

# DZ125定向凝固高温合金氩弧焊修复工艺研究

曲 伸<sup>1</sup>,刘纪德<sup>2</sup>,宋文清<sup>1</sup>,李 英<sup>1</sup>,孙 元<sup>2</sup>,李 博<sup>2</sup>,侯星宇<sup>2</sup>,周冠男<sup>1</sup>

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司,沈阳 110043;

2. 中国科学院金属研究所高温合金研究部,沈阳 110016)

**[摘要]** DZ125合金具有良好的中温、高温综合性能和优异的疲劳性能,被广泛用于燃气轮机工作叶片和导向叶片。针对零件实际使用过程中出现的使役缺陷等问题,介绍了采用钨极氩弧焊(TIG)的方法焊接修复DZ125合金的研究进展。研究表明,采用传统焊接材料修复后,热影响区碳化物等位置易于产生热裂纹,焊缝硬度较低。针对上述试验结果,设计开发了一种新型焊接材料,采用此新型焊接材料和恰当的焊接与热处理工艺,可有效避免热影响区裂纹产生,接头微观组织较均匀,1000℃拉伸强度达到母材90%,可以满足DZ125合金使用要求。

**关键词:** DZ125; 高温合金; 钨极氩弧焊; 热裂纹; 热处理

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2018.08.043



曲 伸

研究员级高工,主要从事焊接与修复工艺研究工作,主持完成10余项重大焊接技术改造和设备研制任务,获部级科技奖多项。

燃气轮机DZ125定向凝固高温合金涡轮叶片工作时承受复杂的应力和温度作用,还有高温腐蚀性燃气冲刷,经常在垂直于叶片主应力方向产生裂纹、烧蚀等缺陷,同时叶尖也经受高温摩擦作用,产生磨损和尖端裂纹。国内外对定向合金的焊接多采用钎焊和扩散焊的方法<sup>[1-8]</sup>,这两种工艺在控制定向合金组织变化、避免产生再结晶等方面具有较大优势,但是钎焊和扩散焊焊缝普遍存在高温强度低、塑性差等缺点<sup>[9-10]</sup>,不完全适用于重要承力部分的焊接修理。国内外也有较多文献介绍了激光直接沉积方法<sup>[11]</sup>。为解决该合金使用过程中叶尖处的磨损和裂纹等问题,本文研究了DZ125合金的TIG修理工艺,通过试验证明采用常规焊接材料不能满足使用要求,为此研制了新的焊接材料,并用TIG工艺进行了焊接修理试验,同时还研究了焊后热处

理制度对焊缝组织和性能的影响。

## 试验方案

### 1 试验材料

用于试验的DZ125合金主要成分见表1,采用普通定向凝固方法制备,最终热处理状态为时效态(870℃/20h)。焊材材料选用传统钴基Co-Cr-W、Co-Cr-Mo、GH605焊材和自行研制的MGS-1镍基焊材,焊材成分见表2。

### 2 试验方法

试验采用米勒ML-352HGBT钨极氩弧焊机,焊接电流30~50A,电压80V,脉冲频率5Hz,钨极直径1.2mm,尖端夹角20°~30°,氩气流量8~10L/min,焊速150~300mm/min。焊接过程中将试样夹持在专用夹具中,防止氧化并实施快速冷却,控制层间温度,减小应力,防止材料过热和裂纹产生。将DZ125合金板经切

割和磨加工后制造为两种形式,其中组织分析和硬度测试样品尺寸为8mm×8mm×4mm,高温拉伸样品尺寸40mm×20mm×4mm(见图1)。

采用的腐蚀液成分为HCl(20mL)+CuSO<sub>4</sub>(5g)+H<sub>2</sub>O(100mL),腐蚀时间7~15s。依据相关标准加工样品并进行高温拉伸性能测试,拉伸测试温度为1000℃,测试4个试片,为了对比分析测试了相同条件下母材的拉伸性能。

采用LEICA光学显微镜和JSM-6301F扫描电子显微镜进行微观组织和断口观察。采用LECO显微硬度仪进行接头硬度测试,施加载荷为1kg。采用岛津AG-25KNE型电子拉伸试验机进行拉伸性能试验。

## 结果与讨论

### 1 传统焊接材料接头组织及性能

#### 1.1 接头组织特征

图2是采用Co-Cr-Mo、Co-Cr-W和GH605这3种焊接材料焊接后的接头微观组织。虽然在焊缝内未观察到气孔、裂纹等焊接缺陷,但在母材焊缝热影响区内均出现热裂纹,且裂纹沿晶界或枝晶间界扩展。

图3是在扫描电镜下观察的化学腐蚀后热影响区的裂纹形貌。裂纹沿着晶界或枝晶间区域扩展,在裂纹的一侧有凝固的液膜,液膜沿裂纹连续分布,具有典型的液化裂纹特征。在腐蚀掉了 $\gamma'$ 相( $\gamma'+\gamma$ )共晶组织后,对液膜内部的块状析出物(A点)以及沿裂纹边缘分布的带状区域(B点)进行能谱分析,结果

表1 DZ125合金化学成分(质量分数)

C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Ta	Hf	B	Ni
0.07~0.12	8.4~9.4	9.5~10.5	6.5~7.5	1.5~2.5	4.8~5.4	0.7~1.2	3.5~4.1	1.2~1.8	0.01~0.02	余量

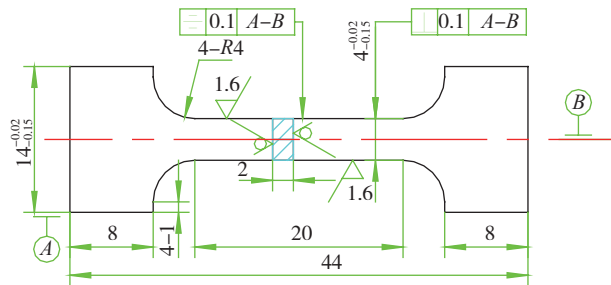
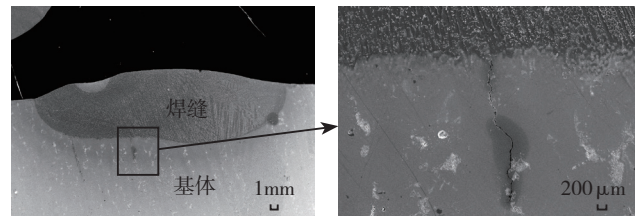
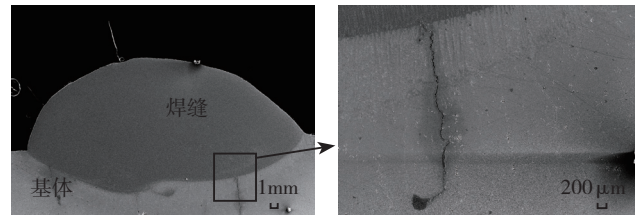


图1 高温拉伸样品图(单位: mm)

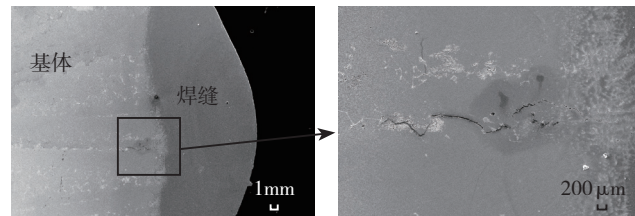
Fig.1 Sample drawing for high temperature tensile testing (Unit: mm)



(a) Co-Cr-Mo



(b) Co-Cr-W



(c) GH605

图2 3种焊接材料焊缝组织

Fig.2 Weld joint microstructure comparison of three welding materials

表2 焊材主要化学成分(质量分数)

焊材	Co	Cr	Ni	W	Mo	Ti	Al	Ta	Hf
GH605	余量	19.0~21.0	9.0~11.0	14.0~16.0	—	—	—	—	—
Co-Cr-W	余量	26.0~30.0	4.0~6.0	18.0~21.0	—	—	—	—	—
Co-Cr-Mo	余量	16.5~18.5	—	—	27.0~30.0	—	—	—	—
MGS-1	3.0~13.0	4.0~15.0	余量	3.0~11.0	1.0~2.0	0.5~2.5	2.0~5.0	1.8~6.1	0.5~1.0

如表 3 所示。可以看出, A 区域的细小块状析出物为 Ti 含量较高的 MC 型碳化物, 带状区域 B 的化学成分分析结果表明该区域与基体成分相近, 并以 ( $\gamma + \gamma'$ ) 共晶组织为主。

在焊接热循环过程中, 基体热影响区的晶间或枝晶间低熔点相, 如 ( $\gamma' + \gamma$ ) 共晶, 在焊接过程中发生了熔化, 在晶间或枝晶间区域形成液膜, 在随后的快速凝固过程中, 这些区域无法得到有效补充而产生裂纹。

### 1.2 接头硬度

硬度测试结果(图 4)表明, 3 种焊材的焊缝区硬度值均低于母材区域硬度, Co-Cr-Mo 焊材的焊缝区硬度值(同一位置 3 点硬度的平均值)略高于其他两种焊接材料。

## 2 MGS-1 焊材微观组织及性能

### 2.1 接头组织特征

采用 TIG 焊后的接头组织如图 5 所示, 接头焊缝区内组织呈现典型的外延生长形式, 并且以细密的定向生长枝晶形貌为主。在焊接界面和母材热影响区内均未观察到热裂纹、孔洞、非金属夹杂等焊接缺陷。

### 2.2 热处理后接头组织特征

对采用自行研制的 MGS-1 焊材焊接后的接头样品进行热处理 (1000℃ /4h), 其接头微观组织如图 6 所示。经过热处理后的焊缝区域的晶界和枝晶形貌更加清晰, 微观组织观察表明在这些区域析出了大量碳化物。由于熔化焊是一个快速凝固过程, 导致碳化物等相不能充分析出, 在随后的热处理过程中, 在晶界或枝晶间等区域析出。

对热处理后的焊缝组织进行观察, 可以发现微观上焊缝组织都是由  $\gamma$  和  $\gamma'$  两相构成, 强化相  $\gamma'$  呈现大尺寸不规则的形状和细小颗粒状两种形貌, 见图 7。

焊接和热处理后基体合金的微观组织形态变化非常重要, 如果经过上述热过程后基体的微观组织与焊前差别较大, 就会影响合金的性能,

零件的正常使用也可能产生问题。对比焊前和焊后两种情况下基体的微观组织可见, 虽然经过了焊接和焊后热处理过程, 基体内的微观组织并未产生明显变化, 尤其是强化相  $\gamma'$  的形状、尺寸和百分含量等均未产生明显差别, 见图 8。

### 2.3 接头硬度及拉伸性能

不同状态接头的显微硬度(同一位置 3 点硬度的平均值)测试结果(图 9)表明, 焊接后焊缝区的硬度值略低于母材区域; 热处理后, 焊缝区的硬度值较焊接态明显提高, 其硬度

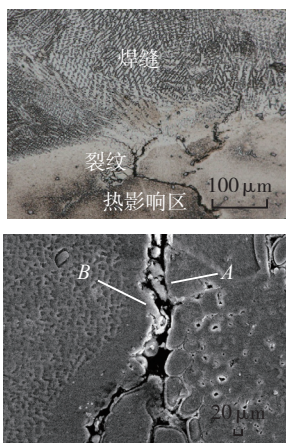


图3 热影响区的典型裂纹形貌

Fig.3 Typical appearance of crack in welding affect zone

表3 热影响区裂纹区域化学成分 %

区域	Al	Ti	Cr	Co	Ni	C
A	6.21	7.63	2.47	6.43	67.09	10.18
B	11.02	5.16	3.39	6.71	73.71	—

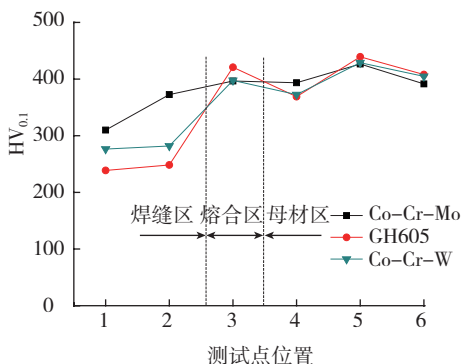
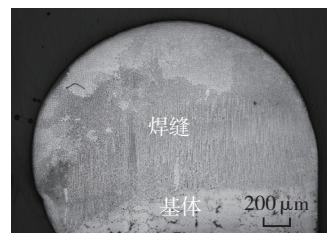


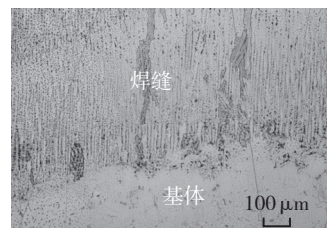
图4 3种焊材接头硬度值

Fig.4 Joints hardness of three welding materials

与基体基本相当。这说明焊后热处理可以明显改善接头焊缝区域的显微硬度, 在提高接头整体性能方面具



(a) 焊缝区



(b) 界面

图5 采用MGS-1焊材焊接的金相(焊态)  
Fig.5 Microstructure of welding joint with welding materials MGS-1

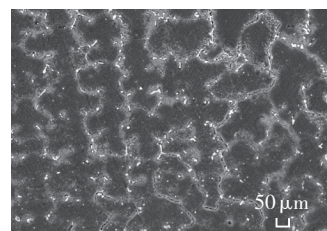
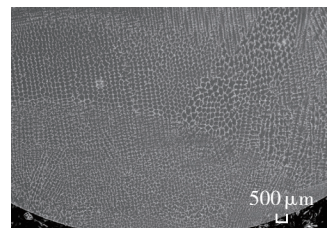


图6 热处理后MGS-1合金焊缝组织  
Fig.6 Microstructure of welding joint (welding materials MGS-1) after heat treatment

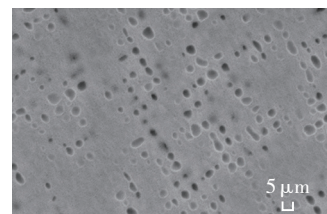
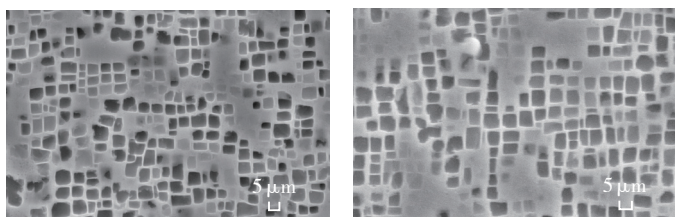


图7 热处理后MGS-1合金焊缝内强化相形貌  
Fig.7 Morphology of strengthening precipitations in welding joint (with MGS-1 welding material) after heat treatment



(a) 热处理前 (b) 热处理后

图8 热处理前后基体微观组织

Fig.8 Microstructure of base metal before and after heat treatment

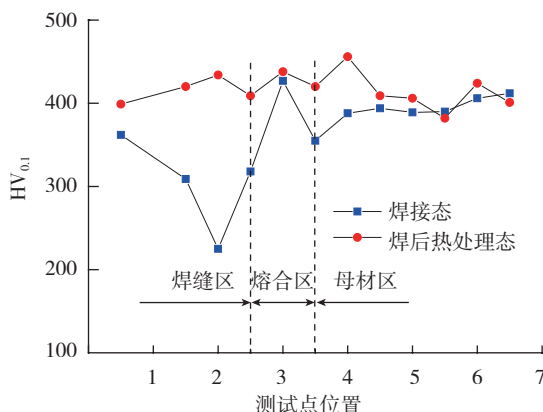


图9 接头显微硬度测试结果

Fig.9 Testing results of hardness of welding joint

有一定作用。

采用自行研制的 MGS-1 焊接材料并结合恰当的焊接和热处理工艺,对板状拉伸性能测试样品进行焊接,并经过 1000 °C 的高温拉伸性能测试,结果表明,接头样品的抗拉强度达到母材强度的 90%,其延伸率达到 10% 以上。这说明焊接后接头具有优异的强度和塑性。

## 结论

本文采用传统 Co-Cr-Mo、Co-Cr-W、GH605 等焊接材料以及自行研制的 MGS-1 焊材,对定向凝固高温合金 DZ125 进行了氩弧焊修复,并研究了焊后接头的微观组织、显微硬度等,主要结论如下:

(1) 采用传统 Co-Cr-Mo、Co-Cr-W、GH605 等材料焊接后,接头热影响区出现大量热裂纹,裂纹区域的化学成分与基体成分相近,且析出细小的块状的 Ti 含量较高的 MC 型碳化物。

(2) 采用自行研制的 MGS-1 焊材焊接后的接头组织,以外延生长形成的微细柱晶为主,在焊接界面及焊接热影响区等位置均未发现裂纹、孔洞等焊接缺陷。

(3) 焊后热处理对 MGS-1 焊材焊接接头的微观组织产生显著影响,在焊缝内析出大量碳化物,焊缝区的显微硬度获得显著提高。焊接及焊后热处理对基体区的微观组织未产生明显影响。

(4) 采用自行研制的焊接材料和适当的焊接工艺, DZ125 合金的 TIG 接头高温强度可达到母材的 90%,延伸率达到 10% 以上。

## 参考文献

[1] 叶雷,毛唯,谢永慧,等. 定向凝固高温合金 IC10 瞬态液相扩散焊接接头组织研究[J]. 材料工程, 2004(3): 42-44.  
 YE Lei, MAO Wei, XIE Yonghui, et al. Research on TLP diffusion bonded joint microstructure of directionally solidified superalloy IC10[J]. Journal of Materials

Engineering, 2004(3): 42-44.

[2] 毛唯,李 晓红,叶雷. 定向凝固 Ni<sub>3</sub>Al 高温合金 IC6A 的真空钎焊[J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 103-106.

MAO Wei, LI Xiaohong, YE Lei. Vacuum brazing of a directionally solidified Ni<sub>3</sub>Al-base superalloy IC6A[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(3): 103-106.

[3] 赵海生,潘 晖,张学军,等. DZ40M 焊接钎焊接头组织与性能[J]. 焊接学报, 2016, 37(7): 114-118.

ZHAO Haisheng, PAN Hui, ZHANG Xuejun, et al. Microstructure and mechanical properties of DZ40M alloy brazed joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(7): 114-118.

[4] 张蕾,李 晓红,候金保,等. DZ125 合金过渡液相扩散焊接接头高温断裂韧性试验研究[C]//中国机械工程学会焊接学会第十八次全国焊接学术会议论文集. 南昌, 2013. <http://cpfd.cnki.com.cn/Article/CPFDTOTAL-ZGVE201310001043.htm>.

ZHANG Lei, LI Xiaohong, HOU Jinbao, et al. Experimental investigation on high-temperature fracture toughness test of TLP-DB joints of DZ125 superalloy[C]//Proceedings of Chinese Mechanical Engineering Society Welding Association 18th National Welding Conference. Nanchang, 2013. <http://cpfd.cnki.com.cn/Article/CPFDTOTAL-ZGVE201310001043.htm>.

[5] EKRAMI A, MOEINIFAR S, KOKABI A H. Effect of transient liquid phase diffusion bonding on microstructure and properties of a nickel base superalloy Rene 80[J]. Material Science and Engineering: A, 2007, 456(1/2): 93-98.

[6] LIU J D, JIN T, LI W, et al. Creep fracture mechanism of TLP joint of a Ni-base single crystal superalloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 457(1/2): 185-190.

[7] POURANVARI M, EKRAMI A, KOKABI A H. Microstructure-properties relationship of TLP-bonded GTD-111 nickel-base superalloy[J]. Material Science and Engineering: A, 2008, 490(1/2): 229-234.

[8] CAO J, WANG Y F, SONG X G, et al. Effects of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of TLP bonded Inconel718 superalloy[J]. Material Science and Engineering: A, 2014, 590: 1-6.

[9] 毛唯,李 晓红,程耀永,等. 定向凝固高温合金 DZ125 的钎焊工艺研究[C]//2004 航空航天焊接国际论坛论文集. 北京, 2004. <http://www.wanfangdata.com.cn/details/detail>.

do?type=conference&id=6064748.

MAO Wei, LI Xiaohong, CHENG Yaoyong, et al. Study on brazing technology of directionally solidified superalloy DZ125[C]//Proceedings of 2004 International Forum on Aerospace Welding. Beijing, 2004. <http://www.wanfangdata.com.cn/details/detail.do?type=conference&id=6064748>.

[10] 毛唯, 李晓红, 程耀永. DZ125

高温合金的真空钎焊[C]//第九次全国焊接会议论文集. 天津, 1999. <http://www.wanfangdata.com.cn/details/detail.do?type=conference&id=71149>.

MAO Wei, LI Xiaohong, CHENG Yaoyong. Vacuum brazing of DZ125 superalloy[C]//Proceedings of 9th National Welding Conference. Tianjin, 1999. <http://www.wanfangdata.com.cn/details/detail.do?type=conference&id=71149>.

details/detail.do?type=conference&id=71149.

[11] BI G J, GASSER A. Restoration of nickel-base turbine blade knife-edges with controlled laser aided additive manufacturing[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 402-409.

通讯作者: 曲仲, E-mail: qushen927@vip.sina.com。

## TIG Repairing on Directionally Solidified Superalloy DZ125

QU Shen<sup>1</sup>, LIU Jide<sup>2</sup>, SONG Wenqing<sup>1</sup>, LI Ying<sup>1</sup>, SUN Yuan<sup>2</sup>, LI Bo<sup>2</sup>, HOU Xingyu<sup>2</sup>, ZHOU Guannan<sup>1</sup>

(1. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Corporation Ltd., Shenyang 110043, China;

2. Superalloys Division, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**[ABSTRACT]** Because of excellent creep resistances and fatigue properties both in medium and high temperature, the directionally solidified superalloy DZ125 alloy has been widely used as turbine blades and guide vanes in engineering. In this paper, the repairing process of DZ125 alloy was discussed. The results showed that there were many HAZ cracks formed by using common welding materials. Then a kind of new welding alloy was developed and after proper welding and heat treatments no cracks were found in the joints. The microstructures of the joints were also homogeneous and the tensile strengths of the joints were 90% of that of DZ125 alloy.

**Keywords:** DZ125; Superalloy; TIG welding; HAZ crack; Heat treatment

(责编 逸飞)

(上接第42页)

## Ultrasonic Double-Pulsed Deep Penetration VPTIG Welding for Aluminum Alloys

CONG Baoqiang<sup>1,2</sup>, WANG Yipeng<sup>1,2</sup>, QI Bojin<sup>1,2</sup>, ZHONG Hao<sup>1,2</sup>, HU Xin<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. MIIT Key Laboratory of Aeronautics Intelligent Manufacturing, Beijing 100191, China;

3. Sichuan Future Aerospace Industry LLC, Shifang 618400, China)

**[ABSTRACT]** Variable polarity tungsten inert gas arc welding (VPTIG) is widely used in the welding of aluminum and aluminum alloys, due to its low cost and high weld quality. In order to enhance the arc energy density and its penetration ability, a novel ultrasonic double-pulsed deep penetration VPTIG (DP-VPTIG) process was proposed in this paper. Al-Cu and Al-Mg series aluminum alloy plates were employed as base materials. The preliminary experimental results show that the stable process and good welding quality can be obtained when DP-VPTIG is employed to weld aluminum alloy plates, and also the precise control of weld penetration can be achieved by adjusting the pulsed current characteristic parameters. It is very significant and valuable to carry out the applicability and related theoretical study for the novel DP-VPTIG process, which can be employed in the welding fabrication of aluminum alloy plates and show a good application prospect.

**Keywords:** Aluminum alloy plate; Ultrasonic double-pulsed current; Current parameter; Deep penetration; VPTIG arc welding

(责编 逸飞)