

DZ22B高温合金定向凝固叶片 铸造缺陷的形成机理研究*

李振锋¹, 胡兵¹, 钟文惠¹, 欧阳雪枚², 李飞³, 王鑫铭², 雷四雄¹, 周坚¹, 尹付成²

(1. 中国航发南方工业有限公司, 株洲 412000;

2. 湘潭大学材料科学与工程学院, 湘潭 411105;

3. 上海交通大学上海市先进高温材料及其精密成形重点实验室, 上海 200240)

[摘要] 采用 SEM、EDS 等分析手段研究了 DZ22B 镍基高温合金定向凝固涡轮叶片不同区域铸造缺陷的特点及其形成原因。结果表明, 裂纹缺陷主要分布在叶身的中上部位, 其形成机理主要归因于叶片在凝固过程中的共晶组织过多; 而疏松缺陷分布在叶身和缘板部位, 产生在枝晶间共晶组织附近。枝晶间距小补缩不足和反应生成的 CO 气体未及时排除是疏松形成的两大原因。

关键词: DZ22B 高温合金; 定向凝固叶片; 陶瓷型壳; 铸造缺陷; 形成机理

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.16.045



李振锋

高级工程师, 研究方向为单晶定向凝固工艺, 参与中国航发基金 123 项目、铸件表面精度提升项目等。

高温合金涡轮叶片是航空发动机关键热端部件之一, 其性能对航空发动机的工作效率与可靠性的提升至关重要^[1-3]。缩松、气孔、表面粘砂是定向凝固涡轮叶片中常见的铸造缺陷, 降低了叶片的力学性能, 恶化了表面质量, 造成合格率的大幅降低, 因此铸造缺陷的控制一直都是叶片制造过程中的技术要点所在^[4-6]。叶片在定向凝固成形过程中, 金属液与型壳之间长时接触, 二者之间既有热冲击和热渗透等机械作用, 又有元素间的热扩散、化学反应等高温化学相互作用, 因此各种铸造缺陷成因复杂, 控制难度较大^[7-8]。

DZ22B 镍基高温合金的铸造性能良好、高温抗氧化及耐腐蚀性能强, 其综合力学性能接近美国 PWA1422 定向凝固高温合金, 通过 Hf、W 等元素的添加, 还能进一步改善合金塑性能力, 因此适于

制造航空发动机定向柱晶叶片^[9]。目前, DZ22B 镍基高温合金涡轮叶片主要采用定向凝固熔模铸造工艺制备, 但在实际生产过程中, 发现在叶片的叶身与缘板部位经常出现铸造缺陷, 导致产品合格率降低, 严重影响了叶片的质量可靠性与交付工期。

本研究以实际生产中的 DZ22B 高温合金涡轮叶片的报废件为研究对象, 对无损检测发现的有缺陷的部位进行解剖和分析, 旨在揭示叶片中的缺陷形成机理, 为优化铸造工艺参数和提升叶片合格率提供理论参考。

试验及方法

本研究选取的 DZ22B 镍基高温合金是在 DZ22 镍基高温合金基础上改型的定向凝固涡轮叶片合金, 其化学组分如表 1 所示。叶片成形

* 基金项目: 中国航发自主创新专项资金项目 (ZZCX-2017-045); “十三五” 装备预研共用技术项目 (41423040206); “十三五” 两机重大专项 (2017-VII-0008)。

所采用的陶瓷型壳为硅溶胶-电熔刚玉型壳,型壳上下区保温温度为1500℃,熔体浇注温度1540℃,浇注后静置20min,以100μm/s的速度抽拉直至铸件完全进入冷区,定向炉温度梯度50℃/mm。型壳面层为Al₂O₃粉,背层为KC95粉,黏接剂为硅溶胶,制备电熔刚玉陶瓷型壳,经脱蜡及850℃焙烧后,在浇口杯处安装氧化锆陶瓷过滤网,之后采用真空定向凝固炉,按照DZ22B高温合金浇注工艺进行叶片的浇注、凝固冷却及清壳。将叶片进行表面喷砂处理后,对无损检测的缺陷显示处进行线切割,得到尺寸合适的金属样块,并在丙酮中进行超声清洗,以去除表面油渍。将样块冷镶后,再进行打磨、抛光,获得检测用样品。采用扫描电子显微镜(SEM, Nova NanoSEM230)对试样表面进行缺陷形貌的观察,并对典型缺陷区域进行能谱(EDS, INCA Energy 250)分析。

结果与讨论

本研究从批产叶片不合格品中随机抽取5片作为样品,进行铸造缺陷检测。图1给出了DZ22B高温合金叶片的结构,经荧光检测后取样,取样位置为无损检测显示缺陷较多的叶身与缘板处。叶片荧光缺陷部位及形貌见图2。

1 缺陷类型和特点

荧光缺陷检测结果表明,所选的5个不合格样品在叶身和缘板处发现密集或尺寸较大的缺陷,标记后进行线切割,然后进行扫描电镜观察和能谱分析,结合文献报道结果,得到的缺陷类型统计情况如表2所示。由表2可知,(1)缺陷主要包括3类:疏松、裂纹和夹渣,且以疏松和裂纹缺陷为主。(2)热裂纹集中出现于叶片中上部,距排气边3~10mm范围之内。此区域叶片厚度仅有1~2mm,是易形成热裂纹的区域,缘板处未发现裂纹。(3)疏松缺陷主

要分布在枝晶间,沿着重力方向,形成疏松通道。

2 叶身裂纹缺陷特点及形成原因分析

通过金相显微镜观察发现,裂纹基本与叶身厚度方向平行,是合金沿晶界开裂形成的,整体贯穿叶盆和叶背,同时局部存在搭桥连接的现象,

如图3所示。枝晶较粗大,且有发达的二次枝晶和三次枝晶出现。枝晶间碳化物含量较低,仅为2%左右,但存在大量(γ+γ')共晶,约为9%,文献表明:共晶含量低于5%或高于22%时,合金的热裂倾向性较弱,因此该合金的热裂倾向性较强。

对裂纹处进行面扫描,结果发

表1 DZ22B高温合金化学成分质量分数
Table 1 Chemical composition of DZ22B superalloy %

C	Cr	Co	W	Nb	Ti	Al	Hf	B	Ni
0.140	9.000	9.500	12.000	0.900	1.900	4.900	1.000	0.015	余量

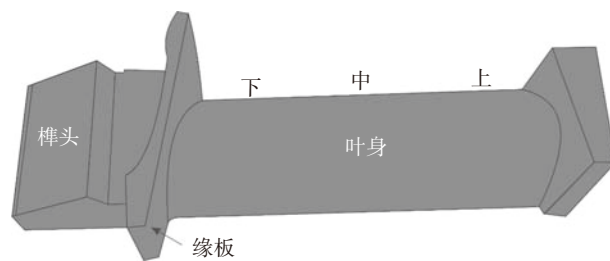


图1 DZ22B镍基高温合金定向凝固涡轮叶片结构
Fig.1 Structure of directionally solidified blades of DZ22B superalloy



图2 叶片荧光显示部位及形貌
Fig.2 Leaf fluorescent display parts and morphology

表2 铸件缺陷分析情况统计情况
Table 2 Statistics of casting defects analysis

缺陷名称	涡轮叶片荧光检测缺陷密集个数					
	检测位置	铸件 1#	铸件 2#	铸件 3#	铸件 4#	铸件 5#
裂纹	叶身	2	1	1	1	0
	缘板	0	0	0	0	0
疏松	叶身	1	2	1	0	0
	缘板	1	1	2	1	1

现,裂纹处存在 Ti、Nb 和 Hf 等元素富集,如图 4 所示。结合背散射电子形貌,裂纹处存在富 Ti、Nb 和 Hf 的 MC 型碳化物和($\gamma+\gamma'$)共晶,其中促进热裂纹易感性的 Ti 元素的富集尤为明显。

对比同一位置有热裂和无热裂的叶片的组织,结果表明:它们的枝晶间距在相同的叶身位置处无明显差异。有热裂叶片的共晶和碳化物含量基本相同;但共晶含量比无热裂多约 5%,碳化物含量稍低于无热裂叶片。热裂纹处有连续的共晶存在,如图 5 所示,表明定向凝固过程中晶界处存在稳定的液膜是导致热

裂纹形成的主要原因。共晶是合金最后凝固的区域,热裂纹处存在连续的共晶组织表明热裂纹形成过程中,晶界处存在熔融的低熔点液相,枝晶搭桥情况出现的较少,晶界强度较低,导致降温过程中晶界开裂;同时由于液膜厚度较低,熔融合金不能及时填充裂纹区域,导致热裂形成。

3 疏松缺陷特点及原因分析

(1) 叶身疏松缺陷特点。

从图 6 中为 2# 叶片叶身上部的一处疏松缺陷形貌,可见,在凝固过程叶身的上半部分为尚未完全凝固的糊状区,合金液体的不足造成叶身该部位形成严重的缩松,出现“沟槽

式”的隧道缩松,穿过整个糊状区。这是由于糊状区的金属液上端的密度大于下端,在合金溶液上重下轻和重力的共同作用下,合金液产生对流,同时上方没有足够的合金液进行补缩,在隧道里的合金液被正在凝固的枝晶组织吸走,形成“沟槽式”的隧道缩松。

(2) 缘板疏松缺陷的特点。

图 7 为 3# 叶片缘板处一处缺陷形貌,黑点即为定向凝固叶片枝晶间的铸造缩松,其形状不规则。能谱结果显示,该区域的 C、Ti、Nb 和 Hf 等元素比基体的高。

(3) 疏松缺陷形成原因分析。

分析发现,在检的定向凝固涡轮叶片都存在缩松缺陷,它会造成叶片的有效承载面积减小,成为叶片服役过程中机械和疲劳失效裂纹的发源地。根据试验结果和文献报道,疏松缺陷形成原因主要有两种:

①在镍基高温合金在定向凝固过程中,因合金内部产生的溶解性气体未及时排出,导致铸态缩松。由表 2 中 EDS 分析结果可知,疏松缺陷处出现了型壳材料中才有的

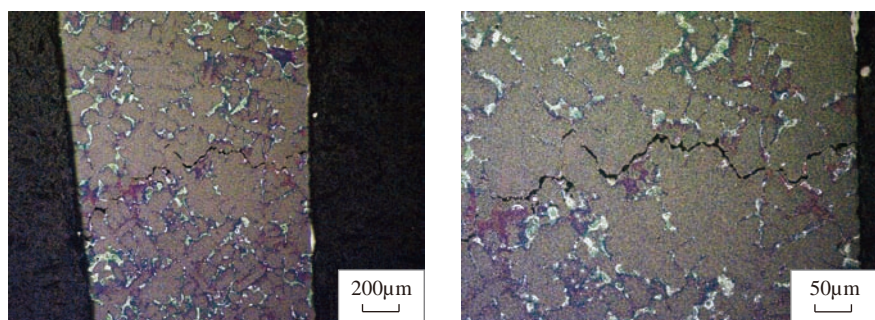


图3 叶片叶身裂纹处微观组织
Fig.3 Microstructure of blade near the crack

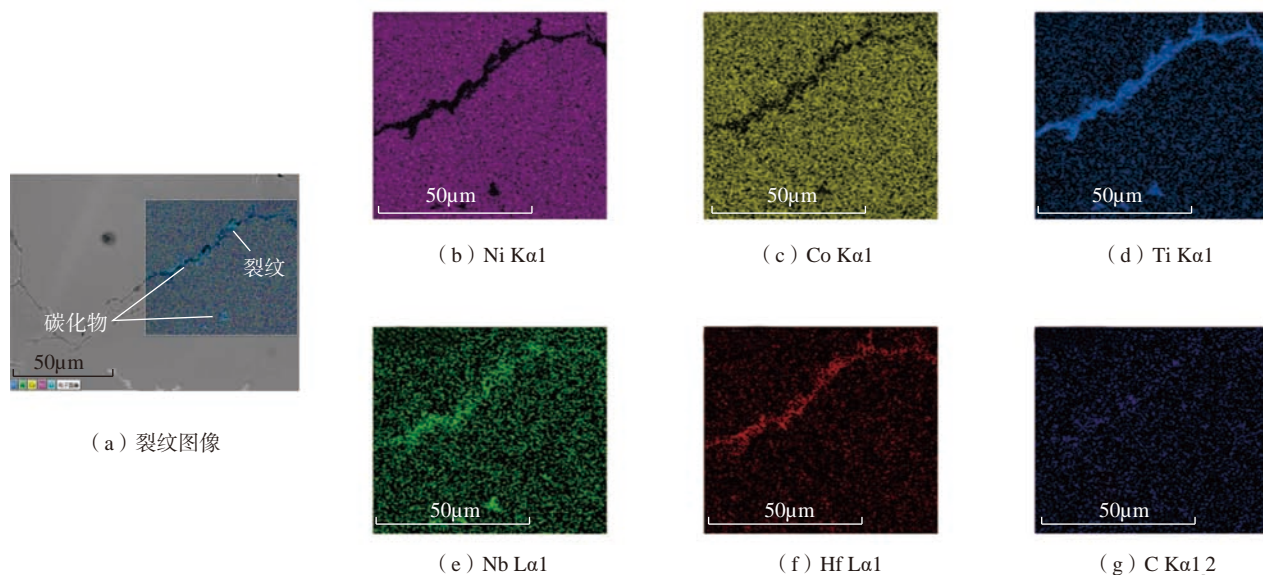
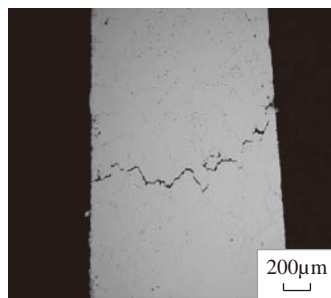
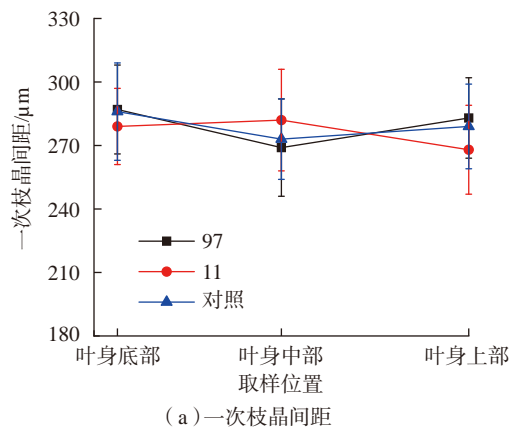
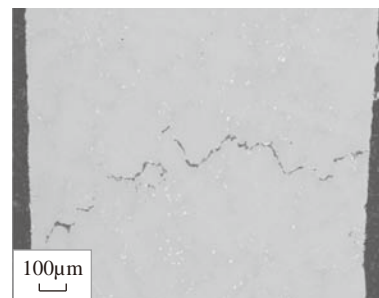


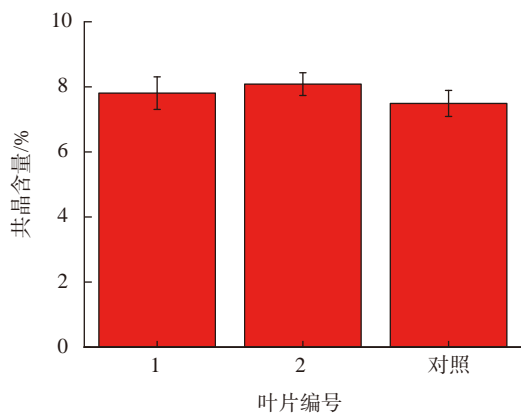
图4 裂纹处元素分布
Fig.4 Element distribution at the crack



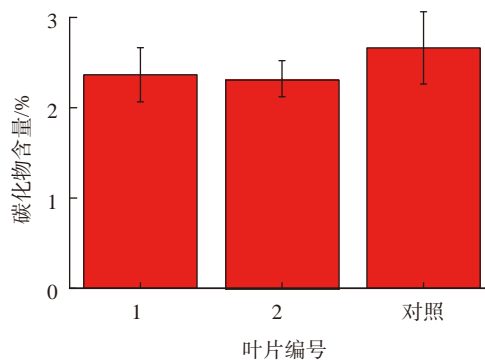
(b) 1# 叶片裂纹形貌



(c) 2# 叶片裂纹形貌



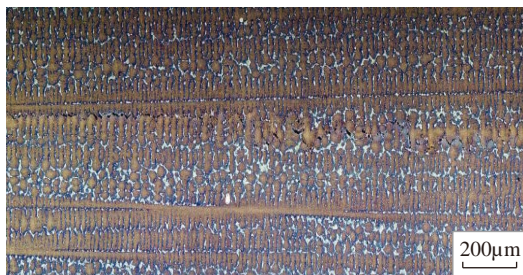
(d) 共晶含量



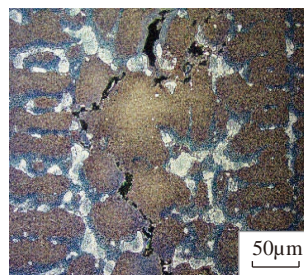
(e) 碳化物含量

图5 1#叶片不同位置

Fig.5 Different positions of 1# blade



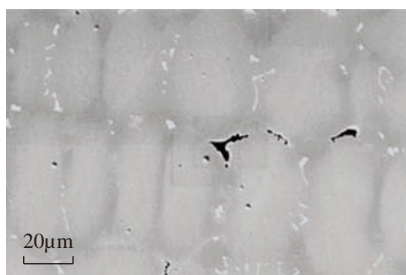
(a) 微观形貌



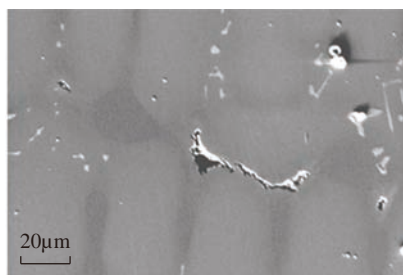
(b) 局部放大

图6 叶身疏松微观形貌及局部放大

Fig.6 Microstructure of loose in leaf body and the enlarge image



(a) 上缘板

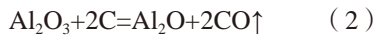


(b) 上缘板与叶身转接 R 处

图7 3#叶片缘板处疏松缺陷形貌

Fig.7 Morphology of loose in edge plate

Al、Si 元素,且 C 含量远高于原合金成分,经分析认为,主要成因是因为液态金属在与型壳长时接触时,合金中的 C 会与型壳中的 SiO_2 和 Al_2O_3 起反应^[10],将其还原成低价氧化物:



由于高温条件下反应剧烈,局部缺陷区域会出现显著的 C 富集。此外,从(1)、(2)反应式中可以看出有 CO 气体逸出,在金属液凝固过程中,析出的 CO 在固相中的溶解度小于液相中的溶解度,溶解于金属液中的 CO 不停地被排挤到液固界面前端。在凝固过程,在缘板处的气体上升被缘板外的型壳阻挡,无法继续排除,因此,会驻留在缘板的上表面,造成该区域的疏松缺陷最为严重。而同一平面的非缘板位置的气体可以继续上升到叶身,最终排除。

②在定向凝固后期,枝晶组织相搭连形成枝晶骨架将枝晶间的合金液封闭,由于被封闭的合金液相和固相存在体积差,凝固收缩时得不到液相的补缩,形成缩松;且后者是主要原因。由于定向叶片在凝固过程中以树枝晶的形态生长,枝晶干优先凝固,其次是枝晶间,部分合金溶液被已经凝固的枝晶臂包围,阻碍了金属液向枝晶间的流动,枝晶间在凝固过程中得不到补缩,形成缩孔。缩松的形成主要是由于固液收缩率的不同,固液收缩率的不同引起枝晶间微小熔池的形成,这些微小熔池得不到流动合金液的补缩,凝固结束形成缩松。

结论

(1)铸件的缺陷主要存在于铸件的表面区域,主要缺陷有裂纹、疏松。裂纹出现的叶身中上部分,缘板处未观察到裂纹。叶身和缘板都存在疏松缺陷。

(2)DZ22B 镍基高温涡轮叶片的叶身铸造裂纹主要是因为凝固过程共晶组织过多。凝固过程中晶界处存在熔融的低熔点液相,枝晶搭桥情况出现的较少,晶界强度较低,导致降温过程中晶界开裂;同时由于液膜厚度较低,熔融合金不能及时填充裂纹区域,导致热裂形成。

(3)叶片疏松缺陷主要原因为枝晶间补缩不足和气体未及时排除。当固-液界面温度梯度偏大时,一次枝晶间距偏小时,使被枝晶骨架分割的孤立熔池在凝固后期无法得到补缩。同时,合金中的 C 会与型壳中的 SiO_2 和 Al_2O_3 起反应,释放 CO 气体,在凝固过程中未及时释放,形成疏松。

参考文献

- [1] 刘维伟. 航空发动机叶片关键制造技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2016, 59(21): 50-56.
LIU Weiwei. Research progress on key manufacturing technology of aeroengine blades[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(21): 50-56.
- [2] 傅恒志. 航空航天材料定向凝固[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
FU Hengzhi. Directional solidification processing of aero-high temperature materials[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [3] DONG Y W, ZHANG D H, BU K, et al. Geometric parameter-based optimization of the die profile for the investment casting of aerofoil-shaped turbine blades[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57(9-12): 1245-1258.
- [4] ZHANG S H, ZHANG J, LOU L H. Anisotropic creep rupture properties of a nickel-base single crystal superalloy at high temperature[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2011, 27(2): 107-112.
- [5] ALABORT E, BARBA D, SULZER S, et al. Grain boundary properties of a nickel-based superalloy: Characterisation and modelling[J]. Acta Materialia, 2018, 151: 377-394.
- [6] ROSKOSZ S, ADAMIEC J. Methodology of quantitative evaluation of porosity, dendrite arm spacing and grain size in directionally solidified blades made of CMSX-6 nickel alloy[J]. Materials Characterization, 2009, 60(10): 1120-1126.
- [7] PATTNAIK S, KARUNAKAR D B, JHA P K. Developments in investment casting process—A review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(11): 2332-2348.
- [8] WANG H, SHANG G F, LIAO J F, et al. Experimental investigations and thermodynamic calculations of the interface reactions between ceramic moulds and Ni-based single-crystal superalloys: Role of solubility of Y in the LaAlO_3 phase[J]. Ceramics International, 2018, 44(7): 7667-7673.
- [9] 刘亚男, 杨伟. DZ22B 高温合金相变过程及凝固组织转变研究[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(2): 99-104.
LIU Yanan, YANG Wei. Phase transformation process and solidification microstructure transition of DZ22B superalloy[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2018, 35(2): 99-104.
- [10] 孙宝才. 定向凝固工艺对 DZ125 合金叶片表面缺陷及组织性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
SUN Baocai. Effect of turbine blade casting process for DZ125 alloy on fluorescence display and mechanical properties[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.

通讯作者: 王鑫铭, 博士, 副教授, 研究方向为精密铸造技术, E-mail: wangxm@xtu.edu.cn.

(下转第 58 页)

Research Progress of Rapid Solidification Phase Field Simulation in Additive Manufacturing

QIU Yi¹, WANG Junsheng^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Advanced Research Institute of Multidisciplinary Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

[ABSTRACT] The property of materials is largely controlled by its microstructure, and the ideal microstructure can be realized by optimizing the forming process. Additive manufacturing is a typical non-equilibrium solidification process, which is also an emerging near-net-shape manufacturing technology. In the non-equilibrium solidification process, dendrite growth is difficult to directly observe, and phase field simulation can effectively predict the dynamic evolution of crystal structure with process change. This paper summarizes the application of phase field simulation in additive manufacturing and points out its development trend, which can provide a reference for the phase field simulation research in the rapid solidification of additive manufacturing.

Keywords: Phase field method; Numerical simulation; Non-equilibrium solidification; Additive manufacturing; Microstructure

(责编 阳光)

(上接第49页)

Study on Formation Mechanism of Casting Defects in Directionally Solidified Blades of DZ22B Superalloy

LI Zhenfeng¹, HU Bing¹, ZHONG Wenhui¹, OUYANG Xuemei², LI Fei³,
WANG Xinming², LEI Sixiong¹, ZHOU Jian¹, YIN Fucheng²

(1. AECC South Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;
3. Shanghai Key Laboratory for High Temperature Materials and Precision Forming, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

[ABSTRACT] The characteristics and the reason of its formation of casting defects in different areas of directional solidified turbine blades of DZ22B nickel base superalloy were investigated by means of SEM and EDS. The results show that the crack defects are mainly distributed in the middle and upper parts of the blade body, and its formation mechanism is mainly due to the excessive eutectic structure of the blade during the solidification process. While the loose defects are distributed in the blade body and the edge plate, and are generated in the dendrite near the eutectic structure. The small gap between dendrites and insufficient filling and the CO gas generated by the reaction not released in time are the two main reasons for the formation of looseness.

Keywords: DZ22B superalloy; Directionally solidified blade; Ceramic shell; Casting defect; Forming mechanism

(责编 阳光)