

[文章编号] 1004- 0609(2001) 02- 0176- 03

单晶高温合金的选晶行为^①

郑 启, 侯桂臣, 田为民, 金 涛, 孙晓峰, 管恒荣, 胡壮麒

(中国科学院 金属研究所, 沈阳 110016)

[摘 要] 对高温合金单晶选晶生产工艺进行了实验研究, 揭示了螺旋选晶器和缩颈选晶器的选晶原理。实验结果表明, 在螺旋选晶器中, 晶体横向择优生长与螺旋结构的耦合作用, 形成连续选晶过程, 是螺旋选晶的主要原理, 其选晶作用良好; 而在缩颈选晶器中, 几乎只存在单一的机械阻隔选晶行为, 多重缩颈结构对于改善选晶作用并不明显, 选晶效果不好。

[关键词] 单晶高温合金; 单晶生长; 选晶

[中图分类号] TG 132. 3; O 782

[文献标识码] A

单晶高温合金作为航空发动机叶片材料, 其承温能力比定向柱晶高温合金提高近 100 °C^[1]。应用高性能单晶合金材料, 并结合先进气冷技术, 可使发动机涡轮进口温度提高 300 °C, 发动机燃油效率提高 30% 以上, 叶片工作寿命大大延长^[2]。

Higginbotham^[3]把常见的单晶选晶器归纳为 4 种类型: 转折型、倾斜型、尺度限制型(缩颈选晶器)和螺旋型。螺旋型选晶器是目前应用最广泛也是最成功的选晶器类型。

选晶法是单晶高温合金叶片制备中最基本的工艺方法, 选晶行为必然对单晶凝固组织以及单晶缺陷的形成产生重要影响, 最终作用于合金的力学性能^[4~6]。选晶技术尽管得到了较为广泛的应用, 但对选晶行为机理的研究并不多, 远没有达到对单晶本身的重视程度, 不利于单晶生长技术的发展。

本文通过在螺旋选晶器和缩颈选晶器中进行两种选晶法单晶生长实验, 研究单晶高温合金选晶行为特征和选晶机理, 为正确应用和发展选晶技术, 提高高温合金单晶制备水平提供实验依据。

1 实验

图 1 所示为本实验所采用的螺旋选晶器和双重缩颈选晶器。浇铸的合金材料为含有 Cr, W, Mo, Al, Ti, Ta 等元素, 并由真空感应冶炼的 Ni 基单晶高温母合金。采用特种高温陶瓷壳型, 在双区加热 HRS 定向结晶炉中完成单晶生长。凝固样品经腐蚀后观察单晶宏观凝固组织, 腐蚀介质为



图 1 螺旋选晶器和缩颈选晶器

Fig. 1 Helix selector (a) and thin neck selector (b)

17% FeCl₃+ 33% HCl+ 50% H₂O。

2 结果与讨论

在两种不同类型的选晶器中, 起晶器中合金的宏观组织形貌类似, 在纵向方向自下而上形成 3 个

① [收稿日期] 2000- 05- 06; [修订日期] 2000- 06- 27

[作者简介] 郑 启(1959-), 男, 高级工程师。

典型区域: 激冷等轴细晶区, 柱晶发育区和稳定柱晶区。关于起晶器中 3 个区域晶粒组织形成的研究较多^[7, 8]。实验还发现, 采用双重缩颈选晶器并未得到单晶组织, 而是粗大的柱状晶; 但用螺旋选晶器则获得全单晶组织。

2.1 螺旋选晶器

在螺旋选晶器选晶过程中, 结晶沿螺旋方向攀旋近 180°时就得到了单一晶粒, 完成选晶。

图 2(a) 所示是螺旋选晶器起晶器至螺旋体入口区域的纵向剖面宏观组织, 柱状晶从起晶器进入缩颈时, 缩颈的约束结构只允许对应于螺旋体入口截面的柱晶通过, 其它柱晶被阻隔在外, 起到一次选晶作用。在转折部分又经历一个典型的转折型选

晶过程, 在此过程中, 由于空间因素的限制, 显然只有那些在竖直段中靠近侧向倾斜延伸段的晶粒才能得以继续生长, 并且其横向〈001〉取向与转折方向更一致的晶粒将得到优先生长, 其它晶粒的生长被抑制, 形成二次选晶。

图 2(c) 是螺旋选晶器螺旋管部分横向剖面的双晶组织的照片。观察发现, 晶粒 1 生长显然占据优势, 并且成为最终单一晶粒。进一步分析发现, 在照片右侧如果延续螺旋迹线, 晶粒 1 的枝晶择优生长方向(即横向〈001〉晶体取向)与该元段前端法线方向更一致, 而晶粒 2 的枝晶取向则与此方向形成一个角度, 晶界快速向晶粒 2 一侧移动, 所以晶粒 1 在此方向上得以快速生长^[7~9]。同时因空间条件约束, 晶粒 2 一侧受到晶粒 1 的排挤, 另一侧受螺旋限制, 失去生长空间, 最终被淘汰。螺旋选晶器中多个晶粒竞争生长具有相同的原理, 如图 3 所示。选晶原则为: 1) 其横向[001]取向与该元段前方法线方向一致; 2) 生长空间。取向与空间尺度同时约束晶体生长, 选晶行为是两者耦合的结果。其中螺旋体连续弯曲攀旋结构特征, 或者说元段法线方向连续变化, 使上述选晶行为形成连续的过程, 是螺旋选晶器高效选晶的最重要因素。

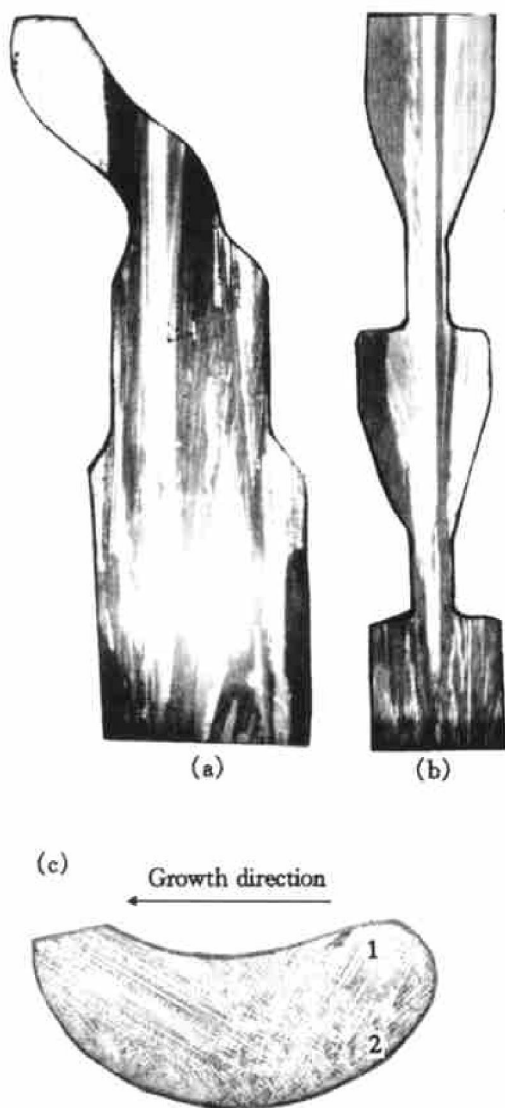


图 2 两种选晶器各截面宏观组织

Fig. 2 Macrostructures of vertical section from starter to entrance of helical part in helix selector (a), vertical section of thin neck selector (b) and horizontal section of helix selector (c)

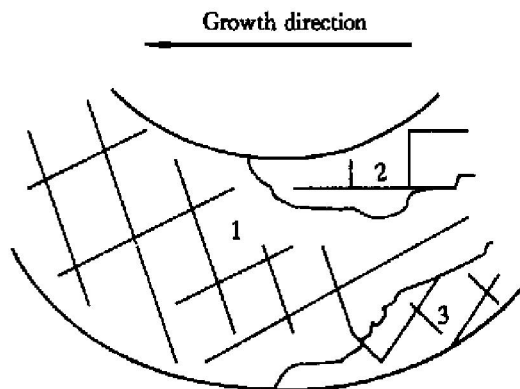


图 3 螺旋选晶器选晶原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of grain selecting procedure in helix selector

据此设计的选晶器适当增加螺旋曲率(减小螺旋半径), 可提高螺旋结构对多晶粒竞争生长过程的约束作用, 将有效提高螺旋选晶器的选晶效果, 并使螺旋选晶器缩短 30% 左右。

2.2 缩颈选晶器

观察图 2(b) 发现, 在缩颈选晶器的第一缩颈区入口处, 基本上是按照横截面积关系淘汰晶粒。缩颈结构只允许对应于缩颈横截面上的那些柱晶进入缩颈区, 其它柱晶则被阻隔, 造成机械阻隔淘汰选

晶机制,在此过程中,选晶作用显然只与柱晶尺寸和缩颈横截面相对尺寸相关。在缩颈区中,晶粒几乎平行生长。

设置多重缩颈的本来目的是强化选晶过程,但本实验结果表明,多重缩颈对增强选晶作用并不明显。观察组织发现,柱晶在通过第一缩颈区,并进入第一扩张区后,只有周边柱晶晶粒发生明显的侧向粗化,中部柱晶尺寸却几乎保持不变,所以当柱晶进入第二缩颈区时,对应于第二缩颈横截面的晶粒数目与第一缩颈区几乎相同,造成第二缩颈选晶作用不明显。

进一步减少缩颈横截面积和粗化起晶器中的柱状晶尺寸,能有效提高选晶能力。但在工艺上实现起来比较困难,同时从机械阻隔选晶机制方面考虑,晶界通过缩颈选晶器的几率仍然较高,这些都成为缩颈选晶器的致命缺陷。

3 结论

1) 螺旋选晶器的基本选晶原理是晶体择优生长与连续弯曲攀旋的螺旋结构的耦合作用。连续选晶是其优越选晶行为的主要特征。

2) 螺旋选晶器结合了缩颈选晶器和转折选晶器的结构和原理。

3) 缩颈选晶器只具有机械阻隔选晶单一功能,而且多重缩颈并未有效提高选晶作用,所以选晶效果不好。

[REFERENCES]

[1] CHEN Rong-zhang(陈荣章), WANG Luo-bao(王罗宝)

and LI Jian-hua(李建华). 铸造高温合金发展的回顾与展望 [J]. Journal of Aeronautical Materials(航空材料学报), 2000, 20(1): 55- 61.

[2] Gell M D, Duhi N, Gupta D K, et al. Advanced superalloy airfoils [J]. Journal of Metals, 1987, 39(7): 11- 15.

[3] Higginbotham G J S. From research to cost-effective directional solidification and single-crystal production: an integrated approach [J]. Materials and Technology, 1986, 2(5): 442- 460.

[4] TIAN Bao-hui, LI Huan-xi, ZHANG Yong-gang, et al. Conditions for the occurrence of serrated flow in Al-Li single crystals [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1996, 6(1): 57- 61.

[5] XU Zheng-ming, LI Jian-guo and FU Heng-zhi. Continuous casting technology of single crystal copper rod [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1998, 8(2): 277- 282.

[6] DU Wei, LI Jian-guo and FU Heng-zhi. Solidification and microsegregation behaviors of Ni-Cr base single crystal superalloy solidified at medium cooling rate [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1998, 8(1): 83- 87.

[7] Sims C T, Stoloff N S and Hagel W C. Superalloy II [M]. New York, John Wiley & Sons Interscience Publication, 1987. 191- 193.

[8] Edition Committee of Aero-Manufacture Engineering Manual(航空制造工程手册总编委会). 航空制造工程手册 [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1994. 12.

[9] HE Guo(何 国), 镍基单晶高温合金凝固行为及组织形成控制规律 [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 1994. 126- 144.

Grain selection behavior of single crystal superalloy

ZHENG Qi, HOU Guo-chen, TIAN Wei-min, JIN Tao,

SUN Xiao-feng, GUAN Heng-rong, HU Zhuang-qi

(Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, P. R. China)

[Abstract] The single crystal selection processes of superalloy in the helix selector and thir-neck selector were studied. The results indicate that the main grain selection mechanism of the helix selector is that the easy growth direction of the cubic crystal coupled with the helical structure of the selector. Helix selector combines with the characteristics of thir-neck and angled grain selector in structure. In thir-neck selector, there is only the grain selection function of mechanical restricting, and the design of multiple thin necks is not beneficial to improving the grain selection effect.

[Key words] single crystal superalloy; single crystal growth; grain selection

(编辑 杨 兵)