

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.04.21

20Cr32Ni1Nb 高温合金焊接接头组织及力学性能研究

张泽浩¹, 肖明颖²

1. 烟台玛努尔高温合金有限公司, 山东 烟台 264034

2. 烟台哈尔滨工程大学研究院, 山东 烟台 264006

摘要: 采用高镍和低镍两种焊丝氩弧焊接 20Cr32Ni1Nb 铸造耐热合金炉管, 旨在研究 20Cr32Ni1Nb 高温合金焊接接头的组织和力学性能。通过金相、硬度和拉伸等表征测试方法对比分析两种焊接接头的显微组织和力学性能。结果表明, 焊接接头的母材由柱状奥氏体晶粒和网状晶界构成, 焊缝是由细小的针状或者柱状奥氏体晶粒和沿晶界分布的链状或者块状碳化物构成。受焊接热输入影响, 热影响区的母材晶粒粗化, 并在晶界处析出二次碳化物; 焊接接头热影响区的显微硬度较母材下降约 20 HV_{0.2}; 低镍焊缝的显微硬度略低于高镍焊缝, 更接近于母材, 约为 220 HV_{0.2}, 这有利于改善焊接接头的整体力学性能。两种焊接接头拉伸性能均满足焊接评定要求, 其短时拉伸力学性能相近, 但低镍焊接接头的高温拉伸持久时间远超高镍焊接接头, 达 3.9 倍, 这是因为低镍焊缝更易析出碳化物, 阻碍晶界滑移和位错聚集, 进而提高其抗蠕变性能。低镍焊丝更适合 20Cr32Ni1Nb 合金的焊接。

关键词: 高温合金; 焊接接头; 焊材成分; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2024)04-0141-07

Microstructure and Mechanical Properties of 20Cr32Ni1Nb Superalloy Weld Joint

ZHANG Zehao¹, XIAO Mingying²

1. Yantai Manoir Heat Resistant Alloys Co., Ltd., Yantai 264034, China

2. Yantai Research Institute of Harbin Engineering University, Yantai 264006, China

Abstract: The 20Cr32Ni1Nb cast heat-resistant alloy furnace tube was welded by argon arc welding with high nickel and low nickel welding wires. The microstructure and mechanical properties of the two weld joints were compared and analyzed by optical microscopy, hardness test, and tensile test. The experimental results show that the base material of the weld joint is composed of columnar austenite grains and network grain boundaries, while the weld metal is composed of small needle or columnar austenite grains and chain or block carbides distributed along the grain boundaries. Affected by welding heat input, the grain size of the base metal located in the heat affected zone becomes larger and secondary carbides precipitate at the grain boundaries. The microhardness of the heat-affected zone of the weld joint decreases by about 20HV_{0.2} compared to the base metal. The microhardness of low nickel welds is slightly lower than that of high nickel welds, which is similar to the base metal and is about 220HV_{0.2}, which is beneficial for improving the mechanical properties of weld joints. The tensile mechanical properties of the two weld joints meet the welding qualification requirements, and their short-term tensile mechanical properties are the same. However, the high-temperature tensile endurance of low-nickel weld joints is 3.9 times that of high-nickel weld joints. This is because low nickel alloy welds are more prone to precipitation of carbides, hindering grain boundary slip and dislocation aggregation, and improving their creep resistance.

Keywords: superalloy; welding; consumables composition; microstructure; mechanical property

收稿日期: 2023-09-13 修回日期: 2023-10-11

作者简介: 张泽浩(1982—), 男, 学士, 工程师, 从事高温合金材料焊接工作。E-mail: zhangzhyt@126.com。

引用格式:张泽浩,肖明颖. 20Cr32Ni1Nb 高温合金焊接接头组织及力学性能研究[J]. 电焊机, 2024, 54(4): 141-147.

Citation:ZHANG Zehao, XIAO Mingying. Microstructure and Mechanical Properties of 20Cr32Ni1Nb Superalloy Weld Joint[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(4): 141-147.

0 前言

耐热合金能够在高温环境(一般 650~1 315 °C 范围内)服役时仍能保持其原有力学性能,能够在较长时间内承受高温氧化腐蚀侵害,不会过快出现疲劳、蠕变、断裂和腐蚀等失效^[1]。因此,耐热合金在石油化工、冶金制造、航天航空、国防军工等行业有着广泛应用。按照合金化学成分分类,耐热合金可以分成 Fe-Cr、Fe-Cr-Ni、Fe-Ni-Cr 和 Ni-Fe-Cr 四个体系。其中,Fe-Ni-Cr 系耐热合金的 Ni 元素含量为 23%~41%,Cr 元素含量为 15%~28%;其主要由稳定的奥氏体构成,具备高抗热循环和热应力以及高抗氧化和热腐蚀性能;同时具备良好的抗渗碳性,特别适用于制备高温烃裂解炉炉管^[2]。炉管工作环境恶劣,以乙烯裂解炉为例,炉管外壁温度可达 1 000 °C 以上,炉管内介质温度约为 850 °C;炉管内的烃类反应产物会造成其内外壁氧化、硫化 and 渗碳;除此之外,炉管还要承受内部压力、自身重量、温度差异引起的疲劳和热冲击作用^[3]。近年来,20Cr32Ni1Nb 铸造耐热合金凭借其良好的高温抗拉强度、抗蠕变性能、抗高温氧化、腐蚀、渗碳性能以及良好的经济性,成为烃类裂解炉炉管理想的备选

材料^[4-5]。根据行业标准 SH/T 3417《石油化工管式炉高合金炉管焊接工程技术条件》规定,20Cr32Ni1Nb 铸造耐热合金炉管一般采用高镍合金焊丝 SNI6082 焊接,其 Ni 元素含量高达 70%,具有良好的焊接工艺性,但其高温抗拉强度低,且成本较高。从焊材成分相匹配角度来看,与母材成分匹配的焊材既能实现与母材力学性能的匹配,又可兼顾经济性;因此,该类型焊材具有更好的应用前景。

本研究采用高镍和低镍两种焊丝分别进行 20Cr32Ni1Nb 铸造耐热合金炉管的焊接,表征分析这两种焊接接头的显微组织,常温、高温力学性能,探讨焊材成分对焊接接头组织和性能的影响。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

母材选用国内某公司离心铸造的高温承压炉管(ZG 20Ni32Cr20Nb),尺寸为 212 mm(直径)×150 mm(长度)×11 mm(壁厚),其化学成分如表 1 所示,符合标准 HG/T 2601《高温承压用离心铸造合金炉管》的相关要求。焊材分别选用高镍和低镍氩弧焊丝,直径均为 2.4 mm,其化学成分如表 2 所示。

表 1 母材化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of base metal (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb	Mo	Fe
0.12	0.40	1.78	0.002	0.001	24.56	34.18	1.46	0.32	37.177

表 2 焊材化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of welding consumables (wt. %)

焊材	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb	Ti	Cu	Mo	Fe
高镍	0.016	0.04	2.85	0.0035	0.003 5	20.48	70.07	2.73	0.282	0.010	—	1.690
低镍	0.158	0.20	6.67	0.0021	0.001	22.30	31.37	1.342	—	0.014	0.03	37.917

1.2 工艺参数

试验采用钨极氩弧焊,坡口形式如图 1 所示,工艺参数如表 3 所示。焊接前,使用砂纸打磨待焊坡口,并用酒精擦拭后烘干,除去其表面的氧化膜和油污。焊接过程中,根部焊道背面通氩气保护以保

证其成形质量,层间温度控制在 150 °C 内。焊接结束后,分别采用渗透(PT)和 X 射线(RT)探伤,确保焊接接头无表面和内部缺陷。

1.3 测试方法

采用光学显微镜(Axio Lab.A1)观察焊接接头

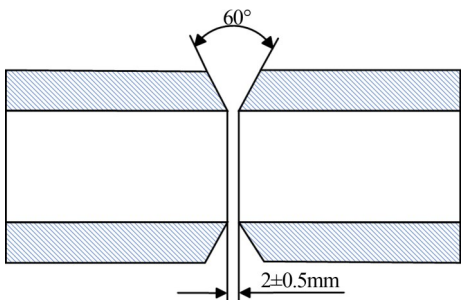


图1 焊接坡口示意

Fig. 1 Welding groove

表3 焊接工艺规范

Table 3 Welding process specification

焊道	电极极性	焊接电流 /A	焊接电压 /V	背部保护气流 量/(L·min ⁻¹)	保护气流量 /(L·min ⁻¹)
根部	直流反接	85~110	9~11	15	10~15
填充	直流反接	95~120	10~12	15	10~15
盖面	直流反接	95~120	10~12	15	10~15

不同区域的显微组织,取样位置如图2a所示;观察前,采用王水(浓硝酸:浓盐酸=1:3)作为腐蚀试剂,对打磨抛光后的焊接接头进行腐蚀,腐蚀反应时间约为8 s。

采用显微硬度计(HV-1000A)测试焊接接头不同区域的显微硬度,如图2b所示;测试过程中,施加载荷为0.2 kg,持续时间为10 s。采用微机控制万能拉伸试验机(E45)进行常温拉伸、高温短时拉伸和高温持久试验。常温拉伸试样标距长度50 mm,直径10 mm。高温短时拉伸试样标距长度50 mm,直径5 mm,测试温度900 ℃。高温持久拉伸试样标距长度50 mm,直径5 mm,测试温度900 ℃,拉伸应力设置为40 MPa。

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

高镍焊丝焊接接头金相组织如图3所示,观察区域分别为母材、焊缝和熔合线位置。图3a为母材的金相组织,由柱状奥氏体晶粒和网状晶界构成;高Cr和Ni含量是形成奥氏体基体的主要原因,其由 γ 相、 γ' 相(Ni_3AlTi)、 γ'' 相(Ni_3Nb)和碳化物相构成;网状晶界则是碳化物相,其一般由NbC和 M_{23}C_6 构成^[6-7]。图3b是焊缝的金相组织,其由细小的柱

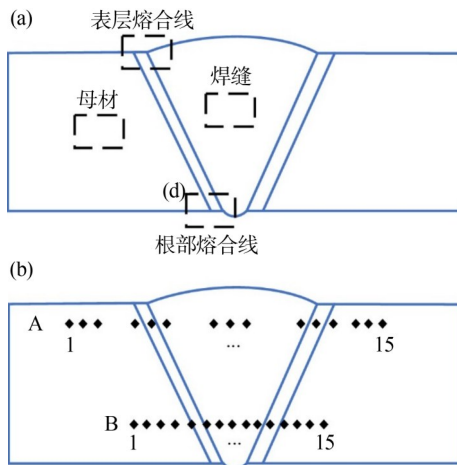


图2 金相观察和显微硬度测试示意

Fig. 2 Schematic diagram for optical microscopy and microhardness testing

状奥氏体晶粒和沿晶界分布的链状或者块状碳化物构成;焊缝柱状晶由熔池边缘向中心生长,这是因为在熔池的凝固过程中,熔池边缘和熔池中心会形成较高的温度梯度,受温度梯度的驱动,熔池由边缘向中心非均匀形核,凝固生成柱状晶^[8]。图3c、图3d分别为焊接接头表层和根部熔合线区域的金相组织。由图可见,焊缝金属和母材熔合良好,无未熔合和裂纹缺陷;热影响区仍保持为“奥氏体柱状晶+网状晶界”结构,然而,受焊接热输入影响,奥氏体基体中析出颗粒状的二次碳化物^[9]。同时,可以观察到网状晶界的宽度增加,这是因为晶界区域的析出碳化物造成该区域C浓度降低,在奥氏体基体和晶界之间形成了C浓度梯度,驱动C原子由基体向界面扩散,而焊接热输入加速了C原子扩散和二次碳化物生成。

图4是低镍焊丝焊接接头的金相组织,观察区域分别为母材、焊缝和熔合线。与图3对比可知,两种焊接接头各区域的金相组织特征相似。焊接接头热影响区的金相组织几乎一致,这是因为两种焊接接头制备选用了相同的焊接工艺参数,其对热影响区的影响几乎相同。与高镍焊丝焊接接头的有区别的是,低镍焊丝焊接接头焊缝的柱状晶组织更为粗大,这主要是受焊丝化学成分影响造成的。

2.2 显微硬度

两种焊接接头的显微硬度测试结果如图5所示,测试区域包括母材、热影响区和焊缝。由图5a

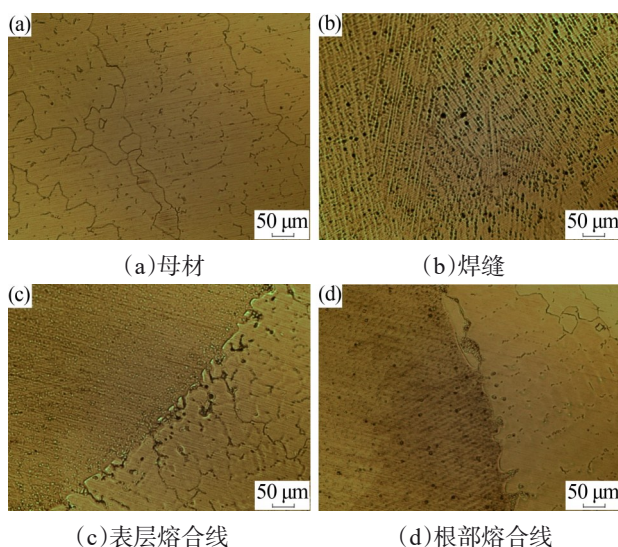


图3 高镍焊接接头显微组织

Fig. 3 Microstructure of weld joint with high-nickel content

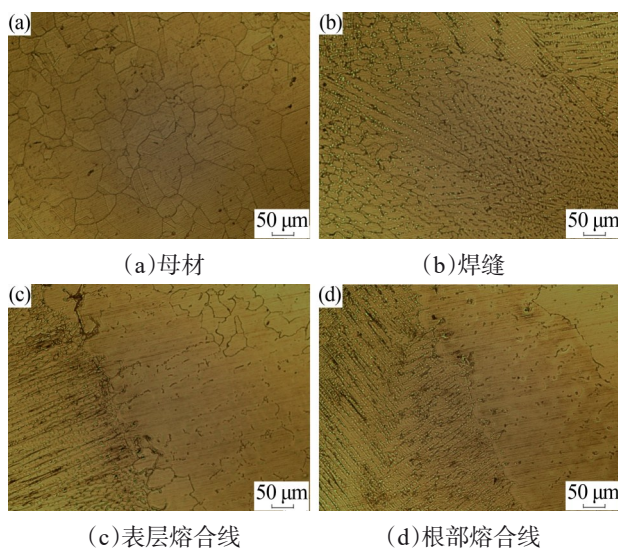
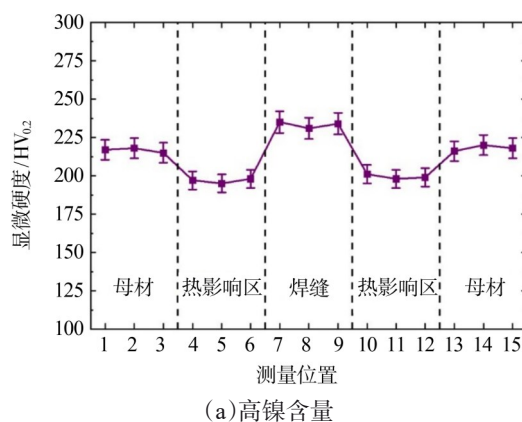


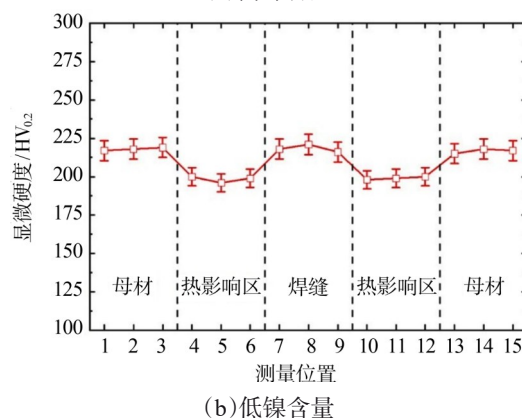
图4 低镍焊接接头显微组织

Fig. 4 Microstructure of weld joint with low-nickel content

可知,对于高镍焊接接头,母材的平均显微硬度约为 $220 \text{ HV}_{0.2}$;热影响区的平均显微硬度较母材略有下降,约为 $200 \text{ HV}_{0.2}$,这是因为受焊接热输入影响,热影区的晶粒发生粗化^[11];而焊缝的平均显微硬度有所提升,约为 $235 \text{ HV}_{0.2}$ 。对于低镍焊接接头,如图5b所示,其硬度分布规律与高镍焊接接头相似;所不同的是,低镍焊接接头的焊缝平均显微硬度更接近于母材,约为 $220 \text{ HV}_{0.2}$ 。也就是说,低镍焊接接头的显微硬度变化更为平缓,这更有利于提升焊接接头的整体力学性能。



(a)高镍含量



(b)低镍含量

图5 焊接接头显微硬度

Fig. 5 Microhardness of weld joints

2.3 拉伸力学性能

根据GB/T228《金属材料室温拉伸试验方法》和GB/T4338《金属材料高温拉伸试验方法》分别测试高镍和低镍焊接接头的拉伸力学性能。

两种焊接接头的常温拉伸应力应变曲线如图6所示。在图6中分别读取两种焊接接头的常温屈服强度和抗拉强度,如表4所示。由表4可知,高镍焊接接头的常温屈服强度为 294 MPa ,抗拉强度为 540 MPa ,断裂在焊缝位置;低镍焊接接头的常温屈服强度和抗拉强度略有提升,分别为 313 MPa 和 550 MPa ,同样断裂在焊缝位置。

图7是两种焊接接头的高温(900°C)拉伸应力-应变曲线。两种焊接接头的高温拉伸应力应变曲线形状基本一致。在图7分别读取两种焊接接头的高温屈服强度和抗拉强度,如表5所示。由表5可知,高镍焊接接头的高温屈服强度(104.5 MPa)略低于低镍焊接接头(108 MPa);但是,两者的高温抗拉

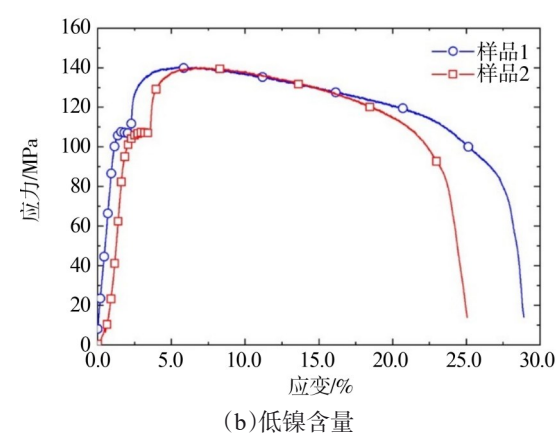
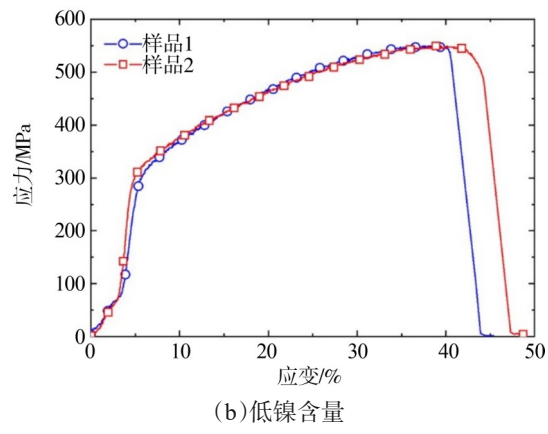
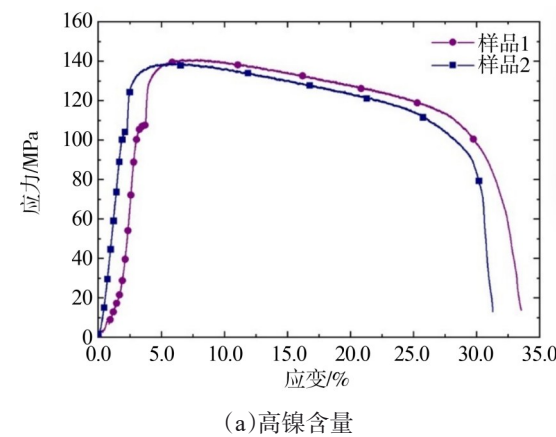
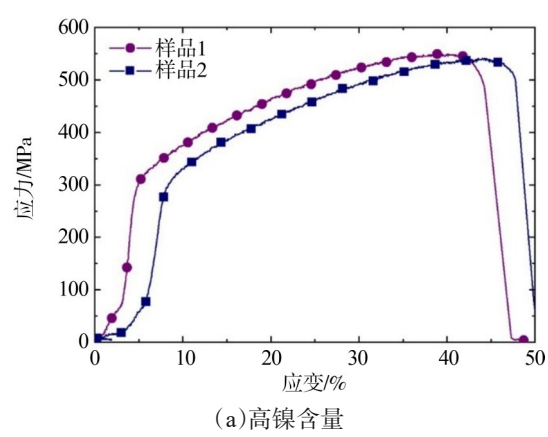


图 6 焊接接头的常温应力应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curve of weld joints at room temperature

图 7 焊接接头的高温(900 °C)应力应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curve of weld joints at 900 °C

表 4 焊接接头常温拉伸力学性能

Table 4 Tensile mechanical properties of joints at room temperature

焊接试样	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断裂位置
高镍 样品 1	286	539	焊缝
高镍 样品 2	302	541	焊缝
高镍 平均值	294	540	—
低镍 样品 1	309	549	焊缝
低镍 样品 2	317	551	焊缝
低镍 平均值	313	550	—

表 5 焊接接头高温(900 °C)拉伸力学性能

Table 5 Tensile mechanical properties of weld joints at 900 °C

焊接试样	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断裂位置
高镍 样品 1	105	141	焊缝
高镍 样品 2	104	139	焊缝
高镍 平均值	104.5	140	—
低镍 样品 1	110	140	焊缝
低镍 样品 2	106	140	焊缝
低镍 平均值	108	140	—

强度相同(140 MPa),且均在焊缝位置断裂。

表 6 是两种焊接接头的高温持久拉伸测试结果,测试温度为 900 °C,拉伸应力为 40 MPa。由表 6 可知,高镍焊接接头经历 191 h 拉伸后在焊缝位置断裂;而低镍焊接接头的高温拉伸持久时间则大幅提升至 744 h,同样也在焊缝位置断裂。

综合分析上述结果可知,两种焊接接头拉伸力学性能指标均满足焊接评定标准要求,即常温抗拉强度 ≥ 450 MPa,高温(900 °C)抗拉强度 ≥ 102 MPa,高温(900 °C, 40 MPa)拉伸持久时间 ≥ 100 h。两种焊

表 6 焊接接头高温持久拉伸测试

Table 6 Tensile mechanical properties of weld joints at 900 °C

焊接试样	测试温度/°C	拉伸强度/MPa	持久时间/h	断裂位置
高镍焊材 样品 1	900	40	182	焊缝
高镍焊材 样品 2	900	40	200	焊缝
高镍焊材 平均值	—	—	191	—
低镍焊材 样品 1	900	40	754	焊缝
低镍焊材 样品 2	900	40	734	焊缝
低镍焊材 平均值	—	—	744	—

接接头的高低温短时拉伸力学性能基本相同,但低镍焊接接头的高温拉伸持久时间远超高镍焊接接头,前者是后者的3.9倍。因此,低镍焊接接头的高温力学性能优于高镍焊接接头。另外,值得注意的是两种焊接接头断裂位置均为焊缝,说明焊缝是高温合金焊接接头的薄弱区域。

由图3、图4可知,母材显微组织是由柱状奥氏体晶粒和沿晶界分布的骨架状碳化物构成的;而焊缝组织则是由细小的针状或者柱状奥氏体晶粒和沿晶界分布的链状或者块状碳化物构成的。当焊接接头受到拉伸作用时,首先是晶粒变形,然后是晶界聚集,生成大量微孔,进而诱导位错聚集形成位错环,最终导致断裂^[12]。由于母材的晶粒尺寸较大,其晶粒变形比焊缝组织吸收更多的能量;因此,拥有更好的拉伸力学性能。奥氏体相是耐热钢抗蠕变的根本,Ni是促进奥氏体相形成元素,Ni/Cr比例决定了奥氏体相的形成。结合舍夫勒相图计算可知,两种焊材的Ni/Cr比分别为3.0和1.7,因此,无论是高镍含量还是低镍含量,两种焊缝金属均由奥氏体相组成,这为其高温力学性能奠定了良好基础。另外,现有的研究表明焊缝金属的高温持久强度与二次碳化物的析出密切相关,析出的碳化物可以阻碍晶界滑移和位错聚集,增加材料的抗蠕变性能^[12]。高镍焊接接头的C含量仅为0.016%,远低于低镍焊接接头(0.16%);其在高温测试的初始阶段过程中更容易析出二次碳化物 $M_{23}C_6$ 或者NbC,阻碍晶界滑移,大幅提升其高温持久时间。

3 结论

分别采用高镍和低镍两种焊丝焊接20Cr32Ni1Nb铸造耐热合金炉管,表征分析两种焊接接头的显微组织和力学性能,得到如下结论:

(1)金相观察结果表明,母材组织由柱状奥氏体晶粒和网状晶界构成;焊接接头的热影响区仍为柱状晶组织,但焊接热输入促进了该区域的晶粒长大和二次碳化物生成;焊缝组织由细小的针状或者柱状奥氏体晶粒和沿晶界分布的链状或者块状碳化物构成的。

(2)显微硬度测试结果表明,高温合金焊接接

头热影响区出现软化现象,其显微硬度较母材下降20 HV_{0.2},这主要是晶粒粗化造成的;低镍焊缝的显微硬度低于高镍焊缝,与母材硬度更为匹配,约为220 HV_{0.2},这有利于提升焊接接头的整体力学性能。

(3)拉伸测试结果表明,两种焊接接头拉伸力学性能指标均满足焊接评定要求,其短时拉伸力学性能基本相同,这是因为两种焊接接头均主要由奥氏体相组成,具备相近的力学性能基础。但是,低镍焊接接头的高温持久拉伸力学性能大幅提高,约为高镍焊接接头3.9倍,这是因为低镍合金焊缝更容易析出碳化物,阻碍晶界滑移和位错聚集。两种焊接接头断裂位置均为焊缝,焊缝区域是焊接接头的薄弱环节;这是因为在拉伸过程中,较大尺寸的母材晶粒变形需要吸收更多的能量。

参考文献:

- [1] 褚强,谢红,李文亚,等. 高温合金熔焊接头组织性能研究现状[J]. 铸造技术, 2022, 43(11): 955-963.
CHU Q, XIE H, LI W Y, et al. Research Status of the Microstructure and Properties of Fusion Welding of Superalloys [J]. Foundry Technology, 2022, 43(11): 955-963.
- [2] 朱日彰,卢亚轩. 耐热钢和高温合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 1996.
- [3] 王慧,徐仁根,李志娟,等. HP-40Nb 乙炔裂解炉管开裂失效分析[J]. 材料导报, 2022, 36(S2): 397-401.
WANG H, XU R G, LI Z J, et al. Failure Analysis of Cracking in HP-40Nb Ethylene Cracking Furnace Tubes[J]. Materials Reports, 2022, 36(S2): 397-401.
- [4] Dewar M P. Characterization and evaluation of aged 20Cr32Ni1Nb stainless steels [D]. Alberta: University of Alberta, 2013.
- [5] Hoffman J J, Gapinski G E. High temperature aging characteristics of 20Cr32Ni1Nb castings[C]//Montreal: 46th International Conference Annual Safety in A, Orlando, Florida, 2000.
- [6] Shi S, Lippold J C. Microstructure evolution during service exposure of two cast, heat-resisting stainless steels-HP-Nb modified and 20-32Nb [J]. Materials Characterization, 2008, 59(8): 1029-1040.
- [7] Dewar M P, Adrian G. Correlation between experimental and calculated phase fractions in aged 20Cr32Ni1Nb austenitic stainless steels containing nitrogen[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(2):

- 627–639.
- [8] 孙文君,王善林,谭观华,等. 材料状态对 GH4169 高温合金激光焊接接头组织与性能的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 83–92.
- SUN W J, WANG S L, TAN G H, et al. Effect of Material States on Microstructure and Properties of GH4169 Superalloy Laser-Welded Joint[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 83–92.
- [9] 吴家云. 焊后热处理对 GH648 镍基合金氩弧焊接接头组织和性能影响的研究[J]. 焊接, 2014(11): 10–13.
- WU J Y. Effect of post weld heat treatment on microstructures and mechanical properties of argon-arc welded joints of GH648 nickel-based alloy[J]. Welding & Joining, 2014(11): 10–13.
- [10] 王斌,刘本鑫,郭晓峰,等. 高温时效对 20Cr32Ni1Nb 奥氏体不锈钢微观组织演化及高温力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(14): 121–125+130.
- WANG B, LIU B X, GUO X F, et al. Effects of High Temperature Aging on Microstructure Evolution and High Temperature Mechanical Properties of 20Cr32Ni1Nb Austenite Stainless Steel[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(14): 121–125+130.
- [11] 余凌峰,梁宇,周磊. GH4169 高温合金焊接接头的组织与性能[J]. 金属热处理, 2014, 39(04): 88–91.
- YU L F, LIANG Y, ZHOU L. Microstructure and mechanical properties of GH4169 superalloy welded joint[J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(04): 88–91.
- [12] 李祚,隋尚,袁子豪,等. 高沉积率激光熔覆沉积 GH4169 合金的微观组织与拉伸性能[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 108–114.
- LI Z SUI S, YUAN Z H, et al. Microstructure and Tensile Properties of High-Deposition-Rate Laser Metal Deposited GH4169 Alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 108–114.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第 140 页

- [14] 许鸿吉,赵雯雯,王春生,等. 1.4003 不锈钢与 0Cr18Ni9 不锈钢焊接接头组织和力学性能[J]. 焊接技术, 2008, 37(06): 12–14.
- XU H J, ZHAO W W, WANG C S, et al. Microstructures and mechanical properties of welding joint of 1.4003 ferritic stainless steel and 0Cr18Ni9 austenitic stainless steel[J]. Welding Technology, 2008, 37(06): 12–14.
- [15] Shao Y, Liu C X, Yue T X, et al. Effects of static recrystallization and precipitation on mechanical properties of 00Cr12 ferritic stainless steel[J]. Metall. Mater. Trans., 2018, 49: 1560–1567.
- [16] 王永强,李娜,林苏华. 不锈钢点蚀研究概述[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015, 27(04): 387–392.
- WANG Y Q, LI N, LIN S H. Review on pitting corrosion of stainless steel[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2015, 27(04): 387–392.
- [17] Toppo A, Kaul R, Pujar M G, et al. Enhancement of corrosion resistance of type 304 stainless steel through a novel thermo-mechanical surface treatment[J]. J Mater Eng Perform, 2013, 22(2): 632–639.
- [18] 于阳,卢琳,李晓刚. 微区电化学技术在薄液膜大气腐蚀中的应用[J]. 工程科学学报, 2018, 40(6): 649–657.
- YU Y, LU L, LI X G. Application of micro-electrochemical technologies in atmospheric corrosion of thin electrolyte layer[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(6): 649–657.
- [19] 李帅,刘中英,王星星,等. 补焊对 7N01 合金焊接接头腐蚀行为的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(03): 762–768.
- LI S, LIU Z Y, WANG X X, et al. Effect of Repair Welding on Corrosion Behavior of 7N01 Aluminum Alloy Welded Joint[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(03): 762–768.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>