

焊接工艺对 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN 钢和 Co6B 合金堆焊层相容性的影响

吴伟建¹, 刘城淼¹, 李 权²

(1. 上海第一机床厂有限公司, 上海 201308; 2. 钢铁研究总院有限公司 特殊钢研究院, 北京 100081)

摘要:对比分析了氧乙炔焊和氩弧焊两种焊接方法下,热处理前后 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN 钢表面 Co6B 堆焊层的组织性能,探究焊接工艺对 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN 钢与 Co6B 合金相容性的影响。结果表明,1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN 钢与 Co6B 合金具有良好的相容性。较氩弧焊堆焊层,氧乙炔焊堆焊层熔合过渡区宽,硬度较氩弧焊堆焊层高 7.3 HRC。经固溶+深冷+回火热处理后,氧乙炔焊堆焊层致密,组织细小、均匀,硬度 45.3 HRC,冲击吸收能量 84.7 J,表现出更优的综合性能。

关键词:氧乙炔焊;氩弧焊;1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN 钢;Co6B 合金堆焊层;相容性;性能

中图分类号: TG156 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-6051(2024)07-0326-05

DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2024.07.050

Effect of welding process on compatibility of 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN steel and Co6B alloy surfacing layer

Wu Weijian¹, Liu Chengmiao¹, Li Quan²

(1. Shanghai No.1 Machine Tool Works Co., Ltd., Shanghai 201308, China;

2. Research Institute of Special Steels, Central Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: Microstructure and properties of Co6B surfacing layer on the surface of 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN steel before and after heat treatment were compared and analyzed under the two welding methods of oxyacetylene welding and argon arc welding, and the effect of welding method on the compatibility of the 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN steel and Co6B alloy was explored. The results show that the 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN steel has good compatibility with the Co6B alloy. Compared with the argon arc weld surfacing layer, the fusion transition zone of the oxyacetylene weld surfacing layer is wider, and the hardness is 7.3 HRC higher than that of the argon arc weld surfacing layer. After solid solution + cryogenic treatment + tempering, the oxyacetylene weld surfacing layer is dense, with fine and uniform structure, hardness of 45.3 HRC, and impact absorbed energy of 84.7 J, exhibiting better comprehensive performance.

Keywords: oxyacetylene welding; argon arc welding; 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN steel; Co6B alloy surfacing layer; compatibility; properties

收稿日期:2024-02-06

修订日期:2024-05-07

作者简介:吴伟建(1987—),男,高级工程师,主要研究方向为现代装备制造、核设备制造领域,E-mail:744947030@qq.com

引文格式:吴伟建,刘城淼,李 权. 焊接工艺对 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN 钢和 Co6B 合金堆焊层相容性的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(7): 326-330.

Wu Weijian, Liu Chengmiao, Li Quan. Effect of welding process on compatibility of 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN steel and Co6B alloy surfacing layer [J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49(7): 326-330.

[3] ASTM A387/A387M-17, Standard specification for pressure vessel plates, alloy steel, chromium-molybdenum[S].

[4] Riyaz Ahmed S, Agarwal Late Ajai, Daniel B S S. Effect of different post weld heat treatment on the mechanical properties of Cr-Mo boiler steel welded with SMAW process[J]. Materials Today: Proceedings, 2015, 2(4/5): 1059-1066.

[5] 李样兵,柳付芳,赵国昌,等. 极限模焊工况下大厚度 SA387Gr11Cl2 钢板的力学性能[J]. 金属热处理, 2020, 45(12): 193-196.

Li Yangbing, Liu Fufang, Zhao Guochang, et al. Mechanical properties of large thickness SA387Gr11Cl2 steel plate under the condition of limit PWHT[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(12): 193-196.

[6] Jia J H, Liu Z Y, Li X G, et al. Comparative study on the stress corrosion cracking of a new Ni-advanced high strength steel prepared by TMCP, direct quenching, and quenching & tempering[J]. Materials

Science and Engineering A, 2021, 825(9): 1-15.

[7] 刘晓玮,周光杰,谭小斌. 800 MPa 级在线淬火水电钢的回火处理[J]. 金属热处理, 2022, 47(8): 228-231.

Liu Xiaowei, Zhou Guangjie, Tan Xiaobin. Tempering for direct quenched 800 MPa grade hydropower steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(8): 228-231.

[8] Dhua S K, Sen S K. Effect of direct quenching on the microstructure and mechanical properties of the lean-chemistry HSLA-100 steel plates [J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(21): 6356-6365.

[9] 李建伟,吴 帆. 高强钢的直接淬火回火工艺研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(14): 226-229.

Li Jianwei, Wu Fan. Study on direct quenching and tempering process of high strength steel [J]. Hot Working Technology, 2017, 46(14): 226-229.

核反应堆控制棒驱动机构为核反应堆的核心设备,能够按照控制和保护系统的指令,带动控制棒组件在堆芯内上下运动,从而完成反应堆的启动、调节功率、保持功率、正常停堆和事故停堆等功能,其性能直接关系到反应堆运行的安全性与可靠性。由于驱动机构是反应堆本体唯一机电一体化运动设备,磨损是其主要的失效形式,关键摩擦副的高耐磨性能是实现控制棒驱动机构等关键核电部件长寿命设计的基础,也是满足核反应堆高效平稳运行的关键技术^[1-2]。

某核反应堆控制棒驱动机构使用的是我国自主研发的新型马氏体沉淀硬化不锈钢 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN^[3-4]。经由真空感应+电渣重熔冶炼以及合适的热处理工艺后,1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN 钢相较于传统的 17-4PH 钢具有更好的耐磨性和适用性^[5-7]。但在实际使用中依然存在表面硬度和耐磨性不能满足重要零件使用的问题。因此需要在零件表面制备硬质涂层以提高其耐磨性和抗冲击性等性能。Co6B 合金是一种钴基合金材料,一般采用真空感应炉+电渣重熔法冶炼,其摩擦因数很低,能和其他金属产生滑触,在多数情况下不会

产生磨损,在不能使用润滑剂的应用中,Co6B 合金可以把咬死和磨损降至最低。

关于在 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN 钢表面堆焊 Co6B 合金的研究相对较少,焊接工艺和焊接性能尚不明晰。为实现在 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN 钢上高质量堆焊 Co6B 合金,进而促进其在核电行业的推广应用,本文选择氧乙炔焊和氩弧焊两种工艺,对比不同焊接方法下,堆焊层的显微组织特征和显微硬度特点等,分析不同焊接工艺对 Co6B 合金与 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN 钢相容性的影响,同时采用与零件相同的热处理工艺进行堆焊后热处理,探究不同堆焊工艺对堆焊层性能的影响。

1 试验材料与试验方法

1.1 试验材料

试验母材选用 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN 钢棒,化学成分如表 1 所示。试验用 Co6B 钴基合金堆焊材料满足 RCC-M 规范中 S8000 钴基合金成分要求,其化学成分如表 2 所示。

表 1 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN 钢的化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical composition of the 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN steel (mass fraction, %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	W	V	N	Fe
0.13~0.19	≤0.6	0.6~1.0	≤0.02	≤0.01	15.0~16.5	3.0~4.0	1.4~1.9	1.0~2.0	0.7~1.2	0.2~0.6	0.05~0.12	余量

表 2 Co6B 合金的化学成分(质量分数,%)
Table 2 Chemical composition of the Co6B alloy (mass fraction, %)

C	Mn	Si	P	S	Cr	W	Ni	Mo	Fe	Co
0.9~1.4	0.5~2.0	0.2~2.0	≤0.04	≤0.03	28.0~32.0	3.5~5.5	≤3.0	≤1.50	≤3.0	余量

1.2 试验方法

分别采用氧乙炔焊和氩弧焊两种工艺,在 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN 钢表面堆焊 Co6B,之后进行固溶(1070 °C × 55 min,油冷)+深冷(-196 °C × 2 h,空气中到室温)+回火(470 °C × 3 h)的热处理,对比分析不同焊接方法下,堆焊层的相容性和组织性能。

根据 NB/T 47013.2—2015《承压设备无损检测 第 2 部分:射线检测》,使用 XRS-420X 射线机进行 X 射线探伤,检测堆焊层的结合情况、热处理前后是否存在裂纹、熔合区是否有熔合缺陷。利用 LEICA MEF4M 光学显微镜观察热处理前后堆焊层微观组织的变化。利用 HT300 洛氏硬度计按 GB/T 230.1—2018《金属材料 洛氏硬度试验 第 1 部分:试验方法》检测堆焊层硬度;利用 JBN-300B 冲击试验机按 GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》对堆焊层

的冲击性能进行检测。

2 试验结果与分析

2.1 相容性

分别在 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN 钢棒外侧用氩弧焊和氧乙炔焊堆焊 Co6B 合金,堆焊效果均较好,如图 1 所示。采用 XRS-420 X 射线机参照 NB/T 47013.2—2015 在管电压 210 kV,管电流 15 mA,照射时间 2 min,焦距 1500 mm 的透照条件下对焊接熔合区进行 X 射线探伤。氩弧焊和氧乙炔焊熔合线附近的微观组织形貌如图 2 所示,由于基体相对钴基合金耐蚀性较差,所以图 2 中黑色部分为基体组织。检验发现采用两种焊接方法在 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN 钢表面堆焊 Co6B 合金,焊接熔合区未发现焊接缺陷,两种金属结合性较好,无裂纹、孔洞等宏观和微观缺陷存在。氩弧焊焊接熔合线约

为 $150\ \mu\text{m}$, 氧乙炔焊焊接熔合线约为 $400\ \mu\text{m}$, 堆焊层熔合过渡层更宽, 能更有效防止堆焊层的脱落^[8]。

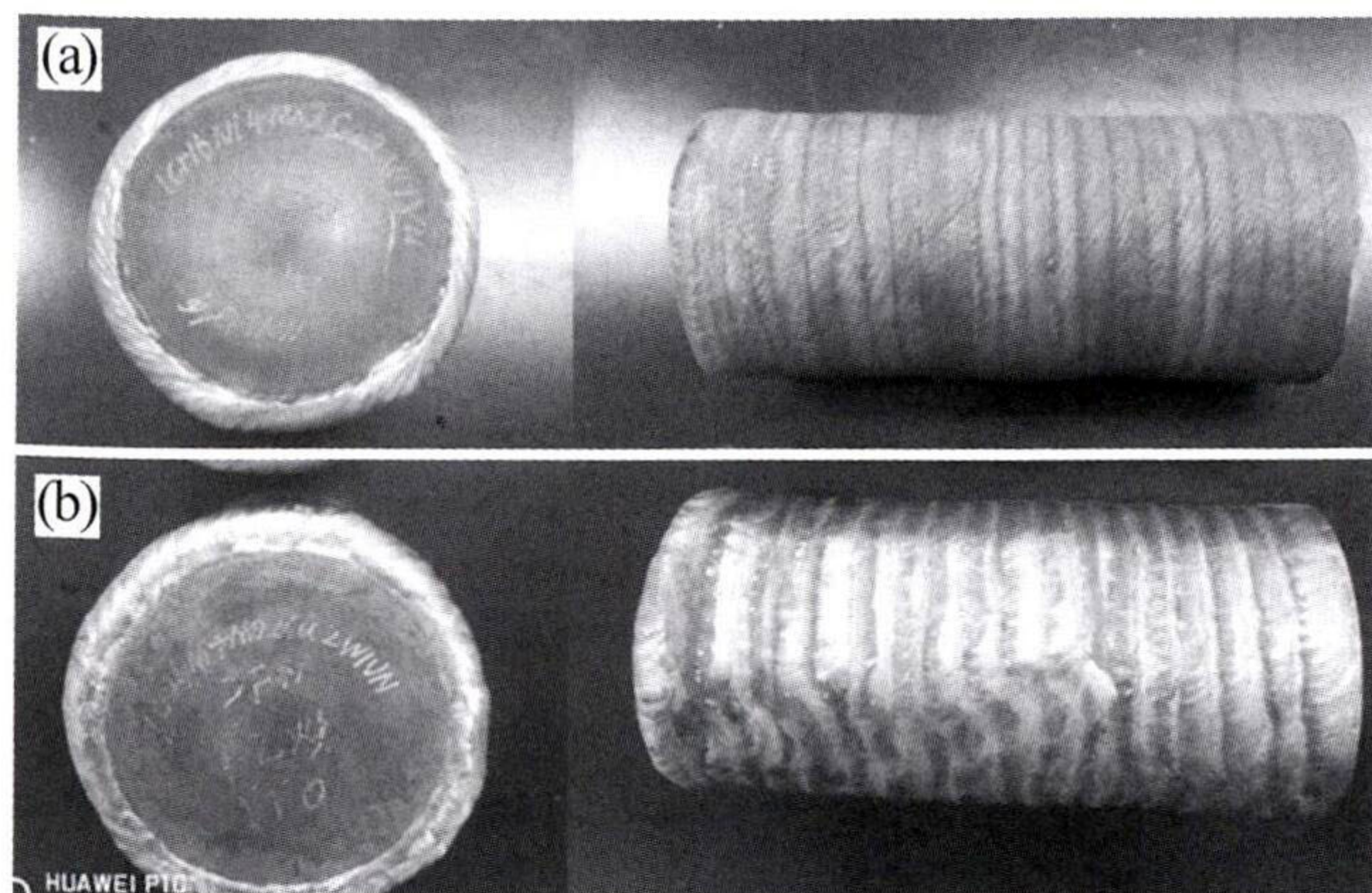


图1 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN 钢堆焊 Co6B 合金后照片

(a) 氩弧焊; (b) 氧乙炔焊

Fig. 1 Photos of the 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN steel after surfacing Co6B alloy

(a) argon arc welding; (b) oxyacetylene welding

图3为两种焊接方法堆焊层热处理前后的微观形貌。由图3(a,b)可见, 热处理前氩弧焊堆焊层为发达的柱状晶; 氧乙炔焊堆焊层除柱状晶外出现少量枝晶, 且枝晶向表面生长, 这是因为低温的传热作用, 熔池与基体界面的液相一侧存在极大的正温度梯度, 当界面温度下降至界面合金的凝固点以下, 达到一定的过冷

度时, 开始结晶, 以基体晶粒为核心沿着散热方向外延生长^[9]。氧乙炔焊堆焊层组织相对更加细小, 这是因为氧乙炔焊冷却速度更快、过冷度更大, 晶粒的形核率和生长速率均会增大, 从而抑制了晶粒的长大, 得到的晶粒就更加细小^[10]。

两种焊接方法堆焊层热处理后的微观形貌如图3(c,d)所示。与热处理前相比, 热处理后堆焊层组织更加均匀, 形态也由块状+条状转变为细小条状。这是因为热处理不仅消除了内应力, 深冷处理还促进了晶体结构从 γ -fcc 相到 ϵ -hcp 相转变, 使得堆焊层组织更为致密, 同时堆焊层内生成细长方向性组织, 有效提高硬度, 减小裂纹等缺陷的产生^[11]。

综合分析, 两种焊接工艺下, 1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN 钢和 Co6B 均具有良好的相容性, 相对于氩弧焊, 采用氧乙炔焊堆焊的钴基堆焊层, 经固溶+深冷+回火热处理后, 钴基堆焊层组织更加均匀、细小。

2.2 堆焊层性能

在堆焊层中心任取3点测试其表面硬度, 结果见表3。氧乙炔焊堆焊层表面平均硬度比氩弧焊的高 7.3 HRC, 且硬度差值 ($<1\ \text{HRC}$) 保持到热处理之后, 且与 Co6B 合金各个状态硬度值相当; 氧乙炔焊堆焊层的硬度值波动更小, 硬度分布均匀, 平均值为 45.3 HRC, 这是因为氧乙炔焊堆焊层的组织更加细小, 单位体积

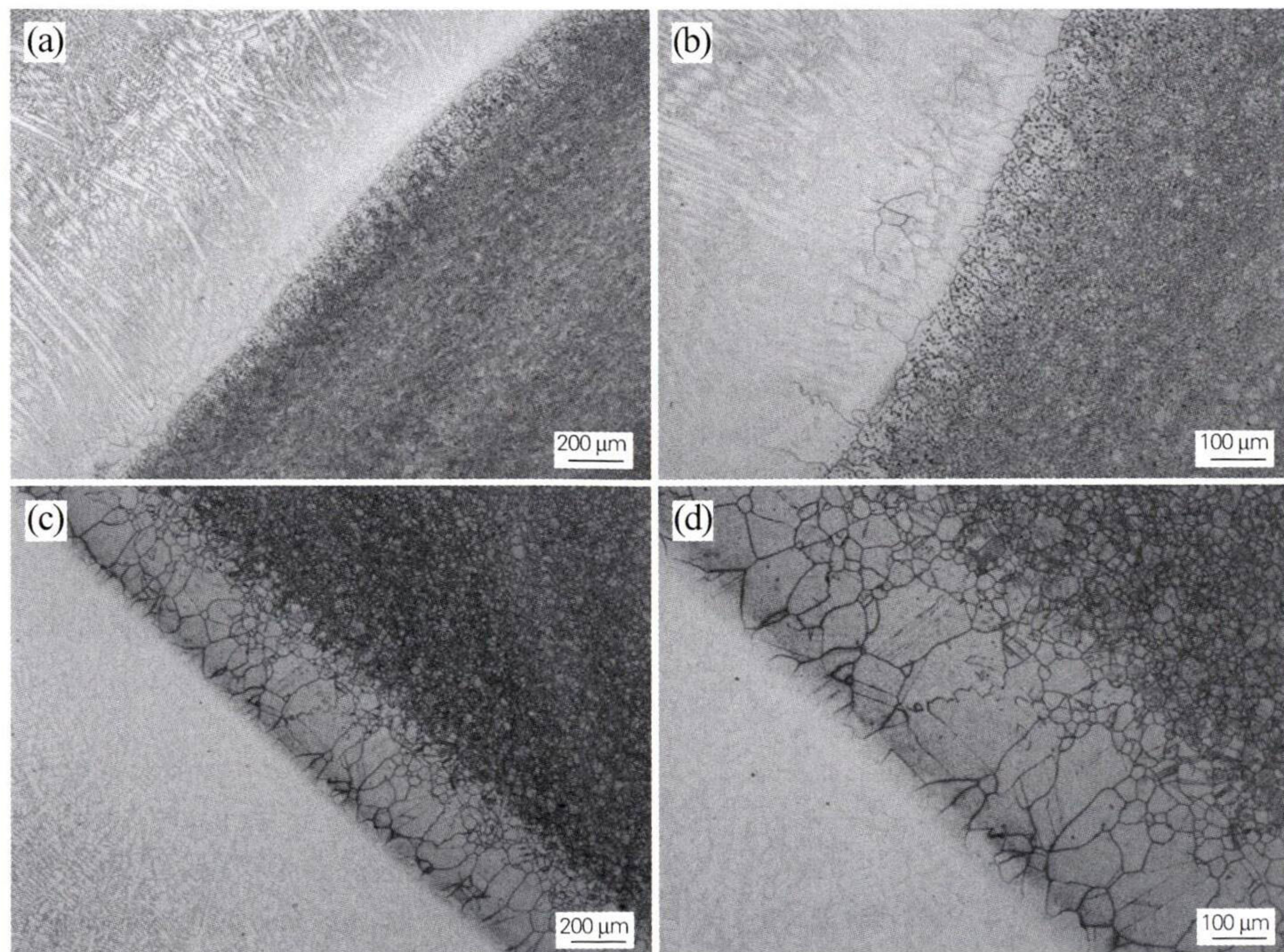


图2 焊接熔合线附近的显微组织

(a,b) 氩弧焊; (c,d) 氧乙炔焊

Fig. 2 Microstructure near the welding fusion line

(a,b) argon arc welding; (c,d) oxyacetylene welding

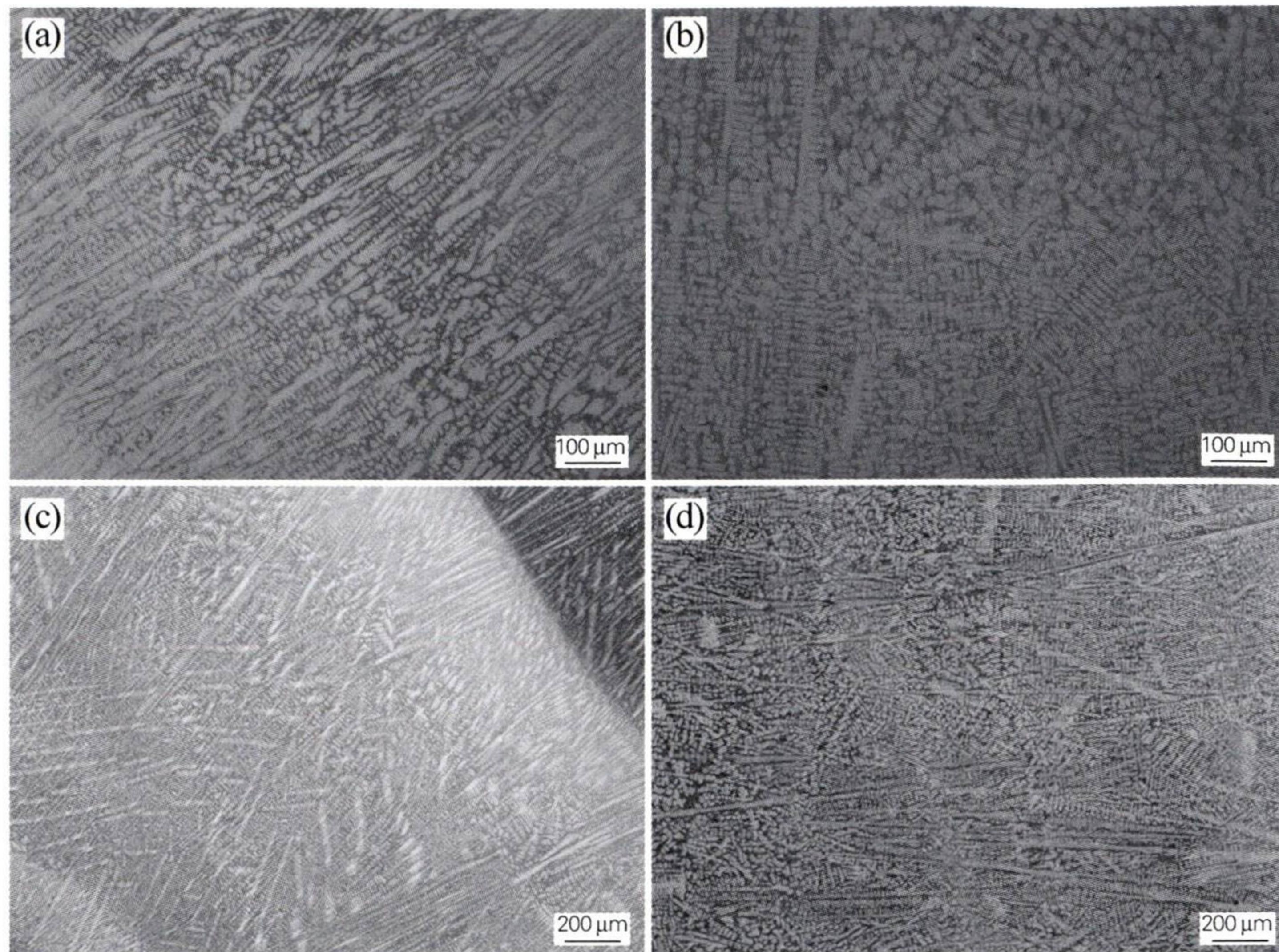


图3 热处理前(a, b)后(c, d)堆焊层的微观形貌

(a,c) 氩弧焊; (b,d) 氧乙炔焊

Fig. 3 Micromorphologies of surfacing layer before(a, b) and after(c, d) heat treatment

(a,c) argon arc welding; (b,d) oxyacetylene welding

表3 热处理前后堆焊层硬度及冲击性能

Table 3 Hardness and impact property of surfacing layer before and after heat treatment

试样	硬度/HRC		冲击吸收能量 KU_2/J	
	实测值	均值	实测值	均值
堆焊层	热处理前			
	氧乙炔焊	43.5, 43.6, 44.2	43.8	—
	氩弧焊	37.1, 34.9, 37.7	36.5	—
	热处理后			
	氧乙炔焊	45.3, 45.3, 45.3	45.3	86, 78, 90
	氩弧焊	39.7, 39.2, 38.8	39.2	69, 72, 78
Co6B 合金	固溶 + 深冷	42.4, 42.2, 41.8	42.1	—
	固溶 + 深冷 + 回火	44.3, 44.7, 44.1	44.4	76, 63, 82

中的晶粒数目越多,承受同样大外力所产生的变形就会分散到更多的晶粒中去,从而使每个晶粒的变形均匀,宏观上就表现出更高且均匀的硬度,起到了细晶强化的作用。

由表3还可以看出,氧乙炔焊堆焊层的冲击性能(84.7 J)大于氩弧焊(73.7 J),冲击吸收能量高约11.7 J,这是由于材料的冲击性能与晶粒大小呈现负相关关系^[12],晶粒尺寸越小,其晶界密度越高,在冲击变形过程中会导致更多额外的位错在晶界处塞积,大部分的冲击吸收能量被转化为变形存储能,表现为更高的抗冲击性能。且氧乙炔焊堆焊层冲击吸收能量高于Co6B合金的,满足使用要求。

3 结论

1) 采用氧乙炔焊和氩弧焊,在1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN钢表面堆焊Co6B合金,两种堆焊工艺下焊接熔合线处结合紧密,未发现熔合缺陷,1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN钢与Co6B合金具有良好的相容性。

2) 经固溶 + 深冷 + 回火热处理后,较氩弧焊,氧乙炔焊堆焊层致密,组织细小、均匀;硬度较氩弧焊的高约6.1 HRC,冲击吸收能量较氩弧焊的高约11.7 J,表现出更优的冲击性能。

参考文献:

- [1] 周洁. 核反应堆控制棒驱动机构的结构及制造[J]. 装备机械, 2010(4): 32-35.

- Zhou Jie. Structure and manufacture of nuclear reactor control rod drive mechanism[J]. The Magazine on Equipment Machinery, 2010(4): 32-35.
- [2] 杨平汉. 压水堆控制棒驱动机构结构与制造[J]. 装备机械, 2014(2): 20-26.
Yang Pinghan. Structure design and manufacture of pressurized water reactor control rod drive mechanism[J]. The Magazine on Equipment Machinery, 2014(2): 20-26.
- [3] 钟海林. 热处理工艺对1Cr16Ni3CuMoWV组织和性能的影响[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2006.
Zhong Hailin. Effect of heat treatment to microstructure and properties of 1Cr16Ni3CuMoWV[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2006.
- [4] 钟海林, 杨 钢, 王立民, 等. 热处理对新型沉淀硬化不锈钢1Cr16Ni3Cu1MoW组织与性能的影响[J]. 特殊钢, 2006, 27(2): 25-27.
Zhong Hailin, Yang Gang, Wang Limin, et al. Effect of heat treatment on structure and properties of a new precipitation hardening stainless steel 1Cr16Ni3Cu1MoW [J]. Special Steel, 2006, 27(2): 25-27.
- [5] 王 均. 核反应堆用17-4PH不锈钢的性能研究[D]. 成都: 四川大学, 2007.
Wang Jun. Study on the properties of a 17-4PH stainless steel used in a nuclear reactor[D]. Chengdu: Sichuan University, 2007.
- [6] 彭艳华, 王 均, 邹 红, 等. 17-4PH不锈钢长期时效对拉伸性能的影响[J]. 核动力工程, 2007, 28(3): 82-86.
Peng Yanhua, Wang Jun, Zou Hong, et al. Effect of long-term aging on tensile properties of 17-4PH stainless steel [J]. Nuclear Power Engineering, 2007, 28(3): 82-86.
- [7] 翟爱群, 杨 钢, 蔡 梅, 等. 0Cr17Ni4Cu4Nb沉淀硬化不锈钢锻造裂纹分析[J]. 特钢技术, 2012, 18(2): 5-9.
Zhai Aiqun, Yang Gang, Cai Mei, et al. Analysis of forging crack on 0Cr17Ni4Cu4Nb precipitation hardening stainless steel [J]. Special Steel Technology, 2012, 18(2): 5-9.
- [8] 曹钰莹. 钴基复合粉末等离子堆焊组织与性能的研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
Cao Yuying. Study on microstructure and properties of cobalt-based composite powder plasma-arc surfacing layers [D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [9] 彭如恕, 王 林, 樊湘芳. 激光熔覆涂层的界面组织和冲击载荷作用下的性能[J]. 材料与冶金学报, 2005, 4(1): 47-50.
Peng Rushu, Wang Lin, Fan Xiangfang. Microstructure and properties of the interface coated by laser under shock load [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2005, 4(1): 47-50.
- [10] 时海芳, 王红蕾. 氧乙炔堆焊与感应熔覆制备的Co119合金涂层的组织性能比较[J]. 材料保护, 2021, 54(8): 158-161, 176.
Shi Haifang, Wang Honglei. Comparison of microstructure and properties of Co119 alloy coating prepared by oxyacetylene surfacing and induction cladding [J]. Material Protection, 2021, 54(8): 158-161, 176.
- [11] 严中明, 丁满平, 张广川, 等. 热处理对等离子堆焊钴基合金组织与性能的影响研究[J]. 金属加工(热加工), 2023(10): 19-25.
- [12] 刘克张, 李建生, 鹿宪珂, 等. 晶粒尺寸对纯铜冲击性能及其断裂机制的影响研究[J]. 热加工工艺, 2023-06-20.
Liu Kezhang, Li Jiansheng, Lu Xianke, et al. Effect of grain size on impact properties and fracture mechanism of pure copper [J]. Hot Working Technology, 2023-06-20.

2024年度团体会费的缴纳

感谢您对中国机械工程学会热处理分会的大力支持! 2024年,全国热处理学会将继续团结广大的热处理科技工作者,围绕国家经济建设和社会发展目标,努力提高学术水平,繁荣和发展我国的热处理事业,为确保学会各项工作计划、业务活动的开展和实施,更好地为广大会员做好服务,有赖于各单位会员一如既往地支持学会工作并按时缴纳会员费,学会对此表示衷心的感谢! 根据学会章程,我会正在开展2024年度会员费收取工作!

一、会费标准

根据《中国机械工程学会会员会费标准及管理办法》,每单位每年2000元人民币。

二、缴费方式

户 名:中国机械工程学会
帐 号:0200003609014476075
开户行:中国工商银行北京礼士路支行
汇款附言请备注“热处理”字样,最终开具“全国性社会团体会员费”电子发票。

三、会员服务

1) 团体会员可提交公司新资讯、新产品新技术、招聘推广等信息,审核通过后将发布在学会网站、微信公众号等媒

介中。

2) 团体会员每月将收到会员杂志《金属热处理》、《材料热处理学报》及行业最新动态。

3) 团体会员单位享受我会网站首页会员链接服务。

4) 团体会员将及时收到学会主办的活动通知,参加会议、培训、研讨会等活动享受会员优惠价,缴纳3年及以上会费,赠送团体会员标牌。更多会员服务,请浏览 www.chts.org.cn。

四、联系方式

电话/传真:010-62920613;联系人:胡绪童

网址:www.chts.org.cn;邮箱:chts@chts.org.cn

地址:北京市海淀区学清路18号705室,100083