

一种大尺寸燃机叶片的缺陷分析

李 杨¹, 吴保平¹, 陈苏勇², 吴剑涛³, 李俊涛¹

(1. 北京钢研高纳科技股份有限公司, 北京 100081; 2. 河北钢研德凯科技有限公司, 河北涿州 072750;
3. 钢铁研究总院有限公司, 北京 100081)

摘要: 第四级透平动叶片为某重型燃机中的关键核心部件, 采用无余量整体精密铸造而成, 该叶片精铸件是由榫头、缘板、叶身和叶冠构成, 属大尺寸等轴晶涡轮叶片。由于榫头、叶身、叶冠等结构引起的截面变化, 在铸造凝固及冷却过程中极易在榫头厚大处产生冶金缺陷。通过对榫头缺陷进行荧光渗透检验来确定缺陷的宏观位置和大小; 通过采用X射线对缺陷部位进行透照来确定缺陷的深度; 通过采用扫描电镜 (SEM) 和金相检测来确定缺陷微观尺寸和形貌, 得到的金相检测结果与荧光渗透检测结果一致。通过以上检测, 分析叶片榫头缺陷为裂纹和疏松, 并对该缺陷的形成原因和产生机理进行了分析。

关键词: 高温合金; 燃机叶片; 缺陷分析

高温合金燃机叶片是燃气轮机的核心部件, 对材料性能和尺寸的要求极高, 制备难度极大^[1]。K488合金 (俄罗斯牌号: ЧС88-ВИ) 是具有抗氧化、耐热腐蚀镍基铸造高温合金, 具有较好的承温能力、高温抗氧化、抗热腐蚀性能, 叶片工作温度达到900 ℃^[2]。K488合金第四级透平动叶片在高温环境下工作, 是高速、高载荷的转动部件, 热负荷和动力负荷要求高, 工作条件非常苛刻。该合金叶片应具备高尺寸精度和冶金质量, 以满足重型燃机的长寿命和高可靠性工作要求^[3]。

在实际生产中, 叶片榫头经荧光渗透检测发现表面存在多处荧光显示。现有的荧光渗透检测可识别出叶片的缺陷位置、宏观缺陷尺寸和缺陷数量, 但无法对缺陷深度、缺陷形貌和缺陷性质进行判定。为此, 本文对该部件榫头处的冶金缺陷进行荧光渗透检验、X射线透照检验和金相检测, 探究缺陷的产生原因和形成机理, 为进一步开展大尺寸重型燃机叶片的精密铸造打下基础。

1 试验方法

1.1 试验样品

试验用燃机叶片总长达到605 mm, 叶身长度达到440 mm, 弦宽达到146 mm, 叶身型面公差+0.90 mm~-0.70 mm。由于榫头、叶身、叶冠等结构引起的截面变化, 在蜡模成形、型壳制备、铸造凝固和冷却过程中极易产生扭转、偏移等问题, 尺寸精度控制难度大。第四级透平动叶片榫头、叶冠、缘板、叶身等部位壁厚相差悬殊, 其中榫头呈框架结构, 带减重槽和筋肋, 厚度约160 mm, 上缘板尺寸160 mm×82 mm, 下缘板尺寸160 mm×90 mm, 叶身弦宽144 mm, 进气边R为2 mm, 排气边R为1 mm, 见图1。

该燃机叶片在ZLZ20 II 压蜡机上压制零件蜡模, 以获得整体熔模精密铸造用蜡模。合格的蜡模经浇注系统组合后涂料、撒砂、干燥后脱蜡、焙烧制备出陶瓷型壳。采用ZG0.1真空感应炉重熔合金并浇注成形, 铸件经切割、打磨、热处理后, 进行目视、荧光、X射线探伤及尺寸检验, 合金化学成分如表1所示, 铸件的具体工艺路线见图2。

作者简介:

李杨 (1986-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为高温合金熔模精密铸造。
E-mail: plum_lee1201@hotmail.com

中图分类号: TG244;

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2023) 06-0717-07

基金项目:

国家科技重大专项, HT-J2019-VI-0020-0136。

收稿日期:

2023-01-19 收到初稿,
2023-03-30 收到修订稿。

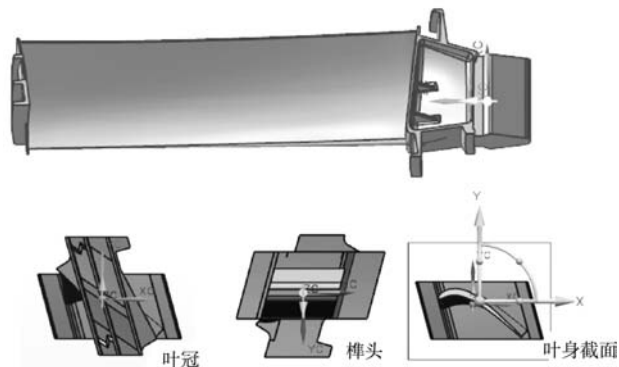


图1 第四级透平动叶片结构图
Fig. 1 The structure diagram of the turbine blade

1.2 试验方法

本试验采用荧光渗透水洗去除法对经吹砂处理的叶片进行荧光渗透检验，渗透液灵敏度为4级。试验采用GE公司生产的ISOVOLT 320HS型X射线透照机和8(Ni)型像质计对叶片榫头部位的缺陷进行透照检测。为进一步探究榫头部位的缺陷形貌，采用扫描电镜(SEM)对缺陷进行金相检测。

2 结果与讨论

2.1 荧光渗透检验结果

因叶片榫头尺寸较大，为便于检测，将叶片榫头切下单独进行荧光渗透检验，结果如图3所示。可以看

表1 K488合金化学成分
Table 1 Normal chemistry of the K488 Alloy

								$w_B / \%$
C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Nb	Hf
0.04~0.09	15.4~16.3	10.0~11.5	4.7~5.9	1.6~2.3	2.8~3.3	4.2~5.0	0.1~0.3	0.2~0.4
B	Zr	Y	Ce	Mn	Si	P	S	Ni
0.06~0.10	0.05	0.03	0.015	≤0.3	≤0.3	≤0.008	≤0.008	余量



图2 产品主要工艺流程
Fig. 2 The main process flow

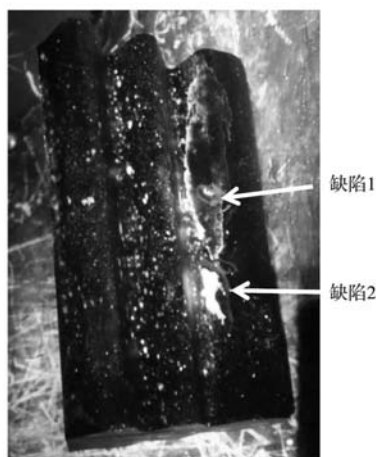


图3 榫头缺陷荧光显示
Fig. 3 The fluorescent display of the blade's endcone

到榫头处的荧光显示点较多，榫齿呈现大面积分散性显示，类似“满天星”状荧光显示。因叶片榫齿经过了磨削加工，故表面存在较深的磨痕，且肉眼观察线性显示几乎与磨痕平行。

2.2 X射线透照检验结果

为进一步明确缺陷状态和深度，对叶片榫头进行X射线透照，射线透照结果显示，未在叶片榫头内部发现缺陷(图4)，故可判定叶片榫头处的缺陷显示为表层缺陷，未延伸到叶片榫头内部。

2.3 金相检测结果

为了进一步确认叶片榫头处的缺陷性质及产生机理，对图3中标注的缺陷1进行扫描电镜(SEM)分析，结果如图5所示。该缺陷呈线性显示，具有明显的裂纹缺陷特征，裂纹萌生区显示不明显，但在裂纹中心区域存在明显的凹陷，且裂纹延伸处可观察到明显的台阶，经分析，应为基体出现晶体错位导致的裂纹萌生区域，这也是该位置出现荧光显示的原因。放大观察倍数后，可在基体上观察到碳化物的存在，如图5b所示，碳化物尺寸约为1~6 μm，部分碳化物沿磨削方向被研碎，显示在其与基体界面处出现微裂纹。

为确定裂纹深度，观察缺陷形貌，对样品断面进行抛光后，再利用硫酸铜盐酸酒精溶液侵蚀，裂纹组织形貌如图6所示。图6a、b显示裂纹主要呈线形，大

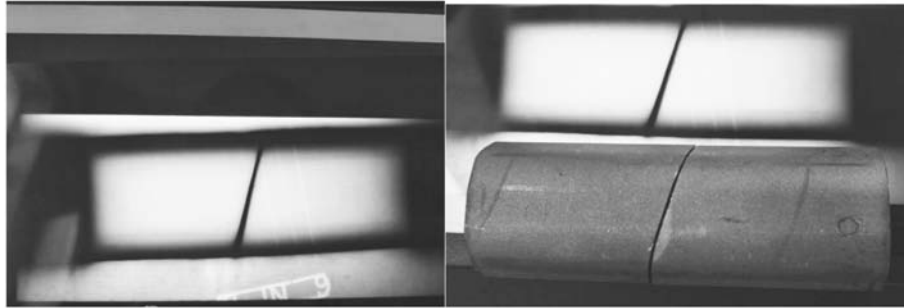


图4 叶片榫齿X射线透照结果
Fig. 4 The X-ray results of the blade's endocone

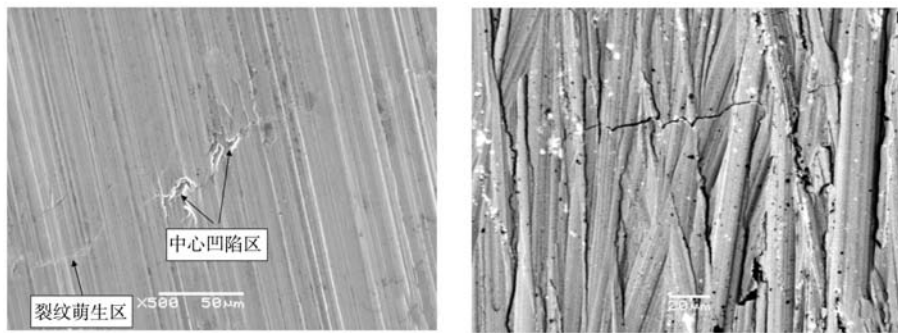
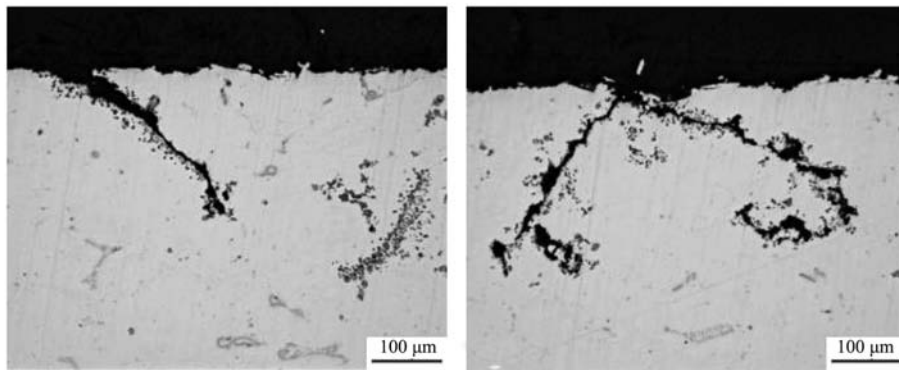
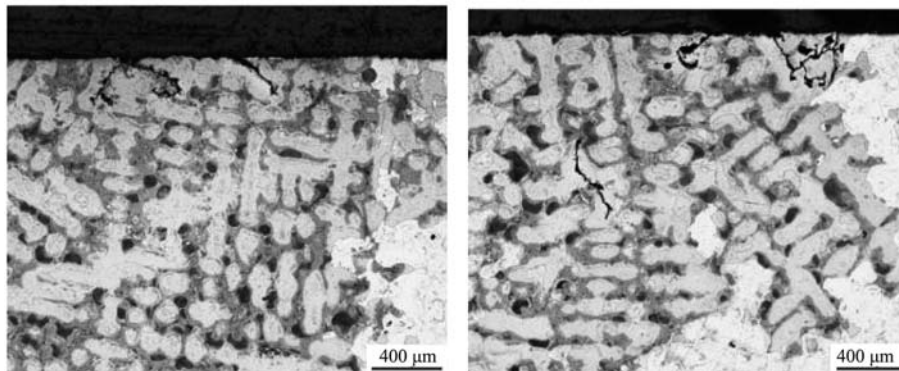


图5 缺陷1形貌
Fig. 5 The display micromorphologies of the defect location 1 under SEM



(a) 线形裂纹

(b) 线形裂纹



(c) 侵蚀状态裂纹

(d) 侵蚀状态裂纹

图6 裂纹金相组织形貌
Fig. 6 Microstructure morphologies of the cracks

部分裂纹深度距表面 400 μm 以内, 裂纹边缘均存在大量析出相。裂纹在侵蚀状态下的形貌见图6c、d, 裂纹多呈弯曲状, 个别显示位置有裂纹聚集的情况, 裂纹内部存在断裂形貌, 裂纹存在于枝晶内部, 对裂纹边缘的点状析出相进行能谱检查, 结果显示, 含有大量的Hf、Ce和Y元素, 如图7所示, 这些裂纹的形成与富

含Hf、Ce和Y元素的析出相聚集分布有关^[4]。

对图3中标注的缺陷2进行金相检查, 结果见图8, 缺陷存在于距荧光显示榫齿面下方约5 mm的范围内。利用硫酸铜盐酸酒精溶液腐蚀后, 发现缺陷呈苞米粒状, 且均在枝晶间和共晶组织边缘出现, 为典型的疏松缺陷。

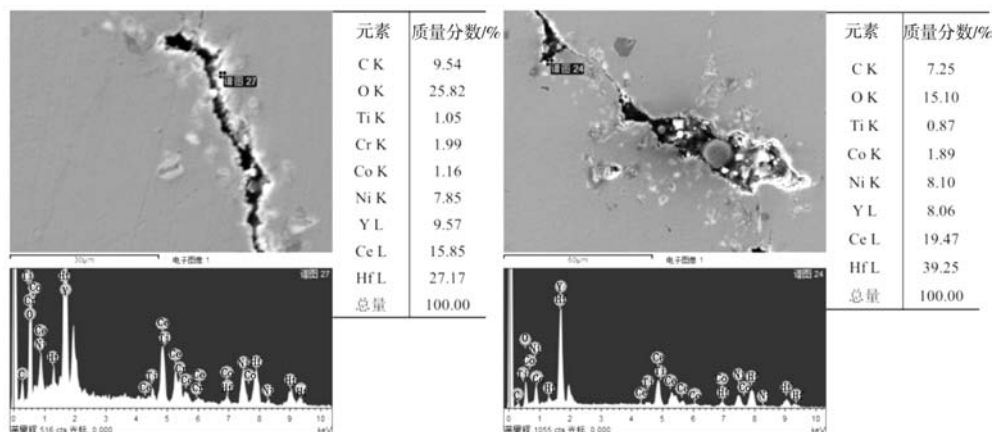


图7 裂纹边缘的能谱分析结果

Fig. 7 EDS analysis results of the crack edge

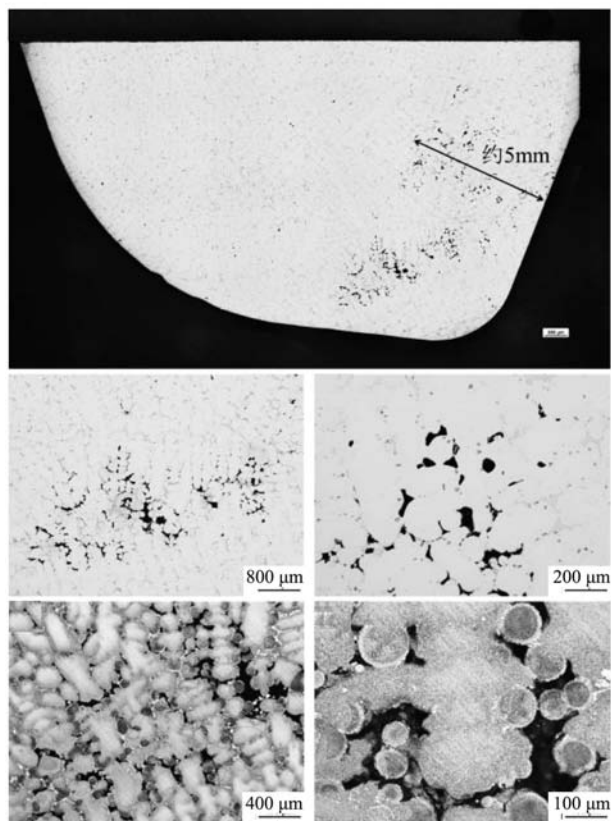


图8 榫齿截面金相组织形貌

Fig. 8 The metallographic morphologies of the section of the tenon

对图3中标注的缺陷2进行扫描电镜 (SEM) 分析, 样品表面未观察到沿一定方向的磨削痕迹, 而是呈现“土豆状”凹凸形貌, 同时观察到尺寸约为 50 μm 的孔洞, 如图9b所示。在缺陷2区域观察到大量孔洞, 其尺寸在30~100 μm , 孔洞周围观察到球状颗粒相, 为明显的疏松缺陷。通过扫描电镜100倍照片, 统计所得榫头疏松最严重区域的显微疏松面积百分比为 $(0.95 \pm 0.14)\%$, 按照GB/T 14999.7—2010标准, 得出其显微疏松等级为2级^[5], 是造成榫齿表面出现“满天星状”荧光显示的主要原因。在未观察到疏松的区域观察到球状颗粒相聚集 (图9d中+处), 经EDS成分测试表明, 其为富集Al的氧化物颗粒, 如图10和表2所示。

2.4 机理分析

针对燃机叶片榫头处的裂纹缺陷, 经分析可知, 试验用燃机叶片由K488合金浇注而成, 其中Hf、Ce和Y为该合金中添加的微量元素。Hf是极强的碳化物形成元素, 在 γ' 相中溶解度大于 γ 相, 具有强化 γ' 相的作用^[6]。由于铸造高温合金的凝固区间较大, 在凝固过程中Hf、Ce和Y元素未完全固溶在基体内部, 导致在凝固末期枝晶间存在大量的低熔点共晶相, 这些碳化物骨架分布密集, 最终包裹于枝晶内部^[7], 使枝晶间液相失

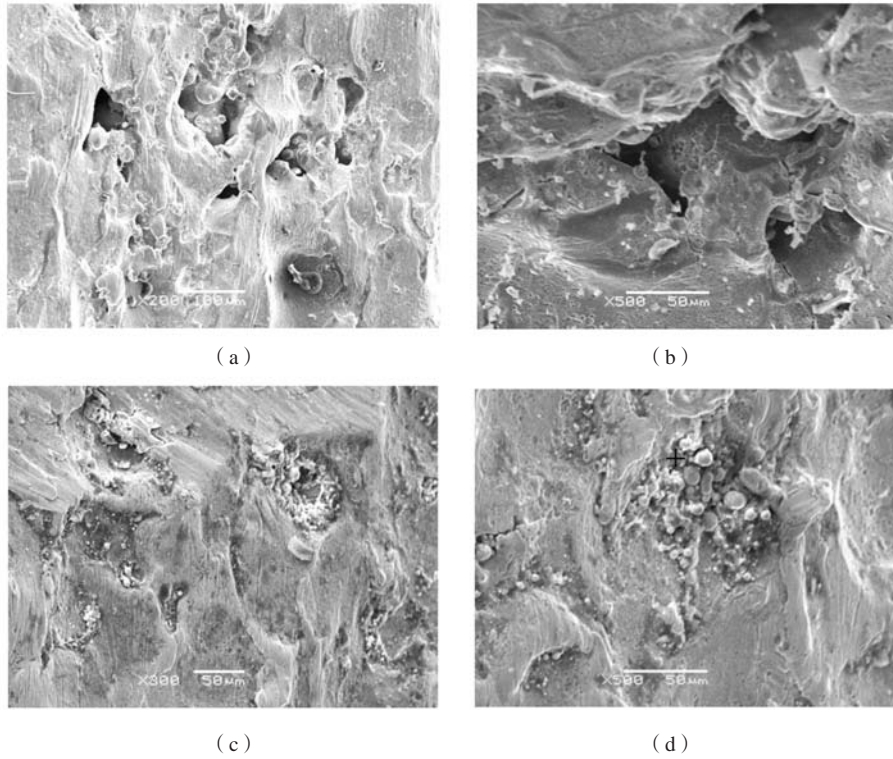


图9 缺陷2形貌

Fig. 9 The display micromorphologies of the defect location 2 under SEM

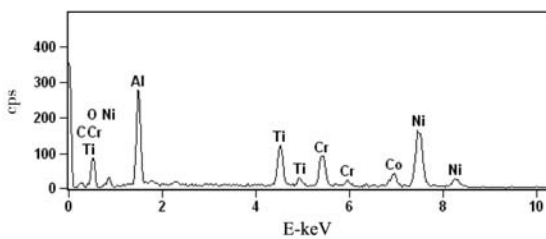


图10 颗粒相EDS谱线

Fig. 10 EDS analysis results of the particle phase

去补缩能力。在重力作用下，枝晶受到拉应力发生位移，且得不到液相的补充，导致金属液在凝固后期收缩应力的作用下产生开裂。

针对燃机叶片榫头处的疏松缺陷，经分析可知，该燃机叶片总长达605 mm，叶身长度达到440 mm，弦宽达到146 mm，榫头、叶身、叶冠、叶身等部位壁厚相差悬殊，其中榫头呈框架结构，带减重槽和筋肋。铸造过程中榫头厚大部位极易由于补缩不足而产生疏松和缩孔等缺陷，冶金质量控制难度大。由于榫头部位相对于叶身壁厚尺寸较大，固液两相区在榫头处的范围较宽（图11），在凝固后期，枝晶组织相搭连形成枝晶骨架^[7]，枝晶的缝隙处在完全凝固之前已被封闭，液体无法流入以补充它的收缩，从而留下细小的孔洞，所以榫头处极易产生疏松^[8]。在凝固过程中，由于合金中C元素与型壳中的Al₂O₃发生反应，

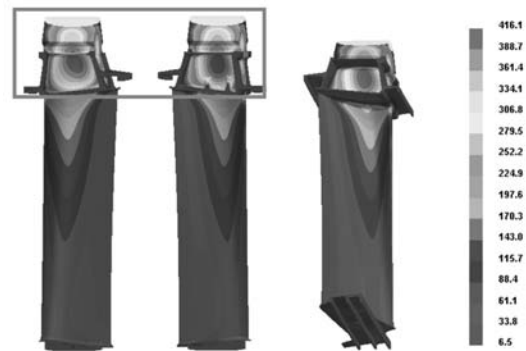


图11 燃机叶片凝固顺序模拟结果

Fig. 11 Simulated results of the solidification sequence of the blade

表2 颗粒相EDS分析结果

Table 2 EDS analysis results of the particle phase w_B /%

C-K	O-K	Al-K	Ti-K	Cr-K	Co-K	Ni-K
3.98	10.26	14.05	10.66	10.25	8.35	42.44

Al₂O₃+2C=Al₂O+2CO，生产CO气体^[9]。当残余液体已被凝固部分包围时，气体得不到排出以及得不到有效的补缩，会形成分散细小的缩洞，从而留下细小的孔洞，所以榫头处极易产生疏松^[10]。

热等静压是目前消除铸件内部孔洞类缺陷的有效方法之一，经热等静压处理后合金元素更加均匀，γ'相的尺寸和分布更理想，疏松和孔洞类缺陷能被有效

控制或消除，叶片组织的致密性可进一步提高^[11]。故对该燃机叶片进行热等静压处理，热等静压处理制度为 $(1\ 180 \pm 10)^\circ\text{C}$ ， $(140 \pm 5)\text{MPa}$ ，保压时间 $(240$

$+ 15)\text{min}$ 。图12为热等静压前后叶片榫头处荧光显示和显微疏松对比。可以看出，经热等静压处理后，榫头处的荧光显示明显减少，显微疏松明显减少。

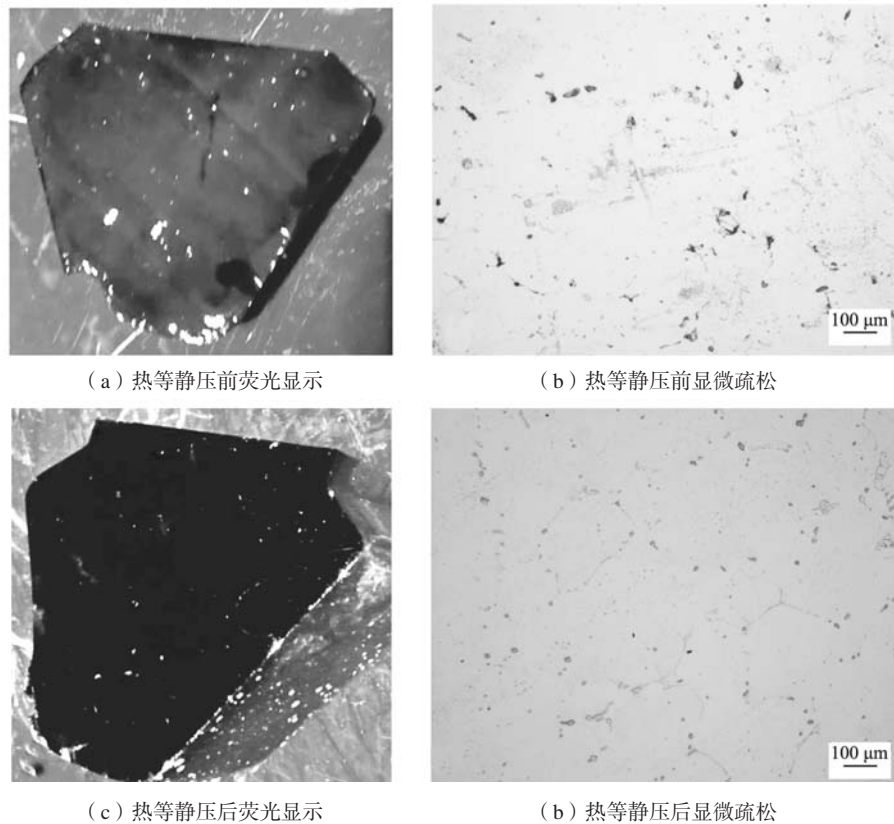


图12 热等静压前后榫头处荧光显示和显微疏松对比

Fig. 12 Fluorescence display and microscopic porosity of the tenon before and after hot isostatic pressure

3 结语

通过荧光渗透、X射线透照和扫描电镜 (SEM) 等多项检测手段，对燃机叶片榫头部位进行了表面和内部的缺陷分析和判定。燃机叶片榫头处缺陷属于表层缺陷，部分线性荧光显示为铸造过程中产生的裂纹，与富含Hf、Ce和Y元素的析出相在榫头表面聚集分布有

关。燃机叶片榫头处的“满天星状”荧光显示为材料内部铸造疏松缺陷，由于燃机叶片榫头尺寸厚大的原因，叶片榫头处的疏松主要是由于凝固过程中枝晶间补缩不足，气体被封闭在孤立的熔池内无法排出，导致疏松缺陷的产生。针对以上缺陷，可通过热等静压的方式进行消除。

参考文献:

- [1] 郭建亭. 高温合金在能源工业领域中的应用现状与发展 [J]. 金属学报, 2010, 46 (5): 513-527.
- [2] 郭建亭. 高温合金材料学 (上) [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 3-16.
- [3] 闻雪友, 肖东明. 现代舰船燃气轮机发展趋势分析 [J]. 舰船科学技术, 2010, 32 (8): 3-19.
- [4] 李嘉荣, 熊继春, 唐定中. 先进高温结构材料与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [5] 张琼元, 杨功显, 巩秀芳. 重型燃机叶片熔模铸造过程的数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32 (12): 1134-1137.
- [6] 马德新, 张琼元, 王海洋. 工艺条件对镍基高温合金DD483单晶叶片中杂晶缺陷的影响 [J]. 铸造, 2017, 66 (5): 439-444.
- [7] 郭雄, 陶飞, 史卫杰. 重燃叶片热裂缺陷的形成机理研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (11): 1365-1369.

- [8] 郭雄, 史卫杰, 陶飞. 重燃叶片透平导向的缩松形成机理 [J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40 (2): 188-191.
- [9] 刘世忠, 史振学, 王效光. 一种单晶高温合金叶片表面缺陷的形成机制 [J]. 铸造, 2017, 66 (2): 118-121.
- [10] 孙宝才. 定向凝固工艺对DZ125合金叶片表面缺陷机组织性能的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [11] 韩凤奎. 热等静压对In718C高温合金组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2022, 71 (1): 39-43.

Defect Analysis of a Large Size Gas Turbine Blade

LI Yang¹, WU Bao-ping¹, CHEN Su-yong², WU Jian-tao³, LI Jun-tao¹

(1. Gaona Aero Material Co., Ltd., Beijing 100081, China; 2. Dekai Intelligent Casting Co., Ltd., Zhuozhou 072750, Heibei, China; 3. Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract:

The fourth stage turbine blade is the key component of a large gas turbine, which is made by integral precision casting. The blade investment casting is composed of tenon, edge plate, blade and blade crown, and belongs to large-size equiaxed crystal turbine blade. Due to the change of section caused by the structure of the tenon, blade body and blade crown, it is easy to produce metallurgical defects in the thick part of the tenon in the process of casting solidification and cooling. The macroscopic position and size of the defects were determined by fluorescence permeation test. The depth of the defect was determined by X-ray transillumination of the defect site. Scanning electron microscopy (SEM) and metallographic detection were used to determine the size and morphology of the defects. The results of metallographic detection were consistent with those of the fluorescence permeation detection. Through the above detection, the defects of the blade tenon were analyzed as cracks and microshrinkage, and the causes and mechanisms of the defects were analyzed.

Key words:

superalloy; gas turbine blade; defect analysis
