2$  中最大夹杂体直径的预测值不大于  $60\ \mu\text{m}$ , 优选不大于  $40\ \mu\text{m}$ , 更优选不大于  $25\ \mu\text{m}$  的高洁净度钢稳定地显示出优秀的疲劳强度。在这种情况下, 高洁净度钢中的氧含量不大于 10ppm, 优选地是, 在钢中的  $C < 0.6\%$  (质量) 的情况下, 氧含量不大于 8ppm, 更优选地是, 在  $C \cong 0.6\%$  (质量) 的情况下, 氧含量不大于 6ppm, 最大夹杂体直径的预测值不大于  $60\ \mu\text{m}$ , 优选不大于  $40\ \mu\text{m}$ , 更优选不大于  $25\ \mu\text{m}$ 。用本发明的方法生产的钢是具有优秀滚动疲劳寿命和优秀疲劳强度的高洁净度钢。虽然酸溶解是非常费时和麻烦的工作, 但是有利的是, 不进行钢产品溶解加工的上述方法能够在显微镜下观察一定的面积来统计性地预测最大夹杂体直径, 这种方法很简单。另外, 具体来说, 至于拉伸压缩的周期应力所造成的疲劳, 大家都知道: 在易于断裂处存在的夹杂体的最大直径是非常大的决定强度的因素。这种能够统计性地预测该最大直径的方法是有益的。

#### 第四个发明

根据第四个发明, 高洁净度钢的优选生产方法包括下述步骤(1)-(5):

(1) 在电弧熔化炉或转炉中氧化精炼钢水, 制备具有预定化学组成和预定温度的钢水, 然后将钢水转移到钢包炉中。

(2) 在钢包炉中对转移到钢包炉中的钢水进行还原精炼, 并调节钢水的化学组成。这时候在钢包炉中, 大家都知道: 通过钢包底部以  $1.5\text{--}5.0\text{N.l/min/t}$  的速度吹入的搅拌气强制搅动钢水, 在这种情况下, 超过 60 分钟的搅拌时间能够产生较好的效果。另一方面, 在本发明中, 钢包精炼炉中的精炼时间不大于 60 分钟, 优选不大于 45 分钟, 更优选 25-45 分钟。

(3) 将在步骤(2)中进行了还原精炼和化学组成调节的钢水脱气, 方法是通过循环式真空脱气装置循环钢水, 并且最终调节钢的化学组成。在这种情况下一般都认为在循环式真空脱气装置中的脱气时间少于 25 分钟, 当钢水的循环量是钢水总量的约 5 倍时能够得到令人满意的结果。另一方面, 在本发明中, 钢水的循环量比钢水总量至少大 8 倍, 优选至少大 10

倍，更优选至少大 15 倍，以进行长时间的脱气，即，不小于 25 分钟的脱气。步骤(2)和(3)在本发明中是最重要的。在步骤(2)中加热的同时进行精炼的钢包精炼时间是最小的必要时间，在步骤(3)中不涉及加热的脱气，特别是循环式真空脱气进行的方式是使喷嘴浸在钢水中并且只循环钢水。所以钢水上表面上的矿渣处于令人满意的静止状态，因此，从矿渣进入钢水中的氧化物夹杂体数目少于在钢包精炼炉中进行的还原过程中的氧化物夹杂体数目。在该系统中，当氧化物夹杂体的浮选分离时间能够保证时，就可以防止由于受到钢包炉内壁上的耐火材料或矿渣的污染而造成的氧含量的升高，同时可以防止粒度不小于约  $30\ \mu\text{m}$  的大夹杂体的形成。这样就能够生产出高洁净度钢。

(4)将在步骤(3)中进行了最终化学组成调节的钢水浇铸成钢锭。

(5)将钢锭轧制或锻造成产品形状，然后可以任选地进行热处理，产生钢产品。

在根据本发明的高洁净度钢的优选生产方法中，在步骤(1)-(5)中，在将步骤(1)后的钢水转移到钢包精炼炉的过程中，虽然钢水的出炉温度一般比钢的熔点高约  $50^\circ\text{C}$ ，但是在本发明中，钢水的出炉温度比钢的熔点至少高  $100^\circ\text{C}$ ，优选至少高  $120^\circ\text{C}$ ，更优选至少高  $150^\circ\text{C}$ 。利用这样的设置可以使钢包周围沉积的金属完全溶解在钢水中，矿渣也能够完全浮选，所以能够防止由于在钢包精炼过程中在预精炼状态下分离或滴入钢水中的金属或矿渣造成的氧含量升高。

本发明涉及用上述生产方法生产的高洁净度钢。

根据一个优选实施方案，本发明的高洁净度钢是特别是具有优秀滚动疲劳寿命的高洁净度钢，其特征在于：钢中的氧含量不大于 10ppm；优选地是，当钢中的碳含量低于 0.6%(质量)时，钢中的氧含量不大于 8ppm；更优选地是，在  $C \geq 0.6\%$ (质量)的情况下，氧含量不大于 6ppm。大家都知道降低氧含量有助于改善滚动疲劳寿命。在用本发明的方法生产的钢中，氧含量不大于 10ppm，优选地是，当钢中的  $C < 0.6\%$ (质量)时，氧含量不大于 8ppm，更优选地是，在  $C \geq 0.6\%$ (质量)的情况下，氧含量不大于 6ppm 的高洁净度钢稳定地显示出优秀的滚动疲劳寿命。

根据一个优选实施方案，用本发明的方法生产的钢还包括具有优秀滚

动疲劳寿命和疲劳强度的高洁净度钢，其特征在于：通过将钢产品溶解在酸中检测的粒度不小于  $20\ \mu\text{m}$  的氧化物夹杂体，例如  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量不低于 50% 的氧化物夹杂体的数量在每 100g 钢产品中不大于 40，优选不大于 30，更优选不大于 20。钢产品的这种测定方法反映了预定体积中的氧含量和最大夹杂体直径。至于疲劳强度、疲劳寿命和镇静度，在氧含量一样的钢中，大粒度的氧化物夹杂体是有害的，具体来说，粒度不小于  $20\ \mu\text{m}$  的氧化物夹杂体是有害的。因此，在用本发明的方法生产的钢中，将钢产品溶解在酸中检测的粒度不小于  $20\ \mu\text{m}$  的氧化物夹杂体（例如， $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量不低于 50% 的氧化物夹杂体）的数量在每 100g 钢产品中不大于 40，优选不大于 30，更优选不大于 20 的钢是具有优秀滚动疲劳寿命和优秀疲劳强度及优秀镇静度的高洁净度钢。

根据一个优选实施方案，本发明的高洁净度钢还包括特别是具有优秀旋转弯曲疲劳强度和周期应力疲劳强度的高洁净度钢，其特征在于：当在  $100\text{mm}^2$  的钢产品横截面上的 30 处测定最大夹杂体直径时，根据这些极值的统计学计算得到的  $30000\text{mm}^2$  中最大夹杂体直径的预测值不大于  $60\ \mu\text{m}$ ，优选不大于  $40\ \mu\text{m}$ ，更优选不大于  $25\ \mu\text{m}$ 。大家都知道：周期应力疲劳强度和疲劳极限在很大程度上取决于预定体积内的最大夹杂体直径。这公开在日本特许公开专利 194121/1999 中，该专利的申请人与本发明的申请人相同。例如，一般当在  $100\text{mm}^2$  的钢产品横截面上的 30 处测定最大夹杂体直径时，根据这些极值的统计学计算得到的  $30000\text{mm}^2$  中最大夹杂体直径的预测值不大于  $60\ \mu\text{m}$ ，优选不大于  $40\ \mu\text{m}$ ，更优选不大于  $25\ \mu\text{m}$  的高洁净度钢稳定地显示出优秀的疲劳强度。在这种情况下，高洁净度钢中的氧含量不大于 10ppm，优选地是，在钢中的  $\text{C} < 0.6\%$ （质量）的情况下，氧含量不大于 8ppm，更优选地是，在  $\text{C} \geq 0.6\%$ （质量）的情况下，氧含量不大于 6ppm，最大夹杂体直径的预测值不大于  $60\ \mu\text{m}$ ，优选不大于  $40\ \mu\text{m}$ ，更优选不大于  $25\ \mu\text{m}$ 。用本发明的方法生产的钢是具有优秀滚动疲劳寿命和优秀疲劳强度的高洁净度钢。虽然酸溶解是非常费时和麻烦的工作，但是有利的是，不进行钢产品溶解加工的上述方法能够在显微镜下观察一定的面积来统计性地预测最大夹杂体直径，这种方法很简单。另外，具体来说，至于拉伸压缩的周期应力所造成的疲劳，大家都知道：在易于断裂处存在的夹杂

体的最大直径是非常大的决定强度的因素。这种能够统计性地预测该最大直径的方法是有利的。

### 第五个发明

根据第五个发明，高洁净度钢的优选生产方法包括下述步骤(1)-(5)：

(1) 在电弧熔化炉或转炉中氧化精炼钢水，制备具有预定化学组成和预定温度的钢水，然后将钢水转移到钢包炉中。

(2) 在钢包炉中对转移到钢包炉中的钢水进行还原精炼，并调节钢水的化学组成。这时候在钢包炉中，通过钢包底部以 1.5-5.0N.l/min/t 的速度吹入搅拌气强制搅动钢水，另外还进行电磁搅拌。因此，钢包精炼时间是 50-80 分钟，优选 70-80 分钟。

(3) 将在步骤(2)中进行了还原精炼和化学组成调节的钢水脱气，方法是通过循环式真空脱气装置循环钢水，并且最终调节钢的化学组成。在这种情况下一般都认为在循环式真空脱气装置中的脱气时间少于 25 分钟，当钢水的循环量是钢水总量的约 5 倍时能够得到令人满意的结果。另一方面，在本发明中，钢水的循环量比钢水总量至少大 8 倍，优选至少大 10 倍，更优选至少大 15 倍，以进行长时间的脱气，即，不小于 25 分钟。步骤(2)和(3)在第五个发明中是最重要的。在步骤(2)中气体搅拌和电磁搅拌的同时进行精炼的钢包精炼时间内，甚至当精炼不是短时间精炼时，即，甚至长时间精炼时，即，50-80 分钟，优选 70-80 分钟精炼时，也能令人满意地提高钢的洁净度。电磁搅拌的搅拌能是每吨钢水 200-700w。如上所述，电磁搅拌不搅动矿渣本身。因此能够防止由于炉的耐火材料和矿渣夹杂体的熔化损失所造成的矿渣平衡系统的破坏。另外，因为脱气，特别是循环式真空脱气进行的方式是使喷嘴浸在钢水中并且只循环钢水。所以钢水上表面上的矿渣处于令人满意的静止状态，从矿渣进入钢水中的氧化物夹杂体数目少于在钢包中进行的还原过程中的氧化物夹杂体数目。在该系统中，当氧化物夹杂体的浮选分离时间能够保证时，就可以防止由于受到钢包内壁上的耐火材料或矿渣的污染而造成的氧含量的升高，同时可以防止粒度不小于约 30  $\mu$ m 的大夹杂体的形成。这样就能够生产出高洁净度钢。

(4) 将进行了最终化学组成调节的钢水浇铸成钢锭。

(5) 将钢锭轧制或锻造成产品形状，然后可以任选地进行热处理，产

生钢产品。

在根据本发明的高洁净度钢的优选生产方法中，在步骤(1)-(5)中的步骤(2)的钢包精炼中，具体来说，使钢包处于惰性气氛中，因此与空气相隔离，在这种条件下进行钢包精炼(步骤6)。在本发明优选的这个实施方案中，步骤(6)在本发明中是最重要的。

在生产实践中，在步骤(6)中在隔离空气的惰性气氛中进行钢包精炼是和步骤(2)中在气体搅拌结合电磁搅拌条件下进行精炼的钢包精炼相结合的，这样，甚至当精炼不是短时间精炼时，即，甚至长时间精炼时，即，50-80分钟，优选70-80分钟精炼时，也能令人满意地提高钢的洁净度。具体来说就是将钢包覆盖。为了将钢包内的钢水与空气隔离，在由盖板限定的空间内充满惰性气体，如氩气、氮气或由氩气和氮气构成的混合气体。因此能够保持矿渣的系统平衡。盖板内惰性气体压力优选降到不大于10托。这可以进一步提高其作用。利用这样的设置可以使矿渣完全浮选，因此能够防止由于在钢包精炼过程中在预精炼状态下分离或滴入钢水中的金属或矿渣造成的氧含量升高。密封气体是流速不小于 $50\text{Nm}^3/\text{H}$ 的气体，如果在减压情况下精炼，则也可以使用流速低于该范围的气体。

本发明涉及用上述生产方法生产的高洁净度钢。

根据一个优选实施方案，本发明的高洁净度钢是特别是具有优秀滚动疲劳寿命的高洁净度钢，其特征在于：钢中的氧含量不大于10ppm；优选地是，当钢中的碳含量低于0.6%(质量)时，钢中的氧含量不大于8ppm；更优选地是，在 $C \geq 0.6\%$ (质量)的情况下，氧含量不大于6ppm。大家都知道降低氧含量有助于改善滚动疲劳寿命。在用本发明的方法生产的钢中，氧含量不大于10ppm，优选地是，当钢中的 $C < 0.6\%$ (质量)时，氧含量不大于8ppm，更优选地是，在 $C \geq 0.6\%$ (质量)的情况下，氧含量不大于6ppm的高洁净度钢稳定地显示出优秀的滚动疲劳寿命。

根据一个优选实施方案，用本发明的方法生产的钢还包括具有优秀滚动疲劳寿命和疲劳强度的高洁净度钢，其特征在于：通过将钢产品溶解在酸中检测的粒度不小于 $20\mu\text{m}$ 的氧化物夹杂体，例如 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量不低于50%的氧化物夹杂体的数量在每100g钢产品中不大于40，优选不大于30，更优选不大于20。钢产品的这种测定方法反映了预定体积中的氧含量和最大

夹杂体直径。至于疲劳强度、疲劳寿命和镇静度，在氧含量一样的钢中，大粒度的氧化物夹杂体是有害的，具体来说，粒度不小于  $20\ \mu\text{m}$  的氧化物夹杂体是有害的。因此，在用本发明的方法生产的钢中，将钢产品溶解在酸中检测的粒度不小于  $20\ \mu\text{m}$  的氧化物夹杂体（例如， $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量不低于 50% 的氧化物夹杂体）的数量在每 100g 钢产品中不大于 40，优选不大于 30，更优选不大于 20 的钢是具有优秀滚动疲劳寿命和优秀疲劳强度及优秀镇静度的高洁净度钢。

根据一个优选实施方案，本发明的高洁净度钢还包括特别是具有优秀旋转弯曲疲劳强度和周期应力疲劳强度的高洁净度钢，其特征在于：当在  $100\text{mm}^2$  的钢产品横截面上的 30 处测定最大夹杂体直径时，根据这些极值的统计学计算得到的  $30000\text{mm}^2$  中最大夹杂体直径的预测值不大于  $60\ \mu\text{m}$ ，优选不大于  $40\ \mu\text{m}$ ，更优选不大于  $25\ \mu\text{m}$ 。大家都知道：周期应力疲劳强度和疲劳极限在很大程度上取决于预定体积内的最大夹杂体直径。这公开在日本特许公开专利 194121/1999 中，该专利的申请人与本发明的申请人相同。例如，一般当在  $100\text{mm}^2$  的钢产品横截面上的 30 处测定最大夹杂体直径时，根据这些极值的统计学计算得到的  $30000\text{mm}^2$  中最大夹杂体直径的预测值不大于  $60\ \mu\text{m}$ ，优选不大于  $40\ \mu\text{m}$ ，更优选不大于  $25\ \mu\text{m}$  的高洁净度钢稳定地显示出优秀的疲劳强度。在这种情况下，高洁净度钢中的氧含量不大于 10ppm，优选地是，在钢中的  $\text{C} < 0.6\%$ （质量）的情况下，氧含量不大于 8ppm，更优选地是，在  $\text{C} \geq 0.6\%$ （质量）的情况下，氧含量不大于 6ppm，最大夹杂体直径的预测值不大于  $60\ \mu\text{m}$ ，优选不大于  $40\ \mu\text{m}$ ，更优选不大于  $25\ \mu\text{m}$ 。用本发明的方法生产的钢是具有优秀滚动疲劳寿命和优秀疲劳强度的高洁净度钢。虽然酸溶解是非常费时和麻烦的工作，但是有利的是，不进行钢产品溶解加工的上述方法能够在显微镜下观察一定的面积来统计性地预测最大夹杂体直径，这种方法很简单有利。另外，具体来说，至于拉伸压缩的周期应力所造成的疲劳，大家都知道：在易于断裂处存在的夹杂体的最大直径是非常重要的决定强度的因素。这种能够统计性地预测该最大直径的方法是有利的。

#### 实施例 A

在电弧熔化炉中进行氧化精炼后的钢水从熔化炉中倒出的过程中，将

脱氧剂如锰、铝和硅预先加入钢包，或者在出炉过程中加到钢水中。每吨钢水中纯基脱氧剂的加入量不小于 1kg，加入脱氧剂进行出钢脱氧，即，进行预脱氧。然后在钢包精炼工艺中还原精炼钢水，精炼后的钢水在循环式真空脱气装置中脱气，然后用浇铸法进行钢锭生产工艺。对这样得到的 10 炉 JIS SUJ 2 和 SCM 435 钢产品进行检测，测定产品中的氧含量、根据极值的统计学计算得到的最大夹杂体直径的预测值和根据止推辊使用寿命实验(thrust-type rolling service life test)测定的  $L_{10}$  使用寿命。在测定最大夹杂体直径的预测值时，从  $\phi 65$  锻材上取下一个实验片，对 30 个实验片进行  $100\text{mm}^2$  的观察，根据这些极值的统计学原理预测  $30000\text{mm}^2$  中的最大夹杂体直径。在止推辊使用寿命实验中，首先将尺寸为  $\phi 60 \times \phi 20 \times 8.3\text{T}$  的实验片进行渗碳、淬火硬化和回火，然后在  $4900\text{Mpa}$  的最大赫兹应力  $P_{\text{max}}$  下进行实验，然后通过计算确定  $L_{10}$  使用寿命。

表 A1 示出根据本发明对 10 炉 SUJ 2 钢进行操作的一个例子。

表 A1

操作 编号	出钢脱氧(A)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
钢号	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2
出炉温度: 熔点, °C	62	56	52	57	65	60	75	65	57	73
出炉时加入的脱氧剂量 或加入钢包中的脱氧剂量, kg/t	1.9	3	2.2	2.8	1.3	1.9	2.9	2	2.8	1
LF: 时间, 分钟	55	51	56	56	60	57	59	57	60	55
LF: 终温, °C	1525	1526	1521	1520	1526	1524	1525	1522	1526	1523
RH: 时间, 分钟	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
RH: 循环量, 倍数	5.7	6.5	7.1	5.5	6.7	6.4	5.6	6.8	5.7	7
RH: 终温, °C	1499	1493	1492	1498	1502	1502	1492	1497	1500	1499
浇铸温度, °C	1475	1476	1476	1475	1478	1478	1475	1477	1476	1475
产品中的氧含量, ppm	4.9	5.6	4.8	5.2	5.3	5.3	4.9	4.9	5.8	5.1
在 100g 钢产品中 不小于 20 μm 的夹杂物数目	38	33	30	26	27	35	32	34	31	36
夹杂物的最大预测直径, μm	49	44.8	38.4	52	47.7	42.4	49	49	52.2	40.8
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	2.2	1.9	3.1	3.0	2.5	2.4	2.7	3.5	2.9	2.8
评价结果	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△

表 A2 示出根据本发明对 10 炉 SCM 435 钢进行操作的一个例子。

表 A2

操作 编号	出钢脱氧(B <sub>i</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
钢号	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435
出炉温度: 熔点+°C	68	54	69	61	74	68	62	67	55	65
出炉时加入的脱氧剂量 或加入钢包中的脱氧剂量, kg/t	2.5	1.8	2.5	1.9	1.5	1.6	1.7	1.5	1.5	2.6
LF: 时间, 分钟	55	51	57	56	59	53	60	53	54	51
LF: 终温, °C	1565	1574	1567	1571	1570	1569	1572	1575	1565	1573
RH: 时间, 分钟	22	22	21	20	23	20	24	23	20	21
RH: 循环量, 倍数	6.8	6.0	6.6	5.7	5.9	5.5	7.0	6.5	7.0	6.3
RH: 终温, °C	1531	1533	1537	1534	1531	1532	1539	1541	1539	1536
浇铸温度, °C	1514	1518	1518	1520	1520	1516	1520	1520	1512	1516
产品中的氧含量, ppm	7.9	6.7	8.0	7.4	7.9	6.5	8.3	7.9	7.9	6.9
在 100g 钢产品中 不小于 20 μm 的夹杂体数目	40	33	35	39	35	25	25	30	37	36
夹杂体的最大预测直径, μm	47.4	46.9	48.0	51.8	55.3	45.5	49.8	55.3	55.3	45.4
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	1.2	1.9	1.8	2.1	1.5	2.8	2.7	1.2	2.4	2.1
评价结果	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△

△ : 中等

表 A3 示出根据本发明对 10 炉 SUJ 2 钢进行操作的一个例子。

表 A3

操作	出钢脱氧+高温出钢(A <sub>2</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2
钢号	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2
出炉温度: 熔点+°C	147	148	116	145	155	152	139	113	152	126
出炉时加入的脱氧剂量或加入钢包中的脱氧剂量, kg/t	2.7	1.5	2.3	1.7	1.7	2.7	1.9	2.3	1.1	2.7
LF:时间, 分钟	56	60	59	51	53	53	52	52	58	53
LF:终温, °C	1524	1520	1521	1523	1523	1520	1523	1525	1525	1522
RH:时间, 分钟	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
RH:循环量, 倍数	6	6.5	5.5	6.3	5.9	6.7	6.4	6.1	6.7	6.3
RH:终温, °C	1498	1501	1502	1500	1503	1498	1502	1497	1494	1501
浇铸温度, °C	1478	1476	1476	1476	1477	1476	1478	1475	1478	1476
产品中的氧含量, ppm	5.2	5.1	5	4.6	4.9	5.1	4.5	5.2	4.9	4.7
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	30	28	28	26	25	22	23	16	25	30
夹杂体的最大预测直径, μm	20.8	20.4	20	23	24.5	25.5	22.5	26	24.5	23.5
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	3.4	3.7	4.7	4.0	4.1	2.6	3.3	4.9	3.9	5.2
评价结果	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0: 良好

表 A4 示出根据本发明对 10 炉 SCM 435 钢进行操作的一个例子。

表 A4

操作	出钢脱氧+高温出钢 (B <sub>2</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435
出炉温度: 熔点+°C	104	119	138	116	119	147	114	141	110	113
出炉时加入的脱氧剂量或加入钢包中的脱氧剂量, kg/t	2	2.8	1.9	2.2	2.9	2.5	1.7	1.6	1.5	2.9
LF: 时间, 分钟	49	51	52	51	52	47	53	51	51	47
LF: 终温, °C	1565	1572	1572	1572	1573	1572	1575	1566	1572	1567
RH: 时间, 分钟	24	20	22	21	23	20	24	22	23	22
RH: 循环量, 倍数	6.5	6.1	5.5	7.2	6.6	6.5	7.1	5.8	7.3	7.0
RH: 终温, °C	1533	1538	1532	1534	1540	1538	1538	1536	1538	1538
浇铸温度, °C	1519	1517	1517	1511	1516	1515	1513	1516	1511	1513
产品中的氧含量, ppm	7.1	7.3	7.1	7.4	6.5	6.8	7.1	7.1	6.9	6.4
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	28	29	20	25	30	28	29	26	22	20
夹杂体的最大预测直径, μm	37.6	38.5	38.3	39.3	34.5	35.6	37.8	36.2	34.5	32.6
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	2.9	2.8	2.4	3.0	3.6	3.3	3.4	3.1	2.8	3.3
评价结果	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0: 良好

表 A5 示出根据本发明对 10 炉 SUJ 2 钢进行出钢脱氧+短 LF、长 RH 操作的一个例子。

表 A5

操作	出钢脱氧+短 LF、长 RH(A <sub>3</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2
钢号	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2
出炉温度: 熔点+°C	66	80	61	79	55	66	68	65	67	60
出炉时加入的脱氧剂量或加入钢包中的脱氧剂量, kg/t	1.8	1.7	3	1.6	2.6	2.7	2.8	2.2	3	2
LF: 时间, 分钟	41	34	33	31	38	30	40	32	39	44
LF: 终温, °C	1546	1547	1548	1549	1550	1551	1552	1553	1554	1555
RH: 时间, 分钟	56	57	59	54	55	55	54	57	60	58
RH: 循环量, 倍数	18.7	19.0	19.7	18.0	18.3	18.3	18.0	19.0	20.0	19.3
RH: 终温, °C	1502	1510	1506	1502	1505	1508	1503	1508	1506	1508
浇铸温度, °C	1478	1477	1477	1478	1477	1478	1478	1475	1477	1476
产品中的氧含量, ppm	4.8	4	4.1	4.6	5.2	4.8	4.5	4.2	4.2	4.4
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	26	30	22	28	21	20	30	30	26	23
夹杂体的最大预测直径, μm	21.8	19.4	18.9	21	21.6	18.4	22.7	21.3	20.8	20.2
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	4.8	4.0	5.1	4.0	3.4	3.9	4.4	3.6	3.7	3.1
评价结果	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0: 良好

表 A6 示出根据本发明对 10 炉 SCM 435 钢进行出钢脱氧+短 LF、长 RH 操作的一个例子。

表 A6

操作	出钢脱氧+短 LF、长 RH(B <sub>3</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
钢号	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435
出炉温度: 熔点+°C	62	72	56	55	71	59	63	78	67	63
出炉时加入的脱氧剂量或加入钢包中的脱氧剂量, kg/t	3	1.6	2.8	1.8	2.9	2.4	2.3	2.6	2.1	1.9
LF: 时间, 分钟	42	42	40	41	42	45	41	37	42	36
LF: 终温, °C	1580	1582	1585	1580	1579	1578	1578	1585	1584	1581
RH: 时间, 分钟	36	45	39	35	43	39	45	36	43	38
RH: 循环量, 倍数	12.0	15.0	13.0	11.7	14.3	13.0	15.0	12.0	14.3	12.7
RH: 终温, °C	1537	1533	1533	1535	1539	1539	1534	1539	1534	1539
浇铸温度, °C	1514	1513	1515	1515	1515	1516	1516	1515	1516	1515
产品中的氧含量, ppm	7	7.3	7.2	7.1	6.7	7.3	6.8	7.1	6.5	7.1
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	28	29	25	25	22	30	23	28	26	23
夹杂体的最大预测直径, μm	25.0	25.0	24.9	24.7	25.0	24.8	24.9	24.6	24.7	24.9
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	3.0	2.6	3.8	3.7	3.1	3.3	2.9	2.3	3.6	2.7
评价结果	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0: 良好

表 A7 示出根据本发明对 10 炉 SUJ 2 钢进行出钢脱氧+高温出钢+短 LF、长 RH 操作的一个例子。

表 A7

操作	出钢脱氧+高温出钢+短 LF、长 RH(A <sub>6</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
钢号	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2
出炉温度: 熔点+°C	132	143	131	150	153	134	151	138	111	157
出炉时加入的脱氧剂量或加入钢包中的脱氧剂量, kg/t	2.8	1	2.9	1.9	2.7	2.6	2.5	2.4	1.7	2.2
LF: 时间, 分钟	43	34	35	38	31	39	38	41	35	44
LF: 终温, °C	1541	1541	1546	1546	1541	1540	1543	1544	1544	1546
RH: 时间, 分钟	54	50	58	48	52	47	51	60	53	48
RH: 循环量, 倍数	18.8	16.1	18.6	16.0	16.8	15.7	17.6	20.7	18.2	16.5
RH: 终温, °C	1498	1502	1502	1502	1500	1501	1498	1502	1497	1498
浇铸温度, °C	1478	1476	1477	1475	1478	1475	1475	1476	1476	1475
产品中的氧含量, ppm	4.1	4.7	4.1	4.2	4.1	4.9	4.3	3.8	4.3	4.7
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	14	11	5	6	8	8	13	10	6	7
夹杂体的最大预测直径, μm	12.3	14.1	12.3	14.4	14.1	14.7	12.9	11.4	12.9	13.8
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	7.1	7.9	9.9	9.1	11.3	10.6	10.9	11.9	10.0	8.4
评价结果	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

◎: 优秀

表 A8 示出根据本发明对 10 炉 SCM 435 钢进行出钢脱氧+高温出钢+短 LF、长 RH 操作的一个例子。

表 A8

操作 编号	出钢脱氧+高温出钢+短 LF、长 RH(B <sub>4</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
钢号	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435
出炉温度: 熔点+°C	143	115	104	148	130	106	109	124	122	105
出炉时加入的脱氧剂量或加入钢包中的脱氧剂量, kg/t	2	2.1	2.4	1.7	1.7	2.9	2.1	2	2.4	2.5
LF: 时间, 分钟	35	34	33	42	33	43	38	45	41	37
LF: 终温, °C	1577	1579	1585	1578	1584	1578	1582	1581	1577	1576
RH: 时间, 分钟	36	45	44	40	38	37	46	39	40	43
RH: 循环量, 倍数	12.4	14.5	14.2	13.3	13.1	11.9	15.3	13.0	12.9	14.3
RH: 终温, °C	1532	1541	1535	1537	1531	1531	1532	1540	1538	1536
浇铸温度, °C	1513	1520	1517	1521	1516	1511	1518	1511	1511	1519
产品中的氧含量, ppm	6.5	5.4	5.5	5.9	6.0	6.1	5.3	6.0	5.8	5.7
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂物数目	8	10	6	9	8	14	8	14	11	8
夹杂物的最大预测直径, μm	24.6	23.5	23.8	24.4	24.6	24.0	22.5	24.0	26.7	26.8
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	7.9	8.6	10.4	9.3	9.8	9.6	8.8	8.7	10.0	9.3
评价结果	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

◎: 优秀

为了与本发明对比,表 A9 示出根据现有技术对 SUJ 2 钢进行操作的一个例子,表 A10 示出根据现有技术对 SCM 435 钢进行操作的一个例子

表 A9

操作	传统操作(现有技术)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2
钢号	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2
出炉温度: 熔点+°C	57	72	58	60	74	75	51	65	62	68
出炉时加入的脱氧剂量或加入钢包中的脱氧剂量, kg/t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LF:时间, 分钟	61	61	63	61	62	62	61	63	61	63
LF:终温, °C	1525	1524	1526	1525	1523	1524	1523	1520	1525	1520
RH:时间, 分钟	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
RH:循环量, 倍数	5.7	6.7	7.1	6.5	6.2	5.7	7	5.5	6.8	6.2
RH:终温, °C	1493	1502	1501	1497	1501	1501	1502	1503	1496	1499
浇铸温度, °C	1477	1475	1475	1475	1475	1475	1476	1478	1478	1476
产品中的氧含量, ppm	5.4	5.1	5.1	6.1	5.8	5.9	5.8	5.9	5.2	6.2
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	59	56	54	65	48	41	50	47	45	49
夹杂体的最大预测直径, μm	86.4	61.2	66.3	97.6	81.2	76.7	92.8	76.7	72.8	74.4
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>1</sup> )	1.9	2.4	2.4	1.8	1.9	3.4	1.9	2.2	2.0	2.2
评价结果	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

x:差

表 A10

操作	传统操作(现有技术)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
钢号	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435
出炉温度: 熔点+°C	61	54	69	50	74	58	58	69	64	54
出炉时加入的脱氧剂量或加入钢包中的脱氧剂量, kg/t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LF: 时间, 分钟	62	63	61	61	61	63	63	63	61	61
LF: 终温, °C	1570	1574	1566	1572	1567	1569	1567	1569	1569	1570
RH: 时间, 分钟	23	23	23	20	21	23	21	23	23	24
RH: 循环量, 倍数	6.8	7.5	7.0	8.3	6.2	6.0	7.4	8.0	7.3	6.7
RH: 终温, °C	1533	1538	1541	1540	1541	1533	1535	1534	1531	1531
浇铸温度, °C	1517	1519	1520	1518	1517	1511	1516	1512	1512	1521
产品中的氧含量, ppm	7.6	9.2	9.2	8.8	6.9	8.3	6.9	8.3	9.4	9.1
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	49	54	59	52	42	57	56	53	53	42
夹杂体的最大预测直径, μm	68.4	82.8	73.6	70.4	55.2	83.0	55.2	83.0	84.6	91.0
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>4</sup> )	1.0	1.3	1.1	1.9	2.3	1.5	2.0	1.2	1.2	1.9
评价结果(x:差)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

从表 A1-A8 可以清楚地看出：对于根据本发明进行出钢脱氧(即，预脱氧)生产的钢产品，当出炉温度高于传统操作温度(即，熔点+至少 100 °C)时，并且通过缩短钢包精炼炉中的操作时间进行令人满意地脱气时，并且在循环脱气过程中增加循环 RH 的量(即，循环钢水量/钢水总量)时，无论是 SUJ 2 钢还是 SCM 435 钢，产品的氧含量都很小，另外，粒度不小于 20  $\mu\text{m}$  的夹杂体数目也大幅下降。从表 A1-A8 可以看出：至于洁净度，对于本发明的例子来说，所有的钢产品都被评价为一般( $\Delta$ )、良好(O)和优秀( $\odot$ )，即，都是优秀的高洁净度钢。相反，从表 A9 和 A10 可以看出：对于所有传统的例子，其洁净度被评价为差(x)，传统的钢产品不能说成是洁净钢。在这一点上应当注意：一般( $\Delta$ )是与良好(O)和优秀( $\odot$ )相比较而言，如果与根据现有技术方法不进行出钢脱氧而被评价为差(x)的钢相比，这些被评价为一般( $\Delta$ )的钢则具有更高的洁净度。

对于进行了预脱氧(即，出钢脱氧)的各炉钢产品，氧含量和最大夹杂体直径的预测值都因  $T_{\text{SH}}[(\text{钢水转移至钢包炉时的温度})-(\text{钢水的熔点})=T_{\text{SH}}]$  的增加而降低，从而改进了钢的洁净度。对于进行了预脱氧的各炉钢产品，钢包炉内的精炼时间与氧含量和最大夹杂体直径的预测值之间的关系是：当精炼时间不小于约 25 分钟时，氧含量和最大夹杂体直径的预测值都能令人满意地降低。但是最大夹杂体直径的预测值却随着精炼时间的增加而增加。可以认为其原因如下：随着时间的延长，钢包炉内耐火材料的熔化损失量增加，矿渣系统的平衡被打破，例如，这是因为和空气接触而产生的氧化反应和溶解的氧量超过了溶解氧的最小值。另外，在循环式真空脱气装置中循环钢水量/钢水总量与氧含量和最大夹杂体直径的预测值之间的关系是：洁净度的提高效应随循环钢水量的增加而增加，当循环钢水量/钢水总量不小于 15 倍时，这种效应基本上达到饱和状态。

已经证明：降低氧含量和最大夹杂体直径的预测值能够改进  $L_{10}$  寿命。这意味着用本发明的方法生产的氧含量和最大夹杂体直径的预测值都降低了的钢具有优秀的疲劳强度性能如优秀的滚动疲劳寿命。

图 A1 是示出在本发明的生产方法中在将 SUJ 2 钢水转移至钢包炉的过程中进行出钢脱氧的 10 炉钢产品的氧含量的折线图，图 A1 还示出在传统方法中不进行出钢脱氧的 10 炉钢产品的氧含量。在图 A1、A3 和 A5 中，

A<sub>1</sub> 示出根据本发明权利要求 1 定义的出钢脱氧时的数据, A<sub>2</sub> 示出根据本发明权利要求 2 定义的出钢脱氧+高温出钢时的数据, A<sub>3</sub> 示出根据本发明权利要求 3 定义的出钢脱氧+短时间 LF、长时间 RH 处理时的数据, A<sub>4</sub> 示出根据本发明权利要求 3 定义的出钢脱氧+高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理时的数据, 图 A1 中还示出现有技术中的传统数据。

图 A2 是示出在本发明的生产方法中在将 SCM 435 钢水转移至钢包的过程中进行出钢脱氧的 10 炉钢产品的氧含量的折线图, 图 A2 还示出在传统方法中不进行出钢脱氧的 10 炉钢产品的氧含量。在图 A2、A4 和 A6 中, B<sub>1</sub> 示出根据本发明权利要求 1 定义的出钢脱氧时的数据, B<sub>2</sub> 示出根据本发明权利要求 2 定义的出钢脱氧+高温出钢时的数据, B<sub>3</sub> 示出根据本发明权利要求 3 定义的出钢脱氧+短时间 LF、长时间 RH 处理时的数据, B<sub>4</sub> 示出根据本发明权利要求 3 定义的出钢脱氧+高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理时的数据, 图 A2 中还示出现有技术中的传统数据。

图 A3 是示出在本发明的生产方法中在将 SUJ 2 钢水转移至钢包炉的过程中进行脱氧的 10 炉钢产品中根据这些极值统计得到的最大预测夹杂体直径的折线图, 图 A3 还示出根据传统方法不进行脱氧的 10 炉 SUJ 2 钢产品中的最大预测夹杂体直径。

图 A4 是示出在本发明的生产方法中在将 SCM 435 钢水转移至钢包炉的过程中进行脱氧的 10 炉钢产品中根据这些极值统计得到的最大预测夹杂体直径的折线图, 图 A4 还示出根据传统方法不进行脱氧的 10 炉 SCM 435 钢产品中的最大预测夹杂体直径。

图 A5 是示出在本发明的生产方法中在将 SUJ 2 钢水转移至钢包炉的过程中进行脱氧的 10 炉钢产品的根据止推辊使用寿命实验测定的 L<sub>10</sub> 寿命的折线图, 图 A5 还示出根据传统方法不进行脱氧的 10 炉 SUJ 2 钢产品的 L<sub>10</sub> 寿命。

图 A6 是示出在本发明的生产方法中在将 SCM 435 钢水转移至钢包炉的过程中进行脱氧的 10 炉钢产品的根据止推辊使用寿命实验测定的 L<sub>10</sub> 寿命的折线图, 图 A6 还示出根据传统方法不进行脱氧的 10 炉 SCM 435 钢产品的 L<sub>10</sub> 寿命。

由这些实验结果可以充分证明: 根据本发明的生产方法, 在钢包精炼

前进行预脱氧(即, 出钢脱氧)无论对 SUJ 2 钢还是对 SCM 435 钢都能降低产品的氧含量和最大夹杂体直径的预测值, 能够大幅提高其洁净度, 能够大幅改进根据止推辊使用寿命实验测定的  $L_{10}$  寿命。在钢的生产方法中加上这些处理步骤, 即, 只加上根据本发明权利要求 1 定义出的钢脱氧步骤、加上根据本发明权利要求 2 定义出的钢脱氧+高温出钢步骤、加上根据本发明权利要求 3 定义出的钢脱氧+短时间 LF、长时间 RH 处理步骤、加上出钢脱氧+高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理步骤能够大幅改进所有钢的氧含量、最大夹杂体直径的预测值和根据止推辊使用寿命实验测定的  $L_{10}$  寿命。特别是加上短时间 LF、长时间 RH 处理步骤能够产生非常大的作用。

从上述说明可以清楚地看出: 在出钢脱氧时, 在将精炼炉如电弧炉生成的钢水转移到钢包中时将脱氧剂如锰、铝和硅预先加入钢包, 或者在根据本发明的生产方法将钢水转移到钢包中的过程中将脱氧剂加入到钢水中, 使钢水在钢包精炼前预脱氧, 这样可以大量生产洁净度非常高的钢产品, 并且不必使用成本非常高的重熔工艺。另外, 采用出钢脱氧+高温出钢以及加上出钢脱氧+高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理步骤能够使钢产品具有更高的洁净度。这样就可以提供高洁净度钢, 其适用作要求具有疲劳强度、疲劳寿命和镇静度的机械零件用钢, 特别适用作如滚动轴承用钢、恒速结头用钢、齿轮用钢、环形连续变速传动用钢、用于冷锻的机械结构用钢、工具钢和弹簧钢, 还能够提供高洁净度钢的生产方法, 即, 本发明具有预想不到的前所未有的优点。

### 实施例 B

在电弧熔化炉中通过熔化工艺生成的钢水通过循环式真空脱气装置进行循环脱气, 然后将脱气后的钢水转移到钢包炉中, 在钢包炉中对钢水进行钢包精炼。然后使精炼后的钢水通过循环式真空脱气装置进行循环脱气, 然后用浇铸法进行钢锭生产工艺。对这样得到的 10 炉 JIS SUJ 2 和 SCM 435 钢产品进行检测, 测定产品中的氧含量、根据极值的统计学计算得到的最大夹杂体直径的预测值和根据止推辊使用寿命实验测定的  $L_{10}$  使用寿命。在测定最大夹杂体直径的预测值时, 从  $\phi 65$  锻材上取下一个实验片, 对 30 个实验片进行  $100\text{mm}^2$  的观察, 根据这些极值的统计学原理预测  $30000\text{mm}^2$  中的最大夹杂体直径。在止推辊使用寿命实验中, 首先将尺寸为

---

$\Phi 60 \times \Phi 20 \times 8.3T$  的实验片进行渗碳、淬火硬化和回火，然后在 4900Mpa 的最大赫兹应力  $P_{max}$  下进行实验，然后通过计算确定  $L_{10}$  使用寿命。

表 B1 示出对 10 炉 SUJ 2 钢在只进行本发明权利要求 1 定义的 W-RH 处理的情况下进行操作的一个例子。

表 B1

操作	W-RH(A)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	1	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2
钢号	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2
出炉温度: 熔点+°C	75	64	63	60	71	61	73	59	64	68
第一个 RH: 时间, 分钟	15	9	15	8	10	8	11	12	15	11
第一个 RH: 循环量, 倍数	5.0	3.0	5.0	2.7	3.3	2.7	3.7	4.0	5.0	3.7
第一个 RH: 脱氧剂加入量, kg/t	2.6	1.6	2.6	1.7	2.8	2	2.9	1.1	1.3	2.6
LF: 时间, 分钟	48	60	49	52	59	57	58	49	48	57
LF: 终温, °C	1532	1534	1533	1532	1528	1531	1533	1534	1535	1533
第二个 RH: 时间, 分钟	22	21	22	25	24	24	25	23	24	25
第二个 RH: 循环量, 倍数	7.3	7.0	7.3	8.3	8.0	8.0	8.3	7.7	8.0	8.3
第二 RH: 终温, °C	1509	1508	1503	1510	1510	1509	1504	1505	1503	1506
浇铸温度, °C	1476	1478	1476	1476	1478	1476	1477	1476	1475	1476
产品中的氧含量, ppm	4.8	5.1	4.6	4.7	4.9	5.1	4.9	4.8	4.8	5
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	23	21	19	26	27	30	21	20	20	29
夹杂体的最大预测直径, μm	22.8	20.5	19.7	21.8	20	19.8	19.8	21.2	18.6	20.2
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	3.8	3.3	5.0	4.8	4.7	4.1	5.3	3.2	5.5	4.9
评价结果	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0: 良好

表 B2 示出对 10 炉 SCM 435 钢在只进行本发明的 W-RH 处理的情况下进行操作的一个例子。

表 B2

操作	W-RH (B <sub>i</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435
钢号	68	74	69	74	65	77	63	60	58	70
出炉温度: 熔点+°C	12	12	11	12	10	10	13	8	15	15
第一个 RH: 时间, 分钟	4.0	4.0	3.7	4.0	3.3	3.3	4.3	2.7	5.0	5.0
第一个 RH: 循环量, 倍数	2.9	2.2	2	1.5	1.5	1.8	2.3	2.5	2.7	2.2
第一个 RH: 脱氧剂加入量, kg/t	60	47	55	47	56	57	51	45	60	56
LF: 时间, 分钟	1579	1585	1578	1583	1580	1578	1580	1579	1582	1583
LF: 终温, °C	22	22	25	24	22	25	20	22	25	24
第二个 RH: 时间, 分钟	7.3	7.3	8.3	8.0	7.3	8.3	6.7	7.3	8.3	8.0
第二个 RH: 循环量, 倍数	1523	1522	1523	1524	1525	1521	1524	1520	1524	1522
第二 RH: 终温, °C	1515	1516	1515	1513	1514	1515	1515	1514	1516	1515
浇铸温度, °C	6.7	6.7	7	7.2	7.1	6.9	6.6	6.8	6.4	7
产品中的氧含量, ppm	30	27	25	22	24	28	23	26	26	26
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	20.1	21.7	22.8	20.2	24	21.9	22.2	22.5	20.7	22
夹杂体的最大预测直径, μm	2.7	3.3	3.4	2.6	2.5	3.4	4.0	4.0	3.8	3.7
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
评价结果										

0: 良好

表 B3 示出根据本发明对 10 炉 SUJ 2 钢进行 W-RH 处理+高温出钢操作的一个例子。

表 B3

操作	W-RH+高温出钢 (A <sub>2</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
钢号	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2
出炉温度: 熔点+°C	136	152	128	169	163	145	120	125	160	154
第一个 RH: 时间, 分钟	15	9	15	8	10	8	11	12	15	11
第一个 RH: 循环量, 倍数	5.0	3.0	5.0	2.7	3.3	2.7	3.7	4.0	5.0	3.7
第一个 RH: 脱氧剂加入量, kg/t	2.6	1.6	2.6	1.7	2.8	2	2.9	1.1	1.3	2.6
LF: 时间, 分钟	72	64	63	72	72	62	66	60	65	71
LF: 终温, °C	1532	1534	1533	1532	1528	1531	1533	1534	1535	1533
第二个 RH: 时间, 分钟	22	21	22	24	24	24	23	23	24	24
第二个 RH: 循环量, 倍数	7.3	7.0	7.3	8.3	8.0	8.0	8.3	7.7	8.0	8.3
第二 RH: 终温, °C	1509	1508	1503	1510	1510	1509	1504	1505	1503	1506
浇铸温度, °C	1476	1478	1476	1476	1478	1476	1477	1476	1475	1476
产品中的氧含量, ppm	4.8	5.1	4.5	4.6	4.9	5.2	5.0	4.6	4.8	5.1
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数/日	21	23	14	16	20	23	22	17	19	26
夹杂体的最大预测直径, μm	15.7	16.2	14.1	14.3	15.6	16.6	16.0	14.9	14.8	17.2
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	7.0	6.0	8.8	7.7	6.5	5.2	6.6	8.4	7.2	5.3
评价结果	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0: 良好

表 B4 示出根据本发明对 10 炉 SCM 435 钢进行 W-RH 处理+高温出钢操作的一个例子。

表 B4

操作	W-RH+高温出钢 (B <sub>2</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435
出炉温度: 熔点+°C	135	140	130	123	102	122	118	109	157	115
第一个 RH: 时间, 分钟	12	12	11	12	10	10	13	8	15	15
第一个 RH: 循环量, 倍数	4.0	4.0	3.7	4.0	3.3	3.3	4.3	2.7	5.0	5.0
第一个 RH: 脱氧剂加入量, kg/t	2.9	2.2	2	1.5	1.5	1.8	2.3	2.5	2.7	2.2
LF: 时间, 分钟	72	68	62	71	61	67	64	73	62	68
LF: 终温, °C	1579	1585	1578	1583	1580	1578	1580	1579	1582	1583
第二个 RH: 时间, 分钟	22	22	23	24	22	23	20	22	24	24
第二个 RH: 循环量, 倍数	7.3	7.3	8.3	8.0	7.3	8.3	6.7	7.3	8.3	8.0
第二个 RH: 终温, °C	1523	1522	1523	1524	1525	1521	1524	1520	1524	1522
浇铸温度, °C	1515	1516	1515	1513	1514	1515	1515	1514	1516	1515
产品中的氧含量, ppm	6.2	6.7	6.6	6.1	6.3	6.4	6.2	6.5	6.4	6.5
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	14	18	15	13	16	16	13	17	15	18
夹杂体的最大预测直径, μm	20.2	21.6	20.3	19.7	20.4	20.8	19.5	21.3	20.6	21.0
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	6.2	5.0	6.4	7.8	5.2	6.9	7.0	4.8	5.9	4.1
评价结果	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0: 良好

表 B5 示出根据本发明对 10 炉 SUJ 2 钢进行 W-RH 处理+短 LF、长 RH 操作的一个例子。

表 B5

操作 编号	W-RH+短 LF、长 RH (A <sub>3</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
钢号	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2
出炉温度: 熔点+°C	59	68	74	61	69	78	74	59	73	67
第一个 RH: 时间, 分钟	14	12	12	9	10	9	12	9	15	11
第一个 RH: 循环量, 倍数	4.7	4.0	4.0	3.0	3.3	3.0	4.0	3.0	5.0	3.7
第一个 RH: 脱氧剂加入量, kg/t	2.6	1.3	1.5	2.2	1	2.2	1.5	2.1	2.2	1.3
LF: 时间, 分钟	44	38	35	44	45	42	41	36	36	44
LF: 终温, °C	1541	1545	1544	1543	1542	1541	1541	1543	1541	1544
第二个 RH: 时间, 分钟	49	38	37	46	54	54	53	59	45	41
第二个 RH: 循环量, 倍数	16.3	12.7	12.3	15.3	18.0	18.0	17.7	19.7	15.0	13.7
第二 RH: 终温, °C	1507	1505	1507	1507	1506	1503	1504	1505	1508	1508
浇铸温度, °C	1476	1478	1478	1476	1475	1475	1477	1477	1476	1476
产品中的氧含量, ppm	4.8	4.3	4.4	4.5	5.1	5.1	4.1	4.4	4.9	4.6
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂物数目	15	14	21	17	25	19	16	12	20	19
夹杂体的最大预测直径, μm	14.1	13.7	14.1	13.2	12.5	14.3	13.8	12.5	12.8	14.7
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	8.6	10.6	10.7	10.0	7.0	9.3	9.9	9.4	8.9	9.4
评价结果	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

◎: 优秀

表 B6 示出根据本发明对 10 炉 SCM 435 钢进行 W-RH 处理+短 LF、长 RH 操作的一个例子。

表 B6

操作 编号	W-RH+短 LF、长 RH (B <sub>6</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
钢号	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435
出炉温度: 熔点+°C	56	70	78	67	76	63	74	63	64	72
第一个 RH: 时间, 分钟	9	14	12	12	15	13	8	14	15	10
第一个 RH: 循环量, 倍数	3.0	4.7	4.0	4.0	5.0	4.3	2.7	4.7	5.0	3.3
第一个 RH: 脱氧剂加入量, kg/t	2.4	2.8	1.6	2.7	2.2	3	2.5	3	2.9	1.9
LF: 时间, 分钟	40	38	42	41	37	42	36	43	38	35
LF: 终温, °C	1585	1578	1581	1579	1582	1579	1585	1583	1577	1577
第二个 RH: 时间, 分钟	31	55	34	32	31	54	37	53	52	46
第二个 RH: 循环量, 倍数	10.3	18.3	11.3	10.7	10.3	18.0	12.3	17.7	17.3	15.3
第二 RH: 终温, °C	1524	1520	1523	1524	1524	1522	1525	1525	1524	1523
浇铸温度, °C	1516	1513	1514	1515	1515	1515	1515	1516	1516	1514
产品中的氧含量, ppm	6.3	6.4	6.1	6.4	6	6.5	6.5	6.4	6.4	6.4
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	14	12	11	15	14	15	10	14	11	15
夹杂体的最大预测直径, μm	24	22.7	22.2	22.2	23	23.7	23.7	22.5	23.4	22.1
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	7.9	8.8	10.1	9.7	7.7	6.9	8.3	9.4	9.5	8.0
评价结果	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

◎: 优秀

表 B7 示出根据本发明对 10 炉 SUJ 2 钢进行 W-RH 处理+高温出钢+短 LF、长 RH 操作的一个例子。

表 B7

操作	W-RH+高温出钢+短 LF、长 RH (A <sub>4</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2
钢号	140	182	170	149	189	166	163	182	142	157
出炉温度: 熔点+°C	13	14	8	13	8	17	15	18	14	11
第一个 RH: 时间, 分钟	4.3	4.7	2.7	4.3	2.7	5.7	5.0	6.0	4.7	3.7
第一个 RH: 循环量, 倍数	1.2	2.2	0.5	2.1	2.1	1.6	2.5	2.4	0.9	1.1
第一个 RH: 脱氧剂加入量, kg/t	37	40	40	43	37	37	44	38	33	39
LF: 时间, 分钟	1541	1546	1546	1543	1540	1545	1542	1544	1540	1542
LF: 终温, °C	49	56	53	59	53	55	46	49	58	56
第二个 RH: 时间, 分钟	15.8	19.2	17.1	19.7	17.6	18.3	15.7	15.9	20.0	19.4
第二个 RH: 循环量, 倍数	1501	1502	1496	1493	1502	1499	1492	1495	1501	1501
第二个 RH: 终温, °C	1477	1478	1475	1477	1478	1477	1478	1475	1476	1476
浇铸温度, °C	4.6	4.1	4.5	4	4.3	4.2	3.7	4.5	3.8	3.9
产品中的氧含量, ppm	2	5	6	7	8	8	8	5	2	4
在 100g 钢产品中不小于 20 $\mu$ m 的夹杂体数目	11.7	11	11.8	10.9	10.5	10.3	11.2	12.1	10.9	10.4
夹杂体的最大预测直径, $\mu$ m	9.7	12.2	11.0	12.6	11.3	10.9	11.5	10.2	10.8	11.1
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>4</sup> )	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
评价结果										

◎: 优秀

表 B8 示出根据本发明对 10 炉 SCM 435 钢进行 W-RH 处理+高温出钢+短 LF、长 RH 操作的一个例子。

表 B8

操作	W-RH+高温出钢+短 LF、长 RH (B <sub>4</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
钢号	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435
出炉温度: 熔点+°C	136	131	137	106	107	102	136	138	105	134
第一个 RH: 时间, 分钟	18	8	9	16	11	8	17	8	15	14
第一个 RH: 循环量, 倍数	6	2.67	3.00	5.33	3.67	2.67	5.67	2.67	5.00	4.67
第一个 RH: 脱氧剂加入量, kg/t	2.4	2.1	1	2.5	1.3	1.6	0.8	1.4	0.8	2.3
LF: 时间, 分钟	33	37	44	42	40	35	39	40	34	34
LF: 终温, °C	1577	1581	1577	1576	1579	1586	1582	1585	1579	1584
第二个 RH: 时间, 分钟	39	39	42	42	40	44	37	39	38	41
第二个 RH: 循环量, 倍数	13.0	13.5	14.0	13.5	12.4	14.3	12.7	13.3	12.2	12.9
第二 RH: 终温, °C	1541	1538	1532	1539	1541	1537	1540	1537	1532	1539
浇铸温度, °C	1515	1518	1521	1513	1518	1520	1521	1519	1511	1520
产品中的氧含量, ppm	6.0	5.8	5.3	5.2	5.6	4.7	5.5	5.5	5.8	5.6
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	5	3	6	8	8	6	2	5	4	3
夹杂体的最大预测直径, μm	22.0	21.3	20.3	20.5	23.4	20.0	22.9	22.1	23.2	21.8
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	10.4	10.6	9.8	9.6	10.0	11.0	9.2	9.1	10.2	9.9
评价结果	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

◎: 优秀

为了与本发明对比,表 B9 示出根据现有技术对 SUJ 2 钢进行操作的一个例子,表 B10 示出根据现有技术对 SCM 435 钢进行操作的一个例子

表 B9

操作	传统操作(现有技术)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2
出炉温度: 熔点+°C	57	72	58	60	74	75	51	65	62	68
第一个 RH: 时间, 分钟	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
第一个 RH: 循环量, 倍数	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
第一个 RH: 脱氧剂加入量, kg/t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LF: 时间, 分钟	61	61	63	61	62	62	61	63	61	63
LF: 终温, °C	1525	1524	1526	1525	1523	1524	1523	1520	1525	1520
第二个 RH: 时间, 分钟	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
第二个 RH: 循环量, 倍数	5.7	6.7	7.1	6.5	6.2	5.7	7	5.5	6.8	6.2
第二个 RH: 终温, °C	1493	1502	1501	1497	1501	1501	1502	1503	1496	1499
浇铸温度, °C	1477	1475	1475	1475	1475	1475	1476	1478	1478	1476
产品中的氧含量, ppm	5.4	5.1	5.1	6.1	5.8	5.9	5.8	5.9	5.2	6.2
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	59	56	54	65	48	41	50	47	45	49
夹杂体的最大预测直径, μm	86.4	61.2	66.3	97.6	81.2	76.7	92.8	76.7	72.8	74.4
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	1.9	2.4	2.4	1.8	1.9	3.4	1.9	2.2	2.0	2.2
评价结果	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

x: 差

表 B10

操作	传统操作(现有技术)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM
钢号	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435
出炉温度: 熔点, °C	61	54	69	50	74	58	58	69	64	54
第一个 RH: 时间, 分钟	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
第一个 RH: 循环量, 倍数	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
第一个 RH: 脱氧剂加入量, kg/t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LF: 时间, 分钟	62	63	61	61	61	63	63	63	61	61
LF: 终温, °C	1570	1574	1566	1572	1567	1569	1567	1569	1569	1570
第二个 RH: 时间, 分钟	23	23	23	20	21	23	21	23	23	24
第二个 RH: 循环量, 倍数	6.8	7.5	7.0	8.3	6.2	6.0	7.4	8.0	7.3	6.7
第二 RH: 终温, °C	1533	1538	1541	1540	1541	1533	1535	1534	1531	1531
浇铸温度, °C	1517	1519	1520	1518	1517	1511	1516	1512	1512	1521
产品中的氧含量, ppm	7.6	9.2	9.2	8.8	6.9	8.3	6.9	8.3	9.4	9.1
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	49	54	59	52	42	57	56	53	53	42
夹杂体的最大预测直径, μm	68.4	82.8	73.6	70.4	55.2	83.0	55.2	83.0	84.6	91.0
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	1.0	1.3	1.1	1.9	2.3	1.5	2.0	1.2	1.2	1.9
评价结果	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

x: 差

从表 B1-B8 可以清楚地看出：对于根据本发明进行 W-RH 处理生产的钢产品，其中，对电弧熔化炉或转炉中生成的钢水进行预脱气，然后转移到钢包炉中进行精炼，然后将钢水通过循环式真空脱气装置循环脱气，在高于传统操作温度（即，熔点+至少 100℃）下采用 W-RH 处理+高温出钢组合操作时，采用缩短钢包炉中的操作时间的 W-RH 处理+短 LF、长 RH 处理的组合操作时，并且在循环脱气过程中增加循环 RH 的量（即，循环钢水量/钢水总量）进行令人满意地长时间脱气时，及采用所有上述处理步骤的组合，即，W-RH 处理+高温出钢+短 LF、长 RH 处理时，无论是 SUJ 2 钢还是 SCM 435 钢，都能够降低产品的氧含量，还能够大幅减少粒度不小于 20 μm 的夹杂体数目。从表 B1-B8 还可以看出：至于洁净度，对于本发明的例子来说，所有的钢产品都被评价为良好 (O) 和优秀 (◎)，即，都是优秀的高洁净度钢。相反，从表 B9 和 B10 可以看出：对于所有传统的例子，其洁净度被评价为差 (x)，传统的钢产品不能说成是洁净钢。

对于进行了 W-RH 处理的各炉钢产品，氧含量和最大夹杂体直径的预测值都因  $T_{sh}[(\text{钢水转移至钢包炉时的温度})-(\text{钢水的熔点})=T_{sh}]$  的增加而降低，从而改进了钢的洁净度。对于进行了 W-RH 处理的钢产品，钢包炉内的精炼时间与氧含量和最大夹杂体直径的预测值之间的关系是：当精炼时间不小于约 25 分钟时，氧含量和最大夹杂体直径的预测值都能令人满意地降低。但是最大夹杂体直径的预测值却随着精炼时间的增加而增加。可以认为其原因如下：随着时间的延长，钢包精炼炉内耐火材料的熔化损失量增加，矿渣系统的平衡被打破，例如，这是因为和空气接触而产生的氧化反应和溶解的氧量超过了溶解氧的最小值。另外，在循环式真空脱气装置中循环钢水量/钢水总量与氧含量和最大夹杂体直径的预测值之间的关系是：洁净度的提高效应随循环钢水量的增加而增加，当循环钢水量/钢水总量不小于 15 时，这种效应基本上达到饱和状态。

已经证明：降低氧含量和最大夹杂体直径的预测值能够改进  $L_{10}$  寿命。这意味着用本发明的方法生产的氧含量和最大夹杂体直径的预测值都降低了的钢具有优秀的疲劳强度性能如优秀的滚动疲劳寿命。

图 B1 是示出在本发明的生产方法中进行 W-RH 处理的 10 炉钢产品的氧含量的折线图，在对 SUJ 2 钢水进行处理的过程中，在钢包精炼前预脱

气，在钢包精炼后将钢水进行再脱气，图 B1 还示出在传统方法中不进行预脱氧的 10 炉 SUJ 2 钢产品的氧含量。在图 B1、B3 和 B5 中，A<sub>1</sub> 示出只采用根据本发明权利要求 8 定义的 W-RH 处理时的数据，A<sub>2</sub> 示出根据本发明权利要求 9 定义的 W-RH 处理+高温出钢时的数据，A<sub>3</sub> 示出根据本发明权利要求 10 定义的 W-RH 处理+短时间 LF、长时间 RH 处理时的数据，A<sub>4</sub> 示出根据本发明权利要求 10 定义的 W-RH 处理+高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理时的数据，这些图中还示出现有技术中不进行预脱气的传统数据。

图 B2 是示出在本发明的生产方法中进行 W-RH 处理的 10 炉钢产品的氧含量的折线图，在对 SCM 435 钢水进行处理的过程中，在钢包精炼前预脱气，在钢包精炼后将钢水进行再脱气，图 B2 还示出在传统方法中不进行预脱氧的 10 炉 SCM 435 钢产品的氧含量。在图 B2、B4 和 B6 中，B<sub>1</sub> 示出只采用根据本发明权利要求 8 定义的 W-RH 处理时的数据，B<sub>2</sub> 示出根据本发明权利要求 9 定义的 W-RH 处理+高温出钢时的数据，B<sub>3</sub> 示出根据本发明权利要求 10 定义的 W-RH 处理+短时间 LF、长时间 RH 处理时的数据，B<sub>4</sub> 示出根据本发明权利要求 10 定义的 W-RH 处理+高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理时的数据，这些图中还示出现有技术中不进行预脱气的传统数据。

图 B3 是示出在本发明的生产方法中进行 W-RH 处理的 10 炉钢产品中根据这些极值统计得到的最大预测夹杂体直径的折线图，在对 SUJ 2 钢水进行处理的过程中，在钢包精炼前预脱气，在钢包精炼后将钢水进行再脱气，图 B3 还示出根据传统方法不进行脱氧的 10 炉 SUJ 2 钢产品中的最大预测夹杂体直径。

图 B4 是示出在本发明的生产方法中进行 W-RH 处理的 10 炉钢产品中根据这些极值统计得到的最大预测夹杂体直径的折线图，在对 SCM 435 钢水进行处理的过程中，在钢包精炼前预脱气，在钢包精炼后将钢水进行再脱气，图 B4 还示出根据传统方法不进行脱氧的 10 炉 SCM 435 钢产品中的最大预测夹杂体直径。

图 B5 是示出在本发明的生产方法中进行 W-RH 处理的 10 炉钢产品的根据止推辊使用寿命实验测定的 L<sub>10</sub> 寿命的折线图，在对 SUJ 2 钢水进行处理的过程中，在钢包精炼前预脱气，在钢包精炼后将钢水进行再脱气，

图 B5 还示出根据传统方法不进行脱氧的 10 炉 SUJ 2 钢产品的  $L_{10}$  寿命。

图 B6 是示出在本发明的生产方法中进行 W-RH 处理的 10 炉钢产品的根据止推辊使用寿命实验测定的  $L_{10}$  寿命的折线图，在对 SCM 435 钢水进行处理的过程中，在钢包精炼前预脱气，在钢包精炼后将钢水进行再脱气，图 B6 还示出根据传统方法不进行脱氧的 10 炉 SCM 435 钢产品的  $L_{10}$  寿命。

由这些实验结果可以充分证明：根据本发明的生产方法，W-RH 处理，其中在钢包精炼前进行预脱气并且在钢包精炼后将钢水进行再脱气无论对 SUJ 2 钢还是对 SCM 435 钢都能大幅降低产品的氧含量和最大夹杂体直径的预测值，能够大幅提高其洁净度，能够大幅改进根据止推辊使用寿命实验测定的  $L_{10}$  寿命。在钢的生产方法中加上这些处理步骤，即，只加上根据本发明权利要求 8 定义的 W-RH 处理步骤、加上根据本发明权利要求 9 定义的 W-RH 处理+高温出钢步骤、加上根据本发明权利要求 10 定义的 W-RH 处理+短时间 LF、长时间 RH 处理步骤、或加上 W-RH 处理+高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理步骤能够大幅改进所有产品的氧含量、最大夹杂体直径的预测值和根据止推辊使用寿命实验测定的  $L_{10}$  寿命。

从上述说明可以清楚地看出：根据本发明可以大量生产洁净度非常高的钢产品，并且不必使用成本非常高的重熔工艺。这样就可以提供高洁净度钢，其适用作要求具有疲劳强度、疲劳寿命的机械零件用钢，特别适用作如滚动轴承用钢、恒速结头用钢、齿轮用钢、环形连续变速传动用钢、用于冷锻的机械结构用钢、工具钢和弹簧钢，还能够提供高洁净度钢的生产方法，即，本发明具有预想不到的优点。

### 实施例 C

在电弧熔化炉中氧化精炼钢水。然后在同一个炉子中向精炼后的钢水中加入脱氧剂如铝和硅，使钢水脱氧。将预脱氧的钢水转移到钢包炉中进行钢包精炼。精炼后的钢水在循环式真空脱气装置中脱气，然后用浇铸法进行钢锭生产工艺。对这样得到的 10 炉 JIS SUJ 2 和 SCM 435 钢产品进行检测，测定产品中的氧含量、根据极值的统计学计算得到的最大夹杂体直径的预测值和根据止推辊使用寿命实验测定的  $L_{10}$  使用寿命。在测定最大夹杂体直径的预测值时，从  $\phi 65$  锻材上取下一个实验片，对 30 个实验片进行  $100\text{mm}^2$  的观察，根据这些极值的统计学原理预测  $30000\text{mm}^2$  中的最大

夹杂体直径。在止推辊使用寿命实验中，首先将尺寸为  $\phi 60 \times \phi 20 \times 8.3T$  的实验片进行渗碳、淬火硬化和回火，然后在 4900MPa 的最大赫兹应力  $P_{max}$  下进行实验，然后通过计算确定  $L_{10}$  使用寿命。

表 C1 示出根据本发明对 10 炉 SUJ 2 钢在电弧熔化炉或转炉中氧化精炼然后在同一个炉子中进行脱氧操作(下面将其称为“炉内脱氧”)，即，只进行炉内脱氧的一个例子。

表 C1

操作	炉内脱氧(A <sub>1</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2
钢号	3.7	2	4.6	4.3	3.6	5	5.9	4.9	4.4	4.9
炉内脱氧时脱氧剂(Si、Mn、Al 等)的加入量, kg/t	59	67	70	52	55	71	69	69	58	69
出炉温度: 熔点+°C	59	57	53	54	57	57	54	58	53	53
LF:时间, 分钟	1524	1520	1520	1526	1520	1520	1524	1521	1525	1521
LF:终温, °C	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
RH:时间, 分钟	7.1	6.3	7	6.1	7.1	6.8	6.7	5.9	6.7	7.2
RH:循环量, 倍数	1497	1499	1500	1494	1500	1494	1496	1498	1496	1499
RH:终温, °C	1478	1475	1477	1477	1475	1475	1476	1475	1475	1475
浇铸温度, °C	4.8	5.2	5.	5.6	4.6	4.8	4.6	5.7	5	5
产品中的氧含量, ppm	29	40	32	25	30	26	37	27	27	34
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	48	41.6	50	56	36.8	43.2	41.4	51.3	50	50
夹杂体的最大预测直径, μm	2.5	1.9	2.4	2.6	2.1	2.7	2.2	1.8	2.2	1.8
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
评价结果										

△: 一般

表 C2 示出根据本发明对 10 炉 SCM 435 钢只进行炉内脱氧操作的一个例子。

表 C2

操作 编号	炉内脱氧(B <sub>1</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
钢号	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435
炉内脱氧时脱氧剂(Si、Mn、Al 等)的加入量, kg/t	5.4	5.7	2.3	2.7	4.7	2.5	5.1	5.3	5.4	5.1
出炉温度: 熔点+°C	60	65	66	54	63	64	57	61	60	51
LF: 时间, 分钟	60	54	54	52	58	52	54	56	57	56
LF: 终温, °C	1575	1572	1570	1570	1565	1572	1568	1566	1567	1572
RH: 时间, 分钟	20	20	20	24	21	23	21	20	21	23
RH: 循环量, 倍数	6.7	6.2	6.5	6.6	6.3	7.3	7.1	6.9	5.7	5.8
RH: 终温, °C	1540	1540	1535	1534	1541	1539	1541	1536	1536	1533
浇铸温度, °C	1520	1517	1521	1518	1515	1519	1520	1520	1514	1520
产品中的氧含量, ppm	8.5	8.3	8.1	7.1	7.0	7.3	8.0	8.1	6.7	6.9
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数 目	35	28	25	32	29	27	37	32	38	33
夹杂体的最大预测直径, μm	51.0	58.1	48.6	49.7	42.0	51.1	56.0	48.6	40.2	48.3
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	1.5	1.8	2.1	1.8	2.3	1.7	1.6	2.5	2.2	2.3
评价结果	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△

△ : 一般

表 C3 示出根据本发明对 10 炉 SUJ 2 钢进行炉内脱氧+高温出钢操作的一个例子。

表 C3

操作	炉内脱氧+高温出钢 (A <sub>0</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2
钢号	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2
炉内脱氧时脱氧剂(Si、Mn、Al 等)的加入量, kg/t	3.1	2	3.2	4.6	2	4.8	2.1	3	3.3	4.1
出炉温度: 熔点+°C	187	178	124	143	178	142	175	163	180	142
LF:时间, 分钟	54	59	57	59	60	60	57	59	56	54
LF:终温, °C	1523	1525	1522	1526	1525	1520	1524	1525	1522	1520
RH:时间, 分钟	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
RH:循环量, 倍数	7.2	6.1	6.3	7	6.7	5.5	6.4	5.9	5.8	6
RH:终温, °C	1501	1503	1500	1499	1496	1496	1498	1493	1492	1499
浇铸温度, °C	1477	1476	1478	1475	1475	1475	1475	1478	1476	1478
产品中的氧含量, ppm	4.8	4.5	4.6	4.6	4.7	5.1	4.6	4.9	4.9	4.7
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	19	19	19	18	26	30	24	22	30	24
夹杂体的最大预测直径, μm	19.2	22.5	18.4	23	23.5	25.5	18.4	19.6	24.5	18.8
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	4.0	3.8	4.4	3.9	4.3	4.3	3.9	4.1	3.7	3.7
评价结果	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0: 良好

表 C4 示出根据本发明对 10 炉 SCM 435 钢进行炉内脱氧+高温出钢操作的一个例子。

表 C4

操作	炉内脱氧+高温出钢(B <sub>2</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM
钢号	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435
炉内脱氧时脱氧剂(Si、Mn、Al 等)的加入量, kg/t	5.2	5	6	6	1.9	5.8	4.8	4.8	3.4	2.7
出炉温度: 熔点+°C	124	140	123	109	112	117	123	116	104	143
LF: 时间, 分钟	54	45	55	49	48	52	48	45	45	54
LF: 终温, °C	1567	1566	1573	1575	1575	1572	1566	1565	1567	1567
RH: 时间, 分钟	22	24	22	24	20	21	24	21	23	24
RH: 循环量, 倍数	7.2	6.5	5.6	6.8	6.7	5.9	6.4	7.2	6.3	6.5
RH: 终温, °C	1535	1539	1532	1538	1538	1536	1538	1533	1541	1541
浇铸温度, °C	1513	1513	1520	1514	1518	1521	1521	1521	1518	1518
产品中的氧含量, ppm	7.2	6.8	7.0	7.0	6.4	6.8	7.5	7.3	6.5	6.1
在 100g 钢产品中不小于 20 $\mu$ m 的夹杂体数目	30	16	19	23	29	30	30	21	25	26
夹杂体的最大预测直径, $\mu$ m	39.0	38.1	37.1	38.5	37.8	39.8	39.0	39.4	33.8	32.9
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	2.8	3.3	2.9	3.5	3.1	3.5	3.3	3.0	3.7	3.6
评价结果	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0: 良好

表 C5 示出根据本发明对 10 炉 SUJ 2 钢进行炉内脱氧+短 LF、长 RH 操作的一个例子。

表 C5

操作	炉内脱氧+短 LF、长 RH (A <sub>3</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2
钢号	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2
炉内脱氧时脱氧剂(Si、Mn、Al 等)的加入量, kg/t	4.7	5	4.4	2.3	2.6	2	4.5	2.3	3.6	4.5
出炉温度: 熔点+°C	67	79	59	78	64	72	75	75	69	72
LF: 时间, 分钟	43	31	45	40	37	35	41	30	37	45
LF: 终温, °C	1546	1543	1545	1544	1545	1541	1544	1545	1546	1545
RH: 时间, 分钟	53	56	56	59	59	59	60	56	56	58
RH: 循环量, 倍数	17.7	18.7	18.7	19.7	19.7	19.7	20.0	18.7	18.7	19.3
RH: 终温, °C	1508	1502	1508	1510	1505	1508	1509	1508	1506	1506
浇铸温度, °C	1476	1477	1477	1478	1478	1478	1475	1477	1478	1475
产品中的氧含量, ppm	4.9	4.4	4.6	4.5	4.1	5.1	5	4.3	5	5.1
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	29	27	27	25	26	29	29	22	20	24
夹杂体的最大预测直径, μm	18	18	22.8	21.1	20.8	20.5	18.2	20.6	22.6	18.7
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	5.7	5.9	5.1	5.4	5.7	5.5	5.8	5.6	5.2	6.0
评价结果	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0: 良好

表 C6 示出根据本发明对 10 炉 SCM 435 钢进行炉内脱氧+短 LF、长 RH 操作的一个例子。

表 C6

操作	炉内脱氧+短 LF、长 RH(B <sub>3</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
钢号	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435
炉内脱氧时脱氧剂(Si、Mn、Al 等)的加入量, kg/t	3.9	4.4	2.7	4.5	3.6	3	2.6	2.5	2.2	5.8
出炉温度: 熔点+°C	66	62	56	71	58	70	80	75	62	62
LF: 时间, 分钟	41	44	44	44	42	39	44	39	43	38
LF: 终温, °C	1581	1577	1584	1582	1577	1578	1579	1583	1583	1578
RH: 时间, 分钟	39	41	37	43	43	44	38	37	38	45
RH: 循环量, 倍数	13.0	13.7	12.3	14.3	14.3	14.7	12.7	12.3	12.7	15.0
RH: 终温, °C	1540	1534	1536	1534	1539	1532	1537	1533	1540	1533
浇铸温度, °C	1513	1513	1516	1514	1514	1515	1514	1514	1515	1514
产品中的氧含量, ppm	7	7.1	7.3	7.4	7.3	6.5	7	6.9	6.9	6.7
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂物数目	25	28	25	25	24	23	24	25	26	23
夹杂体的最大预测直径, μm	23.7	20.7	24.6	22.7	22.9	23.7	22.8	21.7	24.8	24.6
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	4.5	5.1	4.4	4.8	4.9	5.1	4.8	4.8	4.3	5.7
评价结果	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0: 良好

表 C7 示出根据本发明对 10 炉 SUJ 2 钢进行炉内脱氧+高温出钢+短 LF、长 RH 操作的一个例子。

表 C7

操作	炉内脱氧+高温出钢+短 LF、长 RH(A <sub>4</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2
炉内脱氧时脱氧剂(Si、Mn、Al 等)的加入量, kg/t	2.8	2.4	3.6	5.6	3.1	1.5	2.1	5.9	3.1	1.6
出炉温度: 熔点+°C	133	149	162	164	119	138	122	163	137	143
LF: 时间, 分钟	39	36	36	42	43	37	38	30	42	37
LF: 终温, °C	1546	1543	1545	1544	1545	1541	1544	1545	1546	1545
RH: 时间, 分钟	53	53	53	53	56	52	57	53	52	56
RH: 循环量, 倍数	17.7	18.3	17.8	17.1	18.7	17.9	18.4	17.5	16.7	19.3
RH: 终温, °C	1495	1497	1503	1502	1501	1503	1497	1503	1500	1503
浇铸温度, °C	1475	1476	1476	1477	1475	1478	1476	1477	1478	1477
产品中的氧含量, ppm	4.8	4.2	4.7	4.7	4.4	4.1	4.4	4.8	4.5	4.2
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	14	6	8	9	6	14	13	8	15	14
夹杂体的最大预测直径, μm	14.3	13.6	14.1	14.8	13.2	13.7	13.2	14.4	14.8	12.6
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	7.8	9.0	8.7	8.7	10.6	9.7	10.8	9.4	9.8	10.0
评价结果	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

◎: 优秀

表 C8 示出根据本发明对 10 炉 SCM 435 钢进行炉内脱氧+高温出钢+短 LF、长 RH 操作的一个例子。

表 C8

操作 编号	炉内脱氧+高温出钢+短 LF、长 RH (B <sub>0</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
钢号	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435
炉内脱氧时脱氧剂(Si、Mn、Al 等)的加入量, kg/t	4.3	4	1.7	2.2	4.1	2.3	4.5	4.6	1.5	2.1
出炉温度: 熔点+°C	134	132	117	107	132	137	128	109	116	102
LF: 时间, 分钟	39	33	30	41	30	36	32	35	35	44
LF: 终温, °C	1577	1581	1577	1585	1584	1582	1582	1576	1582	1584
RH: 时间, 分钟	39	39	36	42	38	42	38	40	39	41
RH: 循环量, 倍数	11.9	12.7	12.1	13.1	11.0	14.0	11.7	12.2	12.3	12.7
RH: 终温, °C	1534	1540	1534	1540	1541	1532	1539	1531	1538	1532
浇铸温度, °C	1512	1513	1516	1513	1513	1515	1512	1516	1514	1518
产品中的氧含量, ppm	6.3	5.5	5.5	5.4	6.0	6.0	5.6	6.5	5.7	5.6
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	13	6	11	9	5	8	11	14	10	14
夹杂体的最大预测直径, μm	24.0	23.5	23.3	22.5	23.9	23.7	23.8	24.6	23.7	23.6
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	9.2	8.8	10.1	9.7	10.3	8.7	9.8	9.9	10.7	9.9
评价结果	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

◎: 优秀

为了与本发明对比,表 C9 示出根据现有技术对 SUJ 2 钢进行操作的一个例子,表 C10 示出根据现有技术对 SCM 435 钢进行操作的一个例子

表 C9

操作	传统操作(现有技术)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
钢号	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2
炉内脱氧时脱氧剂(Si、Mn、Al 等)的加入量, kg/t	57	72	58	60	74	75	51	65	62	68
出炉温度: 熔点+°C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LF: 时间, 分钟	61	61	63	61	62	62	61	63	61	63
LF: 终温, °C	1525	1524	1526	1525	1523	1524	1523	1520	1525	1520
RH: 时间, 分钟	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
RH: 循环量, 倍数	5.7	6.7	7.1	6.5	6.2	5.7	7	5.5	6.8	6.2
RH: 终温, °C	1493	1502	1501	1497	1501	1501	1502	1503	1496	1499
浇铸温度, °C	1477	1475	1475	1475	1475	1475	1476	1478	1478	1476
产品中的氧含量, ppm	5.4	5.1	5.1	6.1	5.8	5.9	5.8	5.9	5.2	6.2
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	59	56	54	65	48	41	50	47	45	49
夹杂体的最大预测直径, μm	86.4	61.2	66.3	97.6	81.2	76.7	92.8	76.7	72.8	74.4
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	1.9	2.4	2.4	1.8	1.9	3.4	1.9	2.2	2.0	2.2
评价结果	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

x: 差

表 C10

操作	传统操作 (现有技术)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
钢号	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435
炉内脱氧时脱氧剂(Si、Mn、Al等)的加入量, kg/t	61	54	69	50	74	58	58	69	64	54
出炉温度: 熔点+℃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LF:时间, 分钟	62	63	61	61	61	63	63	63	61	61
LF:终温, °C	1570	1574	1566	1572	1567	1569	1567	1569	1569	1570
RH:时间, 分钟	23	23	23	20	21	23	21	23	23	24
RH:循环量, 倍数	6.8	7.5	7.0	8.3	6.2	6.0	7.4	8.0	7.3	6.7
RH:终温, °C	1533	1538	1541	1540	1541	1533	1535	1534	1531	1531
浇铸温度, °C	1517	1519	1520	1518	1517	1511	1516	1512	1512	1521
产品中的氧含量, ppm	7.6	9.2	9.2	8.8	6.9	8.3	6.9	8.3	9.4	9.1
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	49	54	59	52	42	57	56	53	53	42
夹杂体的最大预测直径, μm	68.4	82.8	73.6	70.4	55.2	83.0	55.2	83.0	84.6	91.0
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	1.0	1.3	1.1	1.9	2.3	1.5	2.0	1.2	1.2	1.9
评价结果	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

x:差

从表 C1-C8 可以清楚地看出：对于根据本发明生产的钢产品，其中，在电弧熔化炉或转炉中生成的钢水在同一个炉子中进行炉内脱氧，然后转移到钢包炉中进行精炼，然后通过循环式真空脱气装置循环以使钢水脱气，在高于传统操作温度（即，熔点+至少 100℃）下采用炉内脱氧+高温出钢组合操作时，采用缩短钢包炉中的操作时间的炉内脱氧+短 LF、长 RH 处理的组合操作时，并且在循环脱气过程中增加循环 RH 的量（即，循环钢水量/钢水总量）进行令人满意地长时间脱气时，及采用所有上述处理步骤的组合，即，炉内脱氧+高温出钢+短 LF、长 RH 处理时，无论是 SUJ 2 钢还是 SCM 435 钢，都能够降低产品的氧含量，还能够大幅减少粒度不小于 20 μm 的夹杂体数目。从表 C1-C8 还可以看出：至于洁净度，对于本发明的例子来说，所有的钢产品都被评价为一般(△)、良好(○)或优秀(◎)，即，都是优秀的高洁净度钢。相反，从表 C9 和 C10 可以看出：对于所有传统的例子，其洁净度被评价为差(x)，传统的钢产品不能说成是洁净钢。在这一点上应当注意：一般(△)是与良好(○)和优秀(◎)相比较而言，如果与根据现有技术方法不进行出钢脱氧而被评价为差(x)的钢相比，这些被评价为一般(△)的钢则具有更高的洁净度。

对于进行了炉内脱氧的钢产品，氧含量和最大夹杂体直径的预测值都因  $T_{SH}$  [(钢水转移至钢包炉时的温度)-(钢水的熔点)= $T_{SH}$ ] 的增加而降低，从而改进了钢的洁净度。对于进行了炉内脱氧的钢产品，钢包炉内的精炼时间与氧含量和最大夹杂体直径的预测值之间的关系是：当精炼时间不小于约 25 分钟时，氧含量和最大夹杂体直径的预测值都能令人满意地降低。但是最大夹杂体直径的预测值却随着精炼时间的增加而增加。可以认为其原因如下：随着时间的延长，钢包精炼炉内耐火材料的熔化损失量增加，矿渣系统的平衡被打破，例如，这是因为和空气接触而产生的氧化反应和溶解的氧量超过了溶解氧的最小值。另外，在循环式真空脱气装置中循环钢水量/钢水总量与氧含量和最大夹杂体直径的预测值之间的关系是：洁净度的提高效应随循环钢水量的增加而增加，当循环钢水量/钢水总量不小于 15 时，这种效应基本上达到饱和状态。

已经证明：降低氧含量和最大夹杂体直径的预测值能够改进  $L_{10}$  寿命。这意味着用本发明的方法生产的氧含量和最大夹杂体直径的预测值都降

低了的钢具有优秀的疲劳强度性能如优秀的滚动疲劳寿命。

图 C1 是示出根据本发明的生产方法生产的 10 炉钢产品的氧含量的折线图，在对 SUJ 2 钢水进行处理的过程中，在电弧熔化炉或转炉中氧化精炼钢水，然后在出钢前在同一个炉子中加入脱氧剂，使钢水脱氧，将预脱氧的钢水转移到钢包炉中进行钢包精炼，然后通过循环式真空脱气装置进行循环以将钢水脱气，图 C1 还示出在传统方法中不进行炉内脱氧的 10 炉 SUJ 2 钢产品的氧含量。在图 C1、C3 和 C5 中，A<sub>1</sub> 示出只采用根据本发明专利权利要求 15 定义的炉内脱氧时的数据，A<sub>2</sub> 示出根据本发明专利权利要求 16 定义的炉内脱氧+高温出钢时的数据，A<sub>3</sub> 示出根据本发明专利权利要求 17 定义的炉内脱氧+短时间 LF、长时间 RH 处理时的数据，A<sub>4</sub> 示出根据本发明专利权利要求 17 定义的炉内脱氧+高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理时的数据，这些图中还示出现有技术中的传统数据。

图 C2 是示出根据本发明的生产方法生产的 10 炉钢产品的氧含量的折线图，在对 SCM 435 钢水进行处理的过程中，在电弧熔化炉或转炉中氧化精炼钢水，然后在出钢前在同一个炉子中加入脱氧剂，使钢水脱氧，将预脱氧的钢水转移到钢包炉中进行钢包精炼，然后在循环式真空脱气装置中将钢水脱气，图 C2 还示出在传统方法中不进行炉内脱氧的 10 炉 SCM 435 钢产品的氧含量。在图 3D、3F 和 4B 中，B<sub>1</sub> 示出只采用根据本发明专利权利要求 15 定义的炉内脱氧时的数据，B<sub>2</sub> 示出根据本发明专利权利要求 16 定义的炉内脱氧+高温出钢时的数据，B<sub>3</sub> 示出根据本发明专利权利要求 17 定义的炉内脱氧+短时间 LF、长时间 RH 处理时的数据，B<sub>4</sub> 示出根据本发明专利权利要求 17 定义的炉内脱氧+高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理时的数据，这些图中还示出现有技术中不进行炉内脱氧的传统数据。

图 C3 是示出在本发明的生产方法中根据权利要求 15-17 对 SUJ 2 钢水进行炉内脱氧处理的 10 炉钢产品中根据这些极值统计得到的最大预测夹杂体直径的折线图，图 C3 还示出根据传统方法不进行炉内脱氧的 10 炉 SUJ 2 钢产品中的最大预测夹杂体直径。

图 C4 是示出在本发明的生产方法中根据权利要求 15-17 对 SCM 435 钢水进行炉内脱氧处理的 10 炉钢产品中根据这些极值统计得到的最大预测夹杂体直径的折线图，图 C4 还示出根据传统方法不进行炉内脱氧的 10

炉 SCM 435 钢产品中的最大预测夹杂体直径。

图 C5 是示出在本发明的生产方法中根据权利要求 15-17 对 SUJ 2 钢水进行炉内脱氧处理的 10 炉钢产品的根据止推辊使用寿命实验测定的  $L_{10}$  寿命的折线图，图 C5 还示出根据传统方法不进行炉内脱氧的 10 炉 SUJ 2 钢产品的  $L_{10}$  寿命。

图 C6 是示出在本发明的生产方法中根据权利要求 15-17 对 SCM 435 钢水进行炉内脱氧处理的 10 炉钢产品的根据止推辊使用寿命实验测定的  $L_{10}$  寿命的折线图，图 C6 还示出根据传统方法不进行炉内脱氧的 10 炉 SCM 435 钢产品的  $L_{10}$  寿命。

由这些实验结果可以充分证明：根据本发明的生产方法，在电弧熔化炉或转炉中氧化精炼钢水，然后在出钢前在同一个炉子中加入脱氧剂，使钢水脱氧，将预脱氧的钢水转移到钢包炉中进行钢包精炼，然后在循环式真空脱气装置中将钢水脱气，无论对 SUJ 2 钢还是对 SCM 435 钢都能大幅降低产品的氧含量和最大夹杂体直径的预测值，能够大幅提高其洁净度，能够大幅改进根据止推辊使用寿命实验测定的  $L_{10}$  寿命。在钢的生产方法中加上这些处理步骤，即，只加上根据本发明权利要求 15 定义的炉内脱氧步骤、加上根据本发明权利要求 16 定义的炉内脱氧+高温出钢步骤、加上根据本发明权利要求 17 定义的炉内脱氧+短时间 LF、长时间 RH 处理步骤、或加上根据本发明权利要求 17 定义的炉内脱氧+高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理步骤能够大幅改进所有钢的氧含量、最大夹杂体直径的预测值和根据止推辊使用寿命实验测定的  $L_{10}$  寿命。

从上述说明可以清楚地看出：根据本发明可以大量生产洁净度非常高的钢产品，并且不必使用成本非常高的重熔工艺。这样就可以提供高洁净度钢，其适用作要求具有疲劳强度和疲劳寿命的机械零件用钢，特别适用作如滚动轴承用钢、恒速结头用钢、齿轮用钢、环形连续变速传动用钢，即，本发明具有预想不到的前所未有的优点。

#### 实施例 D

在电弧熔化炉中通过熔化法生成并氧化熔炼钢水，然后将钢水转移到钢包炉中进行钢包精炼，钢包精炼时间很短，不超过 60 分钟。然后进行不少于 25 分钟的脱气，具体来说，在循环式真空脱气装置中进行脱气的

条件是循环钢水量不小于钢水总量的 8 倍，然后用浇铸法进行钢锭生产工艺。对这样得到的 10 炉 JIS SUJ 2 和 SCM 435 钢产品进行检测，测定产品中的氧含量、根据极值的统计学计算得到的最大夹杂体直径的预测值和根据止推辊使用寿命实验测定的  $L_{10}$  使用寿命。在测定最大夹杂体直径的预测值时，从  $\phi 65$  锻材上取下一个实验片，对 30 个实验片进行  $100\text{mm}^2$  的观察，根据这些极值的统计学原理预测  $30000\text{mm}^2$  中的最大夹杂体直径。在止推辊使用寿命实验中，首先将尺寸为  $\phi 60 \times \phi 20 \times 8.3\text{T}$  的实验片进行渗碳、淬火硬化和回火，然后在  $4900\text{MPa}$  的最大赫兹应力  $P_{\text{max}}$  下进行实验，然后通过计算确定  $L_{10}$  使用寿命。

表 D1 示出对 10 炉 SUJ 2 钢进行下述操作的一个例子，在电弧熔化炉或转炉中氧化精炼钢水，然后将钢水转移到钢包炉中进行不超过 60 分钟的钢包精炼，然后在循环式真空脱气装置中进行不少于 25 分钟的脱气处理(在本申请中称为“短时间 LF、长时间 RH 或短 LF 或长 RH”)，即，进行短时间 LF、长时间 RH 处理。

表 D1

操作	短 LF、长 RH(A <sub>1</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
钢号	SUJ	SUJ	SUJ	SUJ	SUJ	SUJ	SUJ	SUJ	SUJ	SUJ
出炉温度: 熔点+°C	67	79	59	78	64	72	75	61	57	59
LF:时间, 分钟	43	31	45	40	37	35	41	30	37	45
LF:终温, °C	1546	1543	1545	1544	1526	1541	1544	1534	1530	1524
RH:时间, 分钟	53	56	56	59	29	59	60	44	38	27
RH:循环量, 倍数	17.7	18.7	18.7	19.7	9.0	19.7	20.0	13.7	11.9	8.5
RH:终温, °C	1508	1502	1508	1510	1505	1508	1509	1508	1506	1506
浇铸温度, °C	1476	1477	1477	1478	1478	1478	1475	1477	1478	1475
产品中的氧含量, ppm	4.9	4.4	4.6	4.5	5.3	5.1	5	4.8	5.2	5
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	29	27	27	25	30	29	29	26	27	28
夹杂体的最大预测直径, μm	18	18	22.8	21.1	22.9	20.5	18.2	20.6	20.1	21.7
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	5.7	5.1	4.1	4.9	4.6	4.1	5.3	4.2	4.7	4.7
评价结果	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0: 良好

表 D2 示出对 10 炉 SCM 435 钢进行下述操作的一个例子，在电弧熔化炉或转炉中氧化精炼钢水，然后将钢水转移到钢包炉中进行不超过 60 分钟的钢包精炼，然后在循环式真空脱气装置中进行不少于 25 分钟的脱气处理，即，进行短时间 LF、长时间 RH 处理。

表 D2

操作	短 LF、长 RH (B <sub>1</sub> )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435
钢号	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435
出炉温度: 熔点+°C	66	62	56	71	58	70	80	75	62	62
LF: 时间, 分钟	41	44	44	44	42	39	44	39	43	38
LF: 终温, °C	1581	1568	1584	1571	1577	1578	1579	1583	1572	1578
RH: 时间, 分钟	39	26	37	30	43	44	38	37	29	45
RH: 循环量, 倍数	13.0	8.2	12.3	9.5	14.3	14.7	12.7	12.3	8.8	15.0
RH: 终温, °C	1540	1534	1536	1534	1539	1532	1537	1533	1540	1533
浇铸温度, °C	1513	1513	1516	1514	1514	1515	1514	1514	1515	1514
产品中的氧含量, ppm	7	7.7	7.3	7.5	7.3	6.5	7	6.9	7.4	6.7
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数	25	29	25	27	24	23	24	25	28	23
夹杂体的最大预测直径, μm	23.7	24.8	24.6	24.1	22.9	23.7	22.8	21.7	24.2	24.6
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	2.9	2.3	3.9	3.4	3.4	3.5	3.8	4.0	3.0	3.9
评价结果	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0: 良好

表 D3 示出对 10 炉 SUJ 2 钢进行下述操作的一个例子，在电弧熔化炉或转炉中氧化精炼钢水，然后在至少比钢水熔点高 100°C 的高温下出钢（在本申请的说明书中称为“高温出钢”），将钢水转移到钢包炉中进行不超过 60 分钟的钢包精炼，然后在循环式真空脱气装置中进行不少于 25 分钟的脱气处理，即，进行短时间 LF、长时间 RH 处理+高温出钢。

表 D3

操作		高温出钢+短 LF、长 RH 处理(A <sub>2</sub> )									
编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
钢号	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	
出炉温度: 熔点+°C	133	149	162	164	119	138	122	163	137	143	
LF:时间, 分钟	39	36	36	42	43	37	38	30	42	37	
LF:终温, °C	1531	1543	1545	1537	1545	1541	1544	1533	1524	1531	
RH:时间, 分钟	41	53	53	48	56	52	57	38	29	35	
RH:循环量, 倍数	12.6	18.3	17.8	15.7	18.7	17.9	18.4	11.5	9.0	10.5	
RH:终温, °C	1495	1497	1503	1502	1501	1503	1497	1503	1500	1503	
浇铸温度, °C	1475	1476	1476	1477	1475	1478	1476	1477	1478	1477	
产品中的氧含量, ppm	4.8	4.2	4.7	4.7	4.4	4.1	4.4	4.8	4.5	4.2	
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	14	6	8	9	6	14	13	8	15	14	
夹杂体的最大预测直径, μm	14.3	13.6	14.1	14.8	13.2	13.7	13.2	14.4	14.8	12.6	
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	8.0	10.6	9.6	8.8	9.0	9.4	9.7	7.3	7.7	10.9	
评价结果	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	

◎: 优秀

表 D4 示出对 10 炉 SCM 435 钢进行下述操作的一个例子，在电弧熔化炉或转炉中氧化精炼钢水，然后在至少比钢水熔点高 100°C 的高温下出钢，将钢水转移到钢包炉中进行不超过 60 分钟的钢包精炼，然后在循环式真空脱气装置中进行不少于 25 分钟的脱气处理，即，进行短时间 LF、长时间 RH 处理+高温出钢。

表 D4

		高温出钢+短 LF、长 RH 处理 (B <sub>2</sub> )									
操作	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
钢号	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	
出炉温度: 熔点+°C	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	
LF: 时间, 分钟	134	132	117	107	132	137	128	109	116	102	
LF: 终温, °C	39	33	30	41	30	36	32	35	35	44	
RH: 时间, 分钟	1577	1581	1577	1585	1584	1582	1582	1576	1570	1569	
RH: 循环量, 倍数	39	39	36	42	38	42	38	33	28	29	
RH: 终温, °C	11.9	12.7	12.1	13.1	11.0	14.0	11.7	11.0	8.9	9.6	
浇铸温度, °C	1534	1540	1534	1540	1541	1532	1539	1531	1538	1532	
产品中的氧含量, ppm	1512	1513	1516	1513	1513	1515	1512	1516	1514	1518	
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	6.3	5.5	5.5	5.4	6.0	6.0	5.6	6.5	6.8	6.3	
夹杂体的最大预测直径, μm	13	6	11	9	5	8	11	14	14	14	
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	24.0	23.5	23.3	22.5	23.9	23.7	23.8	24.6	23.7	23.6	
评价结果	7.2	9.9	10.0	8.7	7.4	8.1	8.6	9.7	9.3	9.3	
	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	

◎: 优秀

为了与本发明对比, 表 D5 示出根据现有技术对 SUJ 2 钢进行操作的一个例子, 表 D6 示出根据现有技术对 SCM 435 钢进行操作的一个例子。

表 D5

操作	传统操作 (现有技术)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2	SUJ 2
钢号	70	70	79	58	77	76	73	55	58	60
出炉温度: 熔点+°C	74	74	68	75	64	71	66	70	65	74
LF: 时间, 分钟	1523	1524	1524	1524	1523	1520	1522	1520	1523	1524
LF: 终温, °C	20	21	21	21	20	18	20	19	23	22
RH: 时间, 分钟	6.7	7.0	7.0	7.0	6.7	6.0	6.7	6.3	7.7	7.3
RH: 循环量, 倍数	1494	1497	1492	1493	1498	1498	1492	1499	1497	1499
RH: 终温, °C	1476	1477	1478	1476	1475	1478	1478	1478	1475	1476
产品中的氧含量, ppm	5.7	5.7	5.8	5.2	6	5.1	5.3	5.2	5.6	6.3
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂物数目	47	44	42	54	46	53	44	45	44	43
夹杂体的最大预测直径, μm	76.3	77.2	68.2	68.5	82.3	63.9	76.5	91.3	70.3	68.5
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	3.5	2.4	1.8	2.7	2.9	3.8	4.1	3.1	2.4	1.8
评价结果	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

x: 差

表 D6

操作 编号	传统操作(现有技术)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
钢号	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435	SCM 435
出炉温度: 熔点+°C	61	62	60	61	56	57	63	62	62	63
LF: 时间, 分钟	63	64	66	64	68	67	71	62	75	69
LF: 终温, °C	1565	1567	1569	1572	1565	1569	1566	1566	1565	1571
RH: 时间, 分钟	19	19	18	21	18	23	19	20	18	20
RH: 循环量, 倍数	6.3	6.3	6.0	7.0	6.0	7.7	6.3	6.7	6.0	6.7
RH: 终温, °C	1535	1534	1536	1532	1541	1540	1535	1541	1539	1535
浇铸温度, °C	1516	1519	1511	1518	1515	1516	1515	1517	1515	1512
产品中的氧含量, ppm	9.5	6.5	5.3	5.5	6	6.3	6.3	6.3	5.7	5.2
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目	51	49	48	58	60	43	56	47	43	54
夹杂体的最大预测直径, μm	58.3	60.4	65.8	72.6	69.7	75.3	78.7	61	78.6	83.9
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )	0.9	1.8	2.3	1.1	1.7	1.4	1.4	2.4	2.3	1.7
评价结果	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

x: 差

从表 D1-D4 可以清楚地看出：对于根据本发明用短 LF、长 RH 处理生产的钢产品，其中，在电弧熔化炉或转炉中生成的钢水转移到钢包炉中进行短时间(即，不超过 60 分钟)的钢包精炼，然后通过循环式真空脱气装置循环钢水，增加 RH 循环量(即，循环钢水量/钢水总量)并进行长时间(即，不少于 25 分钟)脱气，在高于传统操作温度(即，熔点+至少 100℃)下采用短 LF、长 RH 处理+高温出钢组合操作生产的钢，无论是 SUJ 2 钢还是 SCM 435 钢，其氧含量都很低，这样还能够大幅减少粒度不小于 20 μm 的夹杂体数目。从表 D1-D4 还可以看出：对于本发明的例子来说，所有的钢产品都被评价为良好(o)或优秀(◎)，即，都是优秀的高洁净度钢。相反，从表 D5 和 D6 可以看出：对于所有传统的例子，其洁净度被评价为差(x)，传统的钢产品不能说成是洁净钢。

对于在电弧熔化炉或转炉中氧化熔炼钢水的钢来说，氧含量和最大夹杂体直径的预测值都因  $T_{SH}[(\text{钢水转移至钢包炉时的温度})-(\text{钢水的熔点})=T_{SH}]$  的增加而降低，从而改进了钢的洁净度。对于这些钢产品来说，钢包炉内的精炼时间与氧含量和最大夹杂体直径的预测值之间的关系是：当精炼时间不大于 60 分钟，如小于或等于约 25 分钟时，氧含量和最大夹杂体直径的预测值都能令人满意地降低。但是最大夹杂体直径的预测值却随着精炼时间的增加而增加。可以认为其原因如下：随着时间的延长，钢包精炼炉内耐火材料的熔化损失量增加，矿渣系统的平衡被打破，例如，这是因为和空气接触而产生的氧化反应和溶解的氧量超过了溶解氧的最小值。另外，在循环式真空脱气装置中循环钢水量/钢水总量与氧含量和最大夹杂体直径的预测值之间的关系是：洁净度的提高效应随循环钢水量的增加而增加，当循环钢水量/钢水总量不小于 15 时，这种效应基本上达到饱和状态。

已经证明：降低氧含量和最大夹杂体直径的预测值能够改进  $L_{10}$  寿命。这意味着用本发明的方法生产的氧含量和最大夹杂体直径的预测值都降低了的钢具有优秀的疲劳强度性能如优秀的滚动疲劳寿命。

图 D1 是示出根据本发明的生产方法生产的 10 炉钢产品的氧含量的折线图，在对 SUJ 2 钢水进行处理的过程中，在电弧熔化炉或转炉中通过熔化法生成并氧化精炼钢水，然后将钢水转移到钢包炉中进行短时间的钢包

精炼，然后进行长时间的循环式真空脱气，图 D1 还示出在传统方法中生产的 10 炉 SUJ 2 钢产品的氧含量，在传统方法中，在电弧熔化炉或转炉中通过熔化法生成并氧化精炼钢水，然后将钢水转移到钢包炉中进行长时间的钢包精炼，然后进行短时间的循环式真空脱气。在图 D1、D3 和 D5 中，A<sub>1</sub> 示出采用根据本发明权利要求 22 定义的短时间 LF、长时间 RH 处理时的数据，A<sub>2</sub> 示出根据本发明权利要求 23 定义的高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理组合时的数据，这些图中还示出根据传统方法的传统数据。

图 D2 是示出根据本发明的生产方法生产的 10 炉钢产品的氧含量的折线图，在对 SCM 435 钢水进行处理的过程中，在电弧熔化炉或转炉中通过熔化法生成并氧化精炼钢水，然后将钢水转移到钢包炉中进行短时间的钢包精炼，然后进行长时间的循环式真空脱气，图 D2 还示出在传统方法中生产的 10 炉 SCM 435 钢产品的氧含量，在传统方法中，在电弧熔化炉或转炉中通过熔化法生成并氧化精炼钢水，然后将钢水转移到钢包炉中进行长时间的钢包精炼，然后进行短时间的循环式真空脱气。在图 D1、D3 和 D5 中，A<sub>1</sub> 示出采用根据本发明权利要求 22 定义的短时间 LF、长时间 RH 处理时的数据，A<sub>2</sub> 示出根据本发明权利要求 23 定义的高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理组合时的数据，这些图中还示出根据传统方法的传统数据。

图 D3 是示出在本发明的生产方法中根据权利要求 22 或 23 的方法对 SUJ 2 钢水进行处理的 10 炉钢产品中根据极值统计得到的最大预测夹杂体直径的折线图，图 D3 还示出根据传统方法生产的 10 炉 SUJ 2 钢产品中根据这些极值统计得到的最大预测夹杂体直径，在传统处理 SUJ 2 钢水的方法中，进行长时间 LF、短时间 RH 处理。

图 D4 是示出在本发明的生产方法中根据权利要求 22 或 23 的方法对 SCM 435 钢水进行处理的 10 炉钢产品中根据极值统计得到的最大预测夹杂体直径的折线图，图 D4 还示出根据传统方法生产的 10 炉 SCM 435 钢产品中根据这些极值统计得到的最大预测夹杂体直径，在传统处理 SCM 435 钢水的方法中，进行长时间 LF、短时间 RH 处理。

图 D5 是示出在本发明的生产方法中根据权利要求 22 或 23 对 SUJ 2 钢水进行处理的 10 炉钢产品的根据止推辊使用寿命实验测定的 L<sub>10</sub> 寿命的折线图，图 D5 还示出根据传统方法生产的 10 炉 SUJ 2 钢产品的根据止推

辊使用寿命实验测定的  $L_{10}$  寿命，在传统处理 SUJ 2 钢水的方法中，进行长时间 LF、短时间 RH 处理。

图 D6 是示出在本发明的生产方法中根据权利要求 22 或 23 对 SCM 435 钢水进行处理的 10 炉钢产品的根据止推辊使用寿命实验测定的  $L_{10}$  寿命的数据，图 D6 还示出根据传统方法生产的 10 炉 SCM 435 钢产品的根据止推辊使用寿命实验测定的  $L_{10}$  寿命，在传统处理 SCM 435 钢水的方法中，进行长时间 LF、短时间 RH 处理。

由这些实验结果可以充分证明：根据本发明的生产方法，在电弧熔化炉或转炉中通过熔化法生成并氧化精炼钢水，然后将钢水转移到钢包炉中进行短时间的钢包精炼，然后通过循环式真空脱气装置循环钢水进行长时间的脱气，无论对 SUJ 2 钢还是对 SCM 435 钢都能大幅降低产品的氧含量和最大夹杂体直径的预测值，能够大幅提高其洁净度，能够大幅改进根据止推辊使用寿命实验测定的  $L_{10}$  寿命。在钢的生产方法中加上这些处理步骤，即，加上根据本发明权利要求 22 定义的短时间 LF、长时间 RH 处理步骤，或加上根据本发明权利要求 23 定义的高温出钢+短时间 LF、长时间 RH 处理步骤能够大幅改进所有钢的氧含量、最大夹杂体直径的预测值和根据止推辊使用寿命实验测定的  $L_{10}$  寿命。

从上述说明可以清楚地看出：根据本发明可以大量生产洁净度非常高的钢产品，并且不必使用成本非常高的重熔工艺。这样就可以提供高洁净度钢，其适用作要求具有疲劳强度、疲劳寿命和镇静度的机械零件用钢，特别适用作如滚动轴承用钢、恒速结头用钢、齿轮用钢、环形连续变速传动用钢、用于冷锻的机械结构用钢、工具钢和弹簧钢，还能够提供高洁净度钢的生产方法，即，本发明具有预想不到的前所未有的优点。

#### 实施例 E

在电弧炉中通过熔化法生成并氧化精炼 JIS SCM 435 钢水，然后将钢水转移到安装有电磁感应搅拌器的钢包炉中，总共进行 50-80 分钟的钢包精炼(在惰性气氛下的短时间气体搅拌+电磁搅拌)，然后将钢水脱气 20-30 分钟。具体来说，在循环式真空脱气装置中进行脱气的条件是循环钢水量不小于钢水总量的 12 倍，然后通过使用浇铸法的钢锭生产工艺生产 10 炉 SCM 435 钢产品。为了对比，在电弧炉中通过传统操作按照上述相同的方

式用熔化法生成并氧化精炼 JIS SCM 435 钢水，然后将钢水转移到钢包炉中，用气体搅拌钢水 35-50 分钟以进行钢包精炼，然后将钢水进行不超过 25 分钟的循环式脱气，然后通过使用浇铸法的钢锭生产工艺生产 10 炉 SCM 435 钢产品。对这样得到的这些钢产品进行检测，测定产品中的氧含量、根据极值的统计学计算得到的最大夹杂体直径的预测值和根据止推辊使用寿命实验测定的  $L_{10}$  使用寿命。在测定最大夹杂体直径的预测值时，从  $\phi 65$  锻材上取下一个实验片，对 30 个实验片进行  $100\text{mm}^2$  的观察，根据这些极值的统计学原理预测  $30000\text{mm}^2$  中的最大夹杂体直径。在止推辊使用寿命实验中，首先将尺寸为  $\phi 60 \times \phi 20 \times 8.3\text{T}$  的实验片进行渗碳、淬火硬化和回火，然后在  $4900\text{MPa}$  的最大赫兹应力  $P_{\text{max}}$  下进行实验，然后通过计算确定  $L_{10}$  使用寿命。

表 E1 示出进行本发明操作的一个例子及其实验结果，表 E2 示出进行传统操作的一个对比例及其实验结果。

表 E1

操作		通过短时间气体搅拌+电磁搅拌进行的炉外(钢包)精炼												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
编号		SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM
钢号		435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435	435
炉外精炼炉: 时间, 分钟		55	76	70	78	59	65	68	53	69	77			
炉外精炼炉: 终温, °C		1577	1581	1577	1585	1584	1582	1582	1576	1582	1584			
RH: 时间, 分钟		28	21	24	22	21	28	26	25	25	28			
RH: 循环量, 倍数		9.3	7.0	8.0	7.3	7.0	9.3	8.7	8.3	8.3	9.3			
RH: 终温, °C		1534	1540	1534	1540	1541	1532	1539	1531	1538	1532			
浇铸温度, °C		1512	1513	1516	1513	1513	1515	1512	1516	1514	1518			
产品中的氧含量, ppm		6.3	5.5	5.5	5.4	6.0	6.0	6.6	6.5	5.7	5.6			
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目		13	6	11	9	5	8	11	14	10	14			
夹杂体的最大预测直径, μm		30.2	25.3	26.4	24.3	28.8	27.0	26.9	30.6	26.2	25.8			
L <sub>10</sub> (x 10 <sup>7</sup> )		9.2	10.0	8.4	8.9	11.3	10.7	10.8	9.4	9.8	9.3			
评价结果		◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎			

◎: 优秀

表 E2

操作		通过短时间气体搅拌进行的炉外(钢包)精炼									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
编号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
钢号		SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM	SCM
炉外精炼炉:时间, 分钟		435	435	435	435	435	435	435	435	435	435
炉外精炼炉:终温, °C		35	45	48	38	42	47	42	39	48	44
RH:时间, 分钟		1570	1574	1566	1572	1567	1569	1567	1569	1569	1570
RH:循环量, 倍数		24	23	21	23	23	23	23	23	21	23
RH:终温, °C		6.7	7.5	6.2	7.3	7.0	6.8	6.0	8.0	7.4	8.3
浇铸温度, °C		1531	1538	1541	1531	1541	1533	1533	1534	1535	1540
产品中的氧含量, ppm		1521	1519	1517	1512	1520	1517	1511	1512	1516	1518
在 100g 钢产品中不小于 20 μm 的夹杂体数目		9.1	9.2	6.9	9.4	9.2	7.6	8.3	8.3	6.9	8.8
夹杂体的最大预测直径, μm		42	54	42	53	59	49	57	53	56	52
$L_{10}(x 10^7)$		91.0	82.8	55.2	84.6	73.6	68.4	83.0	83.0	55.2	70.4
评价结果		2.0	1.7	2.6	2.1	1.0	1.1	1.8	1.4	2.2	1.7
x: 差		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

从表 E1 可以清楚地看出：对于根据本发明的生产方法生产的 10 炉 SCM 435 钢产品，即，在电弧炉中通过熔化法生成并氧化精炼 JIS SCM 435 钢水，然后将钢水转移到安装有电磁感应搅拌器的钢包炉中，总共进行 50-80 分钟的钢包精炼（在惰性气氛下的短时间气体搅拌+电磁搅拌），然后将钢水脱气 20-30 分钟。具体来说，在循环式真空脱气装置中进行脱气的条件是循环钢水量不小于钢水总量的 12 倍，然后通过使用浇铸法的钢锭生产工艺生产的 10 种编号为 1-10 的钢产品。其氧含量为 5.4-6.6ppm，在 100g 钢产品中粒度不小于  $20\mu\text{m}$  的夹杂体数目是 5-14，最大预测夹杂体直径是  $30.6\mu\text{m}$ 。即，这些产品是非常洁净的钢。例如，这些产品的  $L_{10}$  寿命有非常大的提高。在总体评价方面，这些产品都被评价为优秀(◎)。

相反，从表 E2 可以看出：对于根据对比用传统生产方法生产的 10 炉 SCM 435 钢产品，即，在电弧炉中通过熔化法生成并氧化精炼 JIS SCM 435 钢水，然后将钢水转移到钢包炉中，用气体搅拌钢水 35-50 分钟以进行钢包精炼，然后将钢水进行不超过 25 分钟的循环式脱气，然后通过使用浇铸法的钢锭生产工艺生产 10 炉 SCM 435 钢产品。尽管这些产品的氧含量比较低，但是仍然略高于本发明的钢产品。另外，在 100g 钢产品中粒度不小于  $20\mu\text{m}$  的夹杂体数目是 42-59，最大预测夹杂体直径也比本发明的大，为  $55.2-91.0\mu\text{m}$ 。另外，这些产品的  $L_{10}$  寿命也比本发明的低，是本发明钢产品的 1/10-1/5。所有这些对比钢产品都被评价为差(x)。

上述实施例说明：本发明的生产方法能够降低氧含量和最大夹杂体直径的预测值，能够改善  $L_{10}$  寿命。这意味着根据本发明的生产方法生产的氧含量和最大夹杂体直径的预测值都降低了的钢具有优秀的疲劳强度性能如优秀的滚动疲劳寿命。

从上述说明可以清楚地看出：根据本发明可以大量生产洁净度非常高的钢产品，并且不必使用成本非常高的重熔工艺。这样就可以提供高洁净度钢，其适用作要求具有疲劳强度、疲劳寿命和镇静度的机械零件用钢，特别适用作如滚动轴承用钢、恒速接头用钢、齿轮用钢、环形连续变速传动用钢、用于冷锻的机械结构用钢、工具钢和弹簧钢，本发明还能够提供高洁净度钢的生产方法，即，本发明具有预想不到的前所未有的优点。

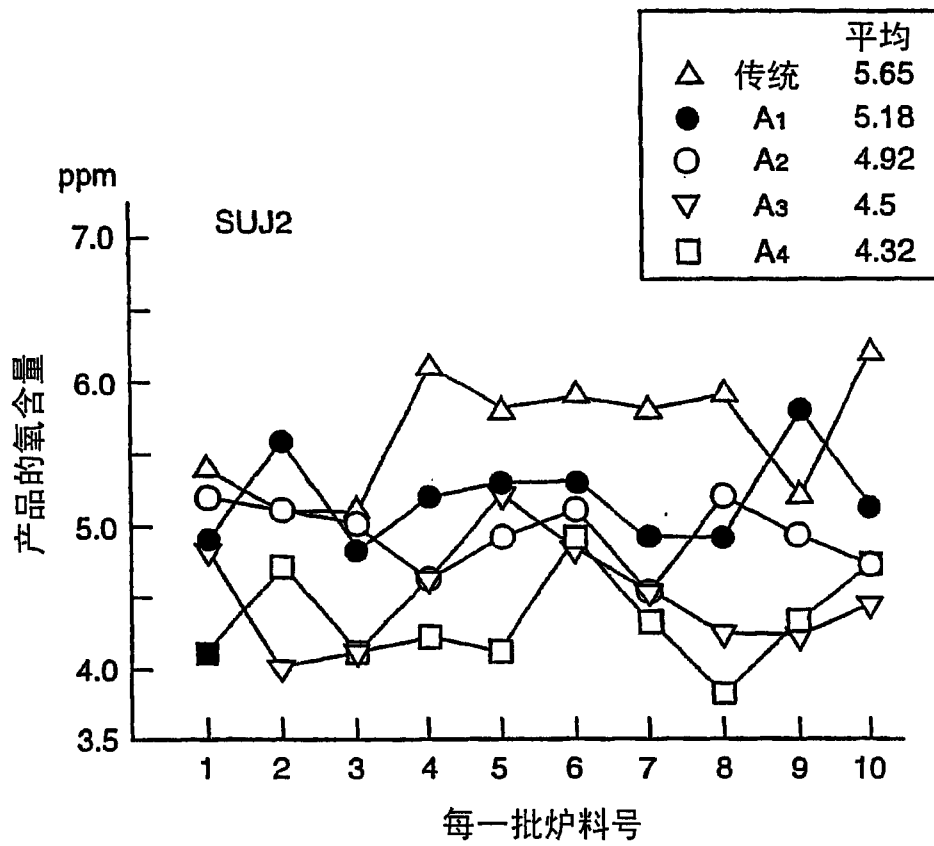


图 1A

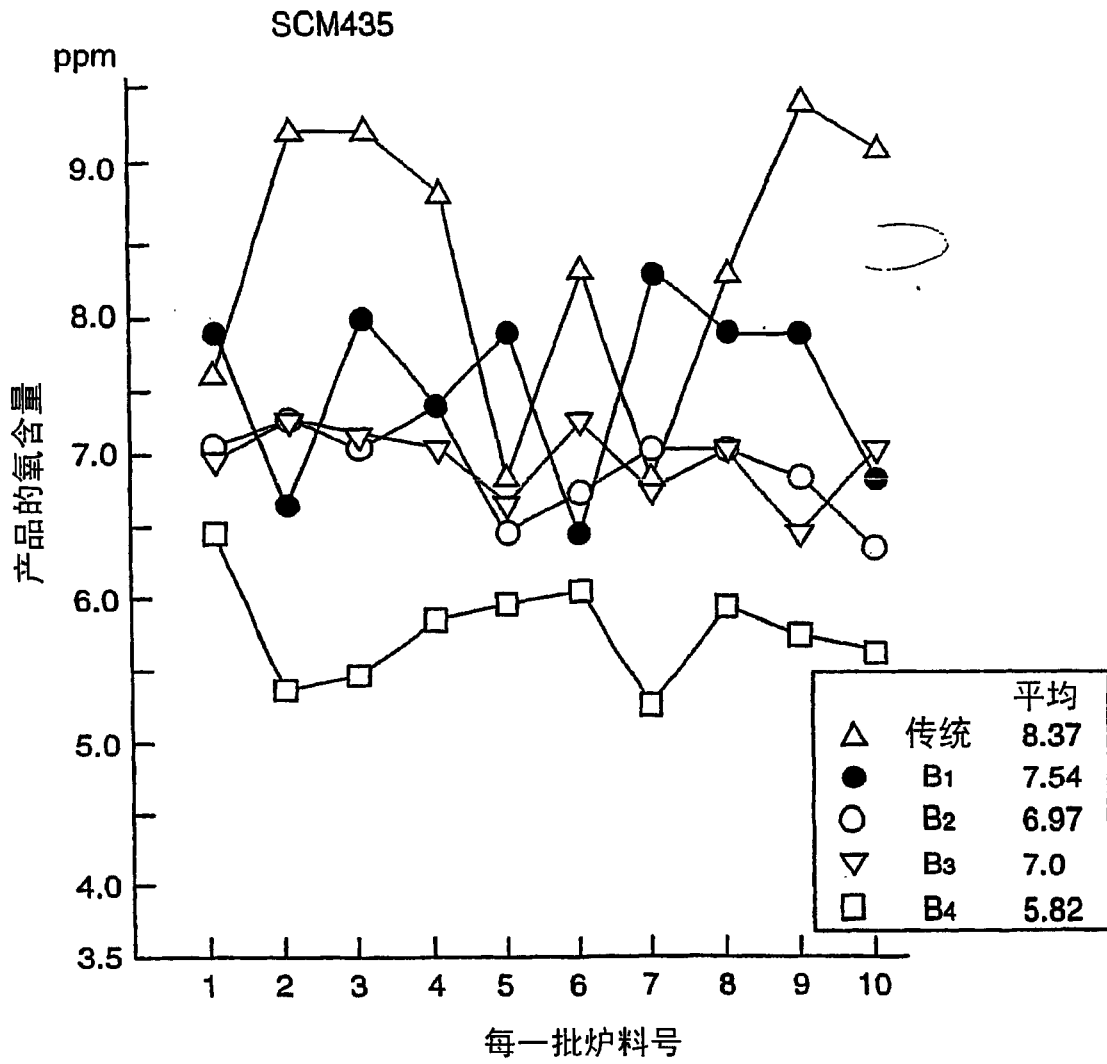


图 1B

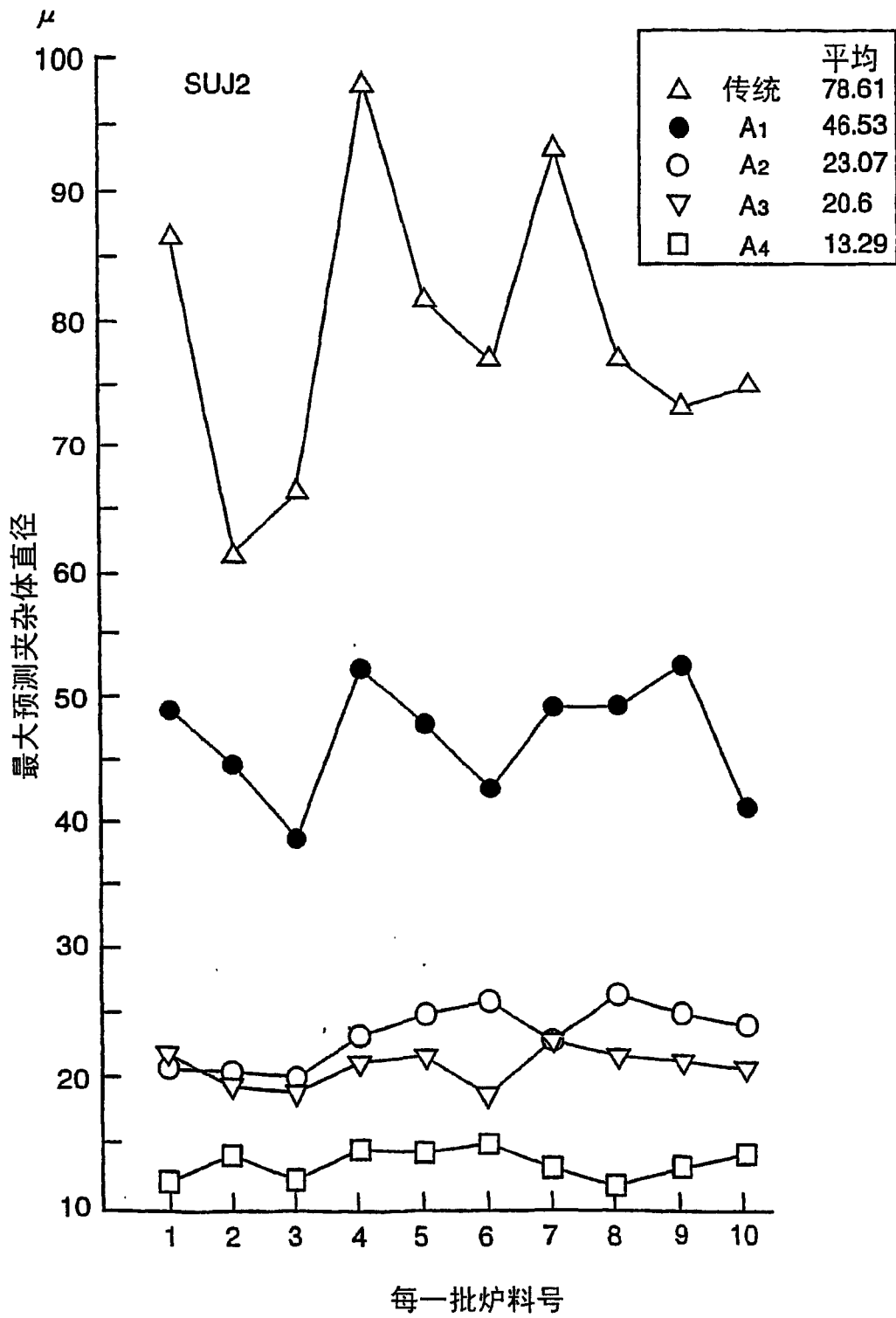


图 10

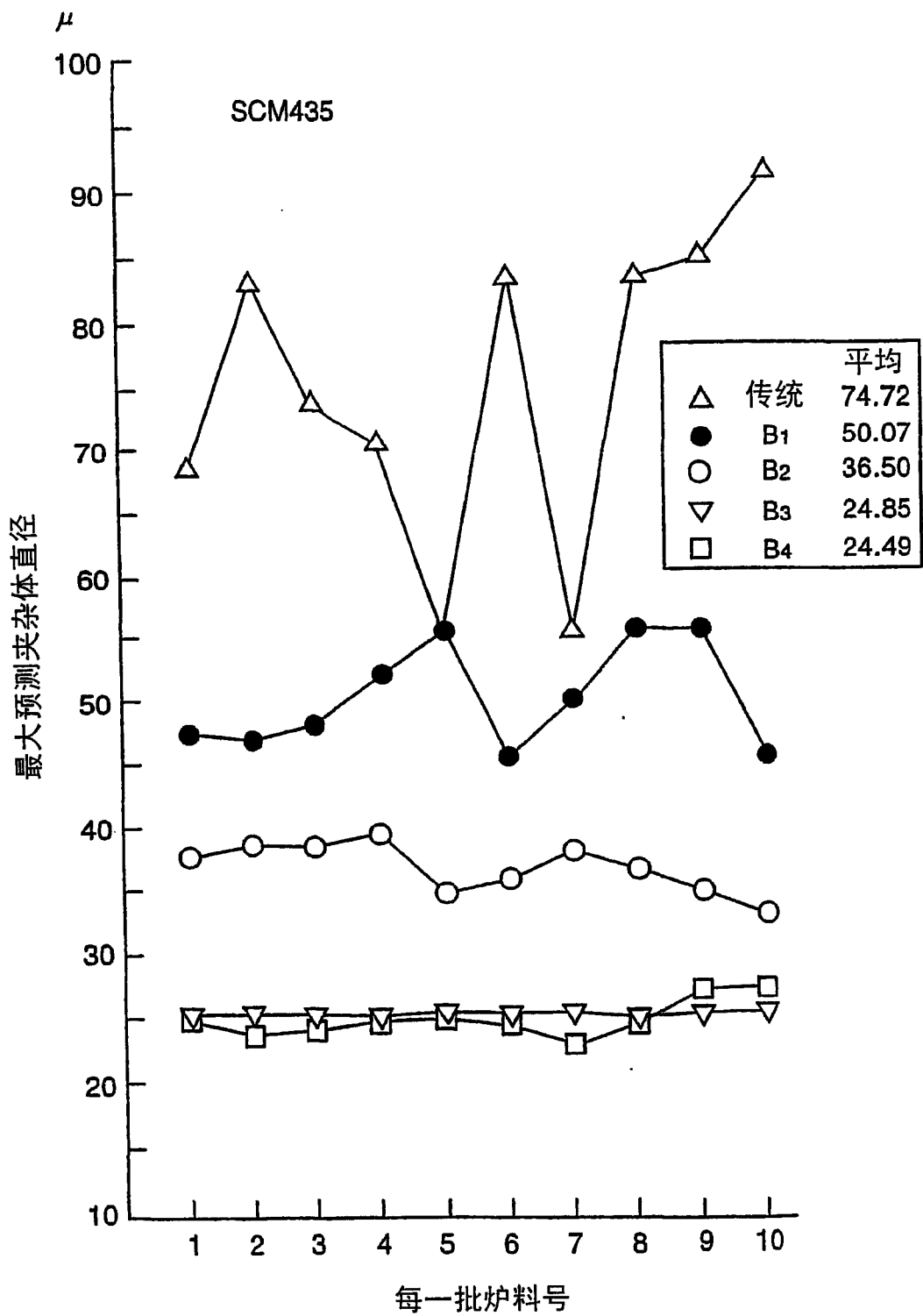


图 1D

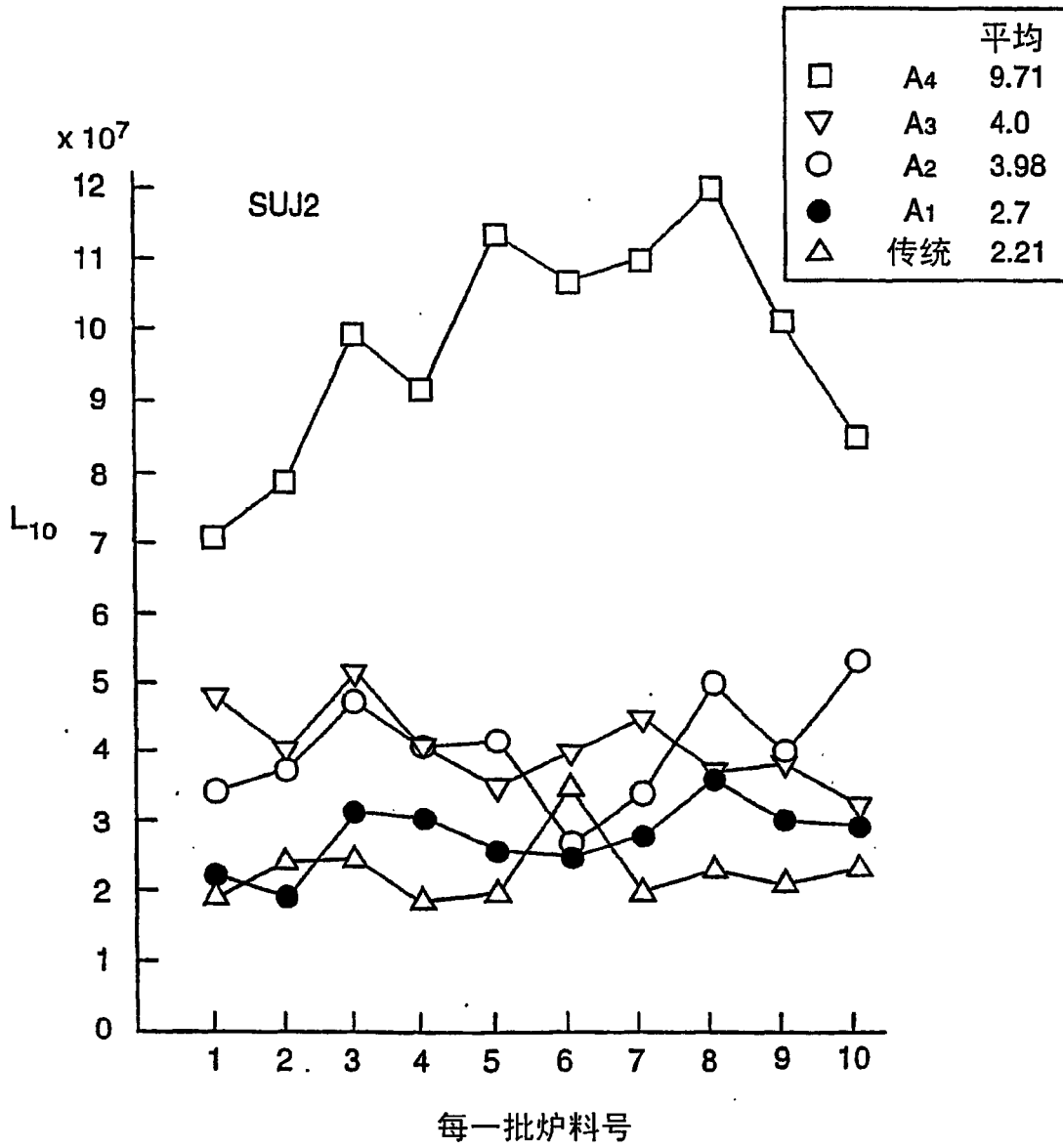


图 1E

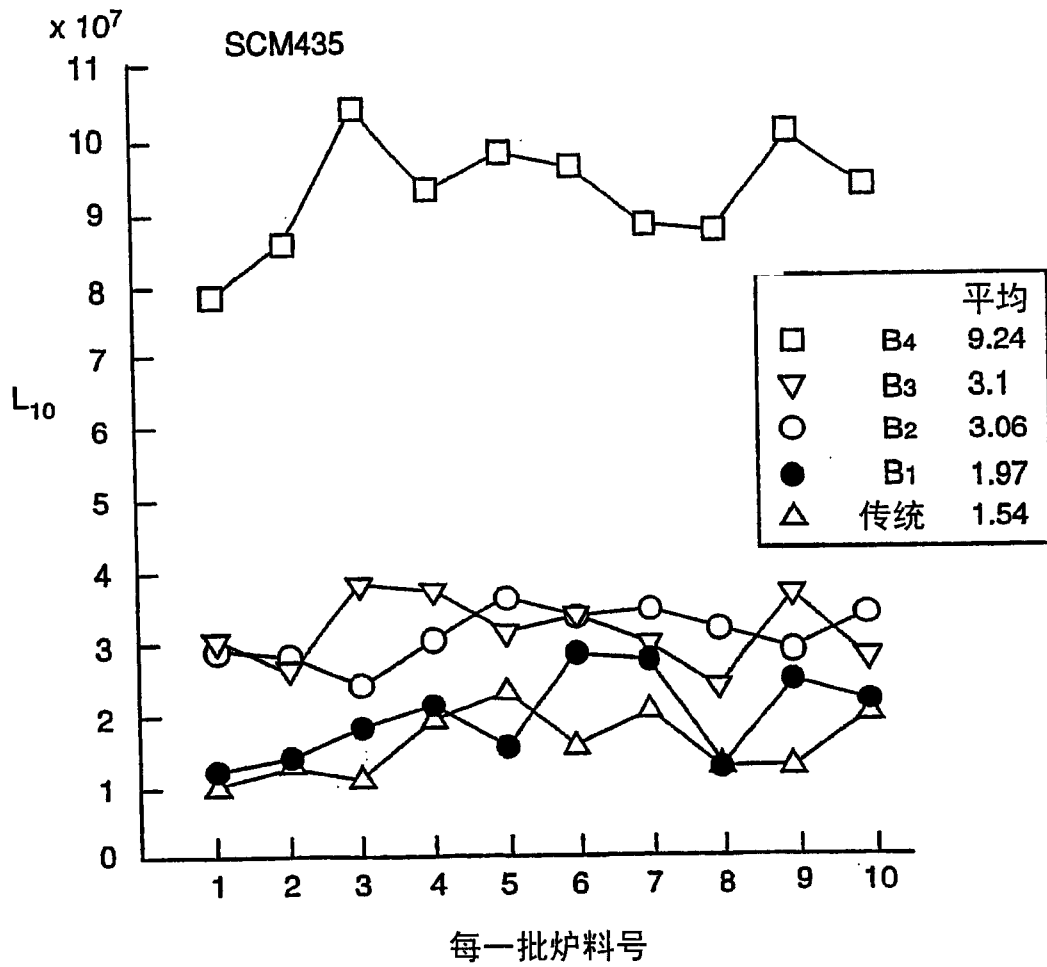


图 1F

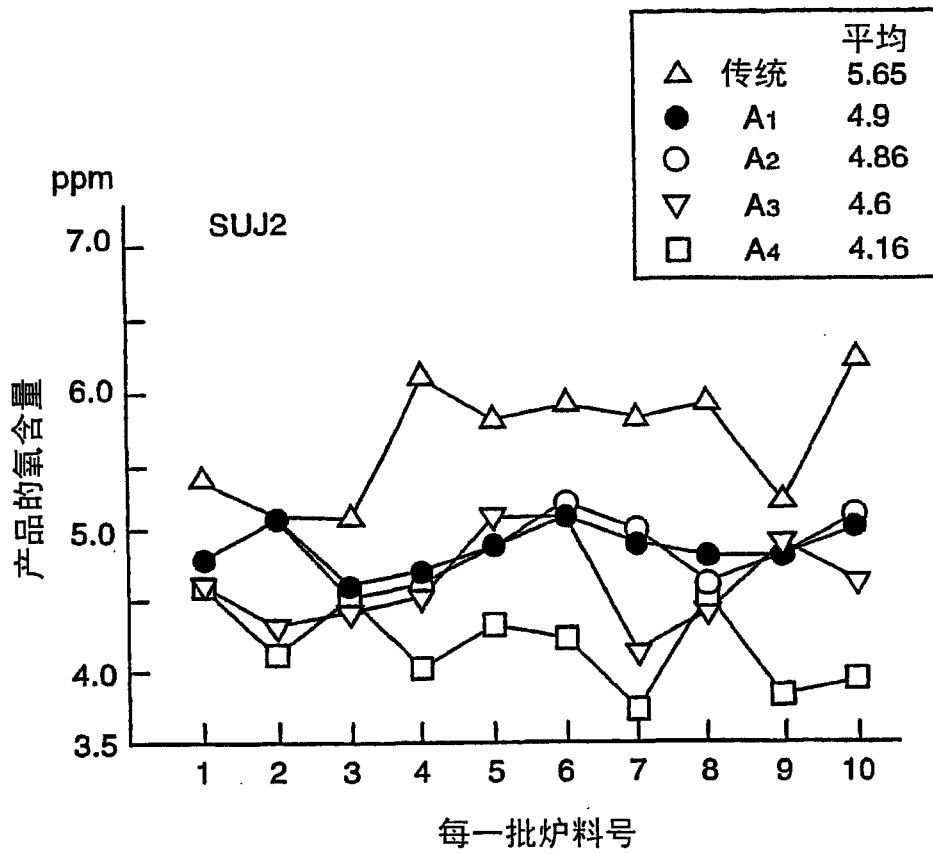


图 2A

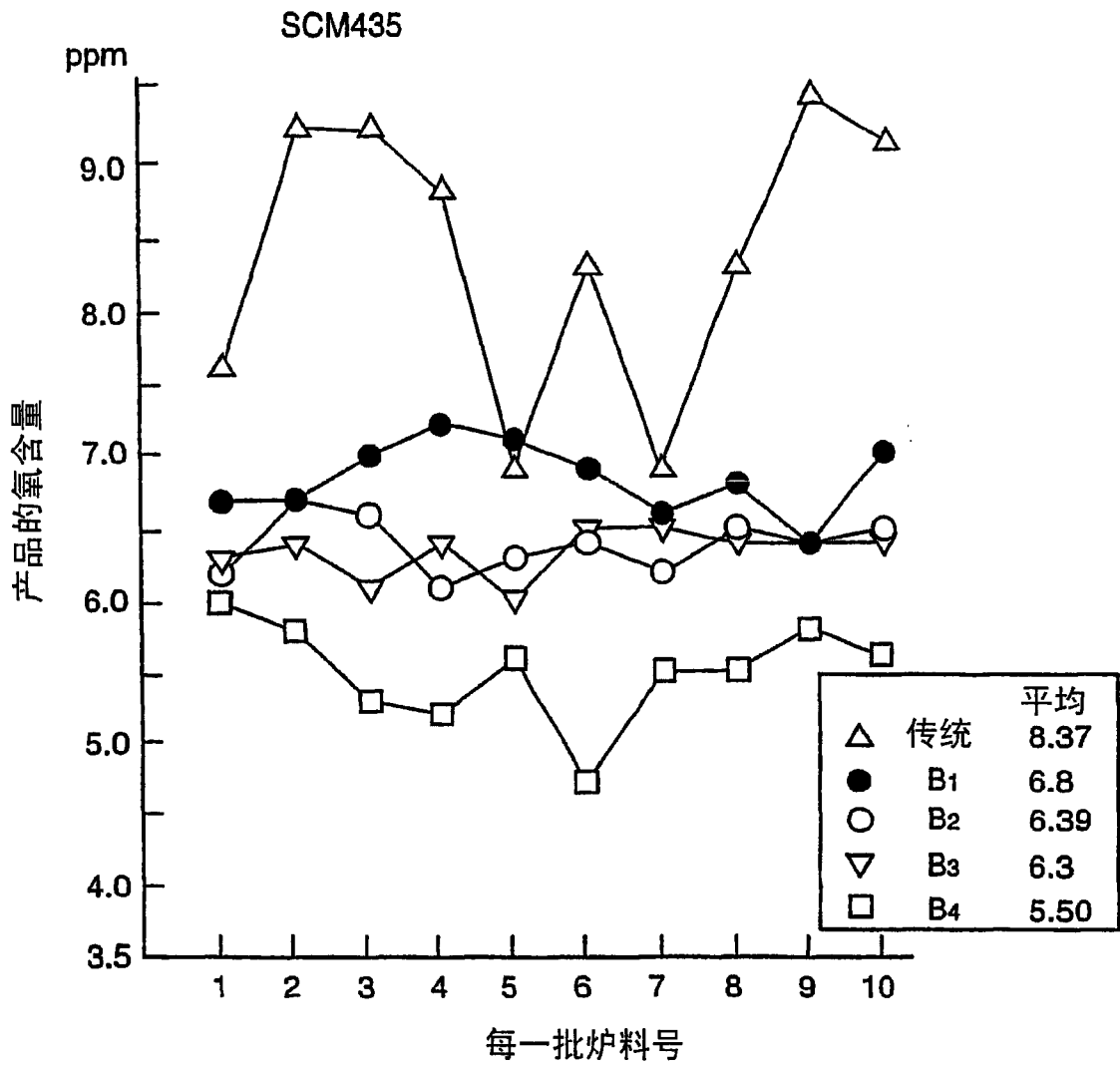


图 2B

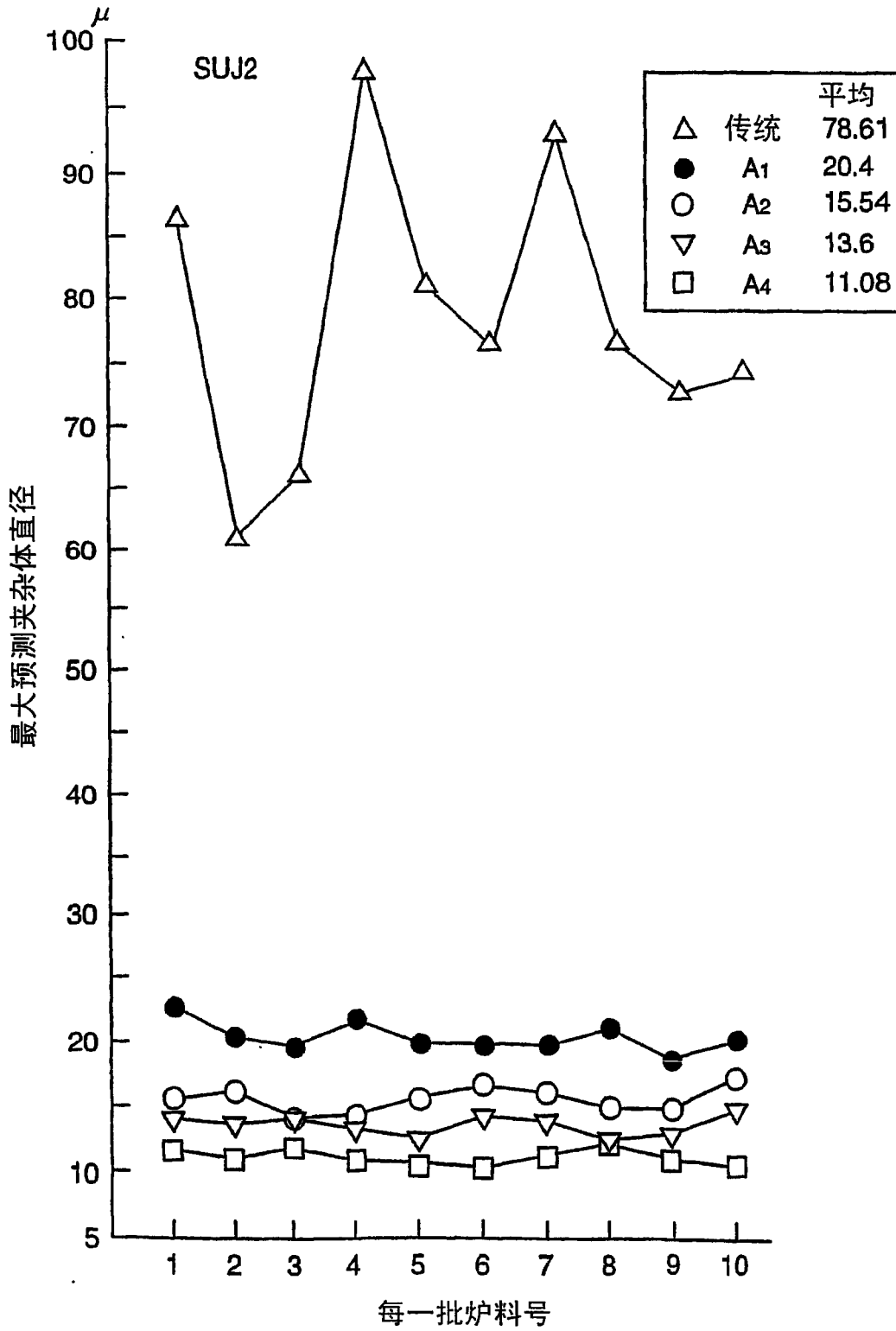


图 20

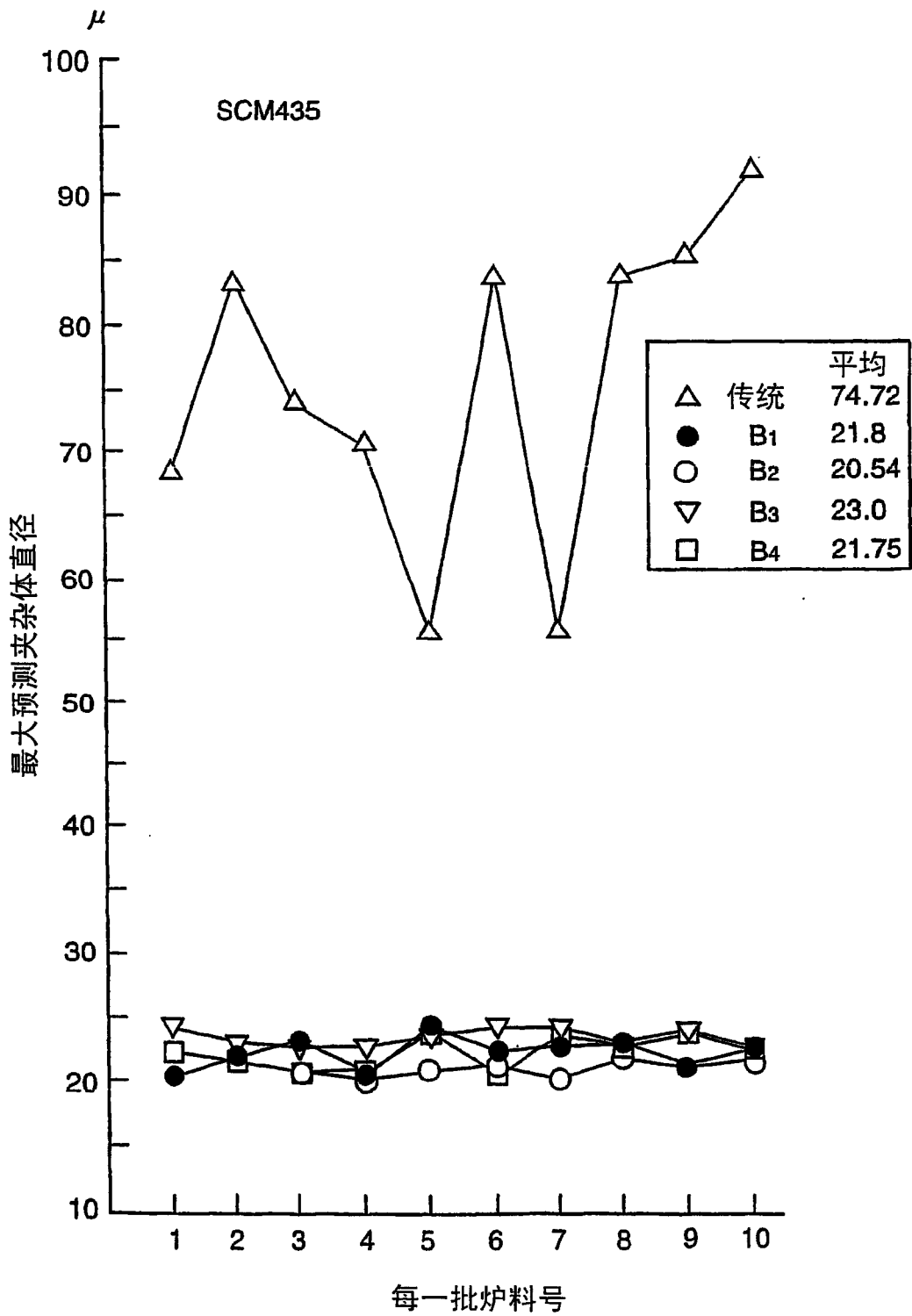


图 2D

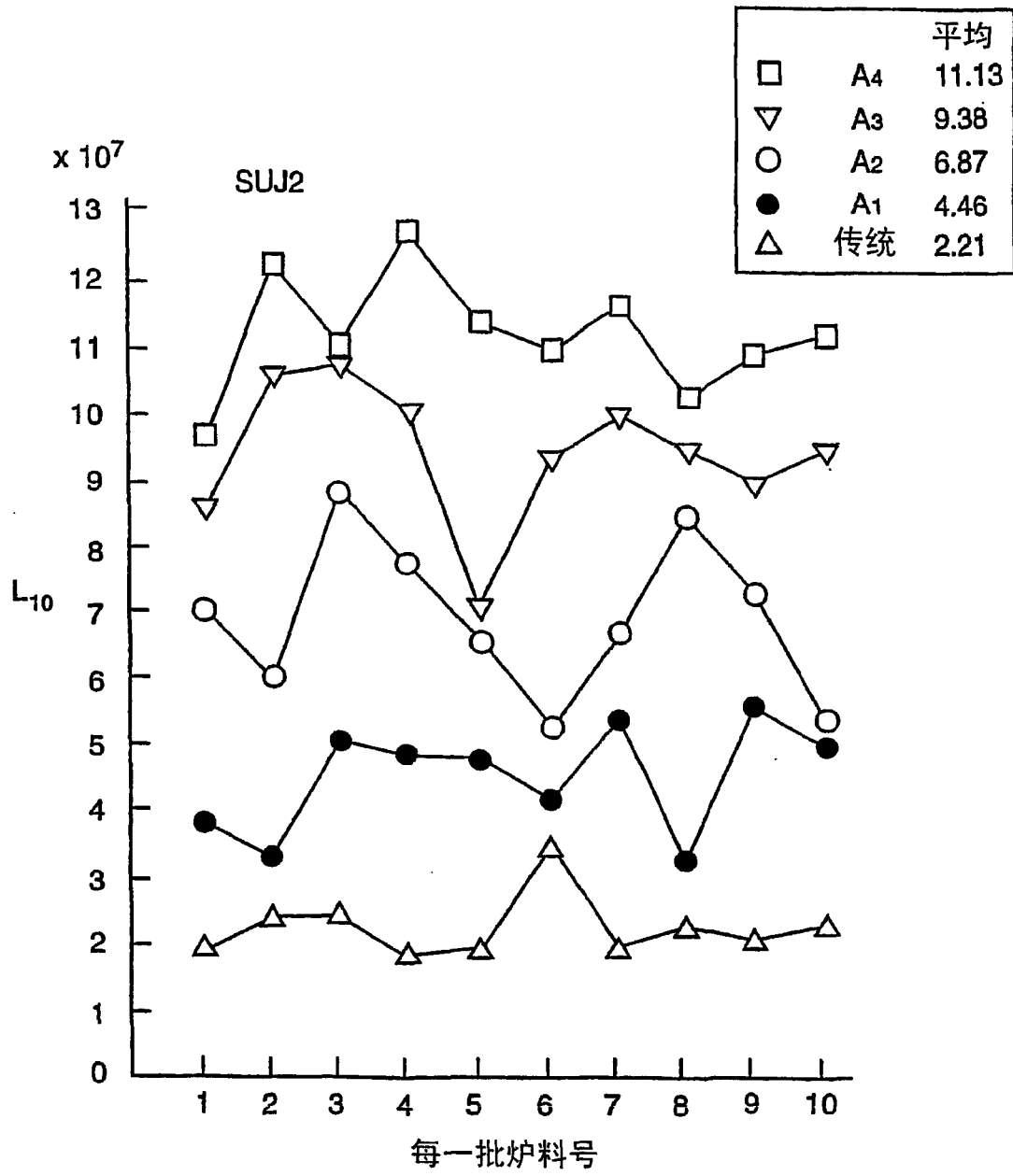


图 2E

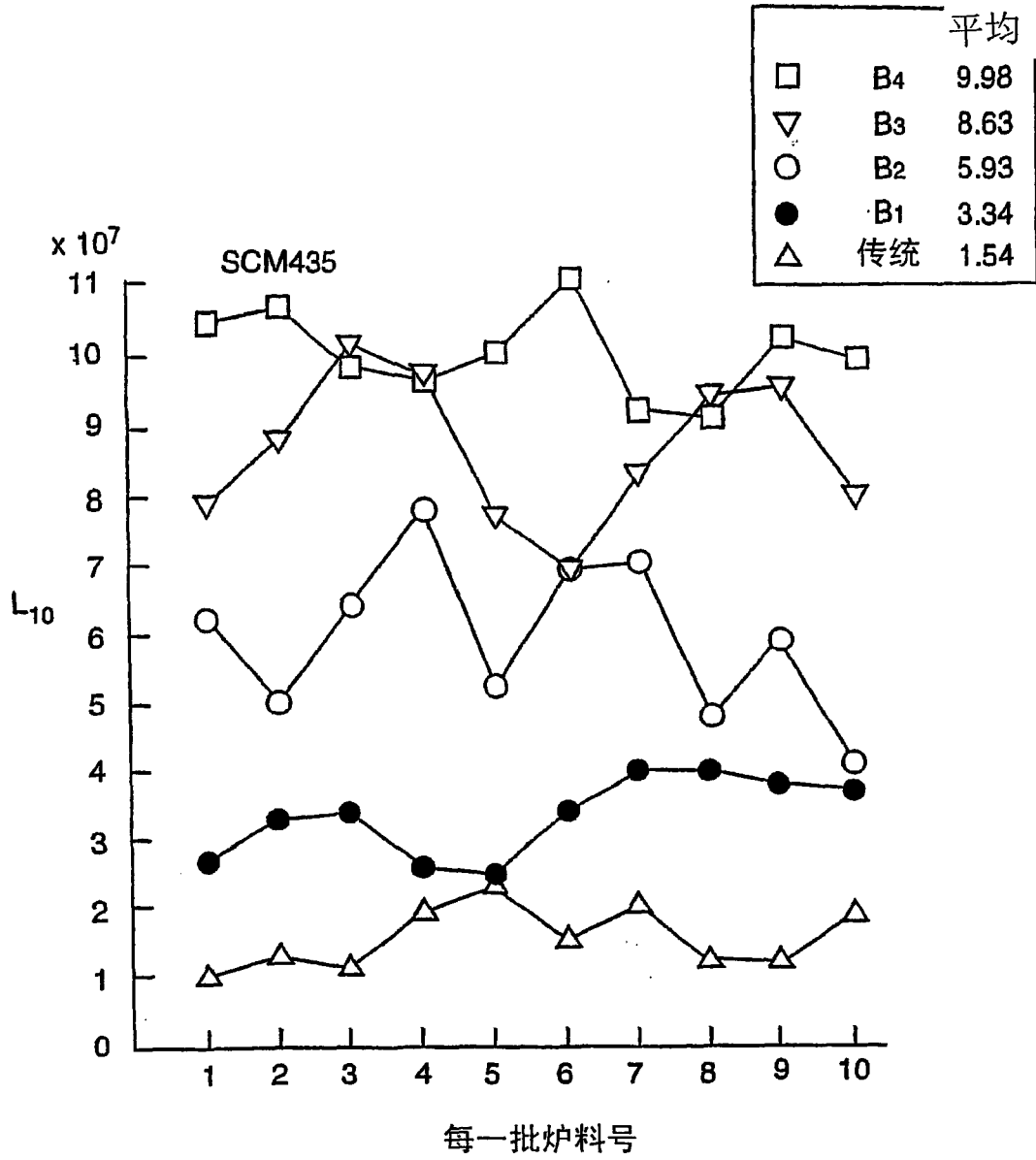


图 2F

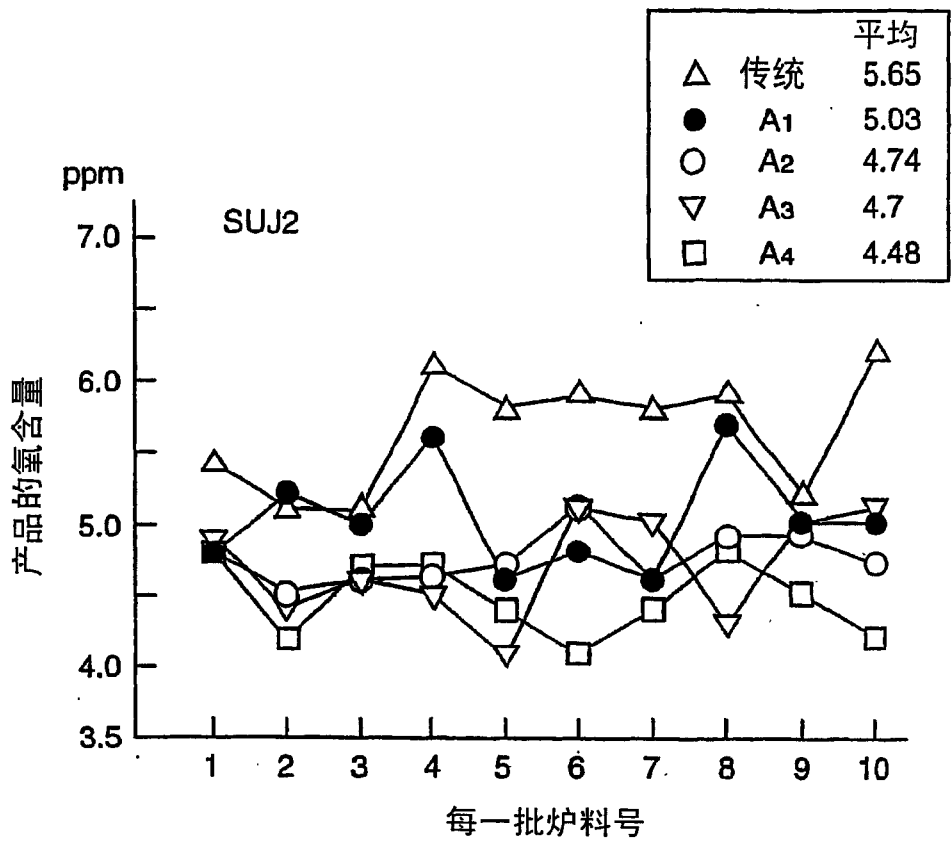


图 3A

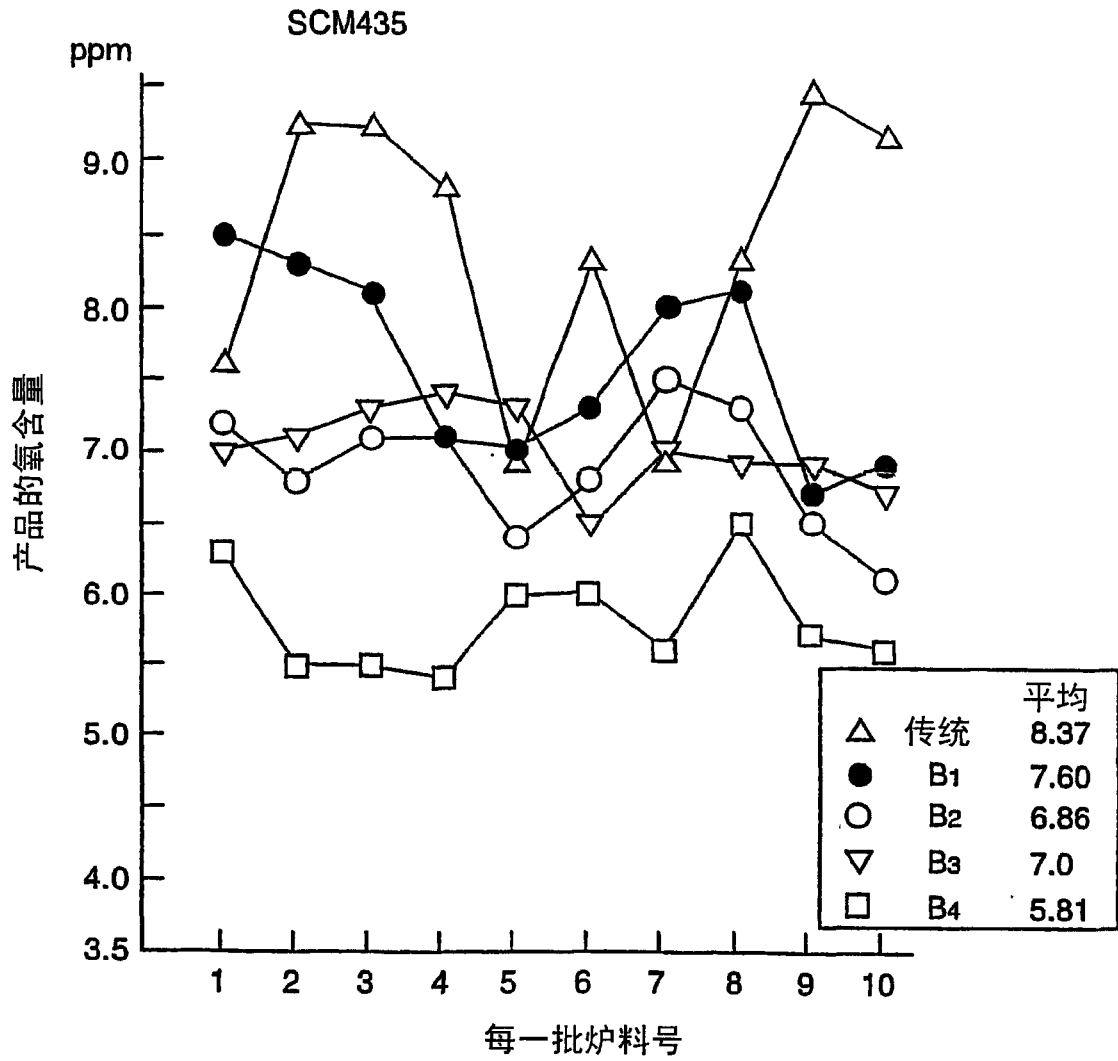


图 3B

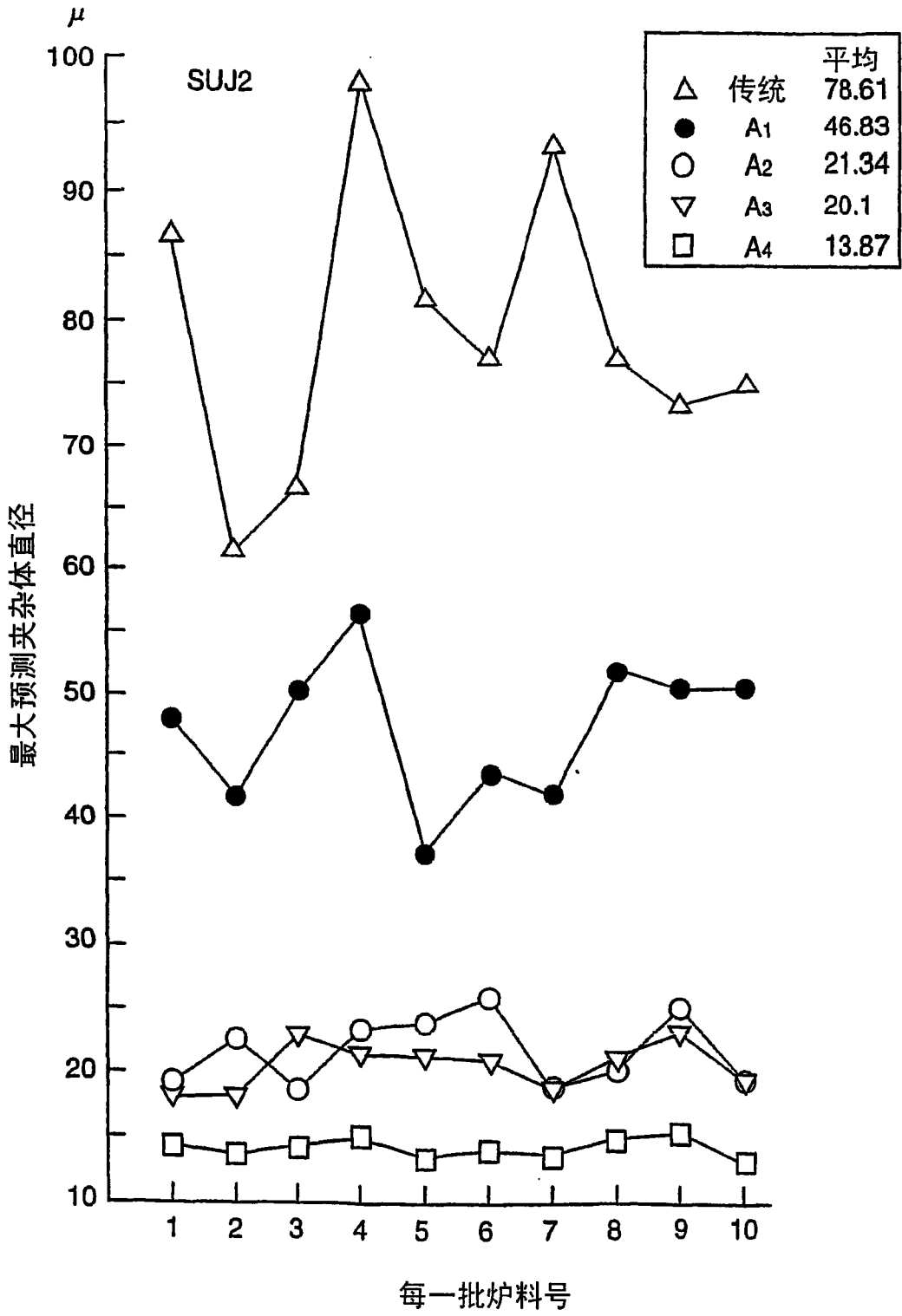


图 3C

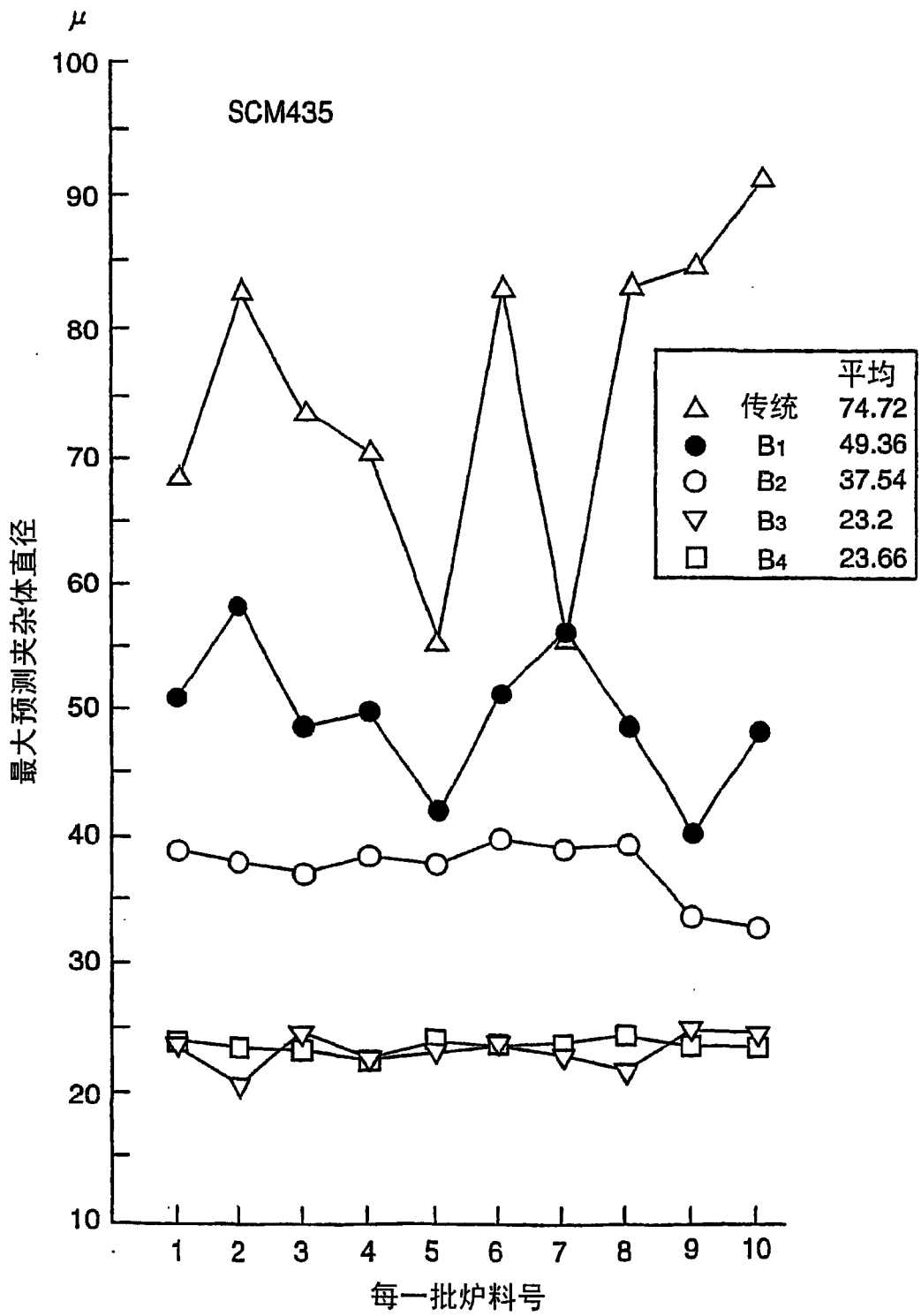


图 3D

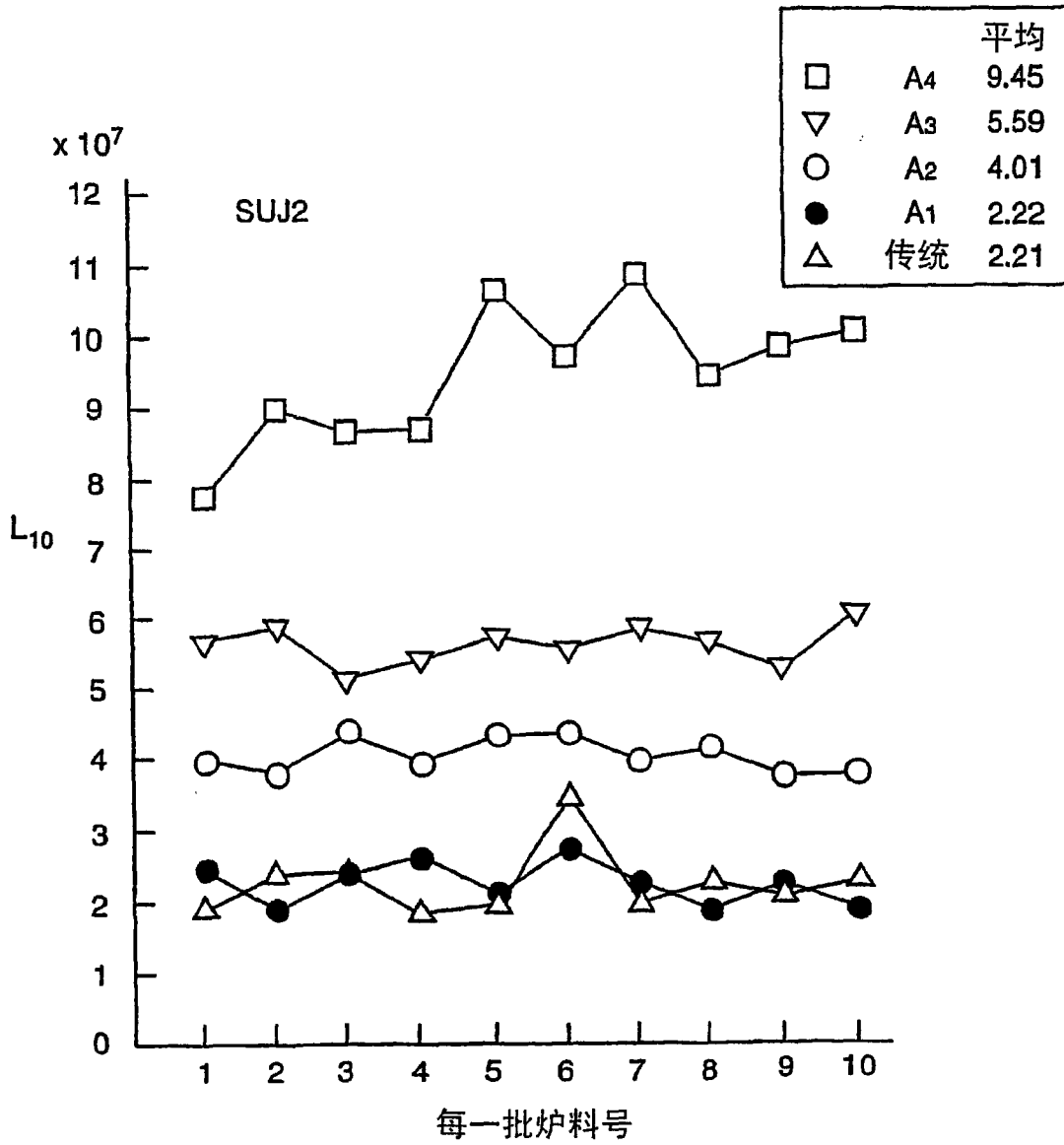


图 3E

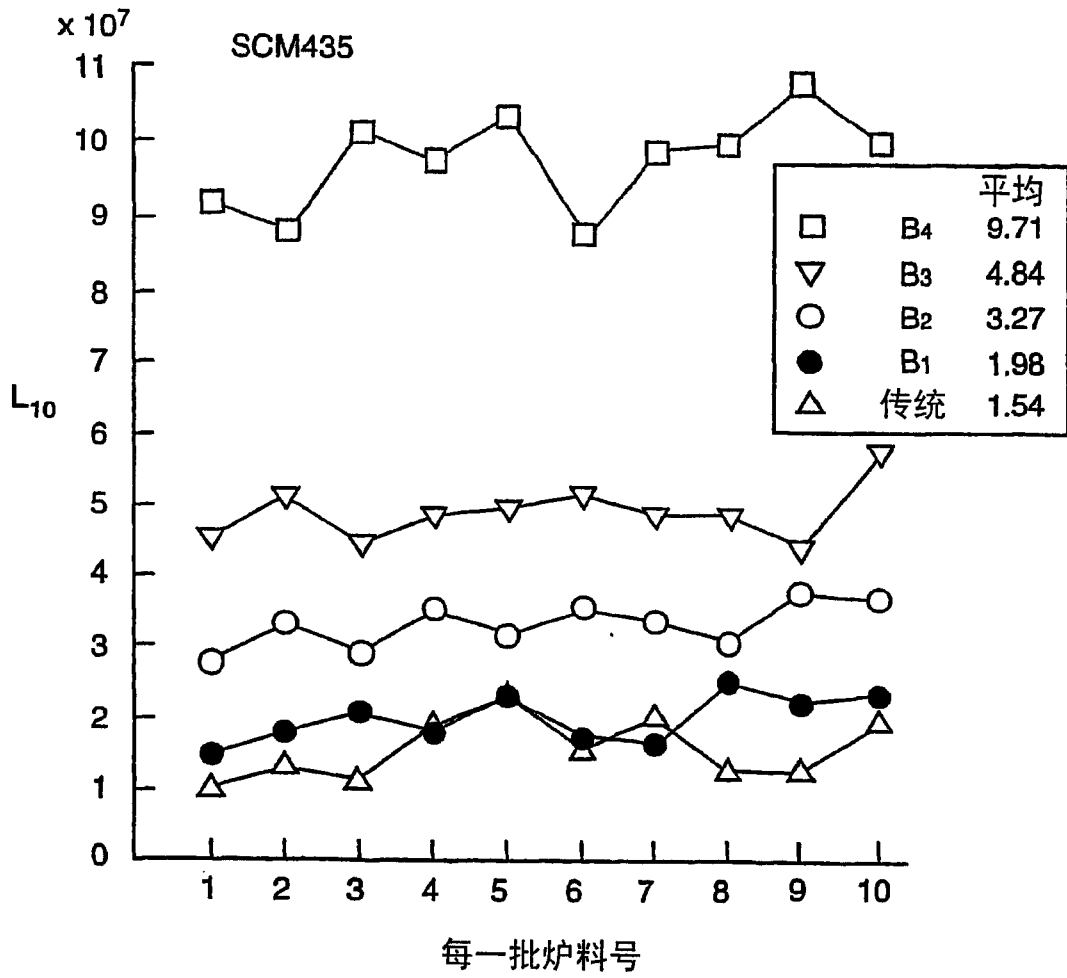


图 3F

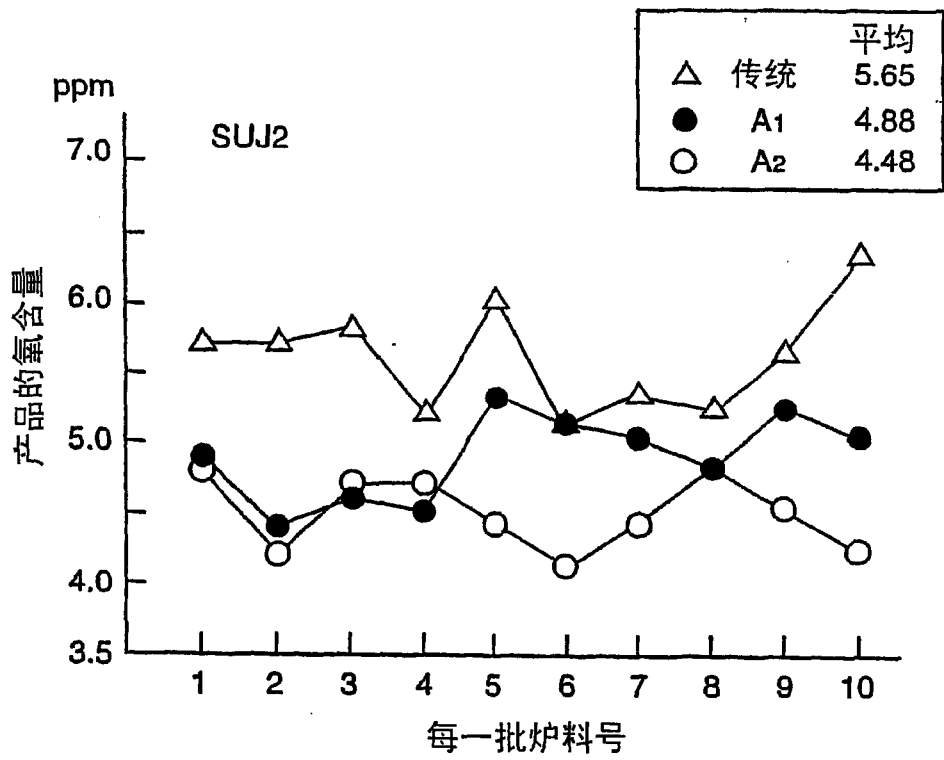


图 4A

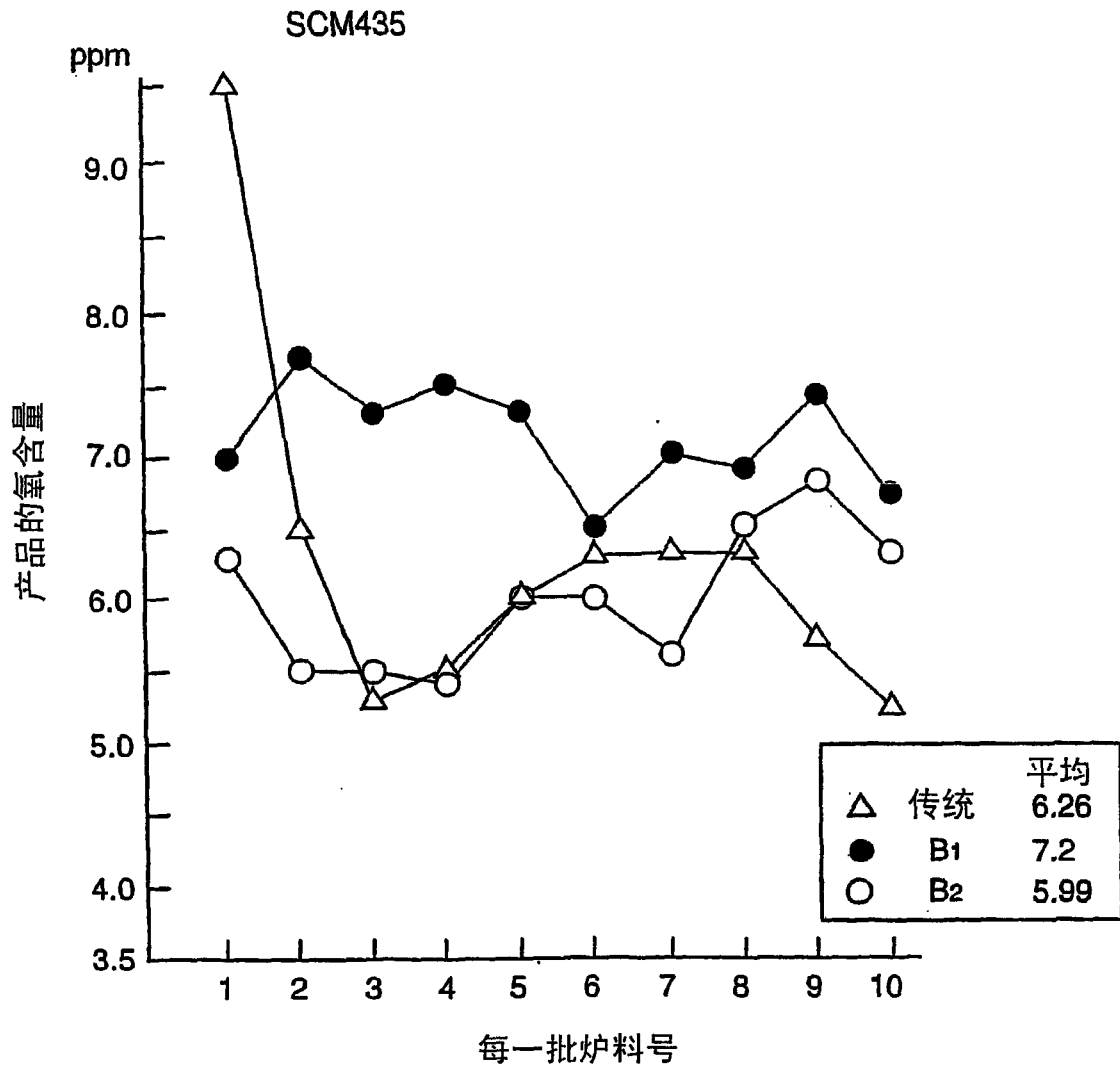


图 4B

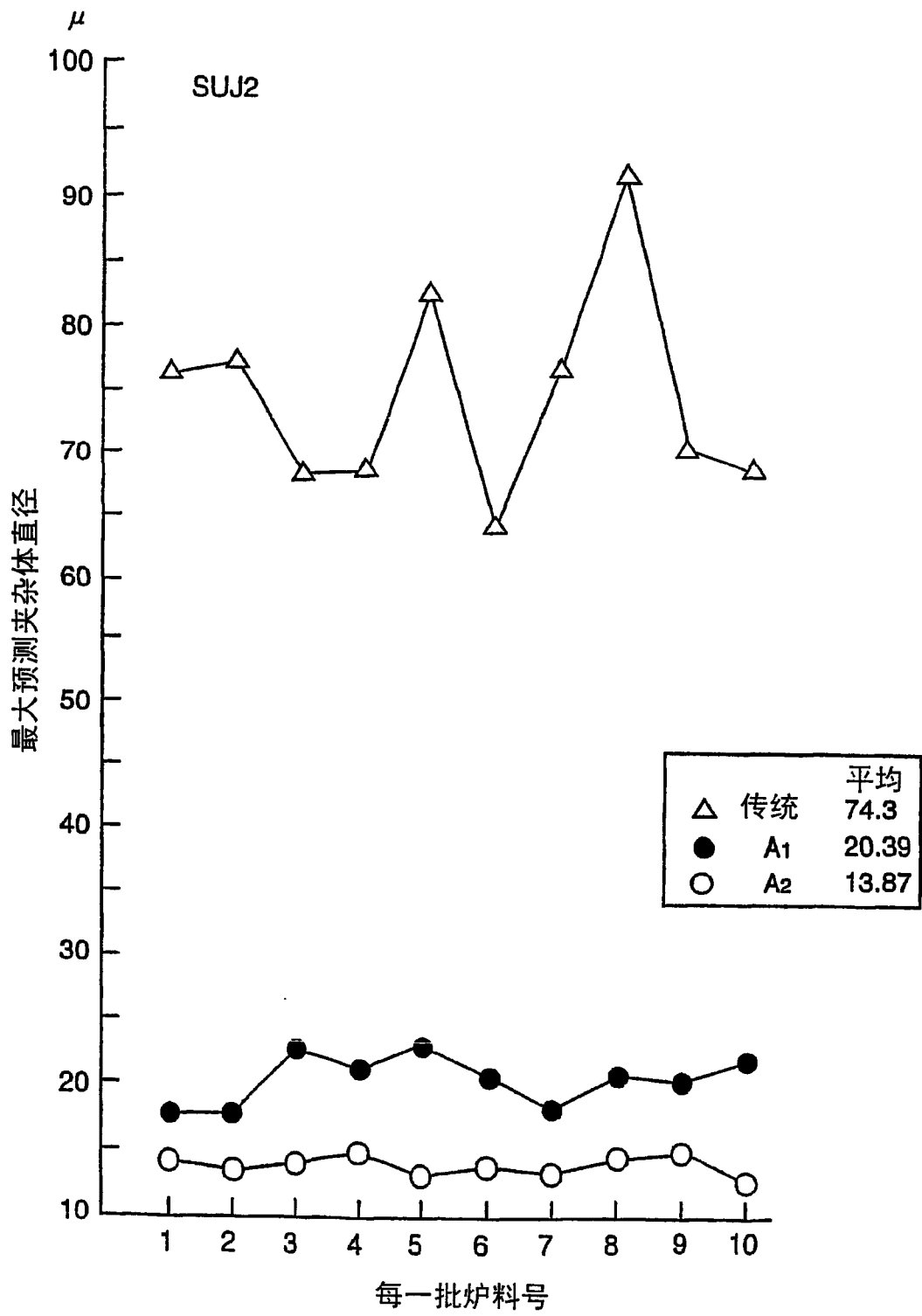


图 4C

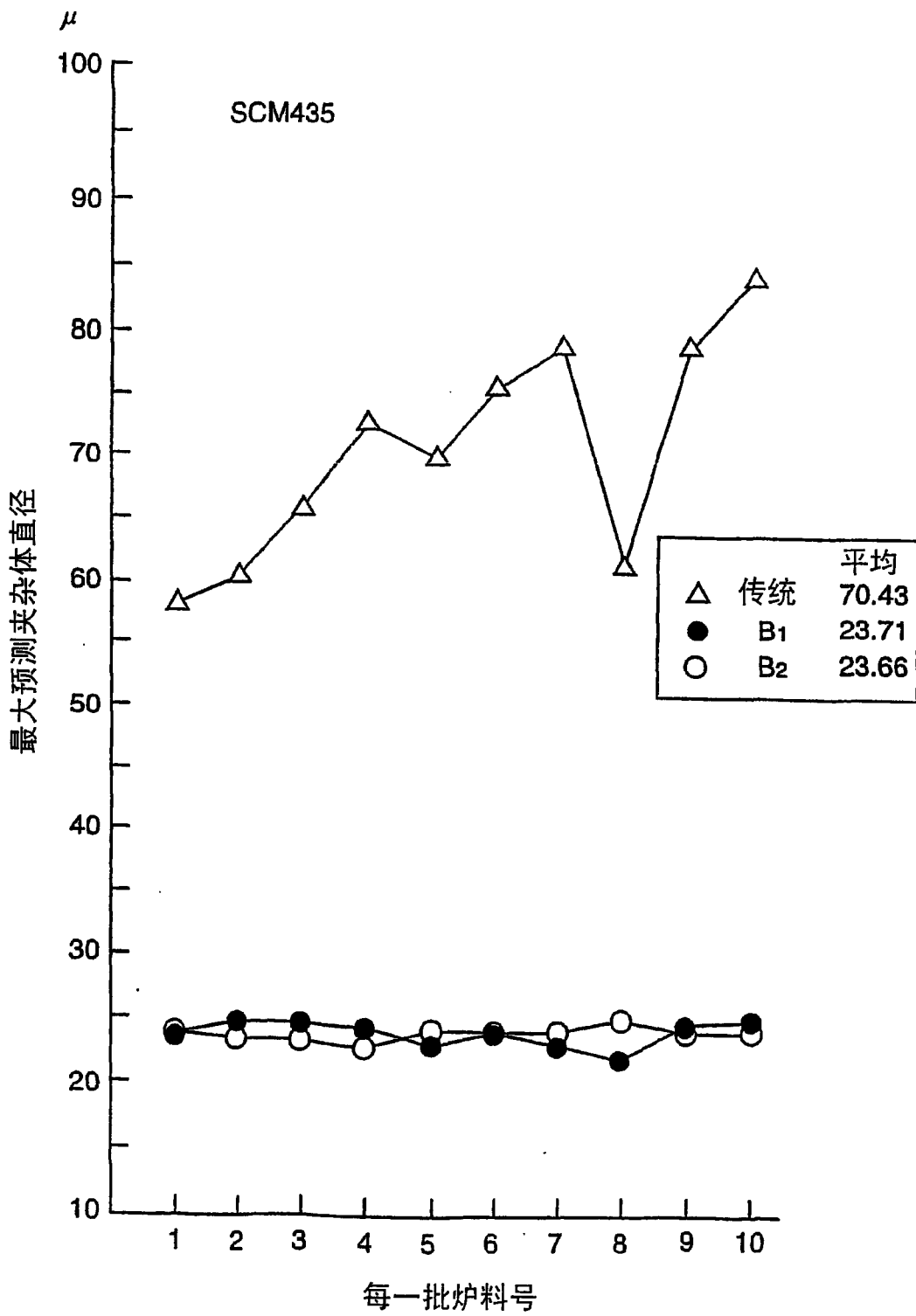


图 4D

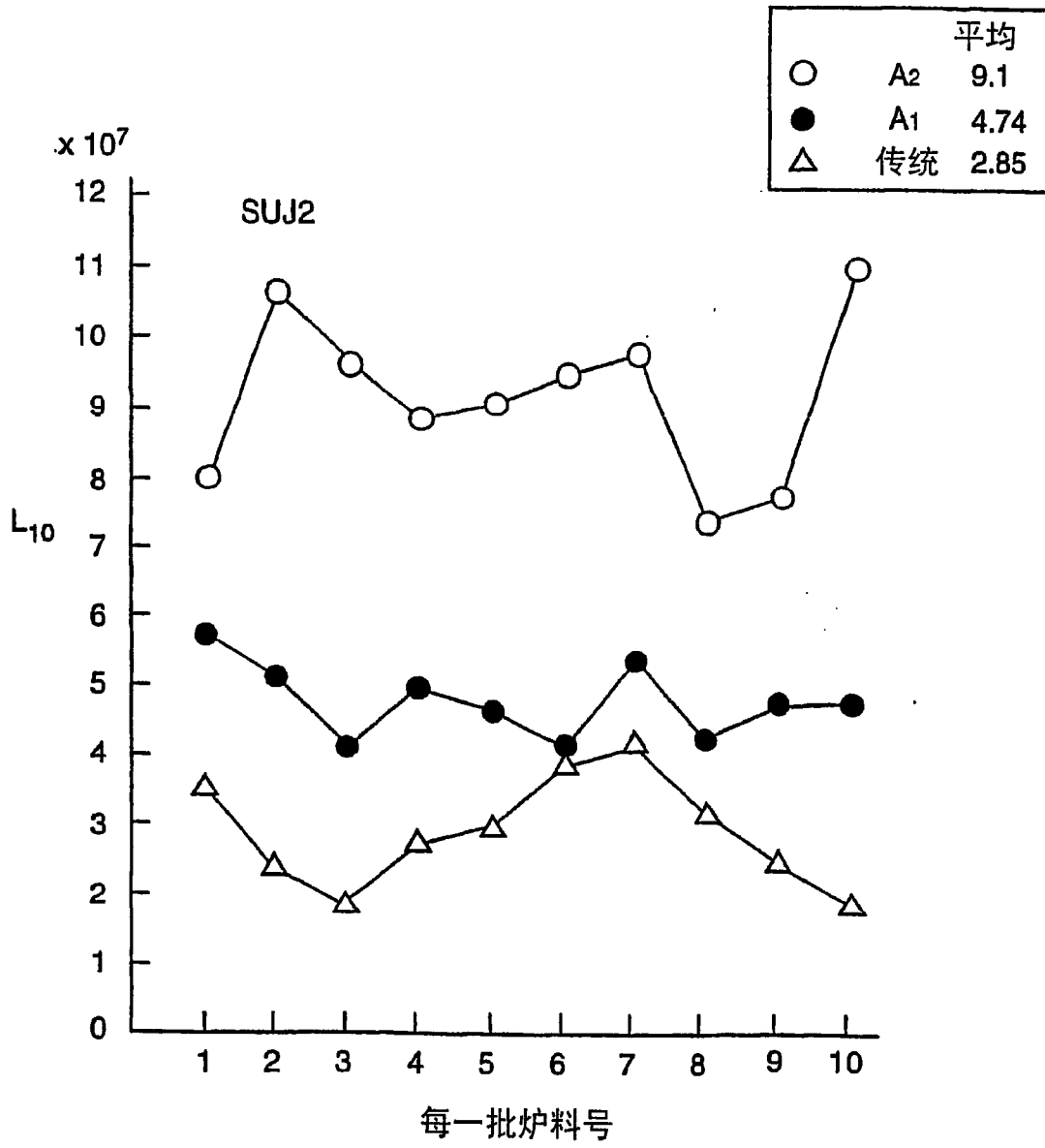


图 4E

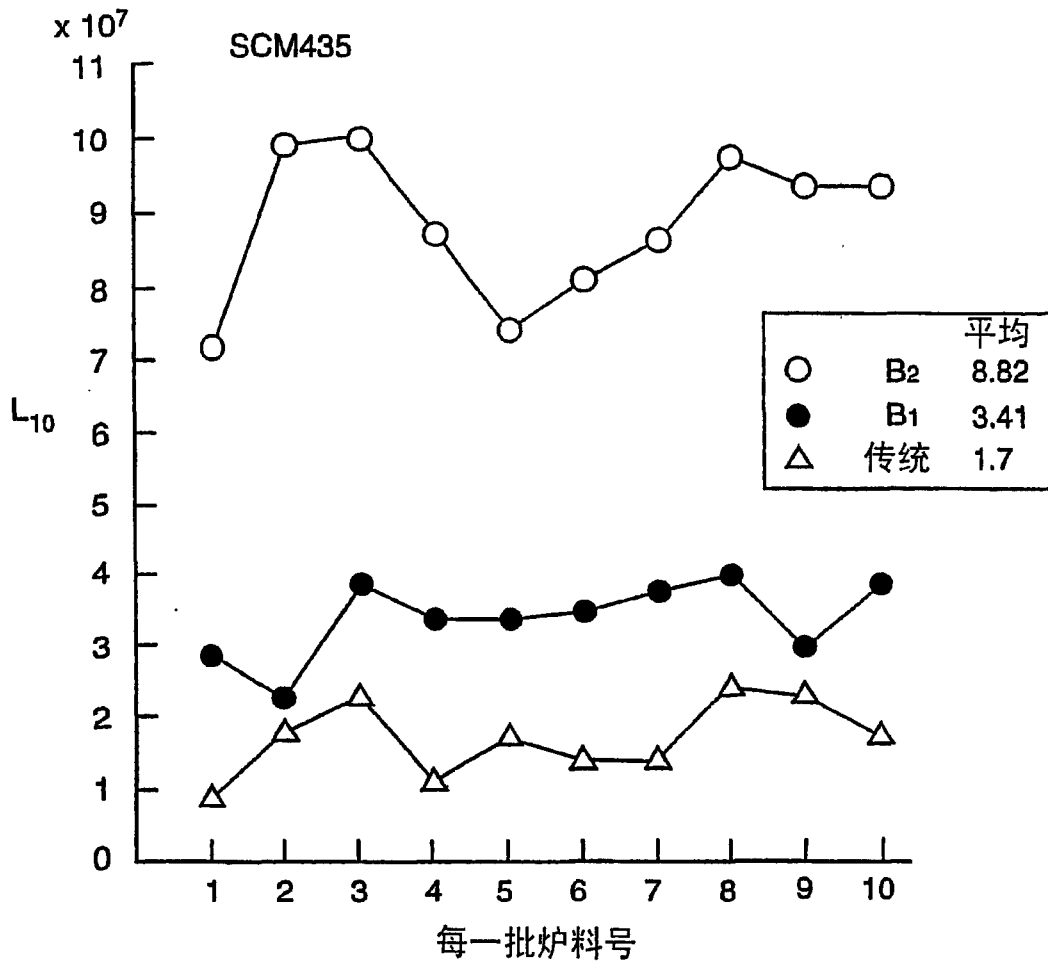


图 4F