

热等静压处理对铸造高温合金涡轮叶片的影响

吕成林^{1,2}, 桑梓晗³, 曲劲宇^{1,2}, 董凯鑫^{1,2}

- (1. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078;
2. 船舶与海洋特种装备和动力系统国家工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150078;
3. 哈尔滨工程大学 南安普顿海洋工程联合学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为解决铸造高温合金涡轮叶片由于工艺固有特性而在内部产生的疏松、气孔及残余共晶等冶金缺陷的问题,采用标准热处理和热等静压处理(HIP)+标准热处理两种工艺对铸造涡轮叶片及其同炉试样进行试验,并对试样进行了差热分析、密度测试、力学性能测试及X射线三维成像,对比分析不同工艺的处理效果。结果表明:相比标准热处理,热等静压处理+标准热处理试样的屈服强度上升3%,抗拉强度上升1.4%,延伸率和断面收缩率分别上升28.1%和51.5%,持久寿命上升16.6%,内部显微疏松和气孔等缺陷的闭合程度达99.8%;铸造涡轮叶片增加热等静压处理可有效闭合铸件内部疏松,提高合金致密度、力学性能,进而提高铸件合格率。

关键词:热等静压;铸造高温合金;涡轮叶片

中图分类号: TG115.6 文献标识码: A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2023.08.007

[引用本文格式] 吕成林, 桑梓晗, 曲劲宇, 等. 热等静压处理对铸造高温合金涡轮叶片的影响[J]. 热能动力工程, 2023, 38(8): 53-57. LYU Cheng-lin, SANG Zi-han, QU Jin-yu, et al. Effect of hot isostatic pressing on cast polycrystalline turbine blades made of nickel-based superalloy[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(8): 53-57.

Effect of Hot Isostatic Pressing on Cast Polycrystalline Turbine Blades Made of Nickel-based Superalloy

LYU Cheng-lin^{1,2}, SANG Zi-han³, QU Jin-yu^{1,2}, DONG Kai-xin^{1,2}

- (1. No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078;
2. National Engineering Research Center of Special Equipment and Power System for Ship and Marine Engineering, Harbin, China, Post Code: 150078; 3. Southampton Ocean Engineering Joint Institute at HEU, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001)

Abstract: In order to solve the problems of metallurgical defects in cast turbine blades made of nickel-based superalloy due to inherent characteristics of process, such as porosity, pores and residual eutectic, two kinds of processes called standard heat treatment and hot isostatic pressing (HIP) plus standard heat treatment were applied to test cast turbine blades and specimens of the same cast batch. Then differential thermal analysis (DTA), density test, mechanical properties test and X-ray 3D imaging were carried out to comparatively analyze the treatment effect of different processes. Results show that comparing to standard heat treatment, specimens yield strength from HIP plus standard heat treatment increases by 3%, tensile strength increases by 1.4%, elongation and reduction of area increase by 28.1% and 51.5% separately, endurance lifetime increases by 16.6%, and the closure degree of internal microporosity and pore is 99.8%; HIP treatment added to the cast turbine blade can eliminate internal porosity effectively and increase the density and mechanical properties of the alloy, in addition to improve the qualification

收稿日期: 2022-10-17; 修订日期: 2022-12-07

基金项目: 国家科技重大专项(J2019-VI-0009-0123)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project(J2019-VI-0009-0123)

作者简介: 吕成林(1976-), 男, 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所高级工程师。

rate of castings furtherly.

Key words: hot isostatic pressing (HIP), cast superalloy, turbine blade

引 言

船用燃气轮机涡轮叶片通常采用抗热腐蚀性能好的镍基铸造高温合金制造,涡轮叶片是船用燃气轮机的关键部件,在高温、高压、热腐蚀和复杂应力的环境下工作,一旦断裂将造成严重的事故。因此,如何提高铸造叶片的冶金质量就显得尤为重要。

液态金属凝固过程中,难以消除显微疏松和气孔等冶金缺陷。铸件表面缺陷可以采用机械修磨、焊接等方法去除,王茂才等人^[1]采用激光熔复也获得了良好的效果。针对铸件内部的疏松、气孔等缺陷,杨维敏、陈荣章等人^[2-3]采用设置内浇口、增大补缩能力及调整浇铸温度等优化铸造工艺的方法,减少了铸件内部疏松等缺陷。目前,零件铸造完成后消除内部缺陷的通常做法是增加热等静压工艺^[4-5]。秦添艳、呼和等人^[6-9]在热等静压工艺及应用方面做了大量的研究,证明了热等静压处理可有效减少或闭合铸件内部的显微疏松、气孔等缺陷,进而提高铸件的致密度、优化铸件的微观组织和力学性能。

目前,未见我国船用燃气轮机涡轮叶片采用热等静压工艺处理的相关报道。为此,本文对船用燃气轮机涡轮叶片的热等静压工艺开展研究,通过对采用标准热处理和热等静压+标准热处理两种工艺处理方式下 K444 合金涡轮叶片的缺陷闭合效果、密度和力学性能及零件加工效果进行对比,分析增加热等静压工艺对合金和叶片的影响。

1 试验方法

1.1 试验技术路线

试验技术路线如图 1 所示,以保证在所选工艺参数合理的情况下获得增加热等静压工艺的效果。

1.2 材料及热处理

镍基铸造高温合金 K444 是针对较高耐热腐蚀性能和较低成本的船用和工业燃气轮机而研制的^[10-11],合金中 Cr 的质量分数高达 16%、Al + Ti 的质量分数之和为 7% ~ 8%,使合金具有良好的耐

腐蚀性、较高的强度和良好的组织稳定性,以保证长期运行可靠性。该合金广泛应用于工作温度为 900 ~ 950 ℃ 的涡轮叶片。采用 K444 合金制备的涡轮叶片及同炉试棒进行试验。合金成分见表 1,合金的标准热处理制度见表 2。

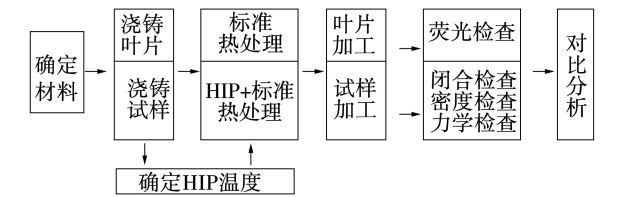


图 1 试验技术路线
Fig. 1 Route of the test

表 1 K444 合金的化学成分(质量分数,wt%)
Tab. 1 Chemical composition of K444 alloys
(mass fraction, wt%)

元素	含量/%
C	0.06
Cr	16.0
Co	10.7
W	5.3
Mo	2.0
Al	3.1
Ti	4.6
Nb	0.2
Hf	0.3
B	0.08
Ni	余量

表 2 K444 合金的标准热处理制度
Tab. 2 Standard heat treating of K444 alloy

条 件	温度/℃	时间/h
第 1 次固溶	1 170	4
第 2 次固溶	1 050	4
时 效	850	16

1.3 试验方法

1.3.1 相平衡温度

合金的热处理及热等静压处理均应在相平衡温

度以下进行,防止造成初熔等因热工艺带来的次生缺陷。采用叶片铸造同炉试棒,在每分钟加热/冷却 20 ℃ 的条件下,利用差热分析法获得相平衡温度。

1.3.2 热等静压处理

热等静压处理工艺参数为:200 MPa,1 180 ℃,4 h。铸造叶片和试样分别采用标准热处理和热等静压处理+标准热处理两种工艺进行对比试验,以确定热等静压处理对冶金缺陷的闭合效果、密度和力学性能的影响。

2 试验结果及分析

2.1 相平衡温度

K444 合金的典型差热分析曲线如图 2 所示,给出了液相线、固相线、共晶熔化温度和 γ' 相溶解温度变化情况。图中,横坐标表示试样的温度($t/^\circ\text{C}$),纵坐标表示热流率(ΔQ),相变温度值列于表 3。通过热差分析曲线给出的相变温度说明,K444 合金的热处理和热等静压温度均不应超过共晶的熔化温度 1 193 ℃。对比合金的标准热处理温度,为了获得更好的热等静压处理效果,确定了 K444 合金的热等静压处理温度为 1 180 ℃。

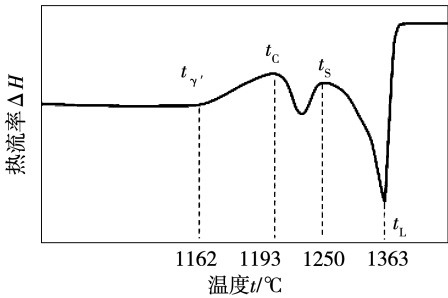


图 2 K444 合金典型差热分析曲线

Fig.2 Typical DTA curve of K444 alloy

表 3 K444 合金的热差分析数据(℃)

Tab.3 DTA data of K444 alloy(℃)

液相线	固相线	共晶熔化温度	γ' 相溶解温度
t_L	t_S	t_C	$t_{\gamma'}$
1 363	1 250	1 193	1 162

2.2 热等静压处理的闭合效果

合金热等静压前后分别截取 1 mm×1 mm×1.5 mm 的试块,利用高分辨透射 X 射线三维成像技术分析冶金缺陷的闭合情况,试验结果见图 3 和

表 4。对比分析可见,热等静压处理使铸件内部的显微疏松、气孔等缺陷的数量、体积分数、等效直径均明显减少,闭合程度达到了 99.8%,仅有极少部分的较大缺陷未得到闭合。说明,热等静压处理可有效闭合 K444 合金中疏松、气孔等冶金缺陷。

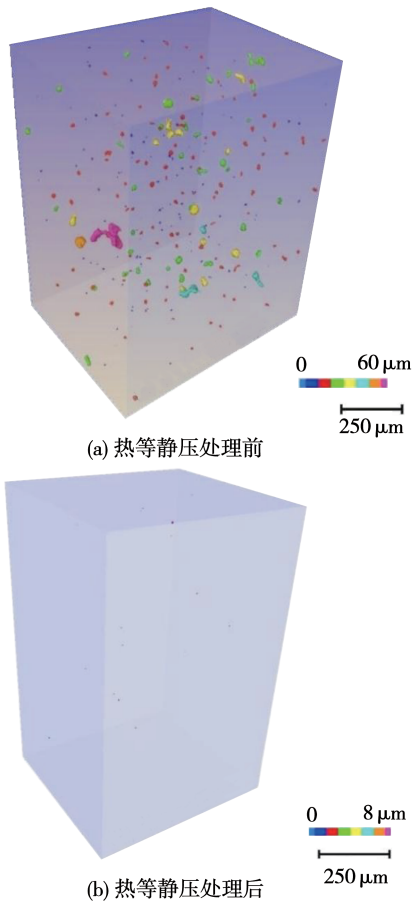


图 3 K444 合金 HIP 前/后冶金缺陷闭合效果

Fig.3 Porosity closure degree of K444 alloy before and after HIP

表 4 K444 合金 HIP 前/后冶金缺陷分布情况

Tab.4 Distribution of porosity in K444 alloy before and after HIP

样 品	数量 n	体积分数 V_f	最大等效直径 $D_{eqmax}/\mu\text{m}$	平均等效直径 $D_{eq}/\mu\text{m}$	闭合程度/ %
HIP 前	313	0.10	58.5	11	—
HIP 后	18	0.000 18	7.6	4	99.8

2.3 密度变化

分别对铸态、固溶态及热等静压态的合金进行密度测定,测试结果见表 5。对比可知,合金在固溶

处理和热等静压处理后,密度均略有变化,其原因为:(1) 热等静压后密度略有增大,主要是缺陷闭合使体积减小导致的。(2) 固溶处理使合金密度略有降低,主要是由于在固溶处理过程中以 γ' 相为主的析出相溶解在 $\gamma + \gamma'$ 基体中,晶格体积增大造成的。

需要说明的是,所选原始铸态试样具有足够致密度的情况下,固溶处理和热等静压处理造成的密度变化是可以忽略的。

表 5 不同工艺处理处理前/后 K444 合金密度变化情况

Tab.5 Density variations of K444 alloy before and after treatment by different processing

试样状态	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^3$	变化率/%
铸态	8.221 3	—
铸态 + 固溶	8.219 2	-0.03
铸态 + 热等静压	8.230 9	+0.05

2.4 力学性能变化

K444 合金采用标准热处理状态和热等静压 + 标准热处理工艺后的拉伸性能、持久性能分别见表 6 和表 7。与标准热处理状态的试样相比,热等静压 + 标准热处理状态试样的拉伸强度略有增加、塑性明显提高,持久寿命提高了 1/6。

表 6 不同工艺处理前/后 K444 合金拉伸性能变化

Tab.6 Tensile property variation of K444 alloy before and after treatment by different processing

指 标	标准热处理	热等静压 + 标准热处理	变化率/%
屈服强度 $\sigma_{p0.2}/\text{MPa}$	897	924	+3.0
抗拉强度 σ_b/MPa	1 113	1 129	+1.4
延伸率 $\delta_5/\%$	5.7	7.3	+28.1
收缩率 $\psi/\%$	9.7	14.7	+51.5

表 7 处理前/后 K444 合金持久性能变化

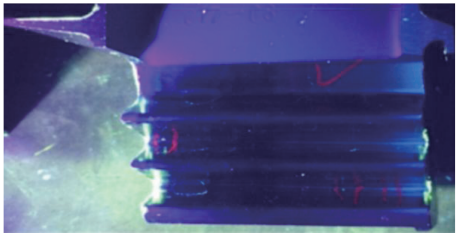
Tab.7 Durability variation of K444 alloy before and after treatment

试 样	温度/ $^{\circ}\text{C}$	应力/ MPa	寿命/h	变化率/%
标准热处理	900	274	271	—
热等静压 + 标准热处理	900	274	316	+16.6

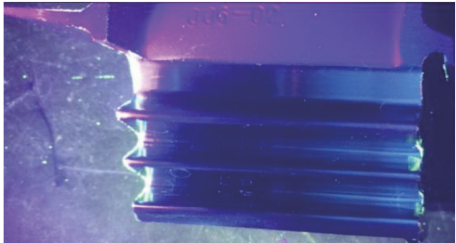
2.5 应用效果

铸造叶片加工后,榫齿加工面常出现荧光显示超标的情况,试验选择标准热处理和热等静压 + 标

准热处理的同熔批叶片,在机械加工后进行荧光检查,检查结果见图 4。对比可知,经热等静压处理的叶片榫齿表面明显好于未经热等静压处理的叶片,没有荧光显示,达到了榫齿表面不允许有荧光显示的要求,产品合格率得到提高。



(a) 热等静压处理前



(b) 热等静压处理后

图 4 K444 合金叶片 HIP 前/后榫头加工表面
荧光检测结果对比

Fig.4 Comparison of fluorescence inspection results of mortise machining surface of K444 alloy blade before and after HIP

3 结 论

- (1) 热等静压处理温度不应超过合金的共晶熔化温度;
- (2) 热等静压处理可有效闭合合金内部的疏松、气孔等冶金缺陷,缺陷闭合程度达 99.8%,减少了叶片加工表面的荧光显示,提高了产品合格率;
- (3) 热等静压处理后合金的屈服强度、抗拉强度分别提升 3% 和 1.4%,持久寿命提升 16.6%,保证了叶片长期运行的可靠性。

参考文献:

[1] 王茂才,吴维爻.先进的燃气轮机叶片激光修复技术[J]. 燃气轮机技术,2001,14(4):53-56.
WANG Mao-cai,WU Wei-tao. Advanced laser cladding and welding process for GT[J]. Gas Turbine Technology, 2001, 14(4): 53-56.

[2] 杨维敏. 精铸 718 合金叶片疏松缺陷的消除[J]. 特种铸造及有色合金,1993(6):37-39.
YANG Wei-min. The elimination of porosity in 718 alloy blade by precision casting [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 1993(6):37-39.

[3] 陈荣章. 航空铸造涡轮叶片合金和工艺发展的回顾与展望[J]. 航空制造技术,2002(2):19-23.
CHEN Rong-zhang. Review and prospect of developments of cast superalloys and technology of aeroengine turbine blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2002(2):19-23.

[4] 刘慧渊,何如松,周武平,等. 热等静压技术的发展与应用[J]. 新材料产业,2010(11):12-17.
LIU Hui-yuan, HE Ru-song, ZHOU Wu-ping, et al. Development and application of hot isostatic pressing technology[J]. Advanced Materials Industry,2010(11):12-17.

[5] 张义文. 热等静压技术新进展[J]. 粉末冶金工业,2009,19(4):32-40.
ZHANG Yi-wen. Development in HIP technology[J]. Powder Metallurgy Industry,2009,19(4):32-40.

[6] 秦添艳. 热等静压工艺[J]. 上海钢研,1999(5):50-51.
QIN Tian-yan. Hot isostatic pressing technology [J]. Journal of Shanghai Iron & Steel Research,1999(5):50-51.

[7] 谭文生. 热等静压和烧结热等静压对消除硬质合金孔洞的作用[J]. 稀有金属与硬质合金,1989(4):14-17.
TAN Wen-sheng. Effect of hot isostatic pressing and sintering hot isostatic pressing on the elimination of voids in cemented carbides [J]. Rare Metals and Cemented Carbides,1989(4):14-17.

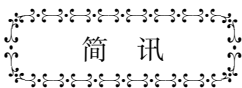
[8] 张树才,郭志俊,王跃旗,等. 涡轮叶轮用铸造高温合金的热等静压处理研究[J]. 兵器材料科学与工程,2011,34(4):67-69.
ZHANG Shu-cai, GUO Zhi-jun, WANG Yue-qi, et al. Hot isostatic pressing treatment of cast superalloys used in turbine wheels[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2011, 34(4):67-69.

[9] 呼和. 镍基铸造高温合金的热等静压处理[J]. 金属学报,2002,38(11):1199-1202.
HU He. Hot isostatic pressing treatment of cast Ni-base superalloy [J]. Acta Metallurgica Sinica,2002,38(11):1199-1202.

[10] 郭永安,李柏松,赖万慧,等. 铸造镍基合金 K444 在 900℃ 空气中的长期氧化行为[J]. 中国腐蚀与防护学报,2012,32(4):285-290.
GUO Yong-an, LI Bo-song, LAI Wan-hui, et al. Oxidation behavior of Ni-based superalloy K444 at 900℃ in air during long term [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2012,32(4):285-290.

[11] 张松,王琦,赵小书,等. K444 铸造镍基高温合金的高温氧化行为[J]. 沈阳工业大学学报,2010,32(2):136-140.
ZHANG Song, WANG Qi, ZHAO Xiao-shu, et al. High temperature oxidation behavior of cast Ni-based superalloy K444 [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2010, 32(2):136-140.

(丛敏编辑)



简讯

英国航空工业宣布下一代飞行战斗空中演示机的先进技术

据官网报道,来自英国宇航系统公司(BAE System)、罗尔斯·罗伊斯公司(Rolls-Royce)、莱奥纳多英国公司(Leonardo UK)、欧洲导弹公司(MBDA)和国防部(MOD)的专家正在与一系列英国中小型企业(SMEs)合作,研制开发英国下一代超音速隐身战斗机“Tempest”所需的技术。

工程师们一直在进行空气动力学发动机测试,利用新的先进制造工艺生产一种独特形状的发动机导管,以减缓发动机表面从超音速到亚音速的空气速度。与传统战斗机设计相比较,进气道具有更少的活动件,增强了飞机的隐身设计。演示机测试在罗尔斯·罗伊斯公司位于布里斯托尔菲尔顿的工厂进行,20 世纪 60 年代 Concorde Olympus 发动机曾在这里测试。

BAE 系统公司 Tempest 项目总监尼尔·斯特朗说:“40 年前,英国领导了‘台风’演示机项目,我们今天所做的工作是另一个千载难逢的机会,可以在航空史上写下新的篇章。”在整个 Tempest 项目中,我们正在使用数字技术和创新的设计和工程方法,以确保能够在 2035 年之前将 Tempest 超音速隐身战斗机交付使用。

(孙嘉忆摘译自 <https://www.rolls-royce.com>)