

一种镍基定向高温合金电弧增材接头的组织性能研究

李晓光¹, 刘纪德², 张 罡³

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司 技术中心, 沈阳 110034; 2. 中国科学院金属研究所 高温结构材料研究部, 沈阳 110016; 3. 沈阳理工大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110159)

摘 要: 采用 TIG 电弧增材方法, 对定向凝固高温合金进行焊接修复, 并进行微观组织形貌分析及拉伸力学性能测试。结果表明, 增材区内部呈典型的细枝晶生长形态; 电弧增材焊缝内的显微硬度略低于母材区, 原因是焊接合金中 Al、Ti 等沉淀强化元素含量较低; 接头样品的平均屈服强度与抗拉强度均达到母材的 98%, 断后伸长率为母材的 59%; 试样断裂在增材区靠近熔合区部位。

关 键 词: 钨极气体保护焊; 镍基高温合金; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG132.3⁺3 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1003-1251.2021.02.012

Study on Microstructures and Mechanical Properties of the Joints of a Kind of Nickel-based DS Superalloy Welded by TIG

LI Xiaoguang¹, LIU Jide², ZHANG Gang³

(1. Shenyang Liming Aero-Engine Corporation Ltd, Shenyang 110034, China; 2. Institute of Metal Research, Shenyang 110016, China; 3. Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: The microstructure, and tensile strength of Molten Wire TIG (Tungsten Insert Gas Welding) of a kind of directional solidified nickel-based superalloy were studied. The results showed that No welding defects formed in the additive region. The microstructure of weld zone was composed of finer dendrites. The Vickers hardness of the additive region was lower than that of the base metal due to less contents of Al and Ti. The tensile strengths of the joints were 98% of that of base alloy, and the elongations of the joints were 59% of the base metals. All of the joints were failed in the welding zone.

Key words: tungsten insert gas welding; nickel-based superalloy; microstructure; mechanical property

镍基定向凝固高温合金具有优异的高温强度和抗氧化腐蚀性能, 广泛用于制造航空发动机和

地面燃气轮机热端部件。这些热端零部件的工作环境非常苛刻, 通常要在复杂的温度、应力状态和

高温腐蚀性气体中长期工作,零件尖端等部位很容易产生裂纹、磨损和烧蚀等缺陷,严重影响零件的正常使用,必须及时更换和维修。而更换新的零件往往带来更大的成本投入,因此国内外都非常重视发展高温合金零件的修复技术^[1-4]。为提高合金的高温强度,镍基定向高温合金通常含有较高含量的 Al 和 Ti 等元素,这些元素往往导致定向合金具有较高的焊接裂纹形成倾向性。目前通常采用钎焊和扩散焊的方法进行零件的修复^[5-7],这两种修复工艺虽然能很好地避免裂纹的产生,但焊缝的高温强度和塑性较低^[8-11],不能完全满足定向凝固高温合金零件的焊接修复要求。

为解决定向凝固高温合金零件使用过程中的磨损和裂纹等问题,同时降低使用和修复成本,本文采用新焊材和钨极气体保护焊(Tungsten Insert Gas Welding, TIG)电弧增材制造工艺,对定向凝固高温合金进行焊接修复,以期有效控制增材区的冶金缺陷和再结晶的产生,提高焊接区的抗拉性能,保证焊接质量满足定向凝固高温合金零件使用要求。

1 试验材料及试验方法

1.1 试验材料

试验母材为 60mm × 60mm × 4mm 的镍基高温合金试板,在 60mm × 4mm 的边面上进行电弧增材堆积,堆积方向与母材原始定向凝固枝晶生长方向平行。

焊前对机加工后的母材使用丙酮、酒精超声清洗以去除油污,并机械打磨去掉母材表面的氧化物薄膜。母材与焊丝成分见表 1 和表 2 所示。焊接保护气采用体积分数为 99% 的氩气,拖罩和背保护装置氩气流量同为 25L/min。电弧增材试验示意图如图 1 所示。

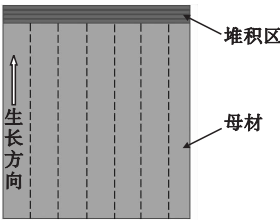


图 1 电弧增材试验示意图

表 1 定向凝固母材合金化学成分

C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Ta	Hf	Ni
0.07 ~0.15	7.9 ~8.6	8.8 ~9.6	9 ~10	0.1 ~1.0	5.0 ~6.0	0.1 ~1.2	2.5 ~3.5	1.2 ~1.8	余

表 2 焊材主要化学成分

Co	Cr	Ni	W	Mo	Ti	Al	Ta	Hf
9.0 ~11.0	10.0 ~15.0	余	11.0 ~14.0	2 ~5	-	2 ~5	0 ~3	-

1.2 试验方法

试验采用米勒钨极氩弧焊机,焊接电流为 25 ~ 60A,脉冲频率为 6Hz,焊接速度为 120 ~ 260mm/min。将增材制造后的定向凝固合金板经切割和平磨加工成两种规格,用于微观组织分析和显微硬度测试的样品尺寸为 8mm × 8mm × 4mm;用于高温瞬时拉伸测试的样品尺寸为 40mm × 20mm × 4mm。高温拉伸样品图见图 2 所示。

用于金相组织分析的样品经过化学方法腐蚀,其腐蚀液成分为 HCl(25mL) + CuSO₄(5g) + H₂O(100mL);将经过机械研磨和抛光的样品置

于腐蚀液中,腐蚀时间为 10 ~ 35s;取出样品,用酒精冲洗干净后吹干。

接头瞬时拉伸测试温度为 900℃。为对比分析相同条件下母材的拉伸性能,分别测试 3 个试片。

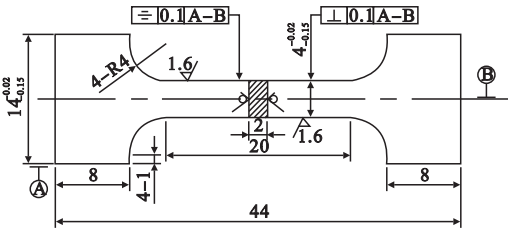


图 2 高温拉伸样品图

采用 LEICA 光学显微镜进行增材后接头样品的微观组织观察;采用 JSM-6301F 型扫描电子显微镜进行高温拉伸后断口形貌观察;采用 LEICO 显微硬度仪测试增材制造接头的微观硬度,载荷为 1kg;采用岛津 AG-25KNE 型电子拉伸试验机进行 900℃ 高温瞬时拉伸性能测试。

2 试验结果及分析

2.1 增材样品外观形貌

镍基定向凝固高温合金电弧增材焊缝宏观形貌如图 3 所示。

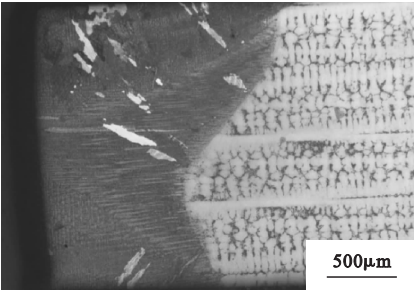


图 3 焊缝宏观形貌

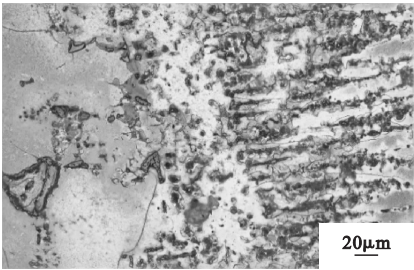
由图 3 可见,焊缝表面呈有金属色泽的银白色,焊缝正面焊道高度均匀,焊缝外观整体上成形良好且无飞溅、咬边等典型焊接缺陷;在试验采用的焊接工艺参数下,接头气体保护效果良好,无明显氧化现象产生。

2.2 接头显微组织形貌

电弧增材后接头纵剖面微观组织形貌如图 4 所示。



(a)低倍组织



(b)高倍组织

图 4 接头微观组织形貌

由图 4 可见,增材焊缝内微观组织呈现典型的外延生长形式,并且以极细密的定向枝晶形貌为主;熔合区部位形成良好的冶金结合,由于热流方向的影响,增材焊缝内凝固组织呈现典型的细枝晶形貌;在焊接熔合区、增材焊缝和母材热影响区内均未观察到裂纹、孔洞、夹杂等焊接缺陷;所采用焊接材料和焊接工艺可以实现增材区内冶金缺陷的有效控制。

2.3 接头硬度分析

电弧增材接头样品不同区域微观硬度测试结果如图 5 所示。

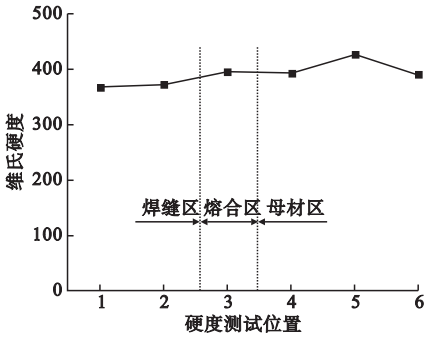
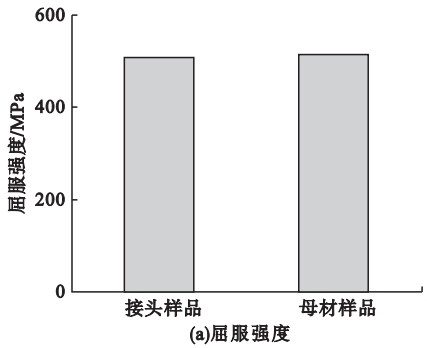


图 5 不同区域微观硬度测试结果

由图 5 可见,母材区内硬度较高,熔合区内硬度值略高于母材区,但焊缝内部显微硬度则略低于母材区和熔合区;由于焊接过程未对母材微观组织造成显著影响,母材的硬度变化不明显;因冷却速率较大,熔合区显微硬度略高;本试验所采用的焊接材料中 Al、Ti 和 Ta 等元素含量略低于母材,而这些元素在高温合金中均是沉淀强化相形成元素,对合金的强化效果和显微硬度具有显著影响,因此焊缝区内显微硬度略低于母材区。

2.4 接头拉伸性能

母材及接头样品的拉伸性能测试结果如图 6 所示。



(a)屈服强度

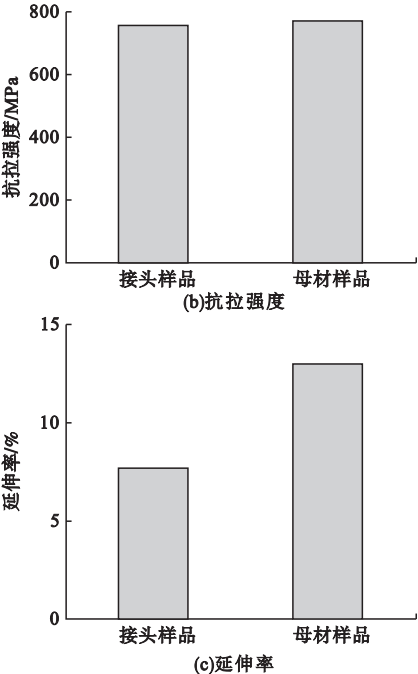


图 6 接头和母材样品拉伸性能

由图 6 可见,接头样品平均屈服强度、抗拉强度、断后延伸率分别为 509MPa、758MPa、7%,平均屈服强度与抗拉强度均达到母材的 98%,断后延伸率为母材的 59%。拉伸试样的主要变形区域在增材区靠近熔合区的位置,断口附近有较为明显的变形区产生,呈现杯锥状断口特征。

采用扫描电子显微镜对拉伸断口的表面形貌进行分析,如图 7 所示。

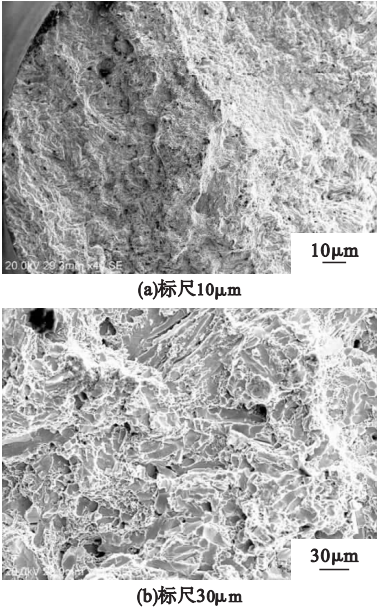


图 7 拉伸断口 SEM 形貌

由图 7 可见,在断口表面存在大量不同尺寸和形状的韧窝,可确定增材样品的高温拉伸断裂形式为韧性断裂。

增材样品的拉伸应力-应变曲线如图 8 所示。

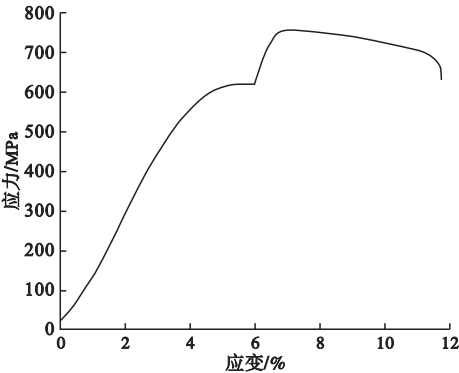


图 8 样品的拉伸应力-应变曲线

由图 8 可见,样品高温拉伸过程中,首先经历了较明显的弹性变形阶段;然后样品发生屈服;屈服后因内部变形导致其产生明显的加工硬化现象;随着变形的继续进行,样品在局部位置发生颈缩最终导致断裂。

3 结论

采用电弧增材方法对一种镍基定向凝固高温合金进行了氩弧焊修复,分析了接头的微观组织、显微硬度和高温拉伸性能等,主要结论如下。

(1) 电弧增材后,样品形成了理想的冶金结合,焊缝外观成形良好;接头内部呈典型的细枝晶生长形态,焊缝及结合界面附近无孔洞、裂纹等缺陷。

(2) 电弧增材区域的显微硬度略低于母材区,原因是焊接合金中 Al、Ti 和 Ta 等沉淀强化元素含量较低。

(3) 增材接头样品的高温拉伸屈服强度与抗拉强度均达到了母材的 98%,断后延伸率为母材的 59%;试样断裂在增材区靠近熔合区部位,断裂方式为微孔聚集性塑性断裂。

参考文献:

[1] 毛唯,李晓红,叶雷. 定向凝固 Ni、Al 基高温合金 IC6A 的真空钎焊[J]. 航空材料学报,2006(3):

- 103-106.
- [2] 刘纪德,金涛,赵乃仁,等. TLP 连接对一种镍基单晶高温合金拉伸性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2007(2):332-334.
- [3] 赵海生,潘晖,张学军,等. DZ40M 合金焊接钎焊接头组织与性能[J]. 焊接学报,2016,37(7):114-118.
- [4] 叶雷,毛唯,谢永慧,等. 定向凝固高温合金 IC10 瞬态液相(TLP)扩散焊接头组织研究[J]. 材料工程,2004(3):42-44.
- [5] 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(第1册),哈尔滨:黑龙江人民出版社,1999:219-222.
- [6] 叶雷,李晓红,毛唯,等. Hf 与 Zr 为降熔元素镍基钎料对 IC10 合金的钎焊[J]. 焊接学报,2009,30(2):137-140,160.
- [7] 万娣,房卫萍,陈和兴,等. 镍基高温合金 TLP 扩散焊中间层材料研究进展[J]. 焊接,2016(8):20-23,73.
- [8] 侯金保,张蕾,魏友辉. IC10 合金 TLP 扩散焊接头组织与强度分析[J]. 焊接学报,2008(3):89-92,157.
- [9] 侯金保,吴松,滕俊飞,等. IC10 合金 TLP 扩散焊技术[J]. 航空制造技术,2011(Z2):98-100.
- [10] 李文,金涛. Ni-Cr-Co-W-Mo-Ta-B 合金钎料的微观结构和润湿性[J]. 金属热处理,2012,37(8):27-29.
- [11] 李晓红,叶雷,钟群鹏,等. DD3 合金 TLP 扩散焊等温凝固过程研究[J]. 航空材料学报,2011,31(6):1-6.

(责任编辑:宋颖韬)

(上接第 60 页)

- [4] Wang Y, Chen H H, Tang J, et al. Preparation of magnetic metal organic frameworks adsorbent modified with mercapto groups for the extraction and analysis of lead in food samples by flame atomic absorption spectrometry[J]. Food Chem, 2015, 181(15):191-197.
- [5] Zhou Z H, Fu Y Q, Qin Q, et al. Synthesis of magnetic mesoporous metal organic framework-5 for the effective enrichment of malachite green and crystal violet in fish samples[J]. J Chromatogr A, 2018, 1560:19-25.
- [6] Wang Z Q, Cohen S M. Postsynthetic covalent modification of a neutral metal-organic framework[J]. J Am Chem Soc, 2007, 129(41):12368-12369.
- [7] Cohen S M. Postsynthetic methods for the functionalization of metal-organic frameworks[J]. Chem Rev, 2012, 112(2):970-1000.
- [8] 霍淑慧. 金属-有机骨架应用于有机污染物的去除和固相(微)萃取[D]. 天津:南开大学,2012.
- [9] Ma S Q, Wang X S, Yuan D Q, et al. A coordinatively linked Yb metal-organic framework demonstrates high thermal stability and uncommon gas-adsorption selectivity[J]. Angew Chem Int Ed Engl, 2008, 47(22):4130-4133.
- [10] Ma S Q, Zhou H C. A metal-organic framework with entatic metal centers exhibiting high gas adsorption affinity[J]. J Am Chem Soc, 2006, 128(36):11734-11735.
- [11] Ma S, Sun D, Wang X S, et al. A mesh-adjustable molecular sieve for general use in gas separation[J]. Angewandte Chemie, 2010, 46(14):2458-2462.

(责任编辑:李继龙,宋颖韬)