

一种镍基单晶高温合金的各向异性研究

Investigation of the Anisotropy for a Nickel

Base Single Crystal Superalloy

赵乃仁^{1,2}, 王志辉², 李金国², 金涛², 孙晓峰², 杨洪才¹, 胡壮麒^{1,2}

(1 东北大学, 沈阳 110004; 2 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016)

ZHAO Nai-ren^{1,2}, WANG Zhi-hui², LI Jin-guo²,

JIN Tao², SUN Xiao-feng², YANG Hong-cai¹, HU Zhuang-qi^{1,2}

(1 Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2 Institute of

Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

摘要: 研究了一种镍基单晶高温合金[001]、[011]和[111]三个晶体取向的组织 and 性能。结果表明, 晶体取向对合金枝晶组织形态和偏析存在显著影响, 而合金的弹性模量和持久性能也存在明显的各向异性。在弹性模量方面, [111]取向最大, [011]取向次之, [001]取向最小。对于持久寿命, 在 871℃/552MPa 下, [001]取向的持久寿命最高, [111]取向的延伸率最高; 在 1010℃/248MPa 下, [111]取向的持久寿命最高, [001]取向的延伸率最高; 两种实验条件下, [011]取向的持久寿命都最低。

关键词: 单晶高温合金; 各向异性; 弹性模量; 持久性能

中图分类号: TG132.32; TG146.1; TG113.25 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)02-0058-04

Abstract: The microstructure and property of a nickel base single crystal superalloy with various crystallographic orientations of [001], [010] and [111] has been investigated. The results show that the dendrite morphology and micro-segregation are strongly influenced by crystallographic orientations although the chemical compositions of alloy keep as constant. The Young's modulus and stress rupture lives of single crystal alloys also exhibit obvious anisotropy. The Young's modulus decreases with the sequence of [111], [011] and [001] orientation. The longest stress rupture life is obtained in the single crystal with [001] orientation and the alloy with [111] orientation shows the maximum elongation under the testing condition of 871 °C/552MPa, while the alloy with [111] orientation appears the longest stress rupture life and the maximum elongation was got in [001] orientation under the testing condition of 1010 °C/248MPa. Under the both testing conditions, the alloy with [011] orientation presents the lowest stress rupture life.

Key words: single crystal superalloy; anisotropy; Young's modulus; stress rupture property

镍基单晶高温合金具有优良的高温性能, 是目前制造先进航空发动机和燃气轮机叶片的主要材料^[1,2]。与多晶材料相比, 单晶合金的一个显著特征就是其表现出来的各向异性。Mackay 和 Maier 的研究表明^[3], 774℃时[001]和[111]取向 MAR-M200 和 MAR-M247 单晶合金的蠕变寿命较高, [011]取向的合金蠕变寿命较低。彭志方等^[4]从 γ 和 γ' 相形态演变的角度对 CMSX-4 合金的各向异性行为进行了研究。Sass 等^[5]对 CMSX-4 合金的研究结果表明: 在 850℃时具有显著的各向异性, 蠕变强度按[001], [011], [111]次序降低, 而在 980℃时各向异性急剧下

降。6 合金和 32 合金^[6]的研究表明, 室温[111]取向的弹性模量几乎是[001]取向的 2 倍, 合金 1000~1100℃的持久性能明显地具有各向异性, [111]取向的持久强度比[001]取向高 10%~15% 以上, 持久寿命高 3 倍, [011]取向持久强度最低。因此, 研究单晶高温合金的各向异性, 充分利用其特点, 使得单晶的三维晶体取向在铸件中具有合理的分布, 对充分发挥单晶高温合金性能潜力具有十分重要的意义。

本工作研究了一种镍基单晶高温合金[001], [011]和[111]晶体取向的组织 and 偏析, 以及合金弹性

模量与持久性能的各向异性。

1 实验方法

实验在工业用大型双区加热 ZGD-2 单晶炉中进行的。所用合金为一种无铼单晶高温合金,其成分为: Cr6-Co5-W8-Mo2-Al5-Ti2-Ta6-Ni 余。铸型为刚玉模组,采用籽晶法生长单晶。分别切取三个取向的横截面,制成金相试样,腐蚀剂为: 20g CuSO₄ + 100mL HCl + 80mL H₂O。在 Leica 光学显微镜上观察其枝晶形态,采用 EPMA-1600 电子探针分析仪测定枝晶干和枝晶间的各元素含量,每个试样分别测定 3 组对应的枝晶干和枝晶间的元素含量后,求出各元素的偏析比。用 JSM-6301F 型场发射电子显微镜进行高倍组织分析和能谱分析。

在高温持久试验机上测定单晶高温合金在热处理态下的持久性能,热处理工艺为 1305℃/8h + 1080℃/4h + 870℃/24h, AC。持久试验条件为 871℃/552MPa 和 1010℃/248MPa。

2 实验结果与讨论

2.1 晶体取向对合金凝固组织的影响

本实验对 [001], [011] 和 [111] 三个晶体取向的合金枝晶组织进行了研究,结果如图 1 所示。可见,不同晶体取向的单晶沿生长方向的枝晶形貌不同, [001] 方向的单晶枝晶花样成标准的“+”字形,并且枝晶在横截面处成六边形排列(见图 1a); [011] 方向的单晶枝晶花样也呈“+”字形,但其截面处枝晶沿某一 [011] 方向排列比较规则,且枝晶左右不对称(图 1b); 而 [111] 方向的单晶的枝晶花样的“+”有一定的角度,呈剪刀形(图 1c)。据报道,单晶高温合金的枝晶是沿择优方向 [001] 生长的。对于 [001] 取向的单晶,其择优生长方向和试样生长方向一致,因此其一次枝晶沿试样轴向平行排列。而 [011] 和 [111] 取向分别有 2 个和 3 个等价的择优取向,它们之间的互相制约及影响将导致枝晶的空间构型比较复杂,因而在垂直于单晶生长的平面内可以看到枝晶的形状和排列特征不同于 [001] 取向。在此平面内, [011] 取向的枝晶常沿一

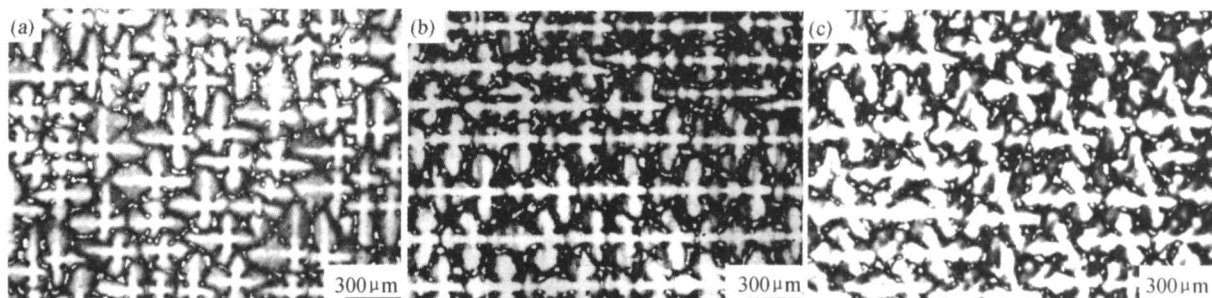


图 1 [001], [011] 和 [111] 晶体取向截面枝晶组织

(a) [001] 方向枝晶组织; (b) [011] 方向枝晶组织; (c) [111] 方向枝晶组织

Fig. 1 Cross sectional microstructure of [001], [011] and [111] crystal orientation

(a) [001] orientation; (b) [011] orientation; (c) [111] orientation

条直线定向排列, [111] 取向的二次枝晶呈不对称生长状态,某 2 个相邻的分枝比较发达,而另 2 个分枝则相对萎缩。

图 2 为 [001], [011] 和 [111] 三个晶体取向的 γ' 形貌,可以看出,枝晶间的 γ' 尺寸较大,形状不规则,而枝晶干的 γ' 尺寸较小且形状较规则。[001] 枝晶干的 γ' 呈规则的立方体形状,尺寸也比较均匀, [011] 取向枝晶干的 γ' 形状基本呈立方体,但没有 [001] 取向的规则, [111] 取向枝晶干 γ' 的形状与其他两个取向的 γ' 不同, γ' 呈三角形。这说明, γ' 沉淀是在 [001] 晶向上保持与 γ 共格的,立方体的三个边的方向为 [001] 方向,在 {111} 面截取试样时, γ' 被剖开,所以观察到只变化规律是等同的,因而偏析只由扩散均匀化过程决

是立方 γ' 相的一部分,形状不规则。

2.2 晶体取向对枝晶偏析的影响

图 3 为 [001], [011] 和 [111] 晶体取向对元素偏析的影响,结果表明: Mo, Cr, Ti, Ta 均为正偏析元素,晶体取向对其分布产生显著影响, [001] 方向元素的偏析最严重,而 [111] 方向元素的偏析最轻; 而 Al, Ni, Co 的偏析比接近于 1,也不随晶体取向变化; W 为负偏析元素,但几乎与晶体取向无关。

顾林喻^[7]等认为凝固过程中的成分偏析取决于有效溶质分配系数和凝固后的扩散均匀化作用。本实验不同取向的单晶是在同一模组中生长的,以认为不同取向的单晶,在生长过程中各元素的溶质分配系数定,均匀化过程取决于扩散距离和扩散时间。在凝固

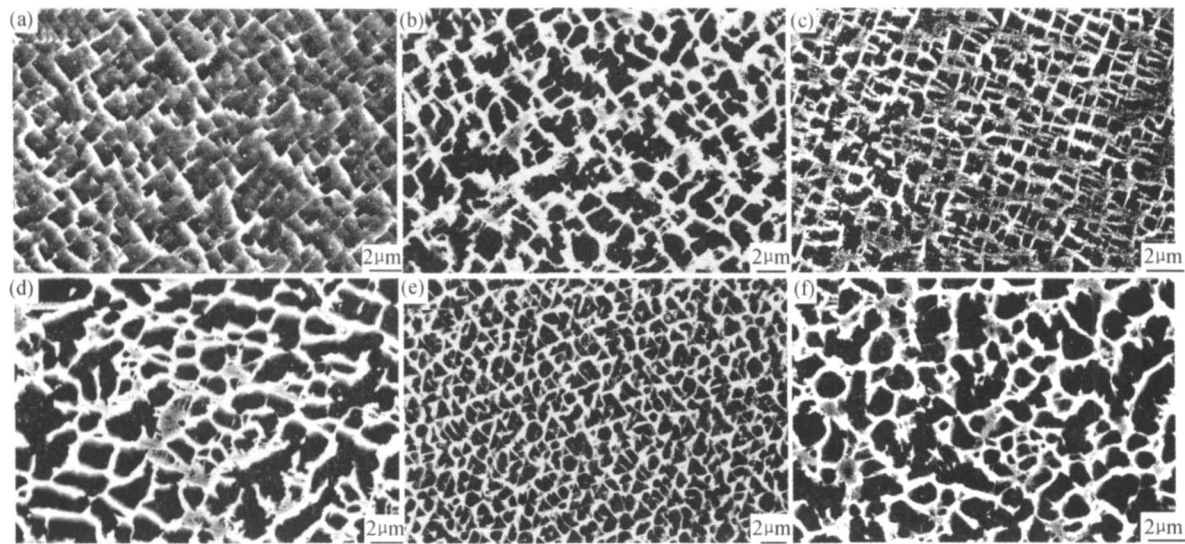


图 2 [001], [011] 和 [111] 晶体取向的 ̳ 相形貌
(a) [001] 取向, 枝晶干; (b) [001] 取向, 枝晶间; (c) [011] 取向, 枝晶干; (d) [011] 取向, 枝晶间;
(e) [111] 取向, 枝晶干; (f) [111] 取向, 枝晶间

Fig 2 Morphology of ̳ at [001], [011] and [111] crystal orientation
Dendritic core (a) [001] orientation; (c) [011] orientation; (e) [111] orientation;
Interdendritic region (b) [001] orientation; (d) [011] orientation; (f) [111] orientation

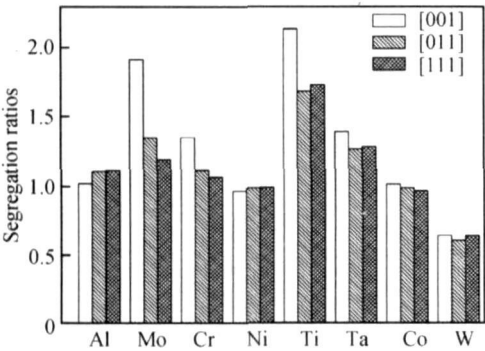


图 3 晶体取向对单晶合金元素偏析的影响
Fig 3 Segregation ratios of [001], [011]
and [111] crystal orientation

条件相同的条件下, 扩散时间一样, 各取向的枝晶组织的差异造成了扩散距离的变化, 对于 [001] 晶体取向, 其元素的扩散路径较少, 而其他取向的单晶等同择优生长方向较多, 相应的元素扩散路径也较多, 使元素的扩散距离缩短, 从而减轻了合金元素的偏析。

2 3 晶体取向对弹性模量的影响

图 4 为 [001], [011] 和 [111] 晶体取向在不同温度下的杨氏模量, 结果表明: 各个晶体取向的弹性模量都随温度的增加而降低, 主要是因为随着温度的升高, 原子间的间距变大, 原子的结合力下降, 所以抵抗材料弹性变形的能力也随之下降。同时发现, 合金的弹性模量存在显著的各向异性, [111] 取向的弹性模量最大, [011] 取向次之, [001] 取向的弹性模量最小。{111} 面

是最密排面, 虽然两相邻的原子面之间的间距最大, 但该晶面内的原子密度也最大, 所以对 [111] 取向要实现相同的变形量, 需要更大的载荷。而 {001} 原子面间距虽然相对较小, 但该晶面内的原子密度也较小, 所以弹性模量相对较小。

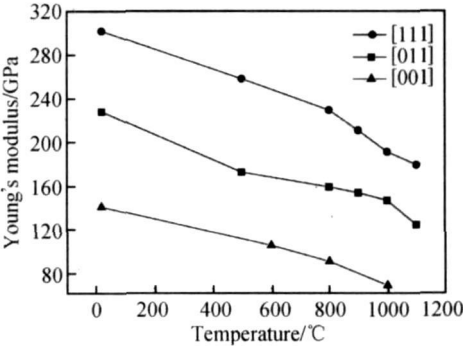


图 4 [001], [011] 和 [111] 晶体取向在不同温度下的杨氏模量
Fig 4 Young's modulus of [001], [011]
crystal orientation at different temperatures

2 5 晶体取向对持久性能的影响

图 5 为 [001], [011] 和 [111] 晶体取向在 871 °C/552MPa 和 1010 °C/248MPa 的持久性能, 结果表明, 晶体取向显著影响持久性能。[011] 取向在两种试验条件下, 持久寿命都最低; 在 871 °C/552MPa 下, [001] 取向的持久寿命最高, [111] 取向的延伸率最高; 在 1010 °C/248MPa 下, [111] 取向的持久寿命最高, [001] 取向的延伸率最高。

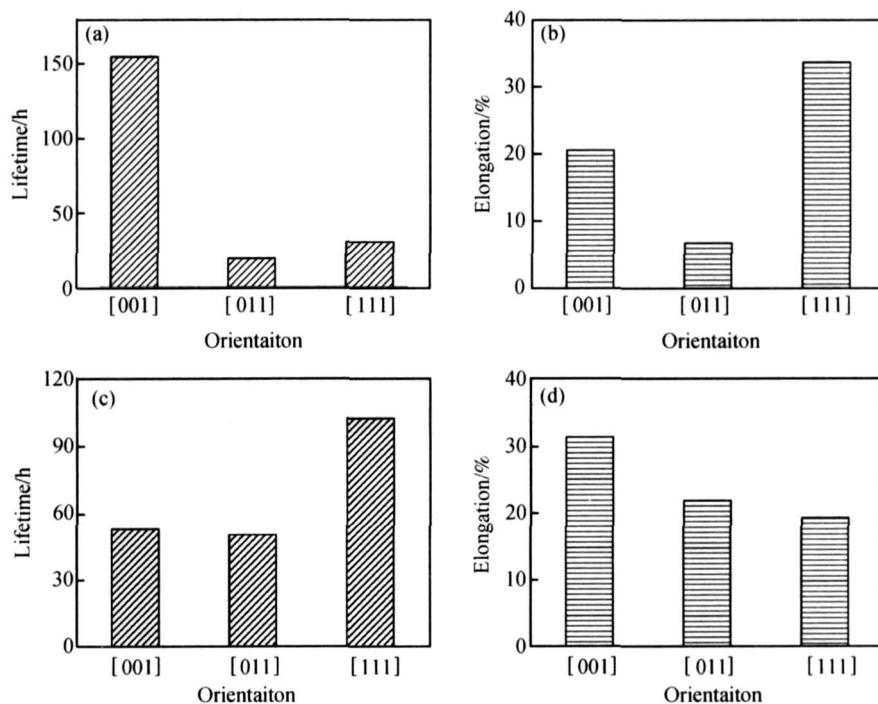


图5 不同取向在 871 °C/552MPa 和 1010 °C/248MPa 的持久性能

(a) 871 °C/552MPa 的持久寿命; (b) 871 °C/552MPa 的延伸率; (c) 1010 °C/248MPa 的持久寿命; (d) 1010 °C/248MPa 的延伸率

Fig 5 Stress rupture properties of three orientations at two test conditions

(a) lives at 871 °C/552MPa; (b) elongations at 871 °C/552MPa; (c) lives at 1010 °C/248MPa; (d) elongations at 1010 °C/248MPa

[001] 取向的试样中{111}[110] 滑移系的 Schmid 因子为 0.41。虽具有较高的分切应力,但等价的滑移系共有 8 个,具有充分的加工硬化能力。[011] 取向具有 4 个等价的{111}[110] 滑移系,其 Schmid 因子为 0.41。[111] 取向具有 6 个等价的{111}[110] 滑移系,其 Schmid 因子为 0.27。因此[011] 取向试样中,独立滑移系少且分切应力高,其变形阻力及变形协调能力都较低,位错平行排列不同滑移系的位错交截几率低,加工硬化能力不足。对于[111] 单晶,其硬取向对位错稳定性产生作用,对延长持久寿命产生有益影响,其等效滑移系数目居中使其变形协调较好,且各滑移系间的位错交截几率高,可形成位错网,具有较强的形变阻力,两因素综合作用的结果使该取向单晶同时具有高的持久寿命和较好的持久塑性。

3 结论

(1) 晶体取向对合金枝晶组织形态和偏析存在显著影响。

(2) 合金的弹性模量存在显著的各向异性, [111] 取向的弹性模量最大, [011] 取向次之, [001] 取向的弹性模量最小。

(3) 持久性能也存在显著的各向异性, 在 871 °C/

552MPa 下, [001] 取向的持久寿命最高, [111] 取向的延伸率最高; 在 1010 °C/248MPa 下, [111] 取向的持久寿命最高, [001] 取向的延伸率最高; 两种实验条件下, [011] 取向的持久寿命都最低。

参考文献

- [1] 胡壮麒, 刘丽荣, 金涛, 等. 镍基单晶高温合金的发展[J]. 航空发动机, 2005, 31(3): 1-7.
- [2] 陈荣章. 单晶高温合金发展现状[J]. 材料工程, 1995, (8): 3-12.
- [3] MACKAY R A, MAIER R D. The influence of orientation on the stress rupture properties of nickel-based superalloy single crystals[J]. Metall Trans, 1982, 13A: 1747-1755.
- [4] 彭志方, 严演辉. 镍基单晶高温合金 CMSX-4 相形态演变及蠕变各向异性[J]. 金属学报, 1997, 33: 1147-1154.
- [5] SASS V, GLATZEL U, FELLER K, NIEPM EIER M. Anisotropic creep properties of the nickel-base superalloy CMSX-4. [J]. Acta Mater, 1996, 44: 1967-1977.
- [6] 桂忠楼. 俄罗斯单晶高温合金各向异性的研究现状[J]. 航空制造工程, 1997, (1): 20-21.
- [7] 顾林喻, 刘忠元, 史正兴. 高梯度快速定向凝固下高温合金 DZ22 的显微偏析[J]. 中国有色金属学报, 1996, 6(2): 298-301.

收稿日期: 2007-07-03; 修订日期: 2007-11-25

作者简介: 赵乃仁(1968—), 男, 博士生, 研究方向为定向及单晶高温合金制备技术, 联系地址: 中国科学院金属研究所高温合金研究部(110016)。E-mail: nrzhao@imr.ac.cn