

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
C22B 9/18 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 02808611.2

[45] 授权公告日 2008 年 2 月 6 日

[11] 授权公告号 CN 100366769C

[22] 申请日 2002.2.25 [21] 申请号 02808611.2
[30] 优先权
[32] 2001.3.8 [33] US [31] 09/802,064
[86] 国际申请 PCT/US2002/005510 2002.2.25
[87] 国际公布 WO2002/072897 英 2002.9.19
[85] 进入国家阶段日期 2003.10.21
[73] 专利权人 ATI 资产公司
地址 美国俄勒冈州
[72] 发明人 贝齐·J·邦德
劳伦斯·A·杰克曼
A·斯图尔特·巴兰塔
[56] 参考文献
CN 85100649B 1988.8.24

应变诱发 INCONEL718 合金相析出和转变.
陈宗霖, 刘文昌. 金属学报, 第 36 卷第 2 期.
2000

审查员 吴琛琛

[74] 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所
代理人 范明娥 巫肖南

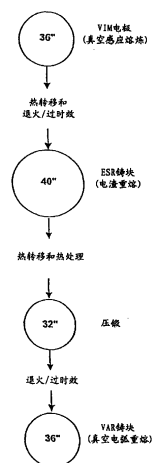
权利要求书 5 页 说明书 15 页 附图 3 页

[54] 发明名称

大直径镍基合金铸块的制造方法

[57] 摘要

一种制造镍基合金的方法包括在浇铸模具里浇铸合金然后在至少 1200 °F (649°C) 下退火和过时效铸块至少 10 小时。以至少 8 磅/分钟(3.63kg/min) 的熔化速率电渣重熔铸块, 然后将 ESR 铸块转移至加热炉中进行 4 小时的完全凝固, 然后进行新的后-ESR 热处理。由 ESR 铸块提供合适的 VAR 电极、电极在 8-11 磅/分钟(3.63-5.00kg/min) 的熔化速率下进行真空电弧重熔以形成 VAR 铸块。该方法由 718 合金和其他在浇铸期间经受严重偏析的镍基高温合金可以制造直径超过 30 英寸(762mm) 的优质 VAR 铸块。



1. 一种制造基本上没有正偏析和负偏析的镍基高温合金的方法，该方法包括：

在浇铸模具里浇铸一种镍基高温合金的合金；

在至少 1200°F(649°C)下加热至少 10 小时对合金进行退火和过时效；

以至少 8 磅/分钟(3.63kg/min)的熔化速度电渣重熔合金；

转移合金到加热炉里进行 4 小时的完全凝固；

在 600°F(316°C)到 1800°F(982°C)的第一温度下在加热炉里保持合金至少 10 小时；

以阻止合金内部热应力的方式从第一温度增加炉温到至少为 2125°F(1163°C)的第二温度；

在第二温度下保持至少 10 小时；

以 8-11 磅/分钟(3.63-5kg/min)的熔化速率真空电弧重熔合金的 VAR 电极以形成 VAR 铸块。

2. 根据权利要求 1 的方法，其中 VAR 铸块的直径大于 30 英寸(762mm)。

3. 根据权利要求 1 的方法，其中，VAR 铸块的直径为至少 36 英寸(914mm)。

4. 根据权利要求 1 的方法，其中 VAR 铸块的重量大于 21500 磅(9772kg)。

5. 根据权利要求 1 的方法，其中，镍基合金是 718 合金和 706 合金中的一种。

6. 根据权利要求 1 的方法，其中，镍基合金包括 50.0-55.0 重量%镍、17-21.0 重量%铬、0-至多 0.08 重量%碳、0-至多 0.35 重量%锰、0-至多 0.35 重量%硅、2.8-3.3 重量%钼、铌和钽中的至少一种，其中铌和钽的总量为 4.75-至多 5.5 重量%、0.65-至多 1.15 重量%钛、0.20-至多 0.8 重量%铝、0-至多 0.006 重量%硼、铁和偶存的杂质。

7. 根据权利要求 1 的方法，其中，镍基合金的组成基本上为 54.0 重量%镍、0.5 重量%铝、0.01 重量%碳、5.0 重量%铌、18.0 重量%铬、3.0 重量%钼、0.9 重量%钛、铁和偶存的杂质。

8. 根据权利要求 1 的方法，其中，浇铸镍基合金包括熔化和任选地通过真空感应熔炼、氩氧脱碳和真空吹氧脱碳中的至少一种进行精练。

9. 根据权利要求 1 的方法, 其中, 退火和过时效合金包括在至少 1200°F(649°C)下加热合金至少 18 小时。

10. 根据权利要求 1 的方法, 其中, 退火和过时效合金包括在至少 1550°F(843°C)下加热合金至少 10 小时。

11. 根据权利要求 1 的方法, 其中, 电渣重熔合金包括以至少 10 磅/分钟(4.54kg/min)的熔化速率进行电渣重熔。

12. 根据权利要求 1 的方法, 其中, 在加热炉内保持合金包括在至少 600°F(316°C)到至多 1800°F(982°C)的炉温下保持合金至少 20 小时。

13. 根据权利要求 1 的方法, 其中, 在加热炉内保持合金包括在至少 900°F(482°C)到至多 1800°F(982°C)的炉温下保持合金至少 10 小时。

14. 根据权利要求 1 的方法, 其中, 增加炉温包括炉温从第一温度以多段方式增加到第二温度, 多段方式包括:

以不超过 100°F/小时(55.6°C/小时)的速率从第一温度增加炉温到中间温度, 并

以不超过 200°F/小时(111°C/小时)的速率从中间温度进一步增加炉温到第二温度。

15. 根据权利要求 14 的方法, 其中, 第一温度小于 1000°F(583°C)并且中间温度为至少 1000°F(583°C)。

16. 根据权利要求 1 的方法, 其中, 第一温度小于 1400°F(760°C)并且中间温度为至少 1400°F(760°C)。

17. 根据权利要求 1 的方法, 其中, 第二温度为至少 2175°F(1191°C)。

18. 根据权利要求 1 的方法, 其中合金在第二温度下保持至少 24 小时。

19. 根据权利要求 1 的方法, 其中, 电渣重熔合金生产出直径大于 VAR 电极预期直径的 ESR 铸块, 在第二温度保持过之后, 该方法进一步包括: 机械加工 ESR 铸块以改变铸块的尺寸并生产出具有预期直径的 VAR 电极。

20. 根据权利要求 14 的方法, 在第二温度下保持合金之后, 机械加工 ESR 铸块之前进一步包括: 以不超过 200°F/小时(111°C/小时)的冷却速率冷却合金至机械加工温度。

21. 根据权利要求 1 的方法, 在第二温度下保持合金之后, 真空电弧重熔 VAR 电极之前进一步包括: 通过冷却过程将合金从第二温度冷却到室温, 该冷却过程包括以不超过 200°F/小时(111°C/小时)的速率从第二温度降低炉

温至不超过 1750°F (982°C)的第一中间温度,并在第一中间温度下保持至少 10 小时。

22. 根据权利要求 21 的方法,其中,冷却合金进一步包括:以不超过 150°F/小时(83.3°C/小时)的速率从第一中间温度降低炉温至不超过 1400°F(760°C)的第二中间温度,并在第二中间温度下保持至少 5 小时。

23. 根据权利要求 22 的方法,其中,在第二中间温度保持之后,合金在空气中冷却至室温。

24. 根据权利要求 1 的方法,在第二温度下保持之后,机械加工 ESR 铸块之前进一步包括:

以阻止合金中的热应力的方式从第二温度冷却合金至室温;并
以阻止合金中的热应力的方式加热合金至合适的机械加工温度。

25. 根据权利要求 24 的方法,其中,加热合金到合适的机械加工温度包括:

在加热炉内在至少 500°F(260°C)炉温下加热合金至少 2 小时;
以至少 20°F/小时(11.1°C/小时)的速率增加炉温到至少 800°F(427°C);
以至少 30°F/小时(16.7°C/小时)的速率进一步增加炉温到至少 1200°F(649°C);并

以至少 40°F/小时(22.2°C/小时)的速率进一步增加炉温到至少 2025°F(1107°C),并在该温度下保持直到合金达到基本上整体均一的温度。

26. 根据权利要求 19 的方法,其中,ESR 铸块的直径为 34 英寸(864mm)到 40 英寸(1016mm)并且 VAR 电极具有不超过 34 英寸(864mm)的较小直径。

27. 一种制造基本上没有正偏析和负偏析的镍基合金的方法,该方法包括:

在浇铸模具里浇铸镍基合金,其中,镍基高温合金是 718 合金;
在至少 1550°F(843°C)下加热至少 10 小时以对合金进行退火和过时效;
以至少 10 磅/分钟(4.54kg/min)的熔化速度电渣重熔合金;
在电渣重熔之后转移合金到加热炉里进行 4 小时的完全凝固;
在 900°F(482°C)到 1800°F(982°C)的第一炉温下在加热炉里保持合金至少 10 小时;

以不超过 100°F/小时(55.6°C/小时)的速率增加炉温至中间炉温;并
以不超过 200°F/小时(111°C/小时)的速率从中间温度进一步增加炉温到

至少 2125°F(1163°C)的第二炉温,并在第二温度下保持至少 10 小时。

以 9-10.25 磅/分钟(4.09-4.66kg/min)的熔化速率真空电弧重熔合金的 VAR 电极以形成 VAR 铸块。

28. 根据权利要求 27 的方法,其中,VAR 铸块的直径大于 30 英寸(762mm)。

29. 根据权利要求 27 的方法,其中,VAR 铸块的直径为至少 36 英寸(914mm)。

30. 根据权利要求 27 的方法,其中,VAR 铸块的重量大于 21500 磅(9772kg)。

31. 根据权利要求 27 的方法,其中,镍基合金包括: 50.0-55.0 重量%镍、17-21.0 重量%铬、0-至多 0.08 重量%碳、0-至多 0.35 重量%锰、0-至多 0.35 重量%硅、2.8-至多 3.3 重量%钼、铌和钽中的至少一种,其中铌和钽的总量为 4.75-至多 5.5 重量%、0.65-至多 1.15 重量%钛、0.20-至多 0.8 重量%铝、0-至多 0.006 重量%硼、铁和偶存的杂质。

32. 根据权利要求 27 的方法,其中,电渣重熔合金生产出直径大于 VAR 电极预期直径的 ESR 铸块,该方法进一步包括:

从第二温度冷却合金至合适的机械加工温度然后机械加工合金以制造预期直径的 VAR 电极。

33. 根据权利要求 27 的方法,其中电渣重熔合金生产直径大于 VAR 电极预期直径的 ESR 铸块,该方法进一步包括:

以阻止合金中的热应力的方式从第二温度冷却合金至室温;

以阻止合金中的热应力的方式加热合金至适于机械加工温度;

机械加工合金以制造预期直径的 VAR 电极。

34. 根据权利要求 1 和 27 的任一方法制造的镍基合金 VAR 铸块。

35. 一种镍基合金的优质 VAR 铸块包括: 50.0-55.0 重量%镍、17-21.0 重量%铬、0-至多 0.08 重量%碳、0-至多 0.35 重量%锰、0-至多 0.35 重量%硅、2.8-至多 3.3 重量%钼、铌和钽中的至少一种,其中铌和钽的总量为 4.75-至多 5.5 重量%、0.65-至多 1.15 重量%钛、0.20-至多 0.8 重量%铝、0-至多 0.006 重量%硼、铁和偶存的杂质,其中,铸块直径大于 30 英寸。

36. 根据权利要求 35 的优质 VAR 铸块,其中,铸块的直径大于 36 英寸。

37. 根据权利要求 35 的优质 VAR 铸块, 其中, 铸块的重量大于 21500 磅(9772kg)。

38. 根据权利要求 36 的优质 VAR 铸块, 其中, 镍基合金是 718 合金。

39. 一种镍基合金铸块包括: 50.0-55.0 重量%镍、17-21.0 重量%铬、0-至多 0.08 重量%碳、0-至多 0.35 重量%锰、0-至多 0.35 重量%硅、2.8-至多 3.3 重量%钼、铌和钽中的至少一种, 其中铌和钽的总量为 4.75-至多 5.5 重量%、0.65-至多 1.15 重量%钛、0.20-至多 0.8 重量%铝、0-至多 0.006 重量%硼、铁和偶存的杂质; 其中铸块直径大于 30 英寸,基本上没有负偏析, 没有斑点并基本上没有其他正偏析。

40. 根据权利要求 39 的铸块, 其中, 铸块的直径至少 36 英寸。

41. 根据权利要求 39 的铸块, 其中, 铸块的重量超过 21500 磅(9772kg)。

42. 根据权利要求 39 的铸块, 其中, 镍基合金是 718 合金。

43. 由权利要求 35 和 39 中任一项所述的铸块制造的制品。

44. 根据权利要求 43 的制品, 其中, 制品是用于航空涡轮机和陆地涡轮机中之一的旋转部件。

45. 制造制品的方法, 该方法包括: 制造权利要求 35 和 39 任一中描述的铸块; 将铸块制造成制品。

46. 根据权利要求 45 的方法, 其中, 制品是用于航空涡轮机和陆地涡轮机中之一的旋转部件。

47. 一种合金 718 的 VAR 铸块, 其中铸块的直径大于 30 英寸(762mm) 并且其重量大于 21500 磅(9772kg)。

48. 根据权利要求 47 的 VAR 铸块, 其中铸块的直径至少 36 英寸(914mm)。

49. 根据权利要求 47 的 VAR 铸块, 其中铸块基本上没有负偏析, 没有斑点并基本上没有其他正偏析。

50. 由权利要求 47 的铸块制造的制品。

51. 根据权利要求 47 制造的制品, 其中制造的制品是用于航空涡轮机和陆地涡轮机中之一的旋转部件。

大直径镍基合金铸块的制造方法

发明人

Betsy J. Bond, Laurence A. Jackman, A. Stewart Ballantyne

相关申请的对照检索

没有

有关联邦赞助的研究或发展的报告

没有

本发明的技术领域和工业适用性

本发明涉及一种用于大直径、优质的镍基高温合金铸块的改进的制造方法。本发明尤其涉及一种用于镍基高温合金包括 718 合金(UNS N07718)和其他浇铸期间经受严重偏析的镍基高温合金的铸块的制造方法,其中铸块的直径超过 30 英寸(762mm)并且基本上没有负偏析、没有斑点并没有其他正偏析。本发明也涉及直径超过 30 英寸(762mm)的 718 合金铸块和使用本发明方法制造的无论直径大小的任何铸块。本发明的方法可以适应于例如,制造装配在发电用旋转部件上的大直径、优质镍基高温合金铸块。这种部件包括,例如,用于陆地涡轮机的车轮和定位架以及航空涡轮机的旋转元件。

背景技术

某些要求严格的应用中,元件必须由没有严重偏析的大直径的镍基高温合金铸块制造。这种铸块必须基本上没有正和负偏析并应完全没有称为“斑点”的正偏析现象。斑点是正偏析最常见的现象,并且是富集溶质元素的黑色蚀刻区域。斑点产生于凝固期间铸块糊状区域中溶质富集的枝晶间液体流中。例如合金 718 中的斑点是相对于基体的铌富集并有高密度的碳化物,通常还包含拉弗斯相。“白点”是负偏析的主要形式。是贫硬化剂溶质元素例如铌的这些轻度蚀刻区域,一般归类于树枝状白点、不连续白点和凝固白点。

对树枝状白点和凝固白点有时尚可容忍，但由于不连续白点经常与可作为裂缝引发剂的氧化物和氮化物簇有关，因此成为主要关注对象。

基本上没有正偏析和负偏析也没有斑点的铸块在这里被称作“优质”铸块。优质镍基高温合金铸块在某些要求严格的应用中，例如，航空或陆地发电涡轮机的旋转部件和其中与偏析有关的冶金缺陷会导致部件灾难性故障的其他应用中是必需的。这里所提出的“基本上没有”正偏析和负偏析是指这种类型的偏析完全不存在或者其出现的程度不足以使铸块不能适用于要求严格的应用，例如用于制造航空和陆地涡轮机的旋转部件。

在浇铸期间经受严重的正偏析和负偏析的镍基高温合金包括例如：718 合金和 706 合金。当浇铸这些合金用于要求严格的应用时，为了减少偏析，也为了更好的保证浇铸合金没有有害的非金属杂质，在最终浇铸前熔融金属材料要经过适当精炼。718 合金和某些其他易于偏析的镍基高温合金例如 706 合金(UNS N9706)一般要经“三熔融”技术的精炼，“三熔融”技术依次包括真空感应熔炼(VIM)、电渣重熔(ESR)和真空电弧重熔(VAR)。但是，这些易于偏析材料的优质铸块很难通过 VAR 熔化，即三熔化步骤的最后一步而制造大直径的规格。有时候，大直径铸块要制造成单个部件，而在部件制造之前在 VAR 浇铸的铸块上的不合格的偏析区域不能选择性的除去，结果，就需要将整个铸块或部分铸块废弃。

718 合金、706 合金和其他镍基高温合金例如 600 合金、625 合金、720 合金和沃斯帕洛依合金的 VAR 铸块，在新兴应用中，对大重量、相应的大直径规格的需求日益增长。这些应用包括例如，用于处于发展阶段的较大的陆地和航空涡轮机的旋转部件。较大铸块不仅要满足经济上最终的部件重量的需要，还要便于充分的热机械加工以充足开坯铸块结构并满足最终的机械上和结构上的需要。

大型号的高温铸块的熔化强调大量基本冶金问题和与过程相关的问题。随着铸块直径的增加，凝固时间和熔池深度也相应增加，这使熔化过程中的排热变得更加困难。这也增加了正偏析和负偏析的趋势。在加热和冷却过程中大型号铸块和电极也能产生更大的热应力。当几种镍基合金(例如，600 合金、625 合金、706 合金和沃斯帕洛依镍基高温合金)成功的生产出本发明预期尺寸的铸块时，718 合金尤其易于存在这些问题。为了满足由 718 合金和某些其他易于偏析的镍基高温合金生产合格冶金质量的大直径 VAR 铸块，开

展了特殊的熔炼和热处理工序。尽管付出了这些努力,但目前最大的工业上可采用的 718 合金优质 VAR 铸块是例如,直径 20 英寸(508mm),以有限的材料生产的直径最多达 28 英寸(711mm)。由于热裂缝和不希望的偏析的出现,浇铸 718 合金材料的更大直径 VAR 铸块的尝试都失败了。由于长度限制,28 英寸 718 合金 VAR 铸块重量不超过约 21500 磅(9772 千克)。这样,工业上可采用的最大直径的 718 合金 VAR 铸块远不能满足新兴工业使用需要的优质镍基高温合金材料中的重量的要求。

因此,需要对优质、大直径的 718 合金 VAR 铸块的制造方法进行改进。也需要对其他易于偏析的但基本上没有负偏析、没有斑点和基本上没有其他正偏析的镍基高温合金的铸块的制造方法进行改进。

本发明概述

为了满足上述需求,本发明提供了一种镍基高温合金的新的制造方法。该方法可用于浇铸直径超过 30 英寸(762mm)、重量超过 21500 磅(9772 千克)的 718 合金的优质 VAR 铸块。相信本发明的方法也可以用于制造其他在浇铸过程中经受严重偏析的其他镍基合金例如合金 706 的大直径 VAR 铸块。

本发明的方法包括在浇铸模具内浇铸镍基合金的初始步骤。这可以通过 VIM、氩氧脱碳(AOD)、真空吹氧脱碳(VOD)或任何其他合适的基本熔炼和浇铸技术完成。随后通过在炉温至少 1200°F(649°C)条件下加热合金至少 10 小时而进行浇铸铸块的退火和过时效。(这里所用的“随后的”和“随后”既指一个接着一个立即发生的方法步骤或事件,也指在时间上相互分离的方法步骤或其他事件和/或插入的方法步骤或其他事件)。随后的步骤中,铸块作为 ESR 电极以至少 8 磅/分钟的熔融速度进行电渣重熔。ESR 铸块转移到加热炉内在 4 小时内进行完全凝固,然后进行后-ESR 热处理。热处理包括在 600-1800°F(316-982°C)的第一炉温下保持合金至少 10 小时,然后以阻止铸块内部的热应力的方式从第一炉温经一次或多次的升温使炉温增至至少 2125°F(1163°C)的第二炉温。在第二炉温下保持铸块至少 10 小时,使形成具有均匀结构和最小的拉弗斯相的铸块。

在某些情况下,ESR 铸块可被浇铸成大于要在方法下一步骤中所使用的 VAR 电极的预期直径。因此,本发明的方法还包括在第二炉温下保持 ESR 铸块之后和真空电弧重熔之前,在升温条件下机械加工 ESR 铸块以改变铸块

尺寸、并提供所期望的直径大小的 VAR 电极。这样, ESR 铸块已经在第二炉温保持过之后, 可以数种途径之一进行进一步处理, 数种途径包括冷却到合适的机械加工温度或冷却到大约室温, 然后再加热到适于的机械加工温度。或者, 如果不需要调整铸块的直径, 铸块可以直接冷却到室温然后在不经过机械加工步骤的情况下进行真空电弧重熔处理。在第二温度下保持铸块之后的冷却和再加热 ESR 铸块的所有步骤都是以阻止热应力的方式进行, 这样就不会导致铸块热裂。

本发明随后的步骤中, ESR 铸块在 8-11 磅/分钟(3.63-5kg/min)的熔化速率下进行真空电弧重熔以形成 VAR 铸块。VAR 熔化速率优选为 9-10.25 磅/分钟(4.09-4.66kg/min), 更优选为 9.25-10.2 磅/分钟(4.20-4.63kg/min)。VAR 铸块直径优选超过 30 英寸(762mm), 更优选为至少 36 英寸(914mm)。

本发明还针对一种基本上没有正偏析和负偏析的镍基高温合金的制造方法, 该方法包括在浇铸模具里浇铸选自 718 合金和在浇铸期间经受严重偏析的其他镍基高温合金的步骤。浇铸铸块随后在至少 1550°F(843°C)的炉温条件下至少加热 10 小时以进行退火和过时效。退火后的铸块接着以至少大约 10 磅/分钟(4.54 kg/min)的熔炼速率进行电渣重熔, ESR 铸块然后送至加热炉内进行 4 小时的完全凝固。在下一步骤里, 通过在第一炉温 900-1800°F(482-982°C)下保持 ESR 铸块至少 10 小时, 而对其进行多阶段的后-ESR 热处理。炉温随后以不超过 100°F/小时(55.6°C/小时)的速度升至中间炉温, 然后以不超过 200°F/小时(111°C/小时)的速度升至至少 2125°F(1163°C)的第二炉温。铸块在第二炉温下至少保持 10 小时。如果必要, ESR 铸块可以转化为合适尺寸的 VAR 电极, 接着在 8-11 磅/分钟(3.63-5kg/min)的速率下进行真空电弧重熔以形成 VAR 铸块。如有需要, VAR 铸块可以进一步通过例如均化和/或合适的机械转化进行处理以得到期望的尺寸。

本发明也涉及根据本发明方法制造的 VAR 铸块。另外, 本发明涉及直径超过 30 英寸的 718 合金的 VAR 铸块, 还进一步涉及直径超过 30 英寸、通过 VAR 或任何其他熔炼和浇铸技术制造的优质 718 合金铸块。

本发明还包括通过由本发明的铸块元件所制造的制品而生产的制造制品。可通过由本发明的铸块制造的典型的制品包括例如, 用于陆地涡轮机上的轮和定位架以及用于航空涡轮机上的旋转部件。

通过对以下本发明实施方案的详细描述的思考, 读者可以领会上述本发

明的细节和优点以及其他方面。通过实施和使用本发明，读者还可以理解本发明的其他的优点和细节。

附图简介

通过参照相应的附图可以更好的理解本发明的特点和优点。

图 1: 大体说明了本发明方法的一个实施方案的示图，其中 ESR 铸块直径为 40 英寸，在真空电弧重熔之前转化成直径为 32 英寸的 VAR 电极；

图 2: 大体说明了本发明方法的第二个实施方案的示图，其中 ESR 铸块直径为 36 英寸，在真空电弧重熔之前转化成直径为 32 英寸的 VAR 电极；和

图 3: 本发明的第三个实施方案的示图，其中浇铸直径为 33 英寸的 ESR 铸块，不经机械转化而用作 VAR 电极。

本发明实施方案的详细描述

本发明的方法适于制造 718 合金、浇铸过程中有偏析倾向的镍基高温合金的优质、大直径铸块。在本方法发展之前，工业上可采用的最重的 718 合金铸块直径限于约 28 英寸(711mm)，由于长度/直径的限制，其最大重量约为 21500 磅(9773 千克)。本发明人通过本方法成功的制造出直径大于 30 英寸(762mm)并至少 36 英寸(914mm)的 718 合金的优质铸块。这些铸块重达 36000 磅(16363 千克)，大大超过了用于优质 718 合金 VAR 铸块的以前的最大重量。本发明人相信本发明的方法可以用于制造浇铸期间一般经受严重偏析的其他镍基高温合金的 VAR 铸块。这样的合金包括例如，706 合金。

本发明的方法包括在浇铸模具中浇铸镍基高温合金的步骤。如所提到的，镍基合金可以是例如 718 合金。718 合金具有以下以重量百分比表示的宽广组成：约 50.0-约 55.0 镍、约 17-约 21.0 铬、0-至多约 0.08 碳、0-至多约 0.35 锰、0-至多约 0.35 硅、约 2.8-至多约 3.3 钼、铌和钽中的至少一种，其中铌和钽的总量为约 4.75-至多约 5.5、约 0.65-至多约 1.15 钛、约 0.20-至多约 0.8 铝、0-至多约 0.006 硼、铁和偶存的杂质。718 合金可采用宾夕法尼亚州匹兹堡市的 Allegheny 技术公司的 Allvac 分支的商标为 Allvac718 的产品。当以较大 VAR 铸块直径浇铸时，Allvac718 具有以下标称成分(重量百分比)：54.0 镍、0.5 铝、0.01 碳、5.0 铌、18.0 铬、3.0 钼、0.9 钛、铁和偶存的杂质。

在浇铸模具内任何合适的技术都适于熔炼和浇铸合金。合适的技术包括

例如, VIM、AOD 和 VOD。熔炼和浇铸技术的选择通常由技术主题和成本所限定。电弧炉/AOD 熔化有利于使用低成本原材料, 但在产量上趋向低于 VIM 熔炼, 特别是使用底注法的时候。当原材料成本增加的时候, VIM 熔炼的高产量使其成为一个较为经济的途径。包含较高量反应元素的合金要求使用 VIM 熔炼以保证适当回收。对低气体残余量特别是氮气的需求, 也要求使用 VIM 熔炼以达到所要求的水平。

合金浇铸以后, 可以在模具内保持一段时间以保证充分凝固, 这样合金就可以从浇铸模具中安全脱模。本领域中的普通技术易于确定, 如果有的话, 在模具中保持浇铸铸块的充分时间。这个时间决定于例如铸块的大小和尺寸、浇铸操作的参数和铸块的成分。

接着将浇铸铸块从浇铸模具中移出, 将其放入加热炉中, 并在至少 1200°F(649°C)的炉温下加热至少 10 小时以进行退火和过时效。优选将铸块在至少 1200°F(649°C)炉温下加热至少 18 小时。更优选的加热温度是至少 1550°F(843°C)。退火和过时效加热处理的目的是去除铸块在凝固过程中产生的剩余应力。随着铸块直径的增加, 由于铸块内的热梯度增加, 微观偏析和宏观偏析程度增加, 热裂的敏感度也提高, 因此对剩余应力也更加关注。当剩余应力过多时, 开始产生热裂。一些热裂是严重的, 导致产品的废弃。裂缝也可以是更细微并导致熔炼不规则性和随之而来的是不可接受的偏析。因引入到 ESR 和 VAR 电极中的热裂导致了一种认为是“熔炼速率循环”的熔炼不规则性, 这从正在熔化的顶端沿着电极阻断了热传导。这集中了在裂缝下的热量, 而当熔化界面接近裂缝时这导致融化速率的增加。当到达裂缝时, 电极终端相对较冷使熔化过程突然减慢。当裂缝区域熔化时, 熔化速率逐渐增加直到电极内重新形成稳定状态的温度梯度并达到正常的熔化速率。

在下一个步骤中, 铸块用作 ESR 电极以形成 ESR 铸块。发明人已经确定至少大约 8 磅/分钟(3.63kg/min), 更优选的至少 10 磅/分钟(4.54kg/min)的 ESR 熔化速率将用于提供适于进一步处理更大直径的 VAR 铸块的 ESR 铸块。可以使用任何合适的熔剂和熔剂进料速率, 本领域的已有的普通技术的人员易于确定针对给定 ESR 过程的合适的熔剂和进料速率。在某种程度上, 合适的熔化速率决定于所要求的 ESR 铸块直径, 并选择合适的熔化速率以提供固体结构的 ESR 铸块(也就是基本上没有空隙和裂缝)、具有相当好的表面质量并且没有过多剩余应力以阻止热裂形成。ESR 设备的一般操作和进行重熔操

作的一般方式是本领域普通技术人员所周知的。本领域的人员在本方法指定的熔化速率下不需要进一步的指导就可以容易地电渣重熔镍基高温合金例如 718 合金的 ESR 电极。

当电渣重熔操作完成以后, ESR 铸块可在坩锅内冷却以更好的保证全部熔化的金属都已固化。最少的合适的冷却时间大大决定于铸块尺寸。从坩锅移出后, 铸块转移到加热炉内根据本方法和以下所述进行新的后-ESR 热处理。

发明人发现大直径 718 合金铸块的生产中, 重要的是, ESR 铸块是热转移到加热炉中并从 ESR 铸块的完全凝固的 4 小时内开始进行后-ESR 热处理。ESR 铸块转移到加热炉中后, 通过将铸块保持在至少 600°F(316°C)至多到 1800°F(982°C)的第一炉温范围内至少 10 小时以进行后-ESR 热处理。更优选炉温范围是至少 900°F(482°C)至多到 1800°F(982°C)。在选择的炉温下的优选的加热时间是至少 20 小时。

在炉温下保持至少 10 小时的步骤之后, 加热炉温从第一炉温上升到至少 2125°F(1163°C)、优选 2175°F(1191°C)的第二炉温, 以抑制 ESR 铸块内的热应力的形成。将炉温增加到第二炉温可以以一段或包括两个或多个加热段的多段进行。发明人已经发现从第一到第二炉温的尤其令人满意的增温顺序是二段顺序, 包括: 以不超过 100°F/小时(55.6°C/小时)、优选大约 25°F /小时(13.9°C/小时)的速度从第一温度增加炉温到中间温度, 然后再从中间温度以不超过 200°F/小时(111°C/小时)、优选 50°F/小时(27.8°C/小时)的速度增加炉温到第二炉温。优选地, 中间温度至少为 1000°F (583°C), 更优选为至少 1400°F(760°C)。

ESR 铸块在第二炉温下保持至少 10 小时, 发明人已经发现在第二炉温下保持以后, 铸块具有均匀的结构并仅包含最少的拉弗斯相。为了更好的保证达到所要求的结构和所要求的退火程度, ESR 铸块优选在第二炉温下保持至少 24 小时, 更优选在第二炉温下保持大约 32 小时。

ESR 铸块在第二炉温下保持规定的时间之后, 进一步进行几种处理方式中的一种。如果不机械加工 ESR 铸块, 它可以阻止热裂的方式从第二炉温冷却到室温。如果 ESR 铸块的直径超过 VAR 电极预期的直径大小, 可将 ESR 铸块通过例如热锻而进行机械加工。ESR 铸块可以选择阻止热裂的方式从第二炉温冷却到合适的机械加工温度。但是, 如果 ESR 铸块已经冷却到合适的

加工温度以下，可通过以阻止热裂的方式将其重新加热到加工温度，然后将其加工到所期望的尺寸。

发明人确定当 ESR 铸块从第二炉温冷却的时候，希望以控制方式从铸块保持在加热炉里的第二炉温降低温度。优选的，表明阻止热裂的冷却顺序包括：从第二炉温开始以不超过 200°F/小时(111°C/小时)、优选以大约 100°F/小时(55.6°C/小时)的速率降低炉温到不超过 1750°F (954°C)、优选不超过 1600°F (871°C)的第一中间温度；在第一中间温度下保持至少 10 小时，优选至少 18 小时；再从第一中间温度以不超过 150°F/小时(83.3°C/小时)、优选以大约 75°F/小时(41.7°C/小时)的速率降低炉温到不超过 1400°F (760°C)、优选不超过 1150°F (621°C)的第二中间温度；在第二中间温度下保持至少 5 小时，优选至少 7 小时；然后空气冷却铸块到室温。冷却到室温以后，铸块将呈现δ相沉淀物的过时效结构。

如果 ESR 铸块从第二炉温冷却到机械加工进行的温度，则刚刚描述的冷却顺序的相关部分可用于达到加工温度。例如，ESR 铸块在加热炉中在第二炉温 2175°F (1191°C)下加热并在 2025°F(1107°C)锻造温度下进行热锻，ESR 铸块可以通过不超过 200°F /小时(111°C /小时)、优选以大约 100°F/小时的速率从第二炉温降低到锻造温度而进行冷却。

发明人认为如果 ESR 铸块已经从第二炉温冷却到室温或接近室温的温度，可以使用下面的顺序进行加热铸块回到合适的机械加工温度以阻止热裂的形成：将铸块放入加热炉中，在小于 1000°F(556°C)炉温下加热铸块至少 2 小时；以小于 40°F/小时(22.2°C /小时)的速率增加炉温到小于 1500°F(816°C)；以小于 50°F/小时(27.8°C/小时)的速率进一步增加炉温到小于 2100°F (1149°C)的合适的热加工温度；并在加工温度下保持铸块至少 4 小时。发明人发展的另一个加热顺序中，ESR 铸块放在加热炉中，并按以下加热步骤进行：铸块在至少 500°F(260°C)、优选在 500-1000°F (277-556°C)的炉温下加热至少 2 小时；炉温以约 20-40°F(11.1-22.2°C)的速度增加到至少 800°F(427°C)；炉温进一步以大约 30-50°F(16.7-27.8°C)的速度增加到至少 1200°F(649°C)；炉温进一步以约 40-60°F(22.2-33.3°C)的速度增加到小于 2100°F(1149°C)的热加工温度；铸块保持在热加工温度下直到铸块达到基本上整体均匀的温度。

如果 ESR 铸块已经冷却或加热到期望的机械加工温度，就可以任何合适的方式例如压锻的方式将其加工成具有预定直径的 VAR 电极。必要时，通过

例如现有设备的限制来减小直径。例如，有必要将直径为大约 34 英寸-大约 40 英寸(大约 864-大约 1016mm)的 ESR 铸块机械加工到直径 34 英寸(大约 864mm)或更小以使其适用于现有 VAR 设备上的 VAR 电极。

这时，ESR 铸块将进行后-ESR 热处理。无论是在 ESR 设备上浇铸还是在机械加工之后，业已假定一个合适的用作 VAR 电极的直径。ESR 铸块接着进行调节和切割以调整其形状从而适于用作本领域已知的 VAR 电极。接着 VAR 电极以 8-11 磅/分钟(3.63-5kg/min)的速度进行真空电弧重熔并以本领域已知的常用技术形成所期望直径的 VAR 铸块。VAR 熔化速率优选为 9-10.25 磅/分钟(4.09-4.66kg/min)，更优选为 9.25-10.2 磅/分钟(4.20-4.63kg/min)。发明人认为 VAR 熔化速率对获得优质 718 合金材料的 VAR 铸块是至关重要的。

如有要求，浇铸 VAR 铸块可以进一步处理。例如，可以使用工业采用的生产较大直径镍基高温合金 VAR 铸块的传统技术对 VAR 铸块进行均匀化和过时效。

通过本发明方法制造的镍基高温合金铸块可以用已知的制造技术制造成制品。这种制品自然包括适用于航空和陆地电力涡轮机上的某些旋转部件。

下面是本发明方法的实施例

实施例 1

图 1 大体描述了本发明，用于制造直径大于 30 英寸的 718 合金的优质铸块的方法的一个实施方案的示意图。从图 1 所示的方法的实施方案中可以明显的看出，其总体上，是一个包括 VIM、ESR 和 VAR 步骤的三段熔炼过程。按照图 1 所示的，通过 VIM 制备 718 合金的熔炼量，并浇铸成 36 英寸直径的适于在下一步中用作 ESR 电极的 VIM 电极。VIM 铸块浇铸后在浇铸模具中保持 6-8 小时。然后铸块从模具中脱模并热转移到炉中并在 1550°(843°F)下进行退火和过时效最少 18 小时。

在退火/过时效步骤之后，铸块表面研磨以去鳞。然后铸块热转移到 ESR 设备中，并用作 ESR 自耗电极而进行电渣重熔以形成 40 英寸的 ESR 铸块。众所周知，ESR 设备包括一个与自耗电极电接触电源。电极与配置在水冷容器，特别是铜制的水冷容器中的炉渣接触。电源供给，特别是交流电，对包括电极、炉渣和容器的电路提供高安培、低电压电流。当电流通过电路时，电阻加热炉渣使温度达到足以熔化与炉渣接触的电极终端的程度。当电极开始熔化时，形成熔化物质的熔滴，电极供料机制促进电极进入炉渣中以提供

期望的熔化速度。熔融物质的熔滴经过加热的炉渣，炉渣带走了氧化物夹杂物和其他杂质。确定合适的熔化速度对形成基本上均匀、没有空隙并具有相当好表面质量的铸块是非常关键的。这里发明人通过试验确定的 14 磅/分钟的熔化速率产生了合适的均匀而无缺陷的 ESR 铸块。

40 英寸的 ESR 铸块浇铸以后，在模具内冷却 2 小时，接着进行后-ESR 热处理。热处理阻止了下面过程中铸块内的热裂。从模具中移出 ESR 铸块并热转移到加热炉在约 900°F(482°C)下保持 20 小时。然后炉温以约 25°F/小时(13.9°C/小时)的速率升至约 1400°F(760°C)。然后炉温以约 50°F/小时(27.8°C/小时)的速率再升高到约 2175°F(1191°C)，铸块在 2175°F(1191°C)下保持至少 32 小时。然后以约 100°F/小时(55.6°C/小时)的速率降低炉温至约 1600°F(871°C)而冷却铸块。在这个温度下保持至少 18 小时。然后通过以约 75°F/小时(41.7°C/小时)的速率降低炉温到约 1150°F 而进一步冷却铸块，并保持这个温度约 7 小时。从炉上移走铸块使其空气冷却。

40 英寸直径的 ESR 铸块太大不宜于使用现有的 VAR 设备进行真空电弧重熔。因此，压锻铸块到适于在 VAR 设备上使用的 32 英寸直径。在锻造之前，铸块在炉中通过本发明人发展的加热顺序加热到合适的压锻温度以阻止热裂的发生。铸块首先在 500°F(260°C)下加热 2 小时。然后炉温以 20°F/小时(11.1°C/小时)的速率升温到 800°F(427°C)，以 30°F/小时(16.7°C/小时)的速率增加到 1200°F(649°C)，然后以 40°F/小时(22.2°C/小时)的速率进一步增加至 2025°F(1107°C)，并在此温度下保持大约 8 小时。接着将铸块压锻到 32 英寸直径并根据需要重新加热到锻造温度。32 英寸 VAR 电极在约 1600°F(871°C)下保持最少 20 小时然后进行调整，并用带锯修剪使其终端平整。

发明人已经发现仅仅在狭窄而特定的 VAR 熔化范围内才产生基本上没有偏析的 VAR 铸块，为避免宏观偏析在开始阶段控制 VAR 是非常关键的。32 英寸 VAR 电极在约 9.75 磅/分钟的熔化速率下真空电弧重熔成 36 英寸 VAR 铸块，其中该熔化速率必须控制在一个狭窄的范围内。使用标准炉均匀化加热循环使 VAR 铸块均匀化，然后在 1600°F(871°C)下过时效最少 20 小时。

36 英寸 VAR 铸块的重量大大超过了工业上使用的 28 英寸直径的 718 合金铸块的重量 21500 磅(9772kg)。由 36 英寸铸块的产品通过超声和宏观切片检测，发现没有斑点，基本上没有裂缝、空隙、负偏析和其他正偏析。可以认为 ESR 铸块是优质的，并适于制造成用于要求严格的应用中的部件，例如

陆地和航空电力涡轮机中的旋转部件。

实施例 2

在上面的实施例中，ESR 铸块的直径超过了现有 VAR 设备上使用的尺寸，而与该设备相匹配的 VAR 电极最大约为 34 英寸(863mm)。这要求通过机械加工的方式调整 ESR 铸块的直径。而这就需要发明人发展一个合适的 ESR 铸块加热顺序以加热 ESR 铸块到锻造温度同时阻止锻造过程中的热裂产生。如果 ESR 铸块的直径更接近于在现有 VAR 设备上可用的最大直径，ESR 铸块形成热裂的倾向就越小。如果 ESR 铸块的尺寸适于在现有 VAR 设备上直接使用，那么压锻和其他 ESR 铸块的机械加工可以完全不需要。在这种情况下，在后-ESR 热处理步骤之后可以立即将 ESR 铸块送至 VAR 设备上。

图 2 根据本发明大体描述了一个三步熔炼过程的预示的实施方案，其中 ESR 设备可用于浇铸 36 英寸的 ESR 铸块。由于 ESR 的直径小于实施例 1 中浇铸的 ESR 铸块的 40 英寸直径，形成铸块裂缝和其他加工导致的缺陷的风险会更小。另外，ESR 铸块直径减小、长度增大会使 ESR 铸块因浇铸的严重偏析而引起的裂缝或损失可以减小。

如图 2 所示，VIM 电解浇铸成 33 英寸直径的铸块。然后使 VIM 铸块热转移并按实施例 1 中所述进行退火和过时效。特别是 VIM 铸块在脱模和放入到热处理炉之前，允许在浇铸模具里保持 6-8 小时。相信对较小尺寸的 VIM 铸块，其在浇铸模型里保持的时间可以缩短。然后将 33 英寸 VIM 铸块通过实施例 1 中大体描述的过程进行电渣重熔。然后铸块热转移并进行如实施例 1 里所述进行后-ESR 热处理。在后-ESR 热处理之后，如实施例 1 中大体描述的那样，ESR 铸块斜线升温至锻造温度并压锻到 32 英寸直径。32 英寸的锻件进行过时效然后如实施例 1 中大体描述的真空电弧重熔至 36 英寸 VAR 铸块。VAR 铸块通过标准的均匀化处理进行均匀化，或采用其他方式进行合适的处理。相信可与实施例 1 方法制造的铸块相比较，产生优质的 718 合金 VAR 铸块。

实施例 3

图 3 是本发明三段熔炼过程的又一个预示的实施例，其中 30 英寸直径的铸态 ESR 铸块直接适于与 ESR 设备一起使用。30 英寸 VIM 电极电渣重熔成 33 英寸 ESR 铸块。如实施例 1 所述，热转移 ESR 铸块并进行热处理，然后在不减少直径的情况下将其真空电弧重熔成为 36 英寸直径的 VAR 铸块。

然后将 VAR 铸块均匀化, 并进行如实施例 1 所描述的进一步处理。图 3 所描述的过程与图 1 的过程的不同仅在于 VIM 电极的直径和 ESR 铸块的直径与实施例 1 中的不同。不需要进行压锻操作或斜线加热至锻造温度。制造得到优质的 36 英寸直径的 718 合金铸块。

实施例 4

几个 Allvac718 材料的直径超过 30 英寸的 VAR 铸块通过本发明的方法制备并检测。几个试验的参数列在下表中。在几个试验中, 评价了不同的 VAR 熔化速率以确定对所得的 VAR 铸块的质量的影响。

步骤	熔炼 215G	熔炼 420G	熔炼 533G	熔炼 631G	熔炼 729G
VIM 电极直径	36	36	36	36	36
VIM 退火/过时效	1550°F(843°C)下 13 小时 24 分钟	1550°F(843°C)下 16 小时 48 分钟	1550°F(843°C)下 15 小时 55 分钟	1550°F(843°C)下 41 小时	1550°F(843°C)下 29 小时
熔剂	60F-20-0-20+TiO ₂	60F-20-0-20+TiO ₂	60F-20-0-20+TiO ₂	60F-20-0-20+TiO ₂	60F-20-0-20+TiO ₂
ESR 熔化速率	14 磅/分钟	14 磅/分钟	14 磅/分钟	14 磅/分钟	14 磅/分钟
坩埚冷却时间	1.5 小时(总转移时间 1 小时 50 分钟)	2 小时	2 小时	2 小时(+20 分钟以脱模至热盒中)	2 小时(+30 分钟以脱模至热盒中)
ESR 铸块直径	40 英寸	40 英寸	40 英寸	40 英寸	40 英寸
后 ESR 热处理	900°F(428°C)下 33 小时 22 分钟, 1150°F(621°C)下 7 小时, 以 25°F/小时(13.8°C/小时)速率斜线升温至 1300°F(704°C), 并以 50°F/小时(27.7°C/小时)速率升至 1650°F(899°C), 并以 75°F/小时(41.6°C/小时)速率升至 2175°F(1191°C), 在 2175°F(1191°C)下保持 24 小时, 降低到 2025°F(1107°C), 保持 6 小时并锻造	900°F(428°C)下 28 小时, 1150°F(621°C)下 19 小时, 以 25°F/小时(13.8°C/小时)速率斜线升温至 1300°F(704°C), 然后以 50°F/小时(27.7°C/小时)速率升至 1650°F(899°C), 并以 75°F/小时(41.6°C/小时)速率升至 2175°F(1191°C), 速率升至 2175°F(1191°C)下保持在 2175°F(1191°C)下保持 24 小时, 降低到 2025°F(1107°C), 保持 9 小时并锻造	900°F(428°C)下 21 小时, 1150°F(621°C)下 4 小时, 以 25°F/小时(13.8°C/小时)速率斜线升温至 1300°F(704°C), 然后以 50°F/小时(27.7°C/小时)速率升至 1650°F(899°C), 并以 75°F/小时(41.6°C/小时)速率升至 2175°F(1191°C), 速率升至 2175°F(1191°C)下保持在 2175°F(1191°C)下保持 24 小时, 降低到 2025°F(1107°C), 保持 69.5 小时并锻造	900°F(428°C)下 33 小时, 1150°F(621°C)下 4 小时, 以 25°F/小时(13.8°C/小时)速率斜线升温至 1300°F(704°C), 然后以 50°F/小时(27.7°C/小时)速率升至 1650°F(899°C), 并以 75°F/小时(41.6°C/小时)速率升至 2175°F(1191°C), 速率升至 2175°F(1191°C)下保持 32 小时, 以 100°F/小时(55.5°C/小时)速率斜线降低炉温至 1600°F(871°C), 并以 75°F/小时(41.6°C/小时)速率斜线降低炉温至 1600°F(871°C)并保持最少 18 小时, 以 75°F/小时(41.6°C/小时)速率斜线降温至 1150°F(621°C)并保持最少 7 小时, 空气冷却。	900°F(428°C)下 42.5 小时, 以 25°F/小时(13.8°C/小时)速率斜线升温至 1400°F(760°C), 然后以 50°F/小时(27.7°C/小时)速率升至 2175°F(1191°C), 在 2175°F(1191°C)下保持 32 小时, 以 100°F/小时(55.5°C/小时)速率斜线降低炉温至 1600°F(871°C), 并以 75°F/小时(41.6°C/小时)速率斜线降低炉温至 1600°F(871°C)并保持最少 18 小时, 以 75°F/小时(41.6°C/小时)速率斜线降温至 1150°F(621°C)并保持最少 7 小时, 空气冷却。

步骤	熔炼 215G	熔炼 420G	熔炼 533G	熔炼 631G	熔炼 729G
压制	以 3 步操作锻造到 31-15/16 英寸	以 3 步操作锻造到 31-15/16 英寸	以 5 步操作锻造到 31-15/16 英寸	在 500°F(260°C)下再加热 8 小时, 以 25°F /小时 (13.8°C/小时)速率斜线升温至 1300°F(704°C), 以 50°F /小时(27.7°C/小时)速率斜线升温至 2050°F (1107°C), 在 2050°F 旁 (1107°C)下保持并锻造	在 500°F(260°C)下再加热 3.5 小时, 以 20°F /小时 (11.1°C/小时)速率斜线升温至 800°F(427°C), 以 30°F /小时(16.7°C/小时)速率斜线升温至 1200°F(649°C), 以 40°F /小时速率斜线升温至 2050°F(1107°C), 在 2050°F(1107°C)下保持 16 小时并压制, 根据需要重复加热
回锻(Forgeback)直径	31-15/16 英寸	31-15/16 英寸	31-15/16 英寸	不用	32 英寸
过时数	1600°F(871°C)下 21 小时, 并空气冷却	1600°F(871°C)下 23.5 小时, 并空气冷却	1600°F(871°C)下 25 小时, 并空气冷却	不用	1600°F(871°C)下 20 小时, 并空气冷却
熔化速率	3 次试验: 9.75、10.5、9.0 磅/分钟	2 次试验: 10.0、9.5 磅/分钟	3 次试验: 10.2、9.25、9.75 磅/分钟	不用	9.75
VAR 铸块直径/重量	36 英寸 27355 磅	36 英寸 28570 磅	36 英寸 30744 磅	不用	36 英寸 37880 磅
均匀化	是	是	是	不用	是
说明	在最高熔化速率时发现正偏析, 在 VAR 开始区域发现两次超声指示, 但没有发现裂纹, 材料在适于优质应用的稳定状态条件下熔化	没有超声指示, 材料在适于优质应用的稳定状态条件下熔化	没有超声指示, 材料在适于优质应用的稳定状态条件下熔化	ESR 铸块在从再加热炉上移出时裂纹, 铸块废弃	VAR 之后完好的无裂纹铸块

通过拉锻 VAR 铸块，然后通过 GFM 锻造到最终的尺寸而生产出 10 英寸直径的钢坯，在这个钢坯上进行 VAR 铸块的评价。对锻造钢坯进行脱模和抛光以去除表面上的不规则性，然后通过超声检测其通常与负偏析区域相关的内部裂缝和空隙。对从沿钢坯长度代表全部熔化速率的几个位置上切下的横切片进行化学蚀刻以揭示负偏析和正偏析的区域。没有超声指示和偏析缺陷就可以充分的将材料归类到优质行列。

可以看出目前的描述举例说明了与本发明的清楚理解相关的那些方面。本发明的某些方面对本领域的普通技术很明显，因此为了简化目前的描述不易于对本发明的更好的理解，就没有将其提出。虽然本发明已经结合某些实施例进行了描述，但考虑到上面的叙述，本领域的普通技术人员可对本发明进行许多修改和变化。本发明的所有这样的变化和修改都将会被上面的描述和下面的权利要求所包括。

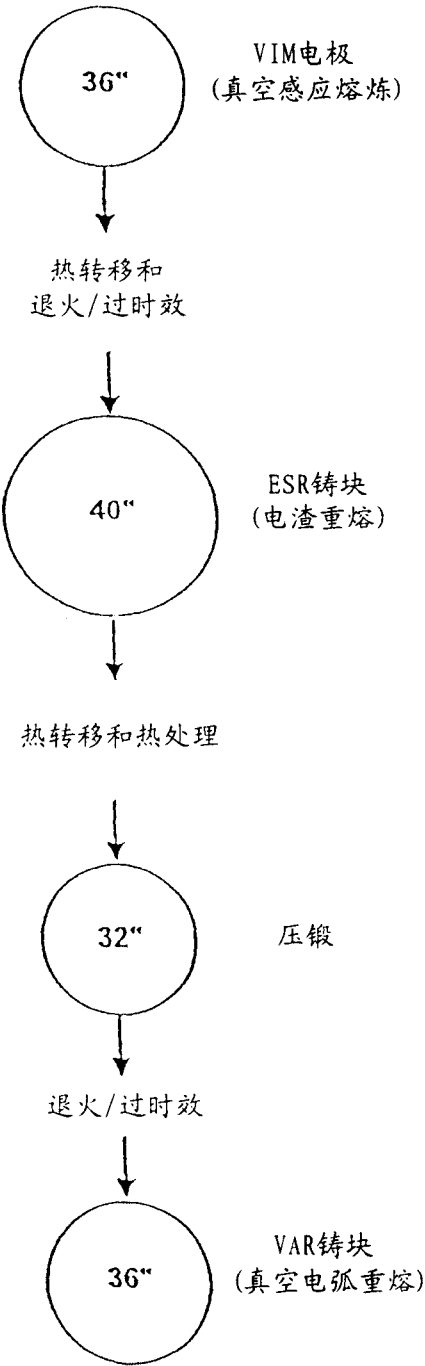


图 1

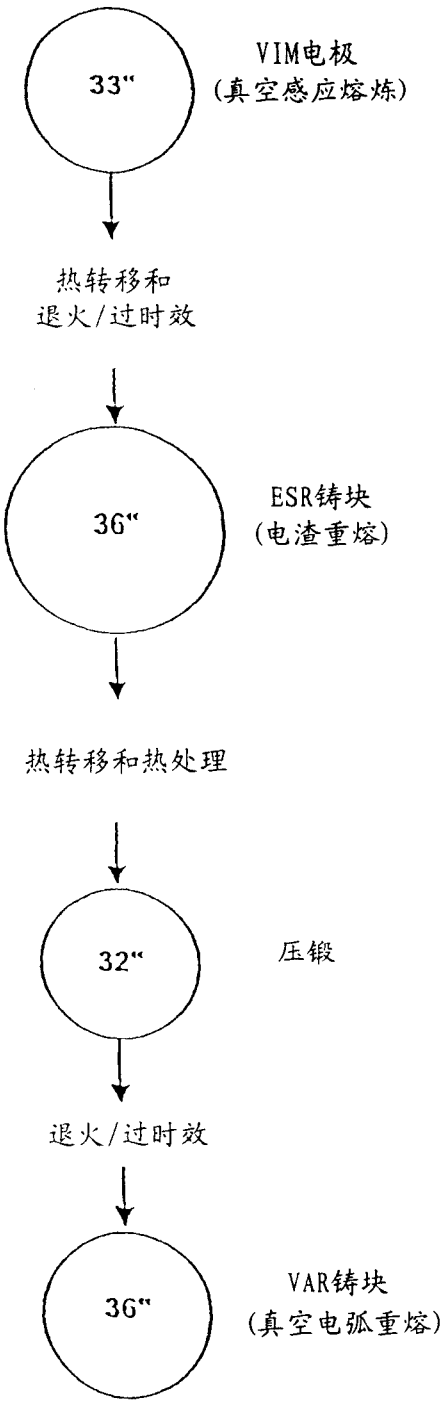


图 2

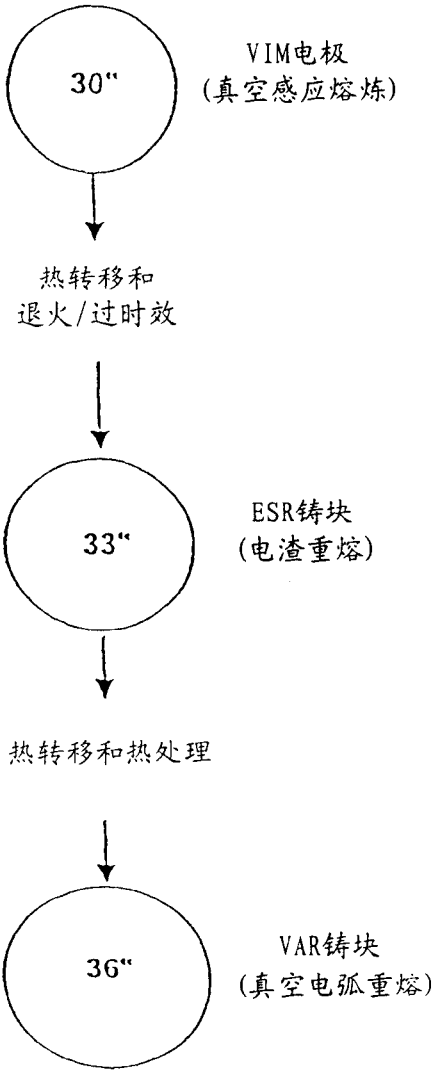


图 3