

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.06.10

钨极氩弧焊焊接参数对 M951 高温合金的 焊接热裂纹影响机制研究

文明月¹, 崔书瑞¹, 王雪峰¹, 王诗洋², 孙 元²

1. 沈阳理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110159

2. 中国科学院金属研究所 师昌绪创新研究中心, 辽宁 沈阳 110016

摘 要: 通过钨极氩弧焊对镍基高温合金 M951 制成的航空发动机热端部件实施修复, 能显著降低维护成本并延长发动机的使用寿命。本文主要研究了弧焊工艺参数及焊接材料对 M951 高温合金的焊接裂纹敏感性的影响, 并分析了不同工艺条件下的裂纹形成位置及其开裂机制。试验结果表明: M951 焊丝堆焊的焊接接头裂纹敏感性显著低于 GH4169 焊丝堆焊的接头。随着焊接电流的升高, 接头中的裂纹总长度以及总数量先增加后下降, 焊接电流较低时, 接头中出现的焊接热裂纹为沿熔化区枝晶间开裂的凝固裂纹; 焊接电流升高至 45 A 以上, 接头热影响区的晶界形成了大量液化裂纹; 随着焊接电流的增加, M951 堆焊接头中的裂纹敏感性先下降后升高, 焊接电流为 40 A 时, 裂纹敏感性最低。

关键词: M951 高温合金; 钨极氩弧焊; 焊接工艺参数; 焊接裂纹敏感性

中图分类号: TG453.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)06-0078-06

Investigation into the Mechanism of Hot Cracking in M951 Superalloy Influenced by Tungsten Inert Gas Welding Parameters

WEN Mingyue¹, CUI Shurui¹, WANG Xuefeng¹, WANG Shiyang², SUN Yuan²

1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China

2. Institute of Metal Research Chinese academic of science, Shenyang 110016, China

Abstract: The application of Tungsten Inert Gas (TIG) welding technology for repairing aero-engine hot-section components made of nickel-based superalloy M951 offers significant advantages in reducing maintenance costs and extending service life. This study systematically investigates the influence of arc welding parameters and filler materials on the hot cracking susceptibility of M951 superalloy, with particular focus on the crack initiation locations and underlying mechanisms under various welding conditions. Experimental results demonstrate that weld joints deposited with M951 filler wire exhibit markedly lower cracking susceptibility compared to those fabricated using GH4169 filler wire. The total crack length and number of cracks within the joint initially increase and then decrease with rising welding current. At lower current levels, cracks primarily propagate along the weld centerline, presenting as solidification cracks along interdendritic boundaries in the fusion zone. In contrast, higher welding currents promote the formation of liquation cracks within the heat-affected zone (HAZ). The minimum susceptibility to hot cracking was achieved at a welding current of 40 A.

Keywords: M951 superalloy; TIG welding; welding process parameters; weld crack susceptibility

引用格式: 文明月, 崔书瑞, 王雪峰, 等. 钨极氩弧焊焊接参数对 M951 高温合金的焊接热裂纹影响机制研究[J]. 电焊机, 2026, 56(6): 78-83.

Citation: WEN Mingyue, CUI Shurui, WANG Xuefeng, et al. Investigation into the Mechanism of Hot Cracking in M951 Superalloy Influenced by Tungsten Inert Gas Welding Parameters[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(6): 78-83.

收稿日期: 2025-09-24 修回日期: 2025-10-13

基金项目: 辽宁省教育厅青年基金项目(LJKQZ202230); 国家自然科学基金(52301098)

作者简介: 文明月(1992—), 女, 博士, 副教授, 主要从事异种钎焊接头的钎焊机理研究。E-mail: mywen_sylu@163.com。

0 引言

镍基高温合金具有非常优异的抗高温蠕变变形能力、抗氧化性^[1-3],在航空发动机热端部件中被大量地使用^[4-5]。其中 M951 合金是我国自主研发的一种镍基沉淀强化型高温合金^[6],具有初熔温度高、抗氧化性能优异、铸造性能良好和低成本、低密度的特点,在航空发动机热端部件的制造中被大量的应用^[7]。

焊接是发动机热端部件制造与维修中的常见工艺手段,然而由于高温合金中容易产生液化裂纹^[8]、应变时效裂纹以及凝固裂纹等多种焊接缺陷,严重地损害了焊接接头的高温服役性能^[9-11]。虽然采用激光焊、电子束焊等工艺方法能够有效地减少热影响区宽度,提高合金的凝固速率^[12],但是这类工艺方法普遍生产效率极低且操作极其不灵活,在面对大型且结构复杂热端部件的修复中应用的极为有限。钨极氩弧焊是一种操作效率高且成本低的焊接工艺,具有重要的经济价值与应用前景^[13-14]。然而如何在钨极氩弧焊(GTAW)过程中,基于工艺控制,避免焊接热裂纹是实现这一工艺在镍基高温合金中应用的前提条件^[15-16]。对于 M951 高温合金,目前的研究主要关注点在于其的高温氧化性能以及抗蠕变变形能力的研究,但是围绕其焊接热裂

纹的形成机理以及控制方法的研究开展得非常有限,如果采用钨极氩弧焊的工艺方法,同时基于焊接工艺参数调控有效地避免焊接热裂纹的形成,这对于 M951 高温合金的应用有非常重要的意义。

本文研究了 GTAW 工艺参数对 M951 高温合金的焊接热裂纹影响机制,提出了能够有效抑制 M951 高温合金堆焊修复组织焊接热裂纹的工艺方法,解决了 M951 高温合金的焊接热裂纹问题,具有重要的实际意义。

1 试验方法

本试验采用钨极氩弧焊方法对 M951 镍基高温合金进行表面堆焊。焊丝成分有两种,分别为 GH4169 焊丝与 M951 焊丝。GH4169 具有优异的塑性变形能力以及较好的可焊性,是目前用于镍基高温合金熔焊修复最常用的商用焊丝;M951 合金不具备良好的塑性成形能力,M951 焊丝是由 $\varnothing 25$ mm 的母合金铸锭制成,焊丝直径 $\varnothing 1.2$ mm,长度 150~185 mm。堆焊用基板焊板厚度为 5 mm,焊接前对基板表面进行打磨与抛光处理,采用有机溶剂清理表面油污。表 1 为 GH4169 与 M951 焊丝的成分,其中 GH4169 焊丝为商用焊丝,M951 焊丝则采用线切割的方式制备。

表 1 基板与焊丝的合金成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of the alloy between the substrate and the welding wire (wt. %)

名称	W	Mo	Nb	Co	Cr	Al	B	C	Y	Ni
M951 基板	3.5	3	2.2	5	9	6	0.024	0.05	0.017	余量
M951 焊丝	3.5	3	2.2	5	9	6	0.024	0.05	0.017	余量
GH4169 焊丝	—	3	4.75	—	18	0.5	0.006	—	—	余量

表面堆焊前对焊板表面进行抛光打磨和清洗处理,祛除表面氧化皮和污渍,为了与实际服役工况下的 M951 显微组织保持一致,在焊接前对焊板进行标准热处理,热处理工艺参数为:1250 °C/2 h/炉冷+950 °C/24 h/炉冷,焊接前祛除表面氧化膜和脏污,如图 1 所示。本研究中用到的焊机为 Miller Electric Millermatic® 142 型 TIG 焊机,采用双层平行堆焊的方式进行焊接,焊道宽度约为 1~1.5 mm,厚度为 0.4~0.7 mm,搭接率为 30%,如图 1 所示。图 1 给出了采用 GH4169 焊丝堆焊接头的宏观形貌以

及采用 M951 焊丝堆焊获得的宏观形貌,通过计算熔池的几何形状,其中 GH4169 焊丝的稀释率 η 在 50%~60% 之间,M951 堆焊接头的稀释率 η 约在 40%~50%,M951 焊丝堆焊接头的稀释率略低于 GH4169 堆焊接头的稀释率。

焊接速率为 15 cm/min,保护气体为 99.99% 的 Ar 气,气体流量为 15 L/min。其中焊接所采用的焊接电流为 30 A、35 A、40 A、45 A,焊接电压 10~12 V。焊接完成后,采用电火花线切割机切割堆焊样品的横截面,每个样品总计切割横截面 5 个,每个截面之

间的间距为 2 cm, 以保证样品取样的均匀性。将切割后的堆焊样品横截面通过打磨、抛光。腐蚀制备成标准金相样品。采用蔡司金相显微镜观察接头横截面显微组织形貌, 观察焊接裂纹的形态特征及其形成区域, 并对金相中观察到的中的焊接热裂纹的总长度 L 和总数量进行统计 N 。采用场发射扫描电镜对接头横截面出现的析出相进行形貌表征, 并采用 EDS 能谱对相合金成分进行标定。

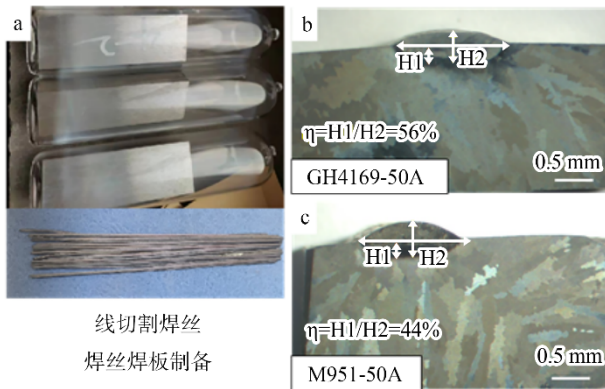


图1 (a)通过线切割获得的 M951 焊丝与用真空管封装的焊板; (b)GH4169 堆焊接头宏观形貌; (c)M951 堆焊接头宏观形貌

Fig. 1 (a) M951 welding wire obtained by wire electrical discharge machining and the welding plates sealed inside the vacuum glass tubes; (b) Macro-morphology of the joint deposited by GH4169; (c) Macro-morphology of the joint deposited by M951

2 试验结果

2.1 焊丝合金成分对接头裂纹敏感性的影响

本部分内容主要研究焊丝合金成分对接头显微组织形貌及裂纹敏感性的影响。对比了采用 GH4169 焊丝以及 M951 焊丝堆焊接头横截面显微组织。

图 2a、2b 为采用 GH4169 焊丝堆焊的接头横截面显微组织, 图 2c、2d 为采用 M951 高温合金焊丝堆焊的接头显微组织。采用 GH4169 焊丝堆焊时, 焊接热裂纹主要出现在接头热影响区中, 沿着热影响区的晶界分布, 焊接裂纹长度较大, 开裂现象严重。而采用 M951 焊丝堆焊时, 焊接热裂纹较少且短, 主要出现在熔化区或是熔化区与热影响区交界处的联生结晶区, 接头的成形质量较 GH4169 堆焊焊丝接头质量显著提高。

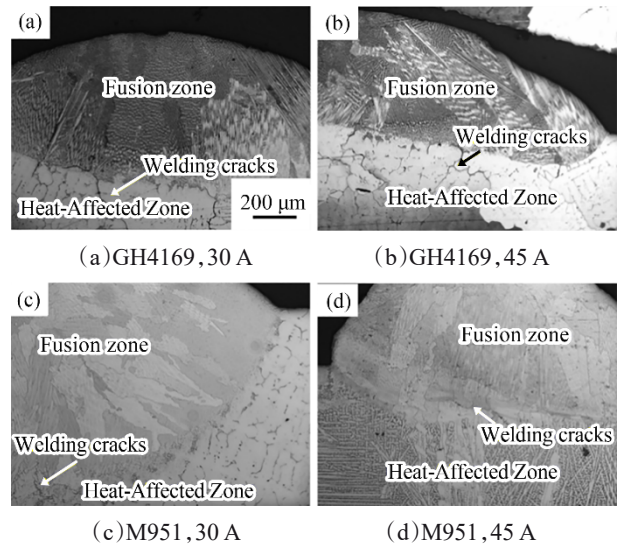


图2 堆焊接头组织

Fig. 2 Butt welding joint structure

图 3 为 GH4169 焊丝堆焊与 M951 焊丝堆焊形成的接头的熔化区、热影响区以及液化裂纹 (Liquation cracks) 的 SEM 显微组织形貌, 采用 M951 焊丝堆焊时, 熔化区的枝晶间析出相为 M_6C 型碳化物析出相, 采用能谱法对相成分进行标定, 主要为 W_6C ; 热影响区的晶界上分布 $MC-\gamma$ 共晶析出相, 为受热液化凝固后形成的共晶相, 在液化裂纹两侧可以观察到重熔的 NbC 析出相, 说明 M951 的晶界液化裂纹的形成与母材晶界的 MC 相析出物的组分液化造成的晶界开裂现象有关。采用 GH4169 焊丝堆焊, 熔化区的枝晶间析出块状的 NbC 析出相, 堆焊接头中热影响区液化裂纹的显微组织形貌与 M951 焊丝堆焊的热影响区形貌不同, 液化裂纹两侧不存在 $MC-\gamma$ 共晶。基于热裂纹形态特征观察, 说明采用 GH4169 焊丝与采用 M951 焊丝堆焊的液化裂纹形成机理是不同的。

为了进一步明确采用 GH4169 焊丝的热影响区液化裂纹形成机制, 对液化裂纹周围区域进行能谱分析。图 4 为采用 GH4169 焊丝堆焊的晶界液化裂纹的 SEM-EDS 的元素分布面扫描结果, 可以看出液化裂纹附近出现了 Nb 元素的富集, 但并未出现 C 和 B 的元素富集, 说明液化裂纹附近仅单纯的发生了低熔点元素的偏析, 但未形成析出相, 这可能是由于焊料中的低熔点元素沿晶界扩散, 导致晶界成分变化, 熔点降低从而造成的晶界液化裂纹, 这与

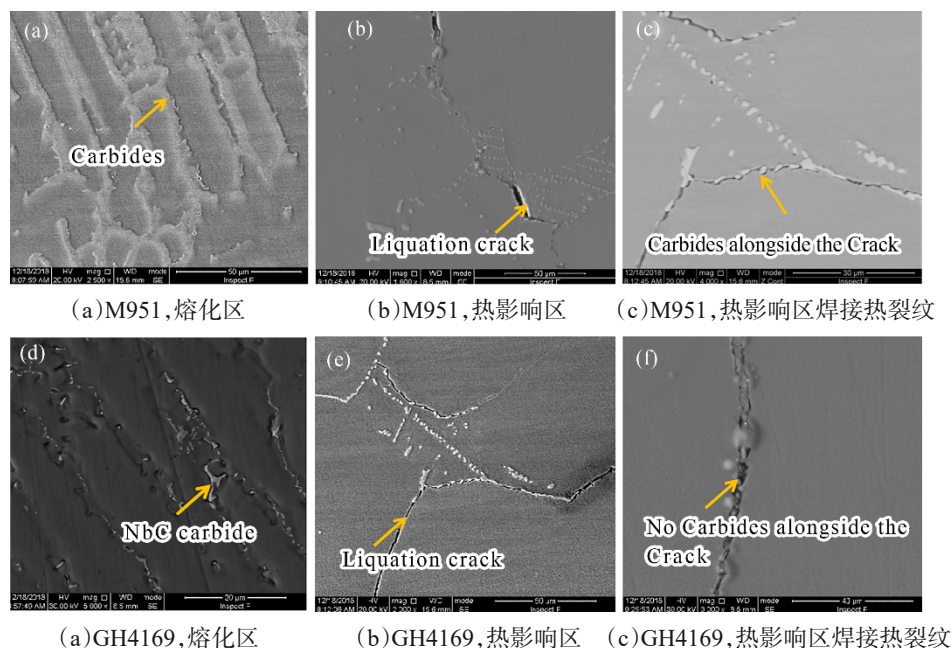


图3 M951、GH4169焊丝堆焊显微组织

Fig. 3 Microstructural morphology of the weld joint deposited by M951 and GH4169 wire

采用M951焊丝堆焊接头中因为晶界MC相发生组分液化形成的液化裂纹开裂现象是不同的。表2为图4中a、b、c、d四点的元素组成,可以看出靠近液化裂纹的c点的Nb元素含量显著高于a、b、d三点,而c

点出的碳含量异常偏高,可能是由于表面污染。M951中的Nb含量不高,Nb来源于GH4169。这也进一步说明GH4169堆焊接头中的液化裂纹开裂是由于焊丝成分导致的。

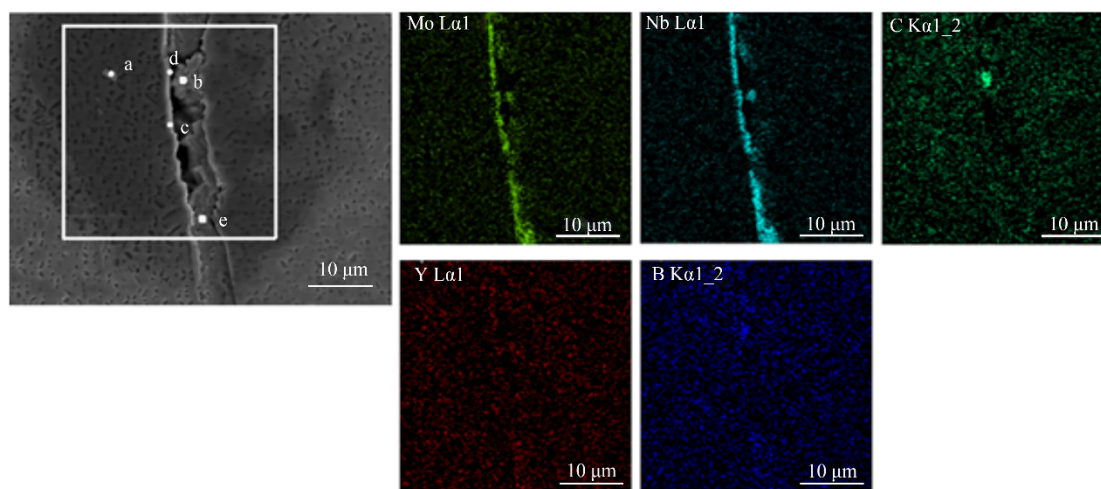


图4 GH4169的热影响区液化裂纹的高倍显微组织形貌与沿裂纹横向的元素线扫描分布图

Fig. 4 The high-power microstructure morphology of the liquefied crack in the heat-affected zone of GH4169 and the element line scan distribution along the transverse part of the crack

2.2 焊接工艺参数对接头裂纹敏感性的影响

焊接热输入能够影响接头的热循环过程,从而直接影响接头的显微组织形成过程,本部分研究了焊接电流对M951堆焊接头显微组织的形貌,如图5所示。当焊接电流为35 A时,热裂纹主要发生在熔

化区,沿熔化区的枝晶间开裂,其类型为凝固裂纹;随着焊接电流的升高,熔化区中的凝固裂纹消失,焊接热裂纹从熔化区逐渐转移至热影响区与熔化区相邻的联生结晶区,其主要类型为液化裂纹。焊接电流为40 A时,接头中未发现明显的热裂纹,然

表2 SEM-EDS点扫描结果(质量分数, %)

Table 2 SEM-EDS spot scan results of the corresponding regions given in Fig. 4 (wt. %)

位置	B	C	Al	Cr	Co	Ni	Y	Nb	Mo	W
a点	0	0	0.7	20.25	1	55.5	0	5.5	3.25	余量
b点	56.25	32.1	0.87	1.31	0.65	8.23	0	0.3	0.22	0.06
c点	0	73.68	0.55	1.69	0.5	6.77	0	14.71	1.64	0.45
d点	52.85	41.55	0.13	0.52	0.28	3.63	0.07	0.2	0.66	0.11
e点	0	63.29	1.79	4.92	1.63	26.76	0	0.48	0.61	0.52

而,随着焊接电流逐渐升高至45~50 A,接头中的焊接热裂纹大量出现。

图6a定量统计了随着焊接电流的变化,采用GH4169焊丝和M951焊丝获得的接头最大焊接裂纹长度以及在5个焊缝横剖面上观察到的焊接热裂纹的总数量。可以看出采用GH4169高温合金获得的堆焊接头,焊接热裂纹的数量以及长度显著大于采用M951堆焊的焊接接头。焊接电流为40 A时,两种焊丝获得的堆焊接头的焊接裂纹总数以及最大裂纹长度最小。此外,根据焊接裂纹的分布位置和形态可以区分所观察到的焊接热裂纹的类型,这

里主要发现了两种焊接热裂纹,一类为分布在熔化区的凝固裂纹,主要沿熔化区的枝晶间开裂,一种为分布在热影响区的液化裂纹,沿热影响区晶界开裂,图6b为两种类型的焊接裂纹的条数,可以看出采用GH4169焊丝堆焊的接头组织中焊接裂纹的主要类型为液化裂纹,凝固裂纹出现的概率较低,且随着焊接电流的升高,液化裂纹的敏感性显著增加。而采用M951焊丝堆焊的高温合金的焊接热裂纹敏感性最低,随着焊接电流的升高,裂纹的类型从凝固裂纹转变为液化裂纹。这主要是由于,热输入较低时,接头的冷却速率较大,焊接残余应力显著增大,此时熔化区的枝晶间液膜在张应力作用下,极易容易发生开裂,导致凝固裂纹的形成。由于此时焊接热输入较低,接头热影响区中不易形成液化裂纹。在金属液滴冷却凝固的过程中,热影响区受到压应力,熔化区受拉应力,若焊接冷却速率过大则会造成沿着熔化区中心的贯穿裂纹。随着焊接电流的增加,热输入增加,热影响区的受热更加严重,导致热影响区的晶界析出相与基体发生局

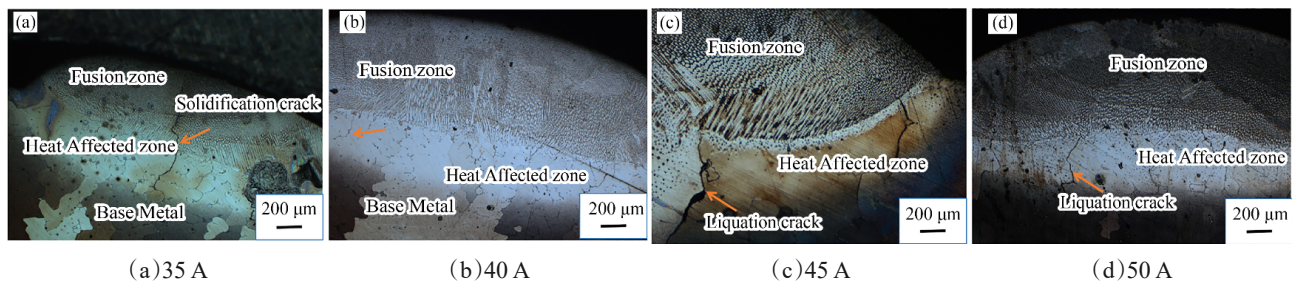


图5 不同焊接电流条件下M951焊丝堆焊接头的横截面显微组织形貌

Fig. 5 Microstructures of the welding joint deposited by M951 under different welding currents

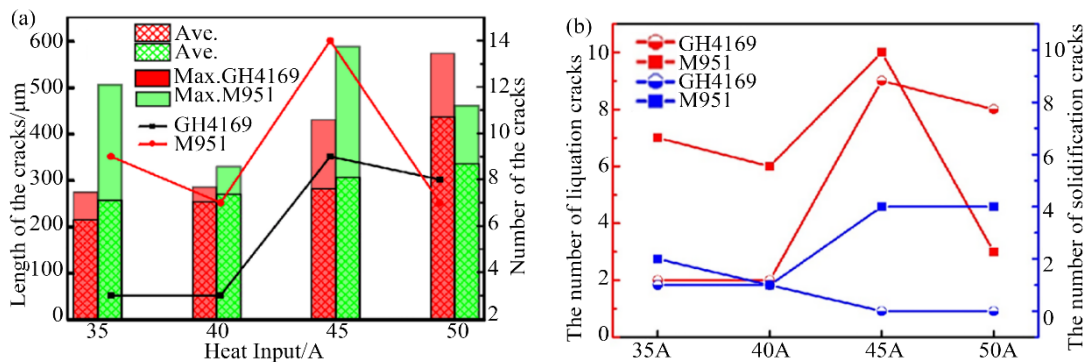


图6 (a)两种不同焊丝焊接高温合金的接头中的热裂纹的总长度及总数量;(b)随着焊接电流的变化,接头中的凝固裂纹以及液化裂纹两类裂纹的数量

Fig. 6 (a)The total length and total number of hot cracks in the joints bonded by two different welding wires;(b)The counts of two types of cracks, solidification cracks and liquation cracks, in joints welded at different welding currents

部重熔,形成低熔点共晶组织,晶界液化裂纹开裂的敏感性增加。

3 结论

本文主要研究了修复堆焊材料及弧焊工艺参数及对 M951 高温合金的焊接裂纹敏感性的影响,并分析了不同工艺条件下的裂纹形成位置及其开裂机制,本文的主要结论如下:

(1)采用 GH4169 焊丝堆焊获得的接头组织中主要的热裂纹缺陷为热影响区液化裂纹,随着焊接电流的增高,液化裂纹的数量和长度也显著增加。

(2)随着焊接电流的增加,M951 堆焊接头中的裂纹敏感性先下降后升高,焊接电流为 40 A 时,裂纹敏感性最低,为推荐焊接工艺。合金接头中的热裂纹由熔化区中的凝固裂纹转变为沿热影响区晶界分布的液化裂纹。

(3)采用 M951 焊丝堆焊获得的接头组织其裂纹敏感性要显著低于采用 GH4149 焊丝堆焊获得的接头组织,这与 M951 低 Nb 含量的成分特征相关。

参考文献:

- [1] 刘阳,徐靖,宁挺,等.激光粉末床熔融 Inconel718 合金工艺优化与组织演变[J].中国粉体技术,2024,30(1):23-35.
LIU Y, XU J, NING T, et al. Process Optimization and microstructure evolution of Inconel 718 alloy melting by laser powder bed [J]. China Powder Science and Technology, 2024, 30(01): 23-35.
- [2] 刘威,王润,华鹏,等.不同保温时间对 GH4169 合金抗氧化性能的影响[J].当代化工研究,2023(22): 35-37.
LIU W, WANG R, HUA P, et al. Effect of different holding time on oxidation resistance of GH4169 alloy [J]. Modern Chemical Research, 2023(22): 35-37.
- [3] Gong G, Wang Z, Du X, et al. Comparative study on mechanical properties and high temperature oxidation behaviour of Hastelloy X and Inconel 718 fabricated by laser directed energy deposition[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 28: 2624-2635.
- [4] 段继萱,安腾,王成宇,等.固溶温度对一种新型镍基高温合金微观组织和力学性能的影响[J].金属热处理,2023,48(12):13-20.
- [5] DUAN J X, AN T, WANG C Y, et al. Effect of solution temperature on microstructure and mechanical properties of a new type of nickel-based superalloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48(12): 13-20.
- [6] XIE Q, QI H, LI S, et al. Experimental and numerical investigation of mixed-mode fatigue crack growth in nickel-based superalloy at high temperature [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 273: 108736.
- [7] 周鹏杰,于金江,孙晓峰,等. M951 镍基高温合金的高温高周疲劳性能[J].机械工程材料,2013,37(07): 77-81+102.
ZHOU P J, YU J J, SUN X F, et al. High temperature and high cycle fatigue properties of M951 nickel-based superalloy [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2013, 37(07): 77-81+102.
- [8] 连占卫,于金江,孙晓峰,等.热处理对 M951 合金显微组织及拉伸性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2008(05):798-802.
LIAN Z W, YU J J, SUN X F, et al. Effect of heat treatment on microstructure and tensile properties of M951 alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008(05): 798-802.
- [9] 许佳玉.选区激光熔化 Inconel738 合金的组织性能调控及成分优化设计研究[D].甘肃:兰州理工大学,2023.
XU J Y. Regulation of Microstructure and Properties with Composition Optimization Design for Inconel 738 Superalloy Fabricated by Selective Laser Melting [D]. Gansu: Lanzhou University of Technology, 2023.
- [10] 李尧,寇浩南,李梦阳,等.激光增材制造沉淀强化镍基高温合金热裂纹研究进展[J].表面技术,2024,53(07):1-14.
LI Y, KOU H N, LI M Y, et al. Research progress on hot cracking of Laser Additive Manufacturing Precipitation Strengthened Nickel-Based Superalloys [J]. Surface technology, 2024, 53(07): 1-14..
- [11] Adegoke O, Kumara C, Thuvander M, et al. Scanning electron microscopy and atom probe tomography characterization of laser powder bed fusion precipitation strengthening nickel-based superalloy [J]. Micron, 2023, 171: 103472.
- [12] Yu H, Liang J, Bi Z, et al. Computational design of novel Ni superalloys with low crack susceptibility for additive manufacturing [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2022, 53(6): 1945-54.
- [13] 黎龙宾.堆焊熔敷金属非平衡组织耐磨性能机理研