



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101772385 B

(45) 授权公告日 2013. 07. 10

(21) 申请号 200880101947. 4

(22) 申请日 2008. 08. 06

(30) 优先权数据

60/963, 616 2007. 08. 06 US

(85) PCT申请进入国家阶段日

2010. 02. 04

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2008/009446 2008. 08. 06

(87) PCT申请的公布数据

W02009/020619 EN 2009. 02. 12

(73) 专利权人 H. C. 斯塔克公司

地址 美国马萨诸塞州

(72) 发明人 D·博兹卡亚 P·R·杰普森

(74) 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司

72002

代理人 蔡胜利

(51) Int. Cl.

B21B 1/22(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 1414887 A, 2003. 04. 30,

JP 平 3-32404 A, 1991. 02. 13,

CN 1635935 A, 2005. 07. 06,

审查员 魏珊珊

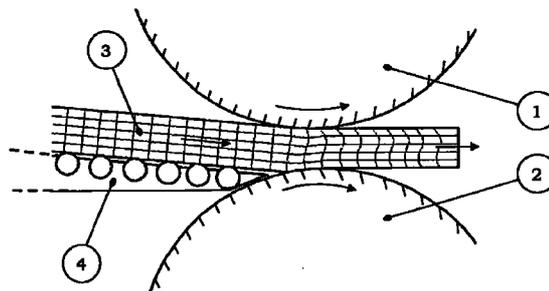
权利要求书1页 说明书13页 附图6页

(54) 发明名称

利用倾斜轧制控制板材和片材织构的方法和
设备

(57) 摘要

提供了用于轧制金属片材或板材 (3) 的方法和
设备。该方法包括下述步骤:将金属板材或片
材 (3) 以一角度进给到轧机 (1,2) 中。该设备包
括轧机,该轧机具有倾斜加料台 (4) 或是具有可
在其上安置传送台和倾斜加料台的输送带。利用
本发明的方法和设备,厚度方向织构梯度以及剪
切织构可被改进。



1. 一种轧制金属板材或片材的方法,该方法包括下述步骤:进给轧制金属板材或片材工件,以将其以水平面上方或下方 2-20 度之间的倾斜角度进给到轧机的工作轧辊之间,其中,工件以预定减薄方案经过一个以上的轧制道次;并且

工件在各轧制道次之间以预定间隔翻面;或者,工件依次通过两个或更多轧机,并且在前后相继的轧机之间所述倾斜角度的方向交替改向;

由此控制工件的晶体结构;

其中,对于每个织构成分 $\langle 100 \rangle // ND$ 和 $\langle 111 \rangle // ND$,厚度方向织构梯度小于或等于每毫米 4%。

2. 如权利要求 1 所述的方法,其中,剪切织构被增多,并且面心立方金属的单位体积内的排列在 $\langle 100 \rangle // ND$ 和 $\langle 111 \rangle // ND$ 的 15 度范围内的晶粒比例分别大于 10.2% 和 13.6%。

3. 如权利要求 1 所述的方法,其中,剪切织构被增多,并且体心立方金属的单位体积内的排列在 $\langle 110 \rangle // ND$ 的 15 度范围内的晶粒比例大于 20.4%。

4. 如权利要求 1 所述的方法,其中,所述方法引入沿工件厚度方向的剪切应变,并且通过工艺参数来控制所引入的剪切应变变量,所述工艺参数包括所述倾斜角度和每个轧制道次之后的厚度减薄率;并且

该倾斜角度在 3 和 7 度之间,从而最小化厚度方向织构梯度。

5. 如权利要求 1 至 3 中任一项所述的方法,其中,所述方法引入沿工件厚度方向的剪切应变,并且通过工艺参数来控制所引入的剪切应变变量,所述工艺参数包括所述倾斜角度和每个轧制道次之后的厚度减薄率;并且

该倾斜角度在 10 和 20 度之间,从而增加剪切织构。

6. 如权利要求 1 至 3 中任一项所述的方法,其中,轧制道次为 4 或以上。

7. 如权利要求 1 至 3 中任一项所述的方法,其中,每个轧制道次的预定厚度减薄率被设置成实现基本上无卷曲。

8. 如权利要求 1 至 3 中任一项所述的方法,其中,润滑剂被施加至工件顶表面和底表面,并且各工作轧辊被维持在恒定的粗糙度。

9. 如权利要求 2 或 3 所述的方法,其中,各轧机的工作轧辊具有基本相等的直径并且以基本相等的轧制速度操作。

利用倾斜轧制控制板材和片材织构的方法和设备

技术领域

[0001] 本发明涉及加工方法和设备,用于制造具有剪切织构或最小厚度方向织构梯度或这二者的板材和片材。

背景技术

[0002] 板材或片材的结晶织构在许多应用场合扮演着重要角色。结晶织构对于用于沉积薄膜的溅射靶的性能而言至关重要,这是因为溅射速率取决于结晶织构。

[0003] 由具有非均匀结晶织构的溅射靶沉积薄膜的均匀度不能令人满意。只有在整个体积内都具有均匀织构的板材才能获得最佳性能。

[0004] 靶中晶粒的溅射速率取决于晶粒的晶面相对于表面的取向(参看 Zhang 等人的“Effect of Grain Orientation on Tantalum Magnetron Sputtering Yield”, J. Vac. Sci. Technol. A 24(4), 2006 年 7/8 月刊);相对于板材法向的每个取向的溅射速率是不同的。另外,某些结晶方向是溅镀原子飞行的优选方向(参看 Wickersham 等人的“Measurement of Angular Emission Trajectories for Magnetron-Sputtered Tantalum”, J. Electronic Mat., Vol 34, No 12, 2005)。溅射靶的晶粒是如此之小(典型地具有 50-100 μm 直径),因而任何单个晶粒的取向都没有显著作用。然而,在大区域内(大约 5cm 至 10cm 直径的区域)的织构可能就会有显著作用。因此,如果靶表面上的一个区域内的织构不同于任何其它区域内的织构,所产生的膜的厚度难以在整个基板上都是均匀的。另外,如果某个表面区域内的织构不同于靶板材的同一区域在某个深度处的织构,在后续基板(在靶被使用或腐蚀到该深度后)上产生的膜的厚度容易不同于第一基板上产生的膜的厚度。

[0005] 这样,只要一个区域中的织构类似于任何其它区域中的织构即可,而织构是什么织构并不重要。换言之,每个晶粒的 111 晶向平行于板材法向方向(ND)的靶板材不比每个晶粒的 100 晶向平行于 ND 的靶板材更好或更差,也不比由 100、111 和其它晶向的晶粒的混合体构成的靶板材更好或更差,只要混合体中的比例在不同区域之间保持恒定即可。

[0006] 膜厚度的均匀度也是重要的。对于集成电路,举例来说,它们几百个在硅晶片上同时产生,在某个点太薄的膜将不能提供重复的扩散屏蔽膜,而在另一点太厚的膜将挡住通孔或沟,或者如果是在后续步骤中将被去除的区域,则可能导致无法去除。如果沉积膜的厚度不在设计者规定的范围内,则器件可能无法装配使用,并且从制造直至测试阶段的全部成本都浪费了,因为通常不可能进行修复或改造。

[0007] 如果靶不具有均匀织构,并且因此而不提供可预测的均匀溅射速率,则利用现有技术水平的溅镀设备,不可能控制基板上的某点到另一点的厚度变化。利用测试件,可实现在基板与基板之间、靶与靶之间局部的而非全局的厚度变化控制。然而,利用测试件,是耗时且高成本的。

[0008] 对于根据现有技术制造的靶,靶板材的织构中的非均匀度会导致在溅射速率(定义为对应于每个入射氩离子从靶上打下的钽原子的平均数量)方面的不可预期性或可变性,导致产生在特定基板上的膜的厚度变化,以及不同基板之间、不同靶之间的膜厚度变

化。

[0009] 结晶结构还会影响材料的机械性能。这是因为各向异性材料的单晶的机械性能在沿不同方向测试时存在差异。尽管单晶材料在各种场合被使用,但实际中使用的大多数材料是由许多晶粒构成的多晶的。如果形成多晶的晶粒具有优选取向(即结晶结构),则材料趋向于表现为类似于具有相似取向的单晶。材料的可成型性取决于材料的机械性能,而机械性能又在很大程度上取决于结晶结构。

[0010] 其它材料特性例如磁渗透性也会受到结晶结构的影响。例如,结晶结构是影响晶粒取向硅钢的性能的重要因素,硅钢主要用作变压器和其它电机的铁心。改进的磁特性,例如晶粒取向硅钢的高磁渗透性,导致能量节约。为实现良好的磁特性,晶粒取向硅钢应当具有强 $\langle 110 \rangle // ND$ 和 $\langle 100 \rangle // RD$ (轧制方向)结构(高斯取向),这样就容易沿轧制方向磁化。

[0011] 材料被塑性变形时会产生结晶结构,并且塑性变形只会沿着那些在变形过程中变成活性的滑移系统(滑移系统)发生。法向和剪切应变成分,以及其它参数例如温度,决定了哪个滑移系统变成活性的。滑移系统的活性化导致晶粒朝向特定取向转动,从而产生结晶结构。材料最终的结晶结构主要取决于初始结构和材料中发生的应变。

[0012] 例如,当板材在平面应变条件下轧制时,材料沿板材的厚度方向同时经受剪切和法向应变。剪切应变的量沿板材的厚度方向显著变化。由于传统轧制工艺的对称性,板材的中间厚度处不会经受任何剪切应变,而离开中间厚度处的部位同时经受剪切和法向应变。因此,板材中间厚度处的结构显著不同于其它部位。

[0013] 沿板材厚度方向的结构非均匀度被称作“厚度方向结构梯度”。传统轧制产生的板材或片材具有很强的厚度方向结构梯度。厚度方向结构梯度和结构主要成分可能基于参数而显著改变,这些参数是在传统轧制中被改变和控制的参数,例如每个轧制道次的厚度减薄率和轧制道次之间的转动。

[0014] 在传统轧制中,某些结构成分,即“轧制结构”成分,成为主体成分。体心立方(BCC)金属的轧制结构成分不同于在体心立方金属经受剪切应变时形成的“剪切结构”成分。当经受剪切应变时,体心立方金属中的晶粒朝向 $\langle 110 \rangle // ND$ 转动。对于面心立方(FCC)金属可观察到几乎相反的行为,即在经受剪切应变时,将导致 $\langle 111 \rangle // ND$ 和 $\langle 100 \rangle // ND$ 变为主体结构成分。工件中引起的应变越大,所产生的剪切结构越强。

[0015] 在具有完美随机结构的材料(面心立方或体心立方)中,10.2%的体积(和10.2%的晶粒数量)具有相对于ND成15度范围内的 $\langle 100 \rangle$ 轴线,另外的13.6%的体积具有相对于ND成15度范围内的 $\langle 111 \rangle$ 轴线,并且还有20.4%的体积具有相对于ND成15度范围内的 $\langle 110 \rangle$ 轴线。因此,面心立方材料如果超过10.2%的体积具有相对于ND成15度范围内的 $\langle 100 \rangle$ 轴线,并且超过13.8%的体积具有相对于ND成15度范围内的 $\langle 111 \rangle$ 轴线,则被认为具有剪切结构。体心立方材料如果超过20.4%的体积具有相对于ND成15度范围内的 $\langle 110 \rangle$ 轴线,则被认为具有剪切结构。

[0016] 已知更高的塑性应变率(r 值)能够提高金属的可成型性,并且,具有主体 $\langle 111 \rangle // ND$ 结构成分的体心立方或面心立方金属具有更高的塑性应变率(r 值)。因此,以 $\langle 111 \rangle // ND$ 作为主体成分之一的剪切结构对于提高面心立方金属的可成型性是理想的。

[0017] 将传统(对称)轧制切换为非对称轧制工艺,可能会改变沿板材或片材厚度方向的剪切应变变量。沿厚度方向的剪切应变总量能够增加,更具体地讲,中间厚度处可以经受一

定量的剪切应变,而这在传统轧制中是不可能的。现有技术非对称轧制方法包括使用具有不同直径的轧辊,具有不同转速的轧辊,和具有不同表面特性以导致工件顶表面和顶部轧辊之间的摩擦系数与工件底表面和底部轧辊之间的摩擦系数不同的轧辊。由于恒定地控制摩擦系数中的难度,具有不同的顶部和底部摩擦系数的非对称轧制是难以实现的,并且在这里不再进一步讨论。前面这些现有技术方法也可被用于减小厚度方向织构梯度。

[0018] 应用上述类型的非对称轧制以产生剪切织构和最小化织构梯度在现有技术被描述过。例如请参看 Field 等人的“Microstructural Development in Asymmetric Processing of Tantalum Plate”, J. Electronic Mat., Vol 34, No 12, 2005; Sha 等人的“Improvement of recrystallization texture and magnetic property in non-oriented silicon steel by asymmetric rolling”, J. Magnetism and Magnetic Mat., Vol 320, 2008; Lee 和 Lee 的“Analysis of deformation textures of asymmetrically rolled steelsheets”, Internat. J. Mech. Sci., Vol 43, 2001; Lee 和 Lee 的“Texture control and grain refinement of AA 1050 Al alloy sheets by asymmetric rolling”, Internat. J. Mech. Sci., Vol 50, 2008; Jin 等人的“Evolution of texture in AA6111 Al alloy after asymmetric rolling with various velocity ratios between top and bottom rolls”, Mat. Sci. and Eng., Vol 465, 2007; Jin 等人的“The reduction of planar anisotropy by texture modification through asymmetric rolling and annealing in AA5754”, Mat. Sci. and Eng., Vol 399, 2005; Kim 等人的“Formation of textures and microstructures in asymmetrically cold rolled and subsequently annealed aluminum alloy 1100 sheets”, J. Mat. Sci., 2003; Zhang 等人的“Experimental and simulation textures in an asymmetrically rolled zinc alloy sheet”, Scripta Materialia, Vol 50, 2004; 以及 Kim 等人的“Texture and microstructure changes in asymmetrically hot rolled AZ31 magnesium alloy sheets”, Mat. Lett. 59, 2005。

[0019] 上面描述的非对称轧制方法通过在顶部和底部轧辊直径或顶部和底部轧辊速度方面采用非对称性而沿板材的厚度方向引入一些量的剪切应变。随着顶部和底部轧辊的轧辊直径或轧辊速度比增加,引入板材的剪切应变增加,但这些比例以及可利用这些方法引入的剪切应变的量在实际中受到限制。

发明内容

[0020] 为此,本发明提供了用于控制材料结晶织构以改进相关材料特性并且提高材料性能的轧制设备和方法。本发明能够引入对沿板材或片材厚度方向的剪切应变量的控制,这会导致板材和片材具有最小厚度方向织构梯度。溅射靶中的最小厚度方向织构梯度能够改进所产生的膜的厚度的可预见性和均匀度,并且因此而使得更容易使用靶。

[0021] 引入剪切应变还能提供这样的剪切织构,其导致材料例如面心立方金属的更好的可成型性,这会在许多行业中广泛采用的成型操作中增加产量且减小加工成本。

[0022] 改进的剪切织构还能够改进材料例如晶粒取向硅钢的磁特性(即磁渗透性)。当晶粒取向硅钢被用作变压器和其它电机的铁心时,改进的磁特性导致能量节约。

[0023] 在本发明中,工件(板材或片材)绕平行于轧机中的轧辊轴线的轴线倾斜规定的角度(倾斜角度)。所述倾斜工件被进给到轧辊之间,并且在整个轧制道次中进料倾斜角度

被维持。如这里所示用的,这一工艺被称作“倾斜轧制”。作为倾斜轧制的结果,材料沿工件厚度方向被剪切。利用所述倾斜角度以及传统轧制控制中常用的其它轧制参数,剪切应变的量可被控制。多道次被用于将工件的厚度减小至期望值。

[0024] 倾斜轧制可以通过专门设计的轧机实现,该轧机具有可被倾斜至不同角度的输送带。在一个实施方式中,所述倾斜的输送带是轧机的整体部件。这允许利用轧机以很快的切换速度进行传统轧制和倾斜轧制。在另一实施方式中,倾斜轧制还能如此在传统轧机中实现,即借助于可被容易安装在轧机上、而不需要有大的改动的夹具。在这个实施方式中,设备的初始投资很小,并且轧机可被用于传统和倾斜轧制这二者,但切换时间大于上面描述的专门设计的轧机。然而,在这两个实施方式中,在传统和倾斜轧制之间相对短的切换时间提供了制造柔性,这与其它要求较长切换时间、从而导致设备的停机时间较长的非对称轧制工艺不同。

[0025] 为此,在一个方面,本发明提供了一种轧制金属板材或片材的方法,该方法包括下述步骤:将板材或片材以水平面上方或下方 2-20 度之间的角度进给到轧机的轧辊之间。

[0026] 在另一方面,本发明提供了一种用于以一角度轧制金属板材或片材的设备,该设备包括轧机,所述轧机具有在水平面上方或下方以 2 和 20 度之间的角度倾斜的倾斜加料台。

[0027] 通过附图、详细描述以及权利要求,本发明的这些以及其它方面可以更清楚地展现出来。

附图说明

[0028] 下面将参照附图进一步详细描述本发明,在附图中:

[0029] 图 1 是显示了 a) 在单步轧机和 b) 在多步轧机中倾斜轧制板材的实施方式的示意图。

[0030] 图 2(a)、2(b) 和 2(c) 是描绘 (a) 具有不同轧辊直径的非对称轧制、(b) 具有不同轧辊速度的非对称轧制和 (c) 倾斜轧制的有限元建模的示意图。

[0031] 图 3 是示出了在直径比为 $1 < DR < 4$ 、速比为 $1 < SR < 4$ 且以倾斜角度 $0 \text{ 度} < TR < 15 \text{ 度}$ 进行倾斜轧制的非对称轧制的单道次 (5% 厚度减薄率) 中累积剪切与法向应变之比的曲线图。

[0032] 图 4 是示出了沿工件厚度方向的不同部位单道次轧制的累积剪切与法向应变之比的曲线图。这些部位是顶表面 (TS), 顶表面和中间厚度处之间的中点 (TQ), 中间厚度处 (MT), 中间厚度处和底表面之间的中点 (BQ), 和底表面 (BS)。该曲线图被描绘出以便揭示不同减薄率的作用。

[0033] 图 5 是示出了在表面 (S)、表面与中间厚度处之间的中点 Q 和板材中间厚度处 (M) 的平均累积剪切与法向应变之比的曲线图。图 5 中的 S 处的值是图 4 中的 TS 和 BS 处的值平均后得到的, 图 5 中的 Q 处的值是图 4 中的 TQ 和 BQ 处的值平均后得到的。图 5 中的 M 处的值等同于图 4 中的 MT 处的值。

[0034] 图 6 是显示使得在轧制的工件中从 2" 至 0.25" 厚度的织构梯度最小化的最佳减薄率的示意图。

[0035] 图 7 是以卷曲度量化地示出了工件卷曲行为的曲线图, 该卷曲度是工件在轧制之

后的曲率半径的倒数。厚度减薄率对不同厚度工件的作用被示出。

[0036] 图 8 是专门设计的具有倾斜输送带、用于倾斜轧制的轧机的示意图。

[0037] 图 9 是安装在传统轧机上的倾斜轧制设备的代表性实施方式的示意图。

[0038] 图 10 是显示工件被引入轧辊时的示意图。“完美送入”位置被示出。在完美送入位置,工件同时接触顶部和底部轧辊。

具体实施方式

[0039] 在本说明书和权利要求书中所使用的数字,包括那些在实施例中使用的,除非另加说明,所有数字都可被解读为如同在其前面带有文字“大约”,不论该文字是否真正出现。另外,这里记载的任何数值范围应被解读为涵盖了包含其中的所有子范围。

[0040] A:倾斜轧制工艺

[0041] 本发明的倾斜轧制工艺,如示于图 1 中的两个实施方式,其中图 1a 示出了单步轧机、图 1b 示出了多步轧机,提供了向工件中引入剪切应变的改进方法。在所述倾斜轧制工艺中,利用倾斜加料台 (4a-f) 或倾斜输送带,工件 (3) 被以进料倾斜角度进给到轧机的轧辊 (1) 和 (2) 中。在整个轧制过程中进料倾斜角度被维持,从而所述倾斜加料台或倾斜输送带可防止工件后缘变为水平。

[0042] 通过调节参数例如倾斜角度和每个道次之后的厚度减薄率,可以控制因倾斜轧制而沿材料的厚度方向引入的剪切应变量,如下面所解释。利用本发明的方法控制工件中剪切应变量的能力,允许在板材或片材中实现两个类型的特殊织构:1) 最小厚度方向织构梯度,2) 沿工件厚度方向的剪切织构。

[0043] 角度选择取决于使用者使用所述倾斜轧制工艺的主要目的:最小化厚度方向织构梯度还是产生剪切织构。优选地,在水平面上方或下方的倾斜角度在 2 和 20 度之间。为了最小化厚度方向织构梯度,倾斜角度优选地在 3 和 7 度之间。为了增加剪切织构,优选地该倾斜角度在 10 和 20 度之间。

[0044] 作为一般规律,随着所述倾斜角度增加,剪切织构可以更有效地引入材料中。然而,在更大的倾斜角度下,厚度方向织构梯度并不肯定减小。对于给定的工件厚度,厚度缩减百分比和倾斜角度应当一起调节,以便实现最小厚度方向织构梯度。为了最优化每个重要参数的仿真方法将在下面详细给出,并且本领域技术人员可以在仿真的基础上调节这些参数,以便平衡各种因素并且实现期望的结果,即具有主体剪切织构或最小织构梯度的板材或片材形式的最终产品。

[0045] 所述倾斜角度可以在水平面上方或下方,取决于轧制道次。对于轧制板材(单步轧机),该角度应当在水平面上方,因为重力的作用会导致工件定位在所述倾斜加料台上。如果多步轧机被用于轧制片材,所述倾斜角度的方向优选地被交替改向,以便节约竖直方向空间和将倾斜轧制的作用均匀地分布至片材的顶部和底部半体。

[0046] 工件中的应变对于“变形织构(deformation texture)”具有直接影响,“变形织构”是本领域公知的术语。在材料利用金属加工方法(本例中为轧制)发生应变后,工件优选被通过将工件温度提高到再结晶温度之上而被退火,以便实现再结晶,尤其是当金属加工过程是在低温下实施(接近或低于室温)或在中温下实施(高于室温但低于再结晶温度)时。如果在金属加工过程中工件达到高于再结晶温度的温度,则可能发生动态再结

晶,并且金属加工候的退火步骤可能就不再需要了。在再结晶过程中工件的组织可能会改变,且所产生的组织被称作“再结晶组织”。然而,工件的再结晶组织在很大程度上与变形组织有关。因此,本发明的倾斜轧制方法的益处可以在低温、中温、高温轧制中体现出了。

[0047] 金属板材或片材可以倾斜地穿过轧辊一次以上,换言之,穿过 2、3、4、5 或更多次。轧制道次被重复直至工件的期望厚度被达到。如果相对于工件中间厚度处的对称组织是期望的,尤其是为了最小化厚度方向组织梯度,厚度缩减百分比应当调节以使得达到最终厚度所需的最小道次数优选至少为四或以上。为了最大减薄率需要考虑的另一因素是轧机上的负载。厚度缩减百分比应当保持低于可能导致轧机过载的减薄率。

[0048] 有限元仿真被用于比较利用本发明的倾斜轧制方法和利用其它非对称轧制方法轧制的工件中产生的剪切应变级别。有限元仿真允许计算工件中应变的量和方向,这是在试验中很难实现的。有限元仿真在这里被用作量化倾斜轧制与其它非对称轧制方法进行比较的作用的工具。全部仿真使用有限元软件包 Deform 2-D,其可购自美国俄亥俄州哥伦布市的 Scientific Forming Technologies Corp.。

[0049] 首先对单道次轧制初始厚度为 0.5" 的工件建立仿真。图 2 示出了为每个工艺建立的仿真,其中包括轧制的直径比为 4(图 2a),速比为 4(图 2b),以及以倾斜角度 10 度倾斜轧制(图 2c)。在一组仿真中,每个轧制道次工件的厚度被减小 5%,在另一组仿真中,每个轧制道次工件的厚度被减小 10%。摩擦系数 0.5 和剪切摩擦模型被用于全部仿真中。

[0050] 对于仿真具有不同轧辊速度的轧制,顶部和底部轧辊的直径设置为 16"。较快轧辊(图 2b 中的辊 1)的旋转速度设置为 1 弧度/秒,较慢轧辊(图 2b 中的辊 2)的旋转速度基于期望的轧辊速比而变化。对于仿真具有不同轧辊尺寸的轧制,图 2a 中的较大轧辊(1)的直径固定为 16",图 2a 中的较小轧辊(2)的直径基于期望轧辊直径比而变化。1 弧度/秒的旋转速度被用于具有不同轧辊直径的轧制。

[0051] 所述倾斜轧制仿真采用轧辊直径为 16"、轧辊速度为 1 弧度/秒(约 10rpm)。

[0052] 摩擦系数、轧辊直径和轧辊速度定量地影响仿真结果,但从仿真结果为定量评估不同工艺而获得的结论不会因这些参数的选择而受到显著影响。

[0053] 图 2 还示出了工件从轧辊出来时是弯曲的,这被称作卷曲效应。

[0054] 钽,作为一种体心立方金属,被选择为工件材料。需要着重指出,对于不同材料在给定的一组轧制参数设定值下,材料中获得的剪切应变的量是非常类似的。然而,因剪切应变而产生的组织将基于材料而变化。因此,剪切应变的仿真结果不会受到仿真中选择的材料的显著影响。

[0055] 随着材料经过轧辊,剪切应变会累积。材料在咬入部位沿一个方向剪切,并且随着材料经过轧制中性点,剪切方向发生改变。通过剪切成分的绝对值的总合,"累积"剪切应变被计算出来。通过平均从工件顶表面至底表面的均匀相隔的五个部位的剪切应变,沿厚度方向的平均累积剪切应变被计算出来。

[0056] 图 3 示出了对于初始厚度为 0.5" 和减薄率为 5 的不同工艺的单道次轧制的累积剪切与法向应变之比。直径比(DR)和轧辊速度率(SR)在 1-4 的范围内变化。在 0-15 度的范围内的倾斜角度(TR)被模拟。直径(DR)与速度(SR)比为 1、倾斜角度(TR)为 0 的情况等同于传统轧制。线性插值被用于确定图 3 中没有明确表示出的倾斜角度值、轧辊直径和轧辊速比时的累积剪切应变。

[0057] 图 3 示出了倾斜角度 (TR) 为 5 度的倾斜轧制实现的剪切应变类似于采用轧辊直径比 (DR) 为 1.6 时的非对称轧制所实现的剪切应变。

[0058] 倾斜角度为 15 度时的倾斜轧制实现的剪切应变类似于轧辊直径比为 2 时的非对称轧制实现的剪切应变。图 3 还示出了倾斜角度为 5 度时的倾斜轧制实现的剪切应变大于轧辊速度率 (SR) 为 4 时的非对称轧制实现的剪切应变。

[0059] 通过任何非对称轧制方法、包括倾斜轧制而引入的剪切应变变量取决于工件的厚度和每个轧制道次的厚度减薄率。例如,如果对于相同厚度 (0.5") 和更高的减薄率 (举例来说 10%) 将倾斜轧制与其它非对称轧制方法作比较,略微不同的结果可从图 3 中提供的结果中获得。

[0060] 当每个轧制道次的厚度缩减百分比为 10% 时,对于 5 度倾斜轧制沿厚度方向的平均剪切应变变量与由在直径比为 1.65 和速比为 4 时的非对称轧制获得的剪切应变变量相当。以 10 度的倾斜角度倾斜轧制所产生的剪切应变类似于直径比为 2 时的。

[0061] 根据这些结果,可以总结出,所述倾斜轧制工艺同其它非对称轧制方法相比 (考虑到每种方法的局限性) 能够在材料更有效地引入剪切应变。与直径比为 1.6 的非对称轧制或与轧辊速比为 4 的非对称轧制相比,倾斜角度低至 5 度就能导致相当或更高的剪切应变。对于轧辊直径为 1.6 或速比为 4 的非对称轧制方法,在轧机中进行的工艺所遇到的实际困难可能是很严重的;而直到倾斜角度为 15 或 20 度,倾斜轧制也不会遇到实际应用困难。

[0062] 在单道次倾斜轧制中,沿工件厚度方向的剪切应变既非均匀的也非相对于中间厚度处对称的。图 4 示出了以 5 度的倾斜角度和每个轧制道次 5-15% 的减薄率进行的倾斜轧制沿工件厚度方向的不同部位实现的剪切应变的有限元仿真结果,即顶表面 (TS)、上部四分之一处 (TQ)、中间厚度处 (MT)、下部四分之一处 (BQ) 和底表面 (BS)。图 4 还示出了每个轧制道次减薄率为 15% 的传统轧制中的剪切应变。

[0063] 为了将剪切应变均匀地分布至工件的顶部半体和底部半体,工件可以在每个倾斜轧制道次后翻面,或以预定间隔例如每两个轧制道次后翻面。工件翻面的频率取决于沿工件厚度方向的剪切应变均匀度的要求。为了最小化厚度方向织构梯度,沿厚度方向的剪切应变的变化应当减小。顶部和底部表面 (S)、上下部四分之一处 (Q) 和中间厚度处 (M) 的平均剪切应变被描绘于图 5 中。在仿真中,倾斜轧制在中间厚度处 (M) 的剪切应变相对于传统轧制 (TR = 0 度) 的零剪切应变而言明显增加到一定量值,该量值受减薄率的影响不大,而是类似于表面 (S) 和四分之一厚度处 (Q)。对于 0.5" 厚的工件,通过采用每个轧制道次 6% 减薄率且倾斜角度为 5 度的轧制,厚度方向织构梯度可以最小化。对于固定的倾斜角度,每个轧制道次的最佳减薄率是能够实现现在工件不同厚度处最小化厚度方向织构梯度的减薄率。对于 5 度的倾斜角度,图 6 示出了厚度在 0.25" 和 2" 之间的工件的最佳减薄率。利用上面描述的仿真,可以为其它角度确定最佳减薄率。

[0064] 工件在传统轧制中的卷曲可能是生产中的主要问题,因为卷曲可能导致难以将工件进给到轧辊之间,或是导致工件的前缘在轧机的排放侧碰到并损坏输送带。除了这些实际困难,卷曲会影响工件中的法向应变被倾斜导致额外的应变和织构非均匀度。随着工件在轧制中卷曲,因卷曲导致的额外应变会出现在材料中。因卷曲导致的应变靠近表面达到其最大值,并在中间厚度处减小到零。卷曲对织构的影响可以通过将因卷曲导致的最大应变与轧制中的法向应变相比较而进行评估。卷曲也可能出现在倾斜轧制和其它非对称轧制

方法中,除非以下面描述的方式使其最小化。

[0065] 已知在具有不同轧辊速度的非对称轧制中通过针对某一厚度最优化减薄率来最小化工件卷曲。例如,请参看 Shivpuri 等人的,“Finiteelement investigation of curling in non-symmetric rolling of flat stock”,*Int. J. of Mech. Sci.*, Vol. 30, 1988; 以及 Knight 等人的“Investigations into the influence of asymmetric factors and rolling parameters on strip curvature during hot rolling”, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 134, 2003。

[0066] 一些概念可以应用到倾斜轧制。图 7(对于 5 度的倾斜角度)中提供的仿真结果显示出在不同厚度和减薄率下工件离开轧辊时的卷曲度。可注意到,仿真中的最大减薄率为 20%。通过计算卷曲工件的曲率半径的倒数,卷曲被量化。图 7 中的曲线图示出了对于每个厚度卷曲度为零时的减薄率,在某些情况下存在两个这样的减薄率。图 7 可以用来指导以 5 度的倾斜角度进行板材轧制时为了最小化卷曲度而最优化轧制方案。下面的表 1 列举了以 5 度的倾斜角度轧制不同厚度的工件时为了获得最小卷曲度的减薄率范围。左侧一列减薄率范围给出了优选减薄率,以使得因卷曲导致的靠近工件表面的最大应变小于法向应变的 20%。右侧一列减薄率范围示出了更优选的减薄率,其可以用于将因卷曲导致的最大应变维持在低于轧制导致的法向应变的 10%。

[0067] 表 1

[0068]		对于 20% 弯曲应变的	对于 10% 弯曲应变的
[0069]	厚度	减薄率范围	减薄率范围
[0070]	0.250"	6.5-20	8-15
[0071]	0.375"	3-5 或 9-20	3.5-4.5 或 12.5-15
[0072]	0.500"	4-20	4.5-7 或 16-20
[0073]	0.750"	6-14	7-11
[0074]	1.000"	7.5-20	9-13.5
[0075]	2.000"	11-20	15.5-20

[0076] 这里使用的表述“基本上无卷曲”指的是产生的最大卷曲应变为法向应变的 10% 或以下。这可以通过采用预定的减薄率实现,如前面所解释。

[0077] 还需要控制轧辊粗糙度和润滑性,以确保在不同道次之间或不同工件之间获得恒定的工件卷曲。如果轧辊顶部和底部轧辊的粗糙度和润滑性不同,顶部轧辊和工件之间的摩擦系数与底部轧辊和工件之间的摩擦系数将会不同。摩擦系数的这种差异导致卷曲行为的不一致性,并且可能发生过度卷曲,即使是在给定的倾斜角度和工件厚度下已经最优化了减薄率时。轧辊和工件优选被供应润滑剂喷流,以增大摩擦系数的均匀度。

[0078] 另一决定最终织构的重要因素是工件的初始织构。如果工件初始织构不理想,则难以实现利用本发明方法的倾斜轧制的益处。例如,如果在轧制前工件初始织构是非均匀的,则倾斜轧制后的织构容易是非均匀的,即使所述倾斜轧制中产生的应变是基本均匀的。

[0079] 取决于最终产品的要求,工件可以可选地在一些道次进行倾斜轧制、而在其它道次进行传统轧制。传统轧制中的轧制经验优选地被采用,以便满足最终产品的附加要求。

[0080] B: 倾斜轧辊夹具

[0081] 用于轧制金属板材和 / 或片材的传统轧机在本领域是公知的。在典型轧机中,每

个工作轧辊具有基本相等的直径并且以基本相等的轧制速度操作。

[0082] 传统轧机可以被重新设计和制作,以便允许绕平行于轧辊轴线的轴线倾斜输送带。一种这样的轧机的示意图描绘于图 8。顶部轧辊 (1) 和底部轧辊 (2) 由轧机机架 (6a-b) 支撑。借助于可选地以不同角度倾斜的输送带 (5a-b),工件 (3) 以倾斜角度被进给到轧辊 (1) 和 (2) 中。输送带 (5a-b) 可以通过定位臂 (7a-b) 而倾斜。输送带的倾斜可以通过任何方法实现,并且可以由本领域技术人员设计。优选地,输送带还可沿垂直方向和轧制方向移动以确保完美送入,如下面所解释。

[0083] 作为专门设计的轧机的替代,倾斜轧制可以借助于倾斜轧辊夹具实现,倾斜轧辊夹具可以安装在传统轧机上,而不需要作大的改造。这使得生产设备具有更大的柔性。

[0084] 可以用于本发明方法的倾斜轧辊夹具的一种实施方式示于图 9,图中示出了轧机具有工作轧辊 (1) 和 (2),轧机机架 (6a-b),和输送带 (8)。所述倾斜轧辊夹具包括各种元件,例如可选的传送台 (9),可选的横梁 (10),和倾斜加料台 (4)。所述倾斜加料台 (4) 可以制作成具有特定的倾斜角度,或通过绕平行于轧辊轴线的轴线枢转而具有可变倾斜角度。通过维持进料倾斜角度,工件被进给到工作轧辊 (1) 和 (2) 中。随着工件在轧辊之间移动,工件趋向于被推向水平,且工件后缘被向下推到所述倾斜加料台上,从而导致在所述倾斜加料台上的拖滞力。可选地,所述倾斜加料台可以设有图 10 中的辊 (12)。图 10 中的位于所述倾斜加料台上的辊 (12) 通过减小工件和所述倾斜加料台之间的摩擦力而减小拖滞力。在传送台 (9) 上提供辊,可以使得工件更容易进入轧辊。

[0085] 夹具由附连于轧机机架 (6a-b) 上的横梁 (10) 支撑,以防止夹具被拖入工作轧辊。作为横梁的替代,所述倾斜加料台可以栓接于输送带 (8),如果输送带具有强力的结构支撑的话。轧机机架 (6a-b) 和横梁 (10) 之间的垫片 (11a-b) 允许水平地调节所述倾斜加料台,输送带 (5) 和倾斜加料台 (4) 之间的垫片 (13) 能够实现沿垂直方向调节,见图 10。为确保“完美送入”,沿水平和垂直方向是必需的。在示于图 10 的实施方式中,所述倾斜夹具只安装在轧机的一侧上,但如果需要的话,可选地,相同夹具可以安装在两侧上。为了使用两个倾斜夹具,第一个夹具可以安装在轧辊一个侧面上,第二个夹具安装在轧辊相反侧面上以便只覆盖轧辊一半宽度。

[0086] 工件在传统轧制以及倾斜轧制工艺中都趋向于卷曲。如果工件在一个道次中卷曲,就会变得难以将工件进给到下一道次的轧辊之间。这对于传统和倾斜轧制来说都可能是严重问题。这可以如图 9 所示来校正,图中示出了使用工作轧辊的一半宽度来进行倾斜轧制。工作轧辊的另一半宽度用于“自由通过”,如示于图 9,或用于传统轧制。该实施方式可在倾斜轧制中实现两个目的:1) 使工件平坦化,和 2) 将工件传送至装有倾斜夹具的那一侧面,以便进入下一倾斜轧辊道次。在自由通过期间,顶部和底部轧辊之间的辊隙被设置成没有、或仅有很小的厚度缩减。即使是没有工件厚度缩减,工件也会在自由通过期间被校平。一旦工件被传送到轧机的具有倾斜轧辊夹具的那一侧面,工件可以手工地或通过采用带吸杯的吊具被定位到传送台上。然后工件可以手工地或利用液压推进器而容易地被推入工作轧辊以便进行下一道轧制。

[0087] 为了贯穿整个工件实现倾斜轧制的益处,所述倾斜角度应当在倾斜轧制过程中得以维持。一旦后缘离开所述倾斜加料台,工件趋向于被推向水平。在这一状况出现后,倾斜轧制变为传统轧制,从而被轧制材料部分不再能获得倾斜轧制的益处。

[0088] 为了最小化这种效应,重要的是最小化工作轧辊和倾斜加料台末端(15)之间的距离。图10示出了倾斜加料台末端(15)的放大图。所述倾斜加料台(4)上的轧辊(12a-c)具有一个重要功能,即减小工件(3)和所述倾斜加料台(4)之间的摩擦力。在空用于支撑轧辊的空间非常有限的情况下,要求轧辊在所述倾斜加料台上尽可能靠近轧辊(1)和(2),是设计轧辊和所述倾斜加料台时的一个重要考虑因素。倾斜加料台末端(15)的楔角(14)使得能够尽可能靠近轧辊,同时提供足够的空间以便以足够的强度支撑轧辊。

[0089] 在工件顶部和底部边缘同时与顶部和底部轧辊接触的情况下,如果工件不能在“完美送入”条件下引入轧辊,则所述倾斜角度不能被维持。如果不能建立完美送入,工件的倾斜角度与所述倾斜加料台的倾斜角度不同。

[0090] 除了控制所述倾斜角度,还要求完美送入以便维持工件和所述倾斜加料台之间大的接触面积。如果工件不是以完美送入的条件引入的,在加料台末端或在工件后缘,工件和所述倾斜加料台之间的接触被从面接触减小至线接触。线接触可能导致所述倾斜加料台或工件上的过量接触压力,这可能会引起加料台或工件的缺陷。

[0091] 为实现完美送入,倾斜加料台末端应当被正确定位;位置将基于厚度和每个轧制道次的减薄率而变化。一旦倾斜加料台末端被定位在竖直方向上以确保完美送入,倾斜加料台末端优选地沿水平方向定位以使得该末端移动到尽可能靠近轧辊。因此,所述倾斜加料台(4)应当是可调的,以便能够沿竖直和轧制方向移动。通过改变图10中的垫片(13)和图9中的垫片(11a-b)的高度,所述倾斜加料台(4)可以分别沿竖直和轧制方向调节。工件的平整度也构成实现完美送入的条件。对于平坦工件,这里解释的实现完美送入的条件可以更精确地实现。

[0092] 这种夹具的另一优点是其可以在15分钟内容易地安装在传统轧机上。这种安装并不需要对轧机作大的改造。轧机可被用于传统轧制,然后可以被切换到倾斜轧制而不需要严重影响生产。

[0093] 实施例

[0094] 通过下面的实施例进一步解释本发明,但不意味着本发明局限于这些实施例。

[0095] 在下面提供的两个例子中,通过粉末冶金制作的钽工件被用作轧制的初始工件材料。已知通过粉末冶金制作的工件的组织是接近于随机的。如果具有随机组织的工件被用作初始材料,则先前加工的作用可以被隔离开,从而倾斜轧制的效果可以清楚地观察到。

[0096] 例1(对比例)

[0097] 根据美国专利6,521,173由粉末制成三个7至8mm厚的板材。下面给出的过程(步骤1至6)导致具有165mm直径和81mm厚度的料饼。

[0098] 具体地讲,这些操作包括:

[0099] 1) 将粉末冷等静压(CIP)至60-90%密度;

[0100] 2) 将压缩的料坯封入钢罐中,然后抽真空和密封钢罐;

[0101] 3) 将料坯热等静压(HIP)至100%密度的钽料;

[0102] 4) 去除钢罐;

[0103] 5) 将钽料退火;和

[0104] 6) 利用带锯或任何类似的适宜切割工具将钽料切割成适于被轧制成板材的切片:该切片的形状为曲棍球状料饼。

[0105] 料饼利用传统技术被轧制（包括以 33mm 的厚度退火的步骤），并且以传统方式最终处理。在轧制中，采用每个轧制道次 15% 的减薄率和不同道次之间 90 度转动。工件不被翻面。

[0106] 样品取自板材中心、板材半径中部和板材边缘（良好分隔的两个样品），并且通过 EBSD 以 10 μm 的步进量沿水平和垂直方向确定织构。平均晶粒尺寸为大约 ASTM 7 (28 微米 ALI)。一旦织构分布图显示出从分布图顶表面至底表面的织构已被获得，织构分布图被数学分析，以便量化厚度方向织构梯度，如下所述：

[0107] 1) 分布图被分为两个半部：上半部 (H1) 和下半部 (H2)。

[0108] 2) 具有切孔的掩膜被放在分布图上，切孔具有 90 μm 的高度以及满宽度 (1.64mm)，从而切孔顶部对应于分布图顶部。注意到切孔提供的窗口的高度选择为大约三个晶粒，但等于 EBSD 步进量的整数倍（本例中为 9 个步进量）。

[0109] 3) 计算出由 <100>//ND 的 15 度范围内的晶粒占据的切孔面积的比例，以及由 <111>//ND 的 15 度范围内的晶粒占据的切孔面积的比例。

[0110] 4) 掩膜被向下移动 10 μm，重复上述计算。

[0111] 5) 操作步骤 4 被重复进行，直至切孔底部对应于分布图底部。

[0112] 6) 对于每个厚度半部，所获得的数据被分析以便确定：

[0113] a) 穿过 100 晶向数据的最佳拟合直线的梯度，表示为 % 每 mm (100 梯度)。

[0114] b) 穿过 111 晶向数据的最佳拟合直线的梯度，表示为 % 每 mm (111 梯度)。

[0115] 三个样品的针对两个厚度半部的结果的分析结果如下：

[0116] 表 2

[0117]

板 1	100 梯度	111 梯度
中心 H1	-4.09	1.71
中心 H2	1.93	-3.10
半径中央 H1	-5.95	4.0
半径中央 H2	4.28	-3.89
边缘 1H1	-3.28	6.32
边缘 1H2	5.19	-2.48
边缘 2H1	-5.64	4.70
边缘 2H2	7.94	-4.47
板 2		
中心 H1	-6.34	4.96

中心 H2	4.55	-6.92
半径中央 H1	-6.48	7.97
半径中央 H2	5.54	-9.04
边缘 1H1	-6.50	8.00
边缘 1H2	6.36	-7.48
边缘 2H1	-7.57	8.48
边缘 2H2	-7.61	8.79
板 3		
中心 H1	-5.20	4.97
中心 H2	4.38	-2.14
半径中央 H1	-8.36	5.76
半径中央 H2	5.96	-6.74
边缘 1H1	-4.93	5.60
边缘 1H2	4.89	-4.46
边缘 2H1	-5.07	3.91
边缘 2H2	7.80	-7.46

[0118] 例 2(本发明)

[0119] 利用与上面描述相同的粉末冶金工艺(步骤 1 至 6)将 7.5mm 厚的板材制成 165mm 直径和 42mm 厚的料饼。

[0120] 然后将料饼构成的工件轧制成所需厚度。5 度的倾斜角度被使用。每个道次工件的厚度被减小大约 5-10%。每个道次后工件被绕垂直轴线转动 45 度。每四个道次后工件被翻面。轧制后工件的最终厚度为 7.5mm。以传统方式进行最终处理(退火等)。

[0121] 样品取自板材中心、板材半径中部和板材边缘,通过 EBSD 以 15 μ m 的步进量沿水平和垂直方向确定织构。平均晶粒尺寸为大约 ASTM $6^{1/2}$ (32 微米 ALI)。以与例 1 相同的方式计算出结果。

[0122] 表 3

[0123]

	100 梯度	111 梯度
--	--------	--------

中心 H1	-1.78	2.10
中心 H2	1.60	1.85
半径中央 H1	-1.11	1.20
半径中央 H2	2.84	2.70
边缘 H1	-1.06	0.97
边缘 H2	0.54	0.50

[0124] 尽管数据点的数量有限, 但将现有技术与本发明的方法进行统计学比较还是有用的。在表 4 中, 例 1 (对比例) 和例 2 (本发明) 的织构梯度的变化被比较。列于表 2 和 3 的织构梯度值的绝对值被用于获得例 1 中的板材 1、2、3 和例 2 中的板材的织构梯度的最小 - 最大范围、平均和标准偏差。表 4 示出了本发明描述的方法可显著地减小 100 和 111 成分的织构梯度。

[0125] 表 4

[0126]

	最小 - 最大 100 梯度	平均 100 梯度	标准差 100 梯度	最小 - 最大 111 梯度	平均 111 梯度	标准差 111 梯度
例 1 (板 1)	1.93-7.94	4.79	1.83	1.71-6.32	3.83	1.43
例 1 (板 2)	4.55-7.61	6.37	1.00	4.96-9.04	7.71	1.30
例 1 (板 3)	4.38-8.36	5.82	1.47	2.14-7.46	5.13	1.67
例 2	0.54-2.81	1.49	0.79	0.50-2.70	1.55	0.81

[0127]

[0128] 尽管前面为了解释的目的描述了本发明的特定实施方式, 但本领域技术人员显然可以理解, 在不脱离权利要求中限定的本发明范围的前提下, 可以对本发明的各个细节作出多种改变。

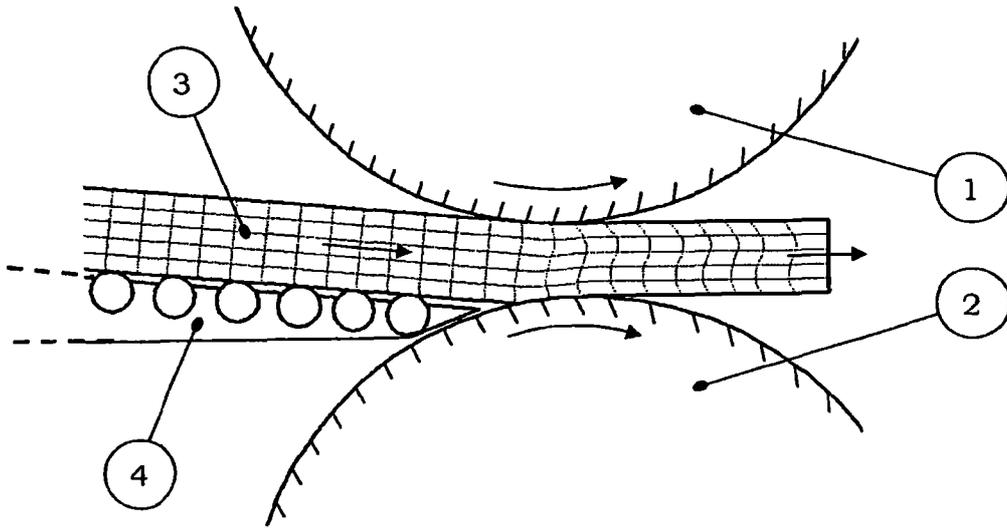


图 1a

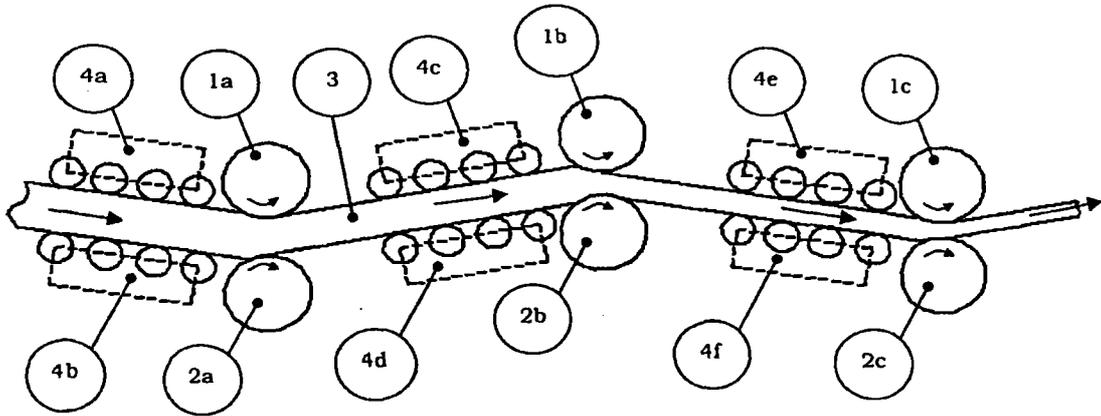


图 1b

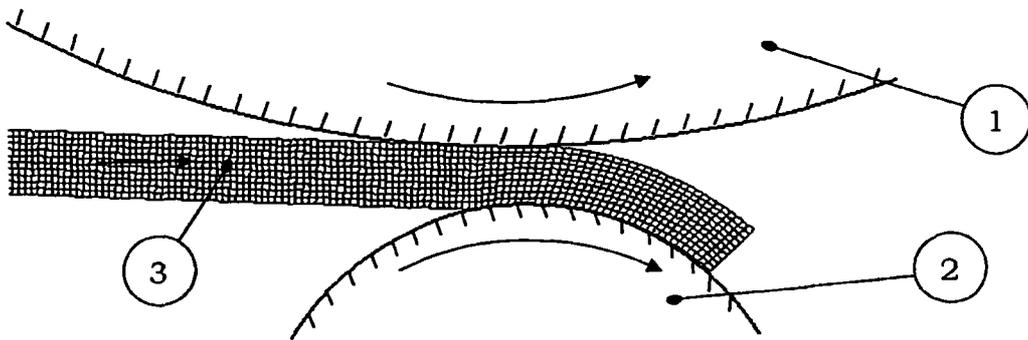


图 2a

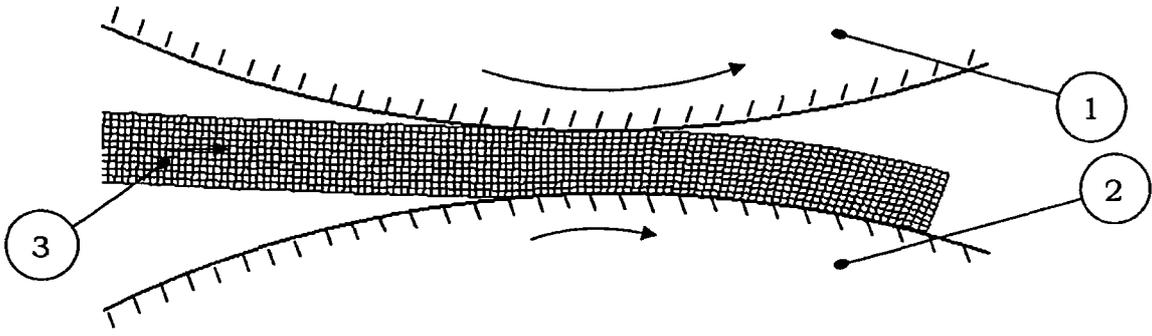


图 2b

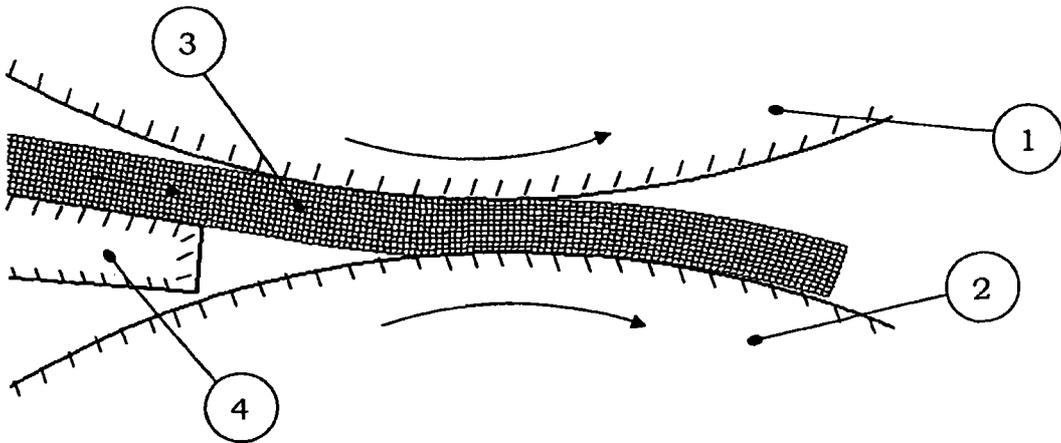


图 2c

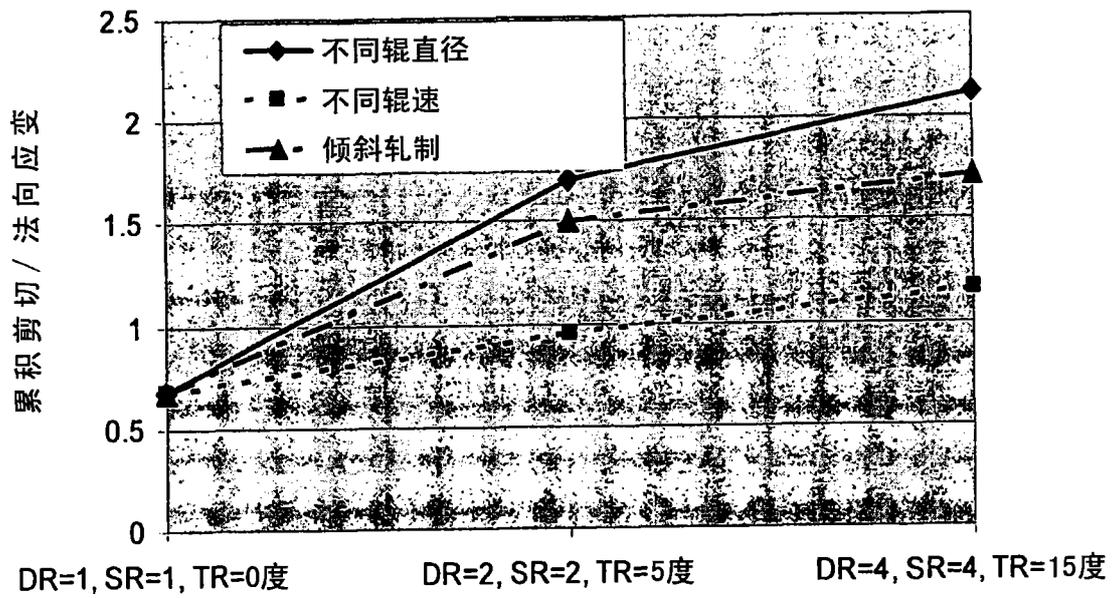


图 3

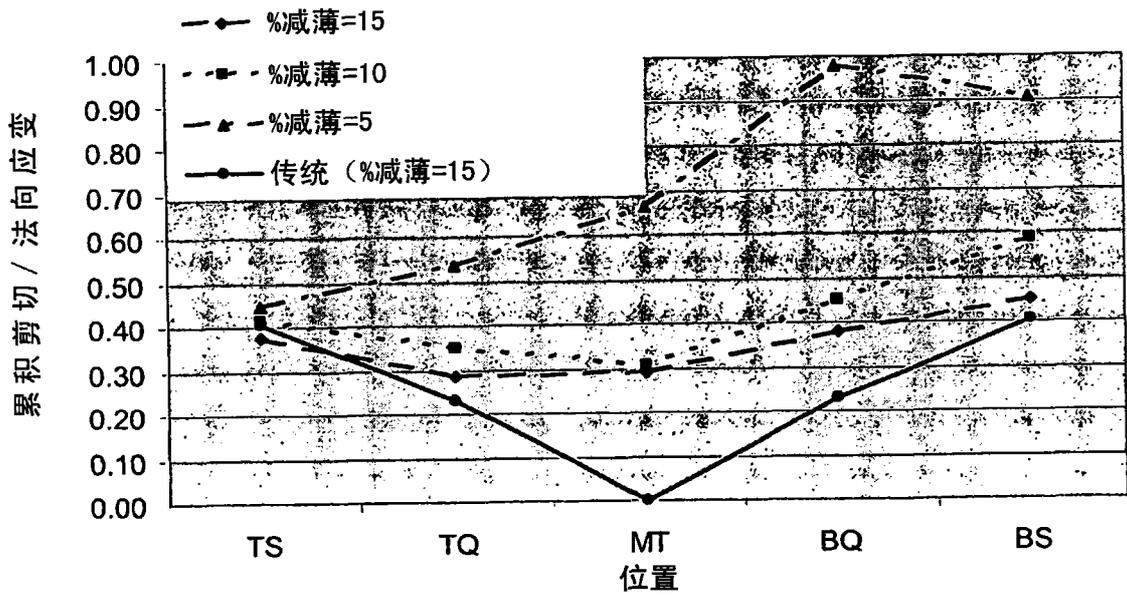


图 4

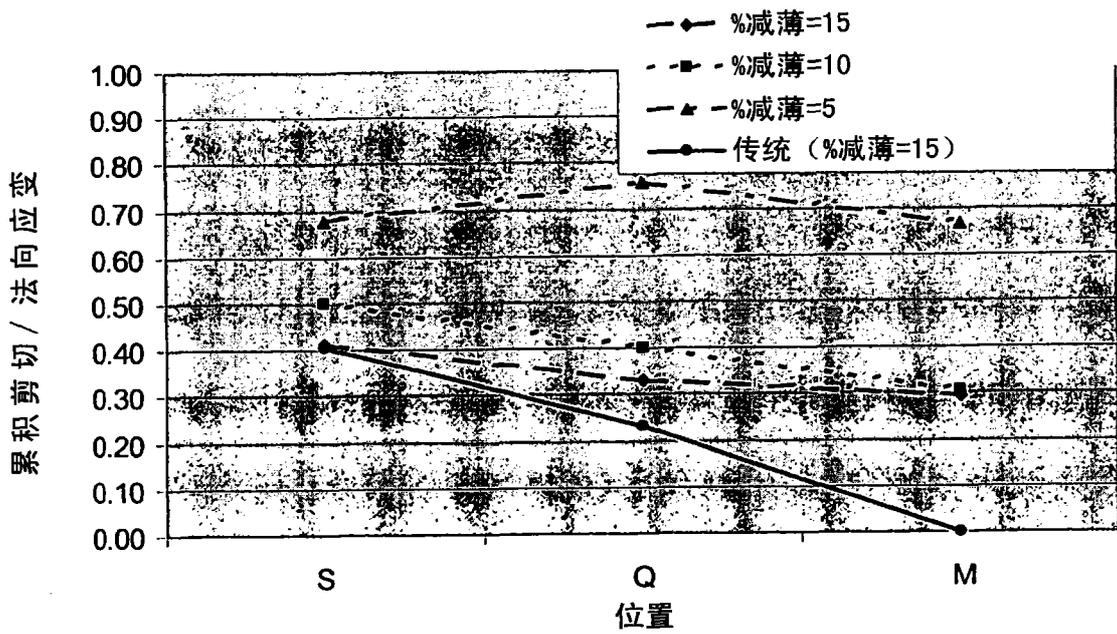


图 5

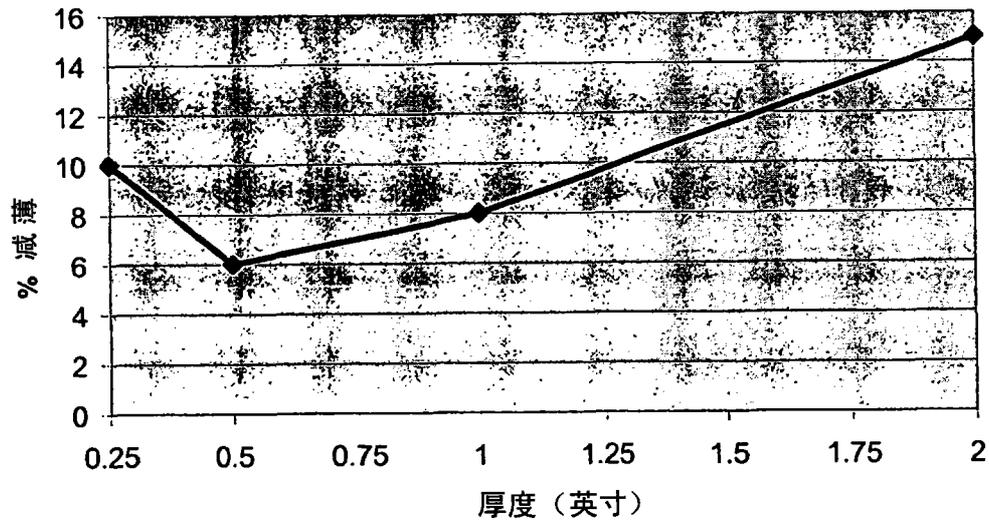


图 6

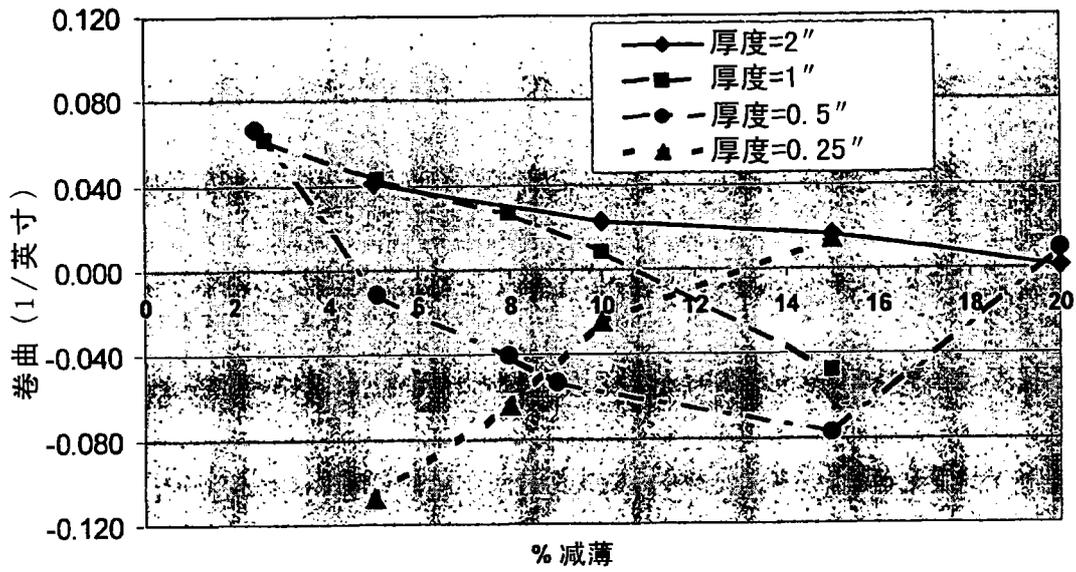


图 7

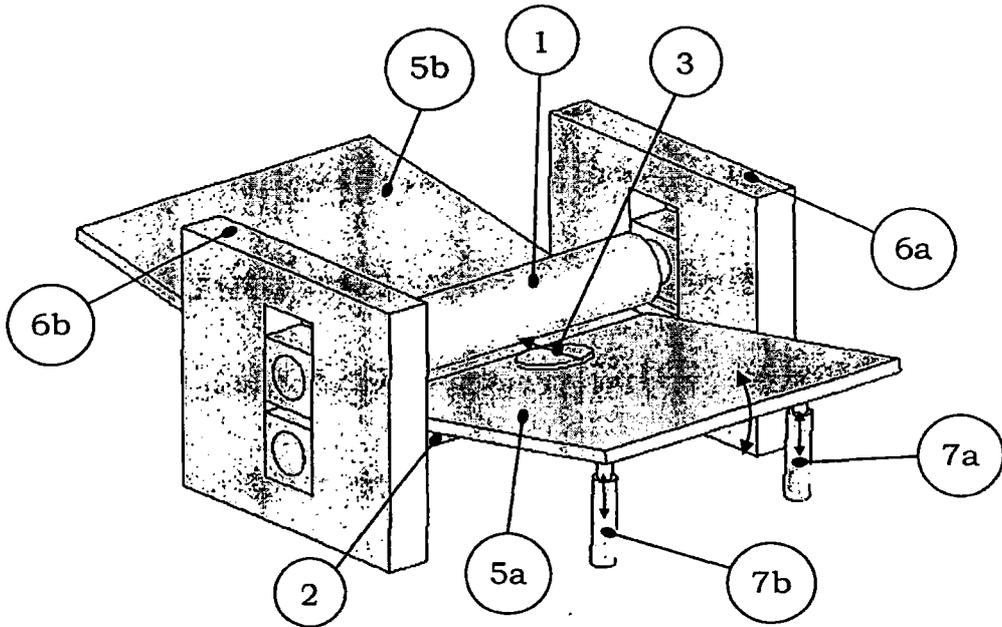


图 8

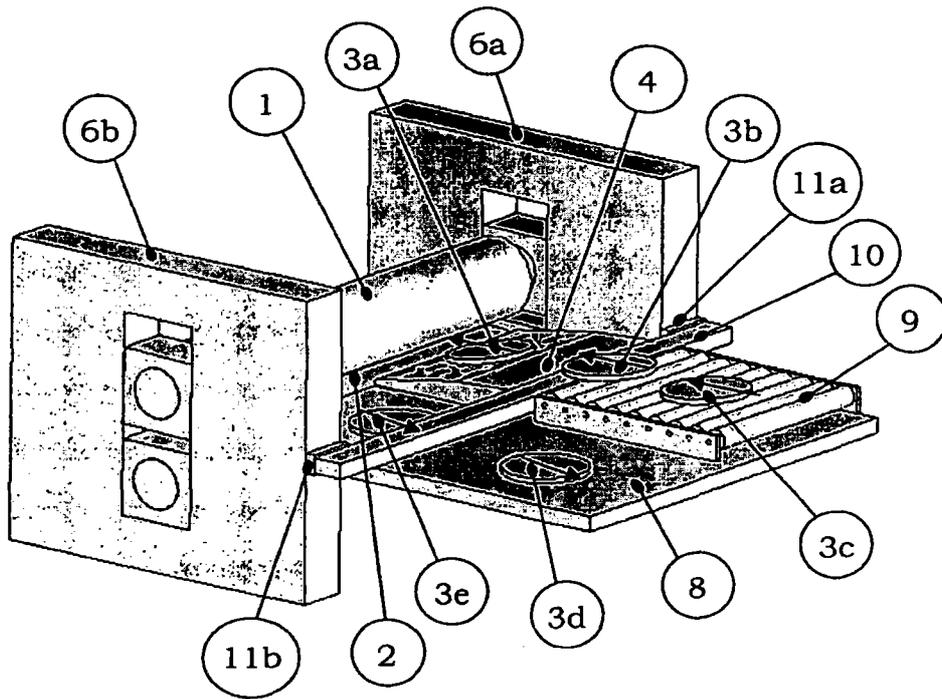


图 9

