

合金成分对定向凝固柱晶高温合金热裂倾向性的影响

Effects of Chemical Compositions on Hot Tearing of Directionally Solidified Alloys

王艳丽, 黄朝晖, 张 强, 谭永宁, 张宏伟, 贾新云, 赵希宏, 李嘉荣
(北京航空材料研究院 先进高温结构材料国防科技重点实验室, 北京 100095)

WANG Yan-li, HUANG Zhao-hui, ZHANG Qiang,
TAN Yong-ning, ZHANG Hong-wei, JIA Xin-yun, ZHAO Xi-hong, LI Jia-rong
(National Key Laboratory of Advanced High Temperature Structural Materials, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 为研究定向凝固柱晶高温合金薄壁铸件凝固过程的热裂纹形成倾向, 采用定向凝固空心薄壁管状试样, 考察了 Ti, Zr, Hf, Al 和 B 等元素对定向凝固柱晶高温合金热裂倾向性的影响; 采用 SEM、断口分析及 DSC 方法, 分析了热裂的晶界宏观形态。结果表明: 随着 Ti 含量的增加, γ/γ' 共晶增多, 尺寸增大, 合金凝固温度范围变大, 定向合金的热裂倾向性严重; Zr 元素含量增加, 促成共晶形成, 合金出现热裂纹; Hf 含量的变化对合金的热裂没有影响; Al, B 含量增加, 微观组织无明显变化, 但合金凝固温度范围变大, 导致定向凝固合金出现热裂。

关键词: 定向凝固; 高温合金; 热裂

中图分类号: TG132.32 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2009)06-0035-04

Abstract: Effects of the elements, such as Ti, Zr, Hf, Al and B on hot tearing susceptibility during directional solidification were investigated by tube-like directional samples with thickness of 1.0 mm in walls. The results of SEM, DSC and fracture analysis of the elements on the solidification of the alloys were presented. It is found that titanium promotes the formation of γ/γ' eutectic, increases its sizes, moreover changes the solidified temperature range of alloys, which leads to crack formation and poor castability. Increasing Zr content promotes eutectic and enlarges hot tearing. During directional solidification changing Hf content can hardly result in the hot tearing of alloys. Increasing Al or B content shows only a little microstructural evolution but enlarges the solidified temperature ranges of alloys, thus alloys with a strong tendency to hot tearing.

Key words: directional solidification; superalloy; hot tearing

发动机叶片制备技术一直是关系航空航天发展的核心问题^[1,2]。Ni₃Al 基定向凝固 IC10 合金由于具有优良的抗高温氧化性能、耐热腐蚀及抗热疲劳性能, 作为涡轮空心导向叶片材料, 具有良好的应用前景^[3]。但是 IC10 等合金的合金化程度高, 添加的合金化元素多, 应研究定向凝固柱晶高温合金浇注具有复杂内腔薄壁叶片时的可铸性。

热裂倾向性是衡量定向凝固合金可铸性的最重要标志^[4]。近年来大量研究证明, 绝大部分涡轮叶片的破坏是由于晶界裂纹引起的^[5,6]。研究结果表明: 裂纹形成过程与合金的准固态力学性能、合金的凝固组织和晶界状态以及合金凝固过程密切相关。影响热裂纹的因素很多, 如合金成分、叶片形状、壳型和型芯材

料的性能以及熔铸工艺等^[7]。因此, 了解和分析热裂的形成过程及其影响因素, 对于防止热裂的产生, 获得健全铸件具有重要的意义。然而, 受研究条件的限制, 对热裂纹形成的真实过程还无法直接观测。由于热裂纹产生于晶界, 作者采用定向凝固空心薄壁管状试样方法, 通过热裂纹测试及凝固行为分析, 考察合金元素对于定向凝固合金热裂倾向性的影响规律。

1 实验方法

首先使用真空感应熔炼炉浇注 $\phi 80\text{mm}$ 的 IC10 母合金锭, 采用 ISP2/ IHDS 型真空定向凝固炉重熔母合金, 然后调整合金成分, 在相同的工艺参数条件下, 制备

壁厚为 1.0mm 的薄壁定向管状试样, 每个成分制成 5 个管状试样, 合金成分如表 1 所示, 结果如图 1 所示。

表 1 实验中合金名义成分(质量分数%)
Table 1 Nominal compositions of the alloys used in the experiments (mass fraction%)

	Cr	Co	W	Ta	Ti	Hf	Al	B	Zr	Ni
IC10	6.96	11.8	4.96	6.65	0	1.5	5.9	0.015	<0.02	Bal
0.8% Ti	6.96	11.8	4.96	6.65	0.8	1.5	5.9	0.015	<0.02	Bal
1.5% Ti	6.96	11.8	4.96	6.65	1.5	1.5	5.9	0.015	<0.02	Bal
0.8% Hf	6.96	11.8	4.96	6.65	0	0.8	5.9	0.015	<0.02	Bal
2.0% Hf	6.96	11.8	4.96	6.65	0	2.0	5.9	0.015	<0.02	Bal
6.1% Al	6.96	11.8	4.96	6.65	0	1.5	6.1	0.015	<0.02	Bal
0.03% B	6.96	11.8	4.96	6.65	0	1.5	5.9	0.03	<0.02	Bal
0.1% Zr	6.96	11.8	4.96	6.65	0	1.5	5.9	0.015	0.1	Bal

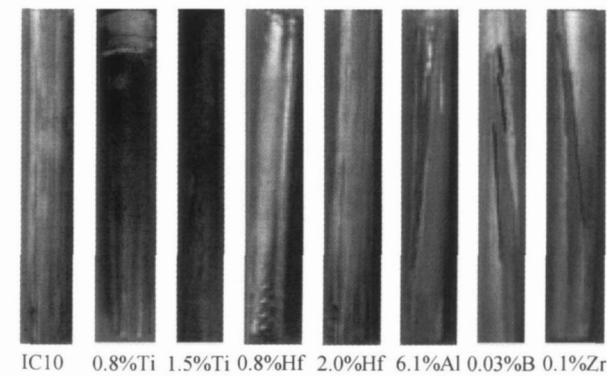


图 1 空心试管
Fig. 1 Tube-like samples

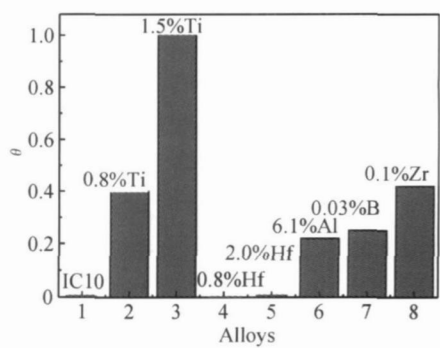


图 2 裂纹长度系数随成分的变化
Fig. 2 Relation of the compositions and coefficient of crack length

2 实验结果与分析

2.1 实验结果

由于裂纹宽度都很小, 所以采用裂纹长度作为考察指标。定义裂纹长度系数 θ :

$$\theta = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} l_i / L \tag{1}$$

式中: n 为裂纹个数; l_i 为裂纹长度; L 为试管长度。各组实验空心试管的裂纹长度系数如图 2 所示, 发现几种元素对热裂的影响程度依次为: Ti 最大, Zr 次之, 再次为 B 和 Al, 最后为 Hf。随着 Ti 含量的增加, 定向合金的热裂倾向性严重。Hf 元素在 0.8% ~ 2.0% (质量分数, 下同) 范围内合金没有出现热裂纹。Al, B 和 Zr 元素含量增加, 合金出现热裂纹。IC10 合金裂纹长度系数为 0, 可铸性优良。

2.2 元素含量对微观组织的影响

横向截取管状试样的裂纹部分, 进行微观组织分析, 如图 3 所示。由于 Hf 含量在 0.8% ~ 2.0% 之间合金没有出现裂纹, 因此没有对其进行微观组织分析。含

Hf 合金的低热裂倾向与存在富 Hf 熔体有关。在凝固后期, 富 Hf 熔体有很好的流动性, 可以沿着枝晶的毛细管道渗出, 在铸件表面形成液膜, 这种液膜会对热裂纹起自愈合作用, 从而使合金具有良好的可铸性^[8]。

从图 3 可以看出, 随着 Ti 含量的增加, 共晶量增多, 而且 γ/γ' 共晶形貌也明显不同。高 Ti (1.5%) 合金共晶 γ' 呈大花瓣, 尺寸大, 数量多, 如图 3c 所示; 低 Ti (0.8%) 共晶的“花心”中 γ 占的比例更大, 呈黑色团状, “花瓣”较细, 如图 3b 所示; 而无 Ti 合金共晶相花瓣最尖 (图 3a)。这是由于 Ti 是强的正偏析元素, 它偏析于枝晶间, 当发生 γ/γ' 共晶转变时, 一部分 Ti 优先进入共晶相, 增大共晶相尺寸和数量, 也明显改变了共晶相形貌。同时, Ti 抑制或减少 Hf 在共晶相中的含量, 使剩余 Hf 形成 Ni_5Hf , 降低合金初熔温度; Ti 含量愈高, 上述效应愈明显。因此, Ti 含量的增多使合金具有严重的热裂倾向性。这种现象不仅出现在本研究中, 而且也出现在其他合金中, 例如 Rene125 合金中含 Ti 量为 2.5% 时, 定向凝固空心叶片具有严重的热裂倾向; 当 Ti 含量降至 1% 左右, 热裂倾向性明

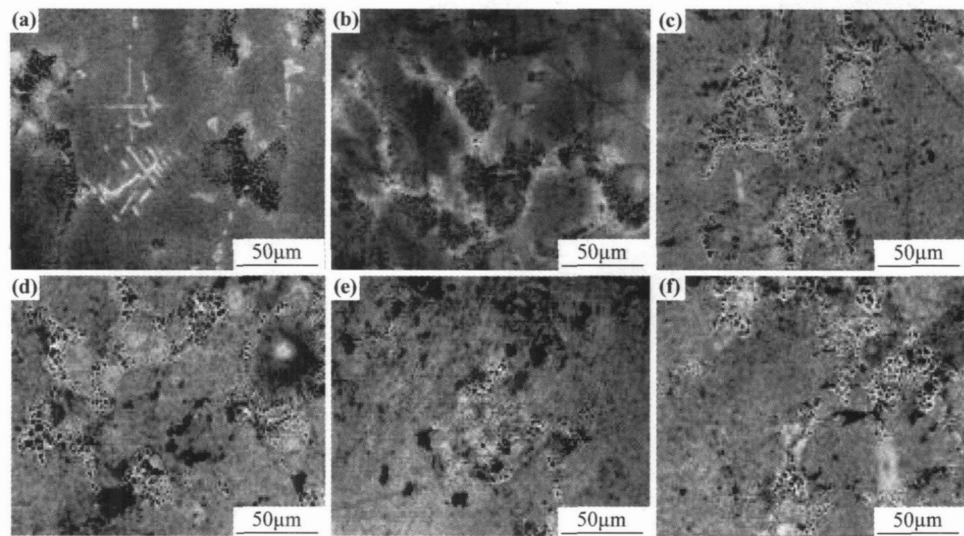


图 3 不同元素含量试管裂纹区域微观组织

(a) Ti= 0; (b) Ti= 0.8%; (c) Ti= 1.5%; (d) Al= 6.1%; (e) B= 0.03%; (f) Zr= 0.1%

Fig 3 Crack microstructures of the tube-like samples with various compositions

(a) Ti= 0; (b) Ti= 0.8%; (c) Ti= 1.5%; (d) Al= 6.1%; (e) B= 0.03%; (f) Zr= 0.1%

显减小^[9]。因此,要使铸件具有良好可铸性,应该控制 Ti 元素含量。

Al, B 含量的变化并没有明显改变合金的显微组织。尽管 Zr 仅加入 0.1%, 也明显促进了 $\gamma + \gamma'$ 共晶的形成, 从而导致晶界开裂。因此, Zr 含量应控制在 < 0.05% 水平。

2.3 元素含量对断口形态的影响

图 4 为不同元素含量合金断口形貌图。由图 4 可

见, 尽管成分变化, 断口都是出现沿晶断裂。当合金含有 Ti 时, 断口表面氧化严重。这是由于 Ti 化学活性极强, 尤其在熔融状态下, 极易与周围介质发生反应; 在凝固后期, 合金断口氧化严重; 同时, 将合金中的 Hf 和难熔合金元素 W, Ta 置换出来, 最终富集在裂纹区域。

当 0.03% B 及 0.1% Zr 时, 除了可以观察到沿晶断裂, 还可以观察到共晶断裂特征。

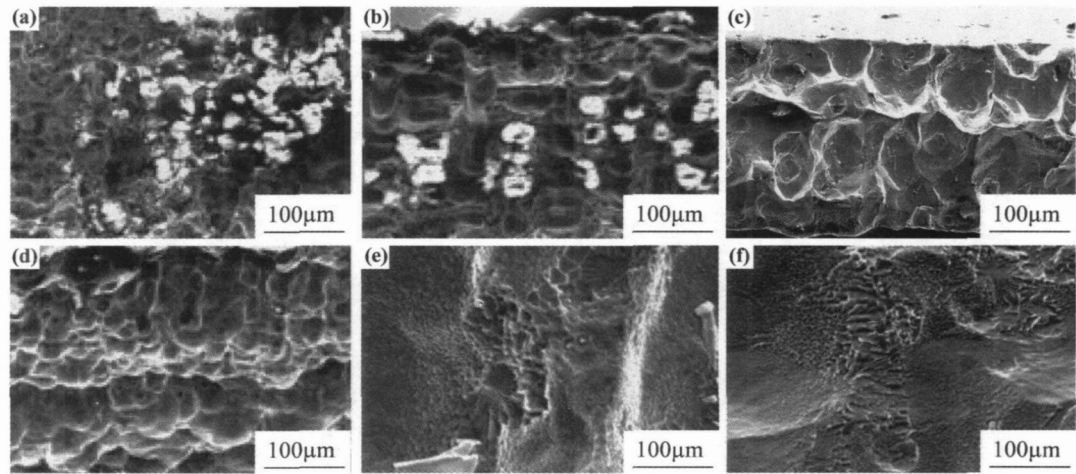


图 4 不同元素含量合金断口形貌

(a) Ti= 1.5%; (b) Al= 6.1%; (c) B= 0.03%; (d) Zr= 0.1%; (e) B= 0.03%; (f) Zr= 0.1%

Fig. 4 Fracture surface of various compositions

(a) Ti= 1.5%; (b) Al= 6.1%; (c) B= 0.03%; (d) Zr= 0.1%; (e) B= 0.03%; (f) Zr= 0.1%

2 4 元素含量对凝固温度的影响

为考察合金成分对凝固特性的影响,以 10℃/min 速率进行了 DSC 试验,结果如表 2 所示。

表 2 合金的 DSC 分析结果

Table 2 DSC results of various compositions

	<i>T_S</i> / ℃	<i>T_L</i> / ℃	Δ <i>T</i> / ℃
IC10	1336 3	1374 8	38 5
0 8% Ti	1323 9	1367 0	43 1
1 5% Ti	1313 0	1356 5	43 5
0 8% Hf	1417 4	1435 3	17 9
2% Hf	1328 7	1374 6	45 9
6 1% Al	1329 5	1371 7	42 2
0 03% B	1332 1	1377 9	45 8
0 1% Zr	1330 1	1374 7	44 6

Ti 是强烈正偏析元素,偏析于枝晶间,降低合金的固、液相线温度。合金凝固特性的 DSC 试验结果表明,无 Ti 合金熔化温度范围最小,低 Ti 合金次之,高 Ti 合金最大。资料表明,合金固-液相线温度范围 (Δ*T*) 越小,可铸性越好。所以合金 Ti 含量减小有助于降低定向凝固时晶界开裂倾向,改善了可铸性。同理,Al, B, Zr 含量的增加使合金熔化温度范围增大,增加合金热裂倾向性^[10]。

从表 2 还可以看出,IC10 固-液相线温度范围较小,这也是 IC10 合金热烈倾向性小,可铸性优良的原因之一。

3 结论

(1)IC10 合金热烈倾向性很小,可铸性优良,可采用定向凝固方法浇注具有复杂形状的空心叶片。

(2)增加 Ti 元素含量,共晶相数量增多,共晶尺寸增大;同时,合金熔化温度范围变大,定向凝固柱晶合金出现热裂纹。

(3)降低 Hf 元素含量,合金熔化温度范围变小,

合金的铸造性能提高;增加 Hf 元素含量,熔化温度范围增大,但 Hf 流动性好,能渗透过枝晶间隙补缩,所以 Hf 元素含量变化没有影响合金铸造性能。

(4)增加 Al, B, Zr 元素含量,微观组织无明显变化,合金熔化温度范围扩大,热裂倾向性增大。

参考文献

[1] KNOWLES D M, SKELTON D K. High temperature fatigue of a polycrystalline nickel base superalloy [J]. Materials Science & Technology, 2001, 17(11): 1403- 1412.

[2] 王艳丽, 郭景杰, 傅恒志. 钛合金冷坩埚定向凝固过程温度场数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(11): 1808- 1810.

[3] ZHOU Y Z, VOLEK A. Effect of grain boundary fraction on castability of a directionally solidified nickel alloys[J]. Scripta Materialia, 2006, 54: 2169- 2174.

[4] 夏鹏成, 禹文芳, 于金江, 等. 长期时效对 DZ951 合金 γ 的影响 [J]. 材料工程: 2007, (12): 8- 11.

[5] YOKOKAWA T, OSAWA M, NISHIDA K, et al. Partitioning behavior of platinum group metals on the γ- and γ'-phases of ni-base superalloys at high temperatures[J]. Scripta Materialia, 2003, 49: 1041- 1046.

[6] 郭运强, 张克实, 耿小亮, 等. 镍基定向高温合金力学性能的统计分析[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15: 49- 54.

[7] MASATSUGU Y, ESTEBAN P B. On the accuracy of self-consistent elasticity formulations for directionally solidified polycrystal aggregates[J]. International Journal of Solids and Structure, 2005, 42: 1073- 1089.

[8] 何玉环, 刘绍伦. Ni₃Al 合金热/机械疲劳裂纹扩展行为研究[J]. 材料工程, 2000, (11): 13- 14.

[9] 杨政, 田飞, 郑志, 等. 定向凝固镍基高温合金的成分因素对涡轮叶片热裂的影响[J]. 金属学报, 2002, 38: 1191- 1194.

[10] 陈荣章, 余力, 张宏伟, 等. DZ125 定向凝固高温那合金的研究 [J]. 航空材料学报, 2000, 20(4): 14- 19.

收稿日期: 2008-08-24; 修订日期: 2009-02-25
作者简介: 王艳丽(1977—), 女, 博士, 研究方向为定向凝固高温合金, 联系地址: 北京市 81 信箱 1 分箱(100095), E-mail: wangyanli0827@163.com

高精度电涡流位移传感器

德国米铨公司生产的电涡流位移传感器,主要用于油膜厚度的在线精密测量。此电涡流传感器主要包括控制器(DT 3010-A,适用于非铁磁材料的测量,如铝材料)和传感器探头(U05,0.5mm 量程,非屏蔽)。传感器的线性度达到 1.25μm,静态分辨率达到 0.025μm,频率响应为 25kHz,可在-50~150℃的环境范围内使用,传感器独特的温度补偿技术可以大大减小由于温升带来的测量误差。

(龚海飞)