

一种细晶铸造 K465 合金低压涡轮叶片组织和力学性能

尹湘蓉, 黄中荣, 龙阅文, 余玉良, 龚晓宁, 郭志飞

(中国航发航空科技股份有限公司, 四川成都 610503)

摘要: 为提高叶片铸件质量和生产效率, 对某型机K465合金低压涡轮叶片开展细晶铸造工艺研究, 对细晶铸造的精铸低压涡轮叶片的显微疏松、组织进行观察, 力学性能及极限疲劳性能进行测试, 并与原工艺的叶片对比, 验证晶粒细化对涡轮叶片晶粒度和疲劳强度的影响。结果表明, 细晶铸造工艺能使叶片铸件低倍晶粒度、枝晶间距细化, 叶片的显微疏松、显微组织与原工艺相比没有变化, 但室温拉伸强度略有提高, 极限疲劳强度更优。

关键词: K465合金; 低压涡轮叶片; 细晶铸造; 晶粒度; 力学性能

细晶铸造工艺是将化学孕育剂 (CoAl_2O_4 、 CoOAl_2O_3 等) 与粘结剂按一定比例配置, 混合均匀后涂制铸造工艺型壳内表面。叶片铸造合金浇注时, 合金中的活性元素如Al、Ti等, 与型壳内表面孕育剂发生置换反应, 形成大量异质晶核, 使叶片铸件得到由表及里的细晶晶粒, 这是一种很有效且简易、实用的晶粒细化工艺方法, 被广泛采用。与普通铸件相比, 细晶铸造组织表现为细小的晶粒度、高度弥散分布的细小碳化物质点、细小而均匀的 γ' 相分布。细晶铸造零件在中低温工作条件下具有明显的性能优势, 有利于提高零件的疲劳强度, 显著减少铸件力学性能数据的分散度, 从而提高铸造零件的设计容限, 在航空发动机等轴晶叶片研制和生产中也得到了一定范围的研究和应用, 如国外In718压气机叶片、国内K417G、K403、K418、K418B低压涡轮工作叶片、K492M整体叶轮等。但由于国内应用的高温合金叶片种类有限, 特别是细长薄壁的等轴晶低压涡轮叶片, 由于浇注系统叶身位置粘有补缩浇道, 导致叶身晶粒度不均匀。因此研究不同牌号、不同结构的等轴晶铸造高温合金叶片细晶铸造工艺, 以及细晶铸造工艺对晶粒度、组织和力学性能的影响规律, 建立细晶铸造叶片的控制技术要求, 是十分必要的^[1-11]。

本研究涉及的K465合金等轴晶低压涡轮叶片总长度220 mm左右, 工作温度不高于850 ℃。原铸造工艺为榫头部位细化而叶身、叶冠部位没有细化, 其晶粒度控制要求: 榫头晶粒1~5级; 叶身晶粒4~7级, 不允许有粗、细晶分界线和垂直柱晶。由于叶片叶身细长且薄壁, 受榫头局部细化工艺影响, 制壳时只能在榫头部位涂覆细化剂, 但叶身部位偶尔也会粘上细化剂, 导致浇注后叶片、叶身易在排气边个别部位形成类似“激冷晶”的细晶斑, 铸件因细晶斑和柱状晶而报废的比例高达20%以上。若提高浇注温度, 铸件凝固时产生温度梯度, 叶身易形成柱状晶; 同时原榫头局部细化工艺导致模样涂刷细化剂制壳时不能整体涂覆而效率低下。因此, 开展叶片整体细化的细晶铸造工艺下低压涡轮叶片铸件试验研究, 提高铸件合格率和生产效率就显得十分迫切和必要了。

本研究根据该低压涡轮叶片工艺研究工作要求, 为改善K465合金涡轮叶片表面晶粒度及组织性能, 提高合格率和生产效率, 同时提高疲劳性能, 开展叶片整体细化的细晶铸造工艺试验, 并研究其对叶片铸件组织、性能等的影响。与原工艺对比分析, 验证细晶铸造工艺对其显微疏松、组织和疲劳强度的效果, 以满足工艺技术要求。

作者简介:

尹湘蓉 (1968-), 女, 研究员, 硕士, 主要研究方向为金属材料及热加工工艺。E-mail: 1106531505@qq.com

中图分类号: TG290.8
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2021)01-0053-05

收稿日期:

2020-07-15 收到初稿,
2020-09-20 收到修订稿。

1 试验材料与方法

试验所用的K465母合金是采用真空感应熔炼炉制备的,其主要化学成分(质量分数,%)为:0.18C, 8.6Cr, 2.58Ti, 5.59Al, 1.94Mo, 10.32W, 9.87Co, 1.01Nb, 其余为Ni。细晶铸造的该低压涡轮叶片是采用真空熔模铸造工艺,用易熔材料制成模样后,在模样表面100%涂覆细化剂铝酸钴料浆,采用刚玉砂和粉、煤矸石砂和粉等制备型壳,涂制层数若干,经硬化干燥制成型壳,然后利用三室真空感应熔炼炉在真空环境下制备K465母合金,其晶粒组织为等轴晶。低压涡轮叶片铸件浇注系统组合方式为4件/组,为有效控制叶身疏松,型壳叶身上设置了内浇口,使叶身在凝固过程中实现了顺序补缩。同时,本试验还对细晶铸造的叶片铸件进行了真空固溶处理:固溶温度 $(1\ 210 \pm 10)^\circ\text{C}$,保温时间4.0 h,从 $(1\ 210 \pm 10)^\circ\text{C}$ 冷却到 $1\ 000^\circ\text{C}$ 的冷却速率为 $(40 \pm 15)^\circ\text{C}/\text{min}$, $1\ 000^\circ\text{C}$ 以下氩气冷却压力不小于0.1 MPa。

本次试验对细晶铸造的低压涡轮叶片铸件进行了低倍晶粒度、显微疏松、组织、力学性能、极限疲劳等检测,其中涡轮叶片精铸件显微疏松检验取样截面A、B、C、D、E、F如图1所示,叶身显微组织的检测主要在A截面进行。对细晶铸造的低压涡轮叶片铸件晶粒度控制重新明确了控制要求:进、排气边一定区域内,晶粒度级别不高于3级,不允许有垂直于进、排气边的穿透性柱状晶等。

室温拉伸性能测试按HB 5143—1996《金属室温拉伸试验方法》进行,高温持久性能测试按HB 5150—1996进行,铸件低倍晶粒度检测方法按HB 20057—2011,采用金相显微镜和扫描电子显微镜观察合金的显微组织,利用金相显微镜的测量软件计算叶片不同截面的疏松含量,用扫描电子显微镜测量叶片不同截面的 γ' 相尺寸。

2 试验结果与分析讨论

2.1 晶粒度

按照细晶铸造的叶片晶粒度控制要求,对铸件叶身表面和叶身A-A截面晶粒度进行检测,结果见图2和图3。根据铸件加工工艺,叶型抛磨量控制在0.1~0.4 mm范围内,铸件叶盆及叶背表面晶粒度检测结果为1~2级,内浇口处为3~4级,叶背内浇口处有柱状晶宽0.3 mm、长5 mm;因叶片叶身薄,经表面晶粒细化后,对应A-A截面低倍晶粒均为1~3级细晶,未发现明显的粗细晶层分界。原工艺铸件叶身表面晶粒度检测结果为4~5级,对应A-A横截面晶粒度为5~6级。

如前所述,在精铸型壳内表面均匀涂抹一层铝酸钴(CoAl_2O_4 、 CoOAl_2O_3)孕育剂,可有效地促进合金

液自发形核。K465合金晶体结构为面心立方晶格,基体元素是Ni,其晶格常数为 $3.54 \times 10^{-4} \mu\text{m}$,而Co的晶体结构也为面心立方晶格,其晶格常数为 $3.55 \times 10^{-4} \mu\text{m}$,与K465合金晶体结构相近,因此可作为该高温合金的形核基底。在浇注时铝酸钴与合金液发生放热反应,活性元素C、Cr、Ti、Al在高温环境下与 CoAl_2O_4 等发生置换反应,而非“激冷”反应,在型壳内侧附近深度约0.02 mm处产生纯钴的显微颗粒,大小不超过 $2 \mu\text{m}$ 。有研究表明Co粒子是真正的结晶核心,型壳与合金作用,在还原Co的同时,也生成了 Cr_2O_3 、 Al_2O_3 、 TiO_2 等氧化物。这些弥散分布的形核质点近壳层附近浓度最高,近壳层合金液自发形核最多铸件表层晶粒也最细小。但合金液中形核质点浓度由表及里呈下降趋势,铸件晶粒细化程度也逐渐减小,心部晶粒细化程度次之^[12]。

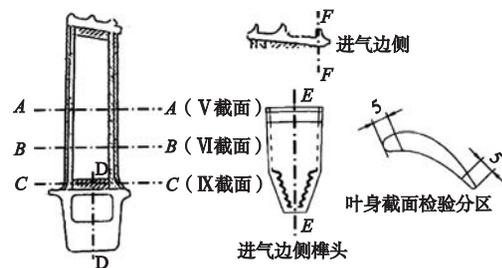
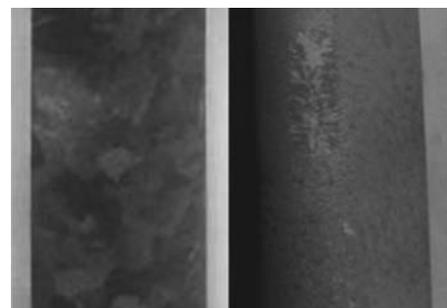


图1 显微疏松检验取样示意图

Fig. 1 Sampling diagram of micro-porosity test



(a) 原工艺 (b) 细晶铸造

图2 原工艺和细晶铸造叶片表面低倍晶粒度(1:1)

Fig. 2 Surface macro-grain size of blades produced by original casting process and fine grain casting process (1:1)

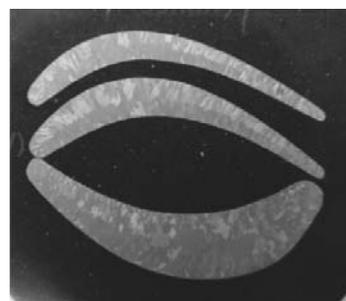


图3 细晶铸造叶片A-A截面剖面低倍晶粒形貌(1:1)

Fig. 3 Macro-grain size of A-A section in fine grain cast blade (1:1)

试验结果表明,在叶片叶身近表层0.4 mm的深度范围晶粒为1~2级,心部晶粒为3级左右,相比叶身不细化叶片的晶粒5~6级,晶粒细小了很多。总之,细晶铸造的叶片表面晶粒度符合技术要求。

2.2 显微疏松

按照图1所示截面,对铸件叶身分别以A-A、B-B、C-C截面进行划线取样,榫头分别以D-D、E-E截面进行划线取样,同时对叶冠F-F截面进行取样,检测显微疏松,结果见表1。从表1可以看出,细晶铸造的涡轮叶片,叶身A-A、B-B、C-C截面的进排气边显微疏松含量均小于0.5%,叶身中间小于等于1.5%,符合技术要求。同时,叶片榫头D-D、E-E截面、叶冠F-F截面的显微疏松含量也小于1%,符合技术要求。细晶铸造能够保证铸件满足显微疏松的要求。

2.3 显微组织

对细晶铸造叶片显微组织检查在叶片的叶身和榫头等截面上分别进行,包括枝晶组织、碳化物、 γ - γ' 相,并与原工艺对比。两种制壳工艺中榫头部位均涂有细化剂,故显微组织的对比试验重点在叶身的截面。图4为细化工艺叶片铸件A-A截面的显微组织。可以看出,叶片铸件组织以树枝晶方式生长,组织主要由 γ 基体相、 γ' 强化相、 γ - γ' 共晶相和碳化物相组成;枝晶间可见骨架状、颗粒状及短棒状碳化物,并

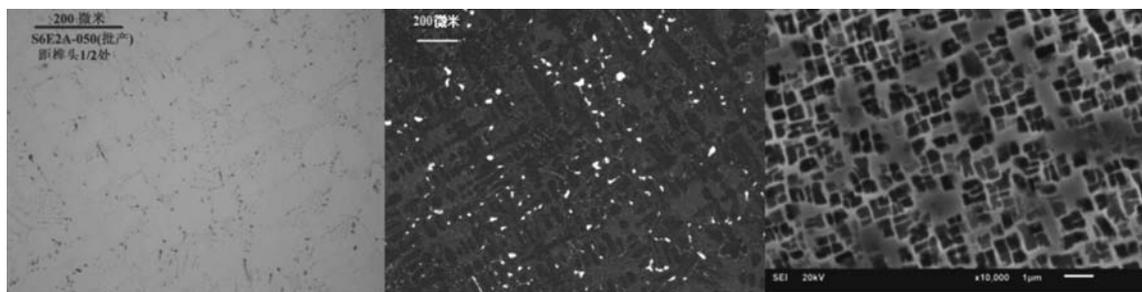
以骨架状为主。此外,铸件枝晶间和枝晶干的 γ' 相形状均不规则,大部分呈现立方形,枝晶干的 γ' 相尺寸明显小于枝晶间的。与原工艺的叶片显微组织对比(图5),细晶铸造叶片除枝晶间距有所细化外,两种工艺下碳化物、 γ - γ' 共晶相及 γ' 的形态和分布基本相当。枝晶干 γ' 呈现细小立方化分布,尺寸在343~484 nm。这表明经过细晶铸造的涡轮叶片是能够满足工艺技术要求的。

2.4 力学性能

表2是叶片标准试棒的室温拉伸、高温持久性能试

表1 细晶铸造叶片显微疏松检测结果
Table 1 Micro-porosity test results of fine grain blade castings

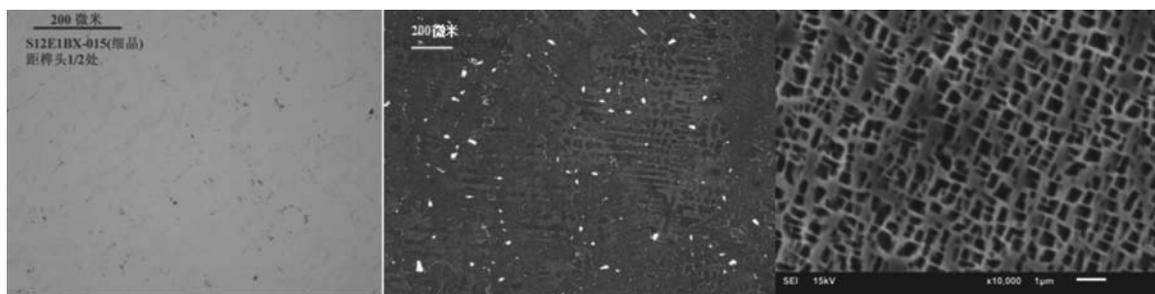
检查截面	检查部位	显微疏松含量/%		技术要求 /%
		第一批	第二批	
A-A	进、排气边5 mm范围内	<0.5	<0.5	≤0.5
	叶身中间范围	<0.5	<0.5	≤1.5
B-B	进、排气边5 mm范围内	<0.5	<0.5	≤0.5
	叶身中间范围	<0.5	<0.5	≤1.5
C-C	进、排气边5 mm范围内	<0.5	<0.5	≤0.5
	叶身中间范围	<0.5	<0.5	≤1.5
D-D	榫头	<0.5	<0.5	≤2
E-E	榫头	<0.5	<0.5	≤2
F-F	叶冠	<0.5	<0.5	≤1.5



(a) 碳化物 (b) 枝晶组织 (c) γ' 相

图4 细晶铸造叶片A-A截面显微组织形貌

Fig. 4 Microstructure of blade section A-A by fine grain casting



(a) 碳化物 (b) 枝晶组织 (c) γ' 相

图5 原工艺叶片A-A截面显微组织形貌

Fig. 5 Microstructure of blade section A-A by original casting process

验结果。表3是在原工艺(a、c)与细晶铸造(b)的叶片铸件叶身制取的非标试样室温拉伸和高温持久性能试验结果。由表2和表3可知,细晶铸造的叶片叶身室温拉伸强度略有提高,伸长率相当,975℃高温持久性能水平相当。该叶片在后续通过了产品零部件极限疲劳强度考核试验和试车考核,由于低压涡轮叶片工作温度低于850℃,细晶铸造的叶片可以满足技术要求。

2.5 极限疲劳强度

按照产品零部件极限疲劳强度考核试验,选取6

件细晶铸造的成品低压涡轮叶片,开展室温下的极限疲劳试验,结果全部通过,详见表4。为进一步掌握细晶铸造对该叶片疲劳强度的影响,继续开展了叶片极限疲劳测量,选取一定数量细晶铸造的该低压涡轮叶片,按连续6片通过规定的循环数而不发生破坏测定疲劳强度,结果表明细晶铸造叶片的疲劳极限比原工艺高约50 MPa。

细晶铸造使叶片晶粒度得以细化,细化作用由表及里对铸件组织产生了影响,提升了叶片的抗疲劳性能。

表2 标准试样室温拉伸和高温持久性能
Table 2 Room temperature tensile properties and high temperature durability of standard sample

	抗拉强度/MPa	伸长率/%	高温持久(950℃)/MPa	持久寿命/h
标准试样1 [#]	1 040	4.5	225	41:00(未断)
标准试样2 [#]	1 005	4.0	225	41:00(断)
铸件技术要求	≥835	≥4	225	≥40

表3 两种工艺下的叶片铸件叶身取样室温拉伸性能和高温持久性能
Table 3 Room temperature tensile properties and high temperature durability of blades under two casting processes

工艺	试样	抗拉强度/MPa	伸长率/%	高温持久强度(975℃)/MPa	持久寿命/h
原工艺	a1	974	3.0	225	41(未断)
	a2	987	4.5	225	19(断)
	a3	940	4.5	225	41(未断)
细晶铸造	b1	1 089	10	225	21.5
	b2	1 063	7.5	225	26.3
	b3	1 126	8.5	225	32
原工艺	c1	930	—	225	21
	c2	970	—	225	26.6
	c3	870	—	225	20.5

表4 细晶铸造低压涡轮叶片极限疲劳考核试验结果
Table 4 Ultimate fatigue test results of fine grain casting blade

编号	频率/Hz	循环数	试验后荧光检查结果	结论
1 [#]	128.5	2.0×10^7	无裂纹	合格
2 [#]	128.0	2.0×10^7	无裂纹	合格
3 [#]	124.5	2.0×10^7	无裂纹	合格
4 [#]	123.6	2.0×10^7	无裂纹	合格
5 [#]	127.1	2.0×10^7	无裂纹	合格
6 [#]	121.6	2.0×10^7	无裂纹	合格
技术要求	125 ± 10	2.0×10^7	无裂纹	合格

3 结论

(1) 采用细晶铸造工艺制备低压涡轮叶片,其表面晶粒度为1级,叶身浇口处2~4级,叶背浇口处存在未穿透的柱状晶且长度不大于10 mm,满足晶粒度的控制要求。

(2) 细晶铸造的低压涡轮叶片叶身显微组织碳化物与 γ' 及 $\gamma-\gamma'$ 共晶相的形态、分布与原工艺基本相当,枝晶间距更细;显微疏松控制水平与原工艺相当,叶身室温拉伸强度略有提高。

(3) 细晶铸造的低压涡轮叶片通过了零件极限疲劳试验考核,且疲劳强度有所提高。

参考文献:

- [1] 杨金侠, 孙元, 金涛, 等. 一种细晶铸造镍基高温合金的组织与力学性能研究 [J]. 金属学报, 2014, 50 (7): 839-844.
- [2] 闫红梅, 王永明, 黄爱华, 等. 影响细长薄壁细晶叶片铸造成形因素影响研究 [J]. 铸造, 2013, 62 (8): 804-807.
- [3] 袁文明, 汤鑫, 陈荣章. 高温合金细晶铸造工艺及其应用 [J]. 铸造, 1996 (6): 39-41.
- [4] 姜华, 李相辉, 盖其东, 等. 搅动法细晶铸造K492M合金的显微组织和拉伸性能 [J]. 铸造, 2019, 68 (6): 574-577.
- [5] 汤鑫, 刘发信, 李爱兰, 等. 细晶铸造K403合金热等静压及热处理工艺研究 [J]. 航空材料学报, 2003, 23 (S1): 45-50.
- [6] 韩梅. 细晶铸造K403合金热处理工艺的研究 [J]. 材料工程, 2001 (10): 45-47.
- [7] 汤鑫, 刘发信, 杨爱德. K417合金细晶铸造的热参数研究 [J]. 材料工程, 1995 (7): 23-24.
- [8] 中国金属学会高温材料分会. 中国高温合金手册: 下 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [9] 刘发信, 袁文明, 汤鑫. 细晶铸造K418合金叶片 [J]. 材料工程, 1996 (5): 38-40, 48.
- [10] 袁文明, 汤鑫, 刘发信. 细晶铸造对K418B合金显微组织及力学性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 1997 (3): 4-6.
- [11] 马岳, 胡尧和, 谢锡善. 国外细晶铸造IN718压气机叶片组织结构分析 [J]. 北京科技大学学报, 1997, 19 (2): 168-172.
- [12] 孙宝才, 鲁悦, 林中天, 等. K417G合金铸件荧光显示问题研究 [J]. 铸造, 2018, 67 (10): 915-917.

Microstructure and Mechanical Properties of K465 Alloy Low Pressure Turbine Blade Produced by Fine Grain Casting Technology

YIN Xiang-rong, HUANG Zhong-rong, LONG Yue-wen, SHE Yu-liang, GONG Xiao-ning, GUO Zhi-fei
(AECC Aero Science and Technology Co., Ltd., Chengdu 610503, Sichuan, China)

Abstract:

In order to improve the casting quality and production efficiency, the study on K465 alloy low pressure turbine blade produced by fine grain casting technology was conducted. The micro-porosity, microstructure, properties and ultimate fatigue strength were compared with that produced by original casting process. It was found that the refinements of grain size and dendritic arm spacing are significant by using fine grain casting technology, and the micro-porosity and microstructure are similar to that produced by original casting process, but the room temperature tensile strength and the ultimate fatigue strength are improved.

Key words:

K465 alloy; low pressure turbine blade; fine grain casting; grain size; mechanical property