

发动机涡轮叶片榫齿磨削裂纹原因分析

王立斐¹ 刘尚瑀² 于俊杰³ 许骏杰³ 郭笑¹ 杨泽南¹ 张强¹

(1.中国航发北京航空材料研究院先进高温结构材料重点实验室; 2.东北大学轧制技术与连轧自动化重点实验室; 3.中国航发四川燃气涡轮研究院)

摘要 发动机涡轮叶片在榫齿磨削加工后,发现部分叶片榫齿加工表面存在线性荧光显示。采用扫描电镜和金相分析,比较叶片铸件在磨削前与磨削后榫齿部位显微组织的差异,结合叶片实际生产工艺,分析叶片榫齿磨削加工后裂纹的形成原因并提出相应的解决措施。结果表明,叶片榫齿荧光显示部位存在一定程度的显微缩松,弥散分布的孔洞在磨削应力的作用下沿剪切应力方向撕裂形成内部相互连通的孔道,从而引起线性荧光显示。适当地降低拉晶速度,延长抽拉时间,可以有效地减轻显微缩松的形成,从而避免了磨削后榫齿裂纹的产生。

关键词 裂纹;磨削加工;显微缩松;高温合金

中图分类号 TG249.5;TG146.23 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.07.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Analysis on the Formation of Grinding Cracks in Aero-Engine Turbine Blade Tenon

Wang Lifei¹, Liu Shangyu², Yu Junjie³, Xu Junjie¹, Guo Xiao¹, Yang Zenan¹, Zhang Qiang¹

(1.Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials; 2.State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University; 3.AECC Sichuan Gas Turbine Research Establishment)

Abstract: The tenons of the turbine blades in aeroengine show linear fluorescent indication after grinding the tenons. The microstructures near the tenons before and after grinding was compared by optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM). The origination for the cracks in blade tenon after griding was analyzed based on the production process of the blades, and the corresponding measures were proposed. The results indicate that there exists a certain degree of microporosity at the position indicated by fluorescence, and the dispersed holes are torn along the direction of shear stress under the effect of grinding stress to form internal connected channels, leading to the linear fluorescent indication. Microporosity can be eliminated by decreasing the pulling rate and prolonging the pulling time appropriately, thus avoiding grinding cracks.

Key Words: Cracks, Grinding Machining, Microporosity, Superalloys

涡轮发动机叶片作为航空发动机中最重要的关键部件之一,在很大程度上决定了发动机性能^[1]。在高速运转的状态下,涡轮叶片需要同时承受着离心力、热应力、振动应力以及气动应力等各种复杂交变载荷,而且随着工作温度和载荷循环次数的变化,受力状态较为复杂,在高温下工作的涡轮叶片极有可能出现蠕变损伤和疲劳损伤,在工作中出现失效的概率较高^[2~4]。

目前,高温合金已被广泛地应用在制造航空发动机的热端部件上。随着发动机性能的不断提高,对高温合金力学性能和承温能力的要求也越来越严格^[5~7]。为了更好地适应需求,镍基高温合金经历了等轴晶、定向凝固柱状晶和单晶的发展历程。柱状晶合金由于消除

了与应力轴垂直的横向晶界,使其具有优异的高温力学性能,同时柱状晶叶片的制造成本一般小于单晶合金,因此大量三代、四代航空发动机选用定向柱晶涡轮叶片^[8~13]。涡轮叶片主要采用熔模铸造成形,叶片榫齿作为叶片与涡轮盘的关键装配部位,其尺寸精度要求较高,需要对叶片榫齿部位进行磨削加工。

涡轮发动机叶片选用 DZ406 合金。该合金是含 Re 的第二代定向凝固镍基高温合金,其高温抗氧化性能较好,高温强度可达到国外二代定向凝固高温合金的水平^[14~16]。在某批次叶片榫齿部位磨削加工后进行荧光检验时,发现其中部分叶片在榫齿机加表面出现线性荧光显示,见图 1。降低了叶片机加合格率,因此,本课

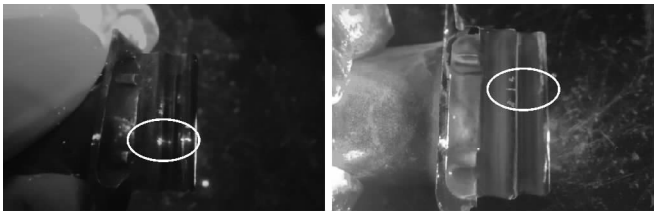
收稿日期:2021-04-16

第一作者简介:王立斐,女,1990 年出生,助理工程师,北京(100095),E-mail:lfeiwang21@163.com

引用格式:王立斐,刘尚瑀,于俊杰,等. 发动机涡轮叶片榫齿磨削裂纹原因分析[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(7):921-924.

WANG L F, LIU S Y, YU J J, et al. Analysis on the formation of grinding cracks in aero-engine turbine blade tenon[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(7):921-924.

题以该叶片为研究对象,对导致榫齿裂纹形成的原因进行系统分析。观察叶片榫齿部位的金相组织,讨论导致叶片荧光显示缺陷的性质以及其产生的原因并给出优化工艺的建议。



(a) 裂纹 1 (b) 裂纹 2
图 1 榫齿磨削加工后荧光显示缺陷照片
Fig.1 Fluorescent indication images at the blade tenon after grinding

1 试验材料与方法

选取榫齿荧光显示较为严重的叶片作为研究对象,对叶片的缺陷位置进行剖切、腐蚀,然后磨制金相试样,结合 Leica-DM4000M 光学显微镜及 Nova nano SEM 450 场发射扫描电镜(加速电压为 20 kV)对缺陷的微

观形貌及显微组织进行观察,同时对该批次叶片的研制生产过程进行复查。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

出现荧光缺陷批次叶片采用定向凝固方法在单晶炉中浇注,化学成分见表 1。随炉试棒经标准热处理后,进行机加工成拉伸和持久性试样,测定在 870 ℃下的高温力学性能和在 980 ℃/275 MPa 条件下持久性能,结果见表 2。标准热处理制度为:在 1 260 ℃均匀化处理 1 h→1 275 ℃×1 h 固溶,空冷+1 120 ℃×4 h 一级时效,空冷+1 080 ℃×4 h 二级时效,空冷+870 ℃×16 h 三级时效,空冷。从化学成分、力学性能结果以及研制过程来看,叶片研制生产过程符合精铸件验收要求。叶片榫齿部位采用 FSG-B818CNC 蠕动缓进磨床进行磨削加工,为避免叶片在磨削加工时工件表面产生磨削烧伤,一般榫齿磨削加工分为粗磨与精磨。整个磨削过程严格按照工艺执行,磨削后叶片表面未出现磨削烧伤层。

表 1 DZ406 合金的名义成分和实测化学成分
Tab.1 Nominal composition and chemical composition of DZ406 alloy %

	C	Cr	Co	W	Al	WB		Re	Hf	B	Ti
						Ta	Mo				
标准范围	0.08~0.14	6.50~7.0	11.4~12.1	4.70~5.10	5.80~6.30	6.10~6.50	1.30~1.70	2.60~3.0	1.3~1.7	0.01~0.02	余量
实测	0.098	6.86	11.73	4.99	6.02	6.36	1.61	2.84	1.44	0.017	余量

表 2 DZ406 合金的力学性能

Tab.2 The mechanical properties of DZ406 alloy

	870 ℃			980 ℃/275 MPa 持久性能	
	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	φ /%	τ /h	φ /%
标准	≥738	≥566	≥7	≥23	≥20
实测	980	786	17.4	56.75	34.07

观察叶片荧光显示缺陷位置,叶片榫齿部位未发现烧伤现象,且无肉眼可见裂纹。叶片榫齿加工后经荧光检测,发现加工表面在荧光下呈现连续线性显示。缺陷部位显微组织见图 2。榫齿荧光显示处的缺陷部位呈现曲折裂纹形貌,不沿某特定晶体学方向,裂纹起源位

置及扩展路径难以通过组织形貌判断,且裂纹内部含有金属。试样经腐蚀后在扫描电镜下观察其微观组织形貌,见图 3。发现裂纹附近合金组织不均匀,除弥散分布于 γ 基体的细小 γ' 析出相外,在枝晶间还存在着较多的 $(\gamma+\gamma')$ 呈葵花状共晶。研究发现,镍基高温合金凝固的最后阶段,枝晶间会析出 $(\gamma+\gamma')$ 共晶组织,共晶相的析出与 γ' 相形成元素的含量和凝固偏析有关^[17,18]。根据图 4 的能谱分析结果,发现裂纹区域附近主要是富含 Ta 和 Hf 元素的碳化物。研究认为,Hf 是一种正偏析元素,主要在枝晶间富集,偏析难以完全消除。由此表明裂纹的扩展路径主要为叶片后凝固组

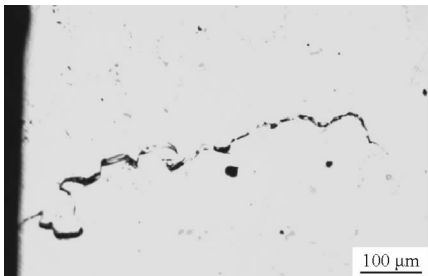
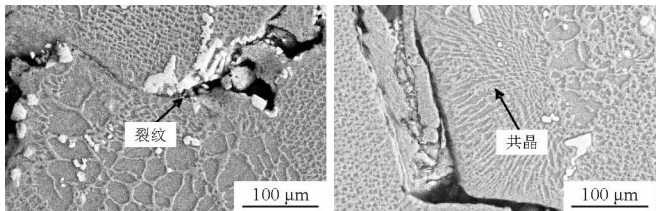
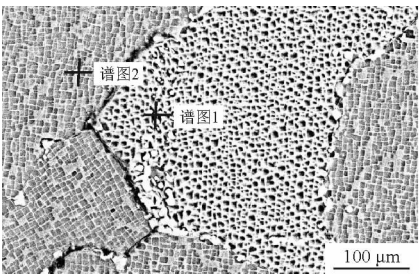


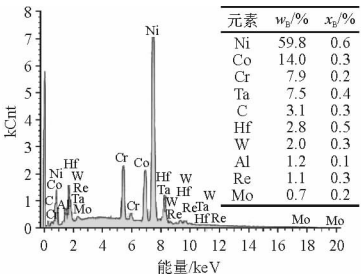
图 2 缺陷部位金相组织
Fig.2 Metallographic structure of defect region



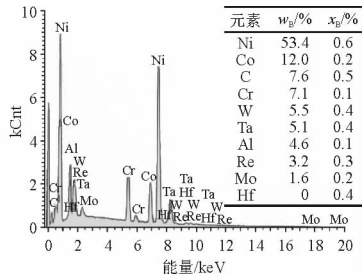
(a) 裂纹 (b) 共晶
图 3 裂纹区域 SEM 照片
Fig.3 SEM micrographs of crack area



(a)能谱示意图



(b)能谱 1



(c)能谱 2

图 4 能谱分析结果

Fig.4 EDS analysis results

织,因此推断裂纹产生与铸件组织不均匀性相关。

2.2 分析讨论

根据荧光显示叶片试验结果,分析裂纹产生阶段。假设裂纹是在铸造阶段产生,裂纹将会暴露在叶片外表面,但在铸件中进行荧光、X 射线检验时,均未发现有裂纹。同时叶片榫齿部位非突变结构,不易造成局部热节,这表明叶片不易产生热裂纹。将同批次未加工叶片榫齿部位按照图 5 截面进行剖切,其中榫齿部位纵剖 I 截面为检测要求截面,II、III、IV 横截面为试验分析截面。发现个别叶片榫齿部位横截面含有一定程度的显微缩松,但未见裂纹。图 6 为叶片榫齿部位横剖面的金相组织,可见在有荧光显示的区域,存在一定程度的显微缩松,且超过该叶片验收标准要求。精铸件规范要求纵剖面未见明显的显微缩松。由于荧光显示区域为叶片非检测截面,且缩松具有随机性,纵剖面不一定能观察到榫齿部位的显微缩松,这可能在叶片铸造阶段存在漏检。结合前述裂纹未联通的形态,由此推断叶片榫齿加工表面裂纹的产生可能是铸件内部初始缺陷在磨削应力作用下贯穿多个显微缩松孔洞有关。

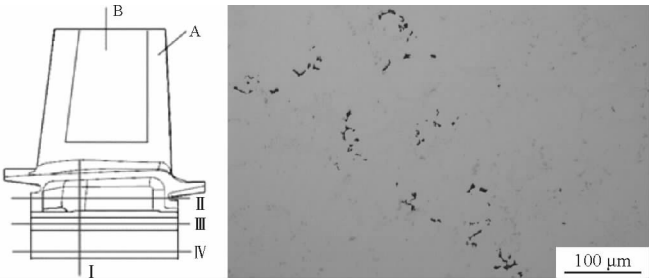


图 5 剖切截面示意图

图 6 叶片铸件金相组织

Fig.5 Schematic diagram of profile section

Fig.6 Metallographic structure of the blade tenon

金属在凝固过程中,由于合金液相和固相的收缩,当残余液体被已凝固部分包围时,两者收缩之差引起的细小孔洞得不到有效补缩时,将会产生缩松^[19]。该叶片是定向凝固成形,枝晶间存在补缩通道,由于榫齿部位最后成形,而且榫齿部位与叶身处相比厚度增大,造成凝固后期补缩困难,形成显微缩松。结合热力学模拟

计算,DZ406 合金在 600~1 400 ℃ 区间内的相组成-温度平衡相图以及榫齿位置处的固/液界面形态分析,见图 7 和图 8,随着凝固进行,固/液界面逐渐下移,曲率增加,糊状区宽度增大,尤其是在叶片的榫齿部位^[20]。当凝固抽拉结束时,挡板已远高于榫齿底部,由于糊状区呈下凹趋势,导致榫齿部位最后凝固,与裂纹区域附近观察到的组织一致。缩松容易在叶片的内部产生应力集中,因而降低叶片的力学性能。同时,在磨削过程中由于局部变形过大和热量聚集形成温度差产生应力,导致缩松孔洞在磨削应力的作用下撕裂联通在一起并扩展,最终导致裂纹产生,造成荧光线性显示。

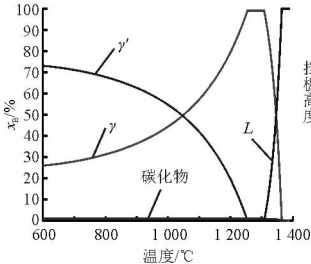


图 7 DZ406 合金在 600~1 400 ℃ 范围内的相组成-温度平衡相图
Fig.7 The phase-temperature equilibrium diagram of DZ406 alloy in the range of 600 to 1 400 ℃

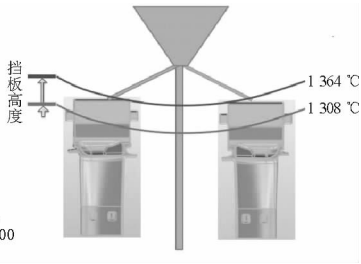
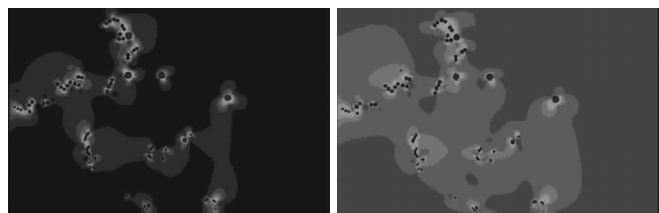


图 8 榫齿位置处的固/液界面形态
Fig.8 Morphology of solid/liquid interface at blade tenon

采用 ABAQUS 有限元通用软件,对在磨削过程中由于剪切应力造成的缩松孔洞变化进行模拟。在模拟过程中,建立二维模型,在 150 μm×150 μm 的模拟面积上,对缩松孔洞的大小与位置进行随机分布(按照显微组织分布),最终设定缩松面积占比在 1% 左右。将整个带有缩松的模型用 CPS3 划分为 6 094 个单元。其中,为了提高模拟结果的准确性,缩松孔洞周围进行更为细致的网格划分。并且采用与磨削过程相符合的应力对其进行模拟,应力设置为 500 MPa。图 9 为 ABAQUS 模拟结果。从图 9a 看出,不同直径的显微缩松孔洞周围均有较大的应力,但应力集中的方向并不一致,主要受到相邻或较近的显微缩松影响,多发生在两组或多组显微缩松连接的路径上,沿路径应力减小,而

应变云图也说明了这一现象(见图 9b)。通过有限元的模拟,发现这些相邻较近的显微缩松孔洞,在磨削应力的作用下,有彼此连接在一起的趋势。模拟结果与叶片磨削加工后内部裂纹结果相符合。因此,为避免叶片磨削后产生线性荧光显示,应在叶片铸件阶段控制显微缩松情况。



(a) 应力

(b) 应变

图 9 应力-应变模拟结果

Fig.9 Stress-strain simulation results

2.3 解决措施

叶片凝固过程中固液相温度相差较大,补缩不足,是造成叶片形成缩松的主要原因。根据叶片研制过程,造成该叶片榫齿部位显微缩松的主要原因是凝固过程中抽拉时间不足造成榫齿处后期补缩不充分。为了防止空心叶片榫齿部位产生大量显微缩松,因此在榫齿部位增加补缩是关键。在工艺要求范围内适当地优化凝固参数,延长定向凝固抽拉时间,可以有效地缩小金属凝固糊状区宽度,提高其补缩能力。将工艺改进后生产的叶片进行低倍腐蚀,叶片表面柱状晶一直生长到榫齿冒口顶部,远超出榫齿处高度。叶片榫齿部位进行金相组织检查,未发现聚集性显微缩松。经磨削加工后,榫齿部位未见线性荧光显示。因此,建议在原定向凝固浇注工艺上延长抽拉时间 10 min,并在相应工艺文件中予以固化。同时增加叶片铸件榫齿部位显微缩松检测截面,加强叶片研制过程的控制。

3 结 论

(1)叶片榫齿磨削荧光裂纹显示,实际上是弥散分布的孔洞在磨削应力的作用下沿剪切应力方向撕裂形成内部相互连通的孔道,从而导致线性荧光显示。

(2)造成叶片榫齿产生缩松的主要因素是凝固过程中固液相温度相差较大,补缩不足。

(3)通过适当延长定向凝固抽拉时间,可以有效地控制榫齿部位缩松情况,在该叶片生产工艺规程中将凝固参数予以固化,同时增加显微缩松检测截面,加强叶片研制过程的控制。

参 考 文 献

[1] 曾波.某航空发动机涡轮叶片动态可靠性建模与分析[D].成都:电子科技大学,2013.

[2] 高镇同,熊骏江.疲劳/断裂可靠性研究现状与展望[J].机械强度,1995,17(3): 61-82.

[3] ARAKERE N K, SWANSON G. Fretting stresses in single crystal superalloy turbine blade attachments [J]. Journal of Tribology, 2001,123(2):413-423.

[4] ARAKERE N K, KNUDSENE, SWANSON G R, et al. Subsurface stress fields in face-centered-cubic single-crystal anisotropic contacts[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128(4):879-888.

[5] 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.

[6] 屈鹏飞,杨文超,岳全召,等.镍基高温合金微孪晶形成机制的研究进展[J].材料导报,2019,33(23): 123-130.

[7] 赵云松,张迈,郭小童,等.航空发动机涡轮叶片超温服役损伤的研究进展[J].材料工程,2020,48(9): 24-33.

[8] 张卫国,刘琳,赵新宝,等.定向凝固高温合金的研究进展[J].铸造,2009,58(1): 1-6.

[9] MA D, QIANG W, BÜHRIG-POLACZEKA. Some new observations on freckle formation in directionally solidified superalloy components[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2012, B43(2):344-353.

[10] CARTER P, COX D C, GANDIN C A, et al. Process modelling of grain selection during the solidification of single crystal superalloy castings[J]. Materials Science and Engineering, 2000, A280(2):233-246.

[11] 陈荣章,王罗宝,李建华.铸造高温合金发展的回顾与展望[J].航空材料学报,2000,20(1): 55-61.

[12] 刘琳.高温合金精密铸造技术研究进展[J].铸造,2012,61(11): 1 273-1 285.

[13] 吕志刚.我国熔模精密铸造的历史回顾与发展展望[J].铸造,2012,61(4): 347-356.

[14] 黄朝晖,谭永宁,贾新云,等.第二代定向高温合金 DZ406 的长期时效研究[J].材料工程,2009(S1): 105-109.

[15] 宁礼奎,郑志,张达,等. DZ406 合金及其渗铝涂层 1100℃氧化性能研究[J].腐蚀科学与防护技术,2011,23(5): 403-406.

[16] 张仕朝,李莉,侯学勤.第二代定向柱晶高温合金低周疲劳行为研究[J].机械强度,2017,39(2): 311-315.

[17] 赵新宝,刘林,杨初斌,等.镍基单晶高温合金凝固缺陷研究进展[J].材料工程,2012(1): 93-98.

[18] 宁礼奎,郑志,刘恩泽,等.长期时效对 DZ406 合金组织和力学性能的影响[J].材料工程,2010(S1): 327-331.

[19] WHITESELL H S, OVERFELT R A. Influence of solidification variables on the microstructure, macrosegregation, and porosity of directionally solidified Mar-M247[J]. Materials Science and Engineering, 2001, A318(1-2):264-276.

[20] 卢玉章,熊英,彭建强,等.重型燃机定向结晶空心叶片凝固过程的实验与模拟[J].材料工程,2018,46(1): 8-15.

(编辑:刘卫)