

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.04.07

转向架牵引拉杆局部电弧增材修复工艺研究

安 博^{1,2}, 姜 斌^{1,2}, 毕越宽^{1,2}, 黄金宝¹, 张乙宙^{1,2}

1. 中车唐山机车车辆有限公司, 河北 唐山 063035
2. 河北省轨道车辆转向架技术创新中心, 河北 唐山 063035

摘要: 采用 ER80S-G 焊丝在焊前不预热的条件下对调质态 40Cr 钢进行电弧增材修复, 模拟转向架牵引拉杆局部缺陷的挖补, 对比分析了脉冲冷焊和常规 TIG 焊两种工艺在堆焊结合强度、微观组织、硬度分布以及对热影响区性能的影响程度等方面差异。结果表明: 脉冲冷焊和 TIG 焊的堆焊层都结合良好, 热影响区均未发现冷裂纹。脉冲冷焊的热输入较低, 焊后冷却速度快, 热影响区窄, 试件焊后的角变形量仅为 TIG 焊的 1/6, 堆焊层和热影响区的晶粒比 TIG 焊细小, 强度和硬度都高于 TIG 焊。虽然脉冲冷焊的熔覆效率低, 但补焊的连接强度高、变形小、对母材性能的影响小, 比 TIG 焊更适合于转向架牵引拉杆的局部增材修复。

关键词: 转向架; 40Cr; 局部增材修复; 脉冲冷焊; TIG 焊

中图分类号: TG457 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2024)04-0050-05

Study on the Locally Repairing Technique Bogie Traction Rods

AN Bo^{1,2}, JIANG Bin^{1,2}, BI Yuekuan^{1,2}, HUANG Jinbao¹, ZHANG Yizhou^{1,2}

1. CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan 063035, China
2. Hebei Railway Vehicle Bogie Technology Innovation Center, Tangshan 063035, China

Abstract: The ER80S-G welding wire was used in this work to weld and repair the quenched and tempered 40Cr steel without preheating. The repair of local defects in the traction rod of the bogie was simulated, and the differences between pulse cold arc welding (PCAW) and traditional TIG welding processes were compared and analyzed in terms of repair welding bonding strength, microstructure, hardness distribution, and the degree of influence on the performance of the heat affected zone (HAZ). The results showed that the repaired welding layers of PCAW and TIG joints were well bonded, and no cold cracks were found in the HAZs. The PCAW method with a lower heat input exhibits a faster cooling rate, a narrower HAZ and only 1/6 angular deformation of that TIG welding. Moreover, the PCAW welding joint shows a higher strength and hardness attributed to finer grains formed in the welding zone and HAZ, compared to the TIG welding joint. Despite having a lower cladding efficiency, the PCAW welding is more suitable for locally repairing the bogie traction rods due to the higher joining strength, smaller distortion, and minimal impact on the performance of the base material.

Keywords: bogie; 40 Cr steel; local repair; pulsed cold arc welding; TIG welding

引用格式: 安博, 姜斌, 毕越宽, 等. 转向架牵引拉杆局部电弧增材修复工艺研究[J]. 电焊机, 2024, 54(4): 50-54.

Citation: AN Bo, JIANG Bin, BI Yuekuan, et al. Study on the Locally Repairing Technique Bogie Traction Rods[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(4): 50-54.

0 前言

转向架是轨道车辆的重要走行部件, 其牵引拉杆多为 40Cr 锻件, 调质态使用, 制造成本很高。牵

引拉杆的内孔表面由于磨损或拉伤等原因容易造成局部缺陷, 其他部位完好无损, 如不能修复就需报废换新, 造成资源浪费, 因此合理的增材修复工艺对轨道交通车辆检修行业意义重大。

收稿日期: 2023-09-28 修回日期: 2023-11-09

作者简介: 安 博(1986—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事轨道车辆焊接工艺、焊接体系管理等研究。E-mail: anbo@tangche.com。

从牵引拉杆的使用技术条件看^[1],对强度和抗疲劳性能要求较高,焊修时要保证结合强度并且不允许出现焊接缺陷;此外,由图1可知,为保证与其他组件的装配关系,对尺寸公差也有严格要求,焊修后不能造成工件较大变形,因此,局部修复时不允许预热,也不能进行后热处理以恢复热影响区性能。这些限制条件都增加了局部电弧增材修复的难度,有些常用的表面修复技术难以满足要求,比如电火花沉积^[2-3]和电刷镀^[4]等工艺结合强度不足;激光熔覆^[5-6]设备成本较高,内孔修复可达性差;火焰钎焊^[7]热影响区宽,工件变形大;MIG/MAG电弧堆焊^[8-10]热影响区淬硬范围大,硬度过高,飞溅损害非焊接区等。相比较而言,TIG电弧堆焊^[11-12]在加工柔性、修复效率、技术成熟度、检修成本等诸多方面都有一定优势。

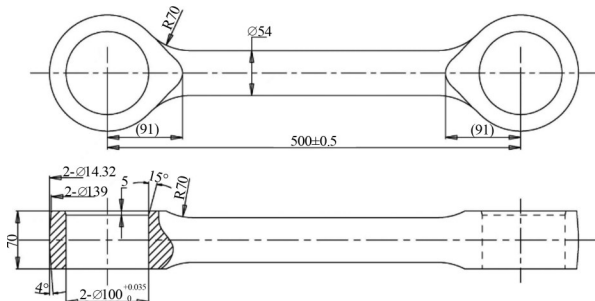


图1 牵引拉杆零件

Fig. 1 Traction rod parts

TIG焊由于电弧连续燃烧,对工件的总热输入相对较大。近年来,开始兴起一种脉冲冷焊技术^[13-14],在再制造领域得到广泛应用。它是将电源储存的能量在瞬间释放于钨极与工件间,焊丝与微量熔化的母材形成冶金结合,具有精度高、变形小、操作简单等特点,在焊接过程中单个焊接脉冲的电流和时间可以精确控制,输入的能量仅够用于焊丝与工件之间的熔合,从而使工件表面受热降至最低,热影响区小,对母材性能影响小。脉冲冷焊技术与氩弧焊操作方式相同,但由于断续加热方式,熔覆效率显著降低,其在转向架牵引拉杆局部修复的适用性需要进行研究。为此本文采用脉冲冷焊和TIG焊两种工艺对牵引拉杆用40Cr钢进行局部电弧增材修复,综合分析两种工艺修复后在微观组织、硬度分布、焊后变形量和力学性能等方面的差异,为轨道车辆检修方案的制订提供参考。

1 试验材料及方法

试验母材为经锻造和调质处理的40Cr板材,调质后硬度30~35 HRC,抗拉强度970 MPa,试板尺寸为200 mm×150 mm×16 mm。为模拟缺陷的状态,焊前在板材表面中间用 $\varnothing 20$ 的球铣刀预制2 mm深的沟槽。两种工艺都采用转向架构架焊接生产常用的 $\varnothing 1.2$ mm耐候钢焊丝ER80S-G,母材和焊丝的化学成分见表1。

表1 母材和焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of base material and welding wire (wt. %)

材质	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
40Cr母材	0.416	0.208	0.55	0.018 5	0.013 3	0.800	—	—
ER80S-G	0.09	0.73	1.28	0.018	0.014	0.03	0.8	0.42

脉冲冷焊采用HB-L6型冷焊机进行,焊接参数为:焊接电流180 A,焊接时间200 ms。TIG电弧堆焊采用WSME-350K型氩弧焊机进行,焊接电流100 A。焊后沿横截面切开试板制取金相试样,观察显微组织和硬度分布;采用GLOBAL ADVANTAGE三坐标仪测量试样角变形量;通过拉伸试验考察每种焊接方法结合强度和对热影响区性能的影响。带堆焊层试样取表面2 mm厚度,热影响区试样先从试板表面向下铣削2 mm,去除堆焊层,再取2 mm厚的拉伸试样,拉伸试样尺寸如图2所示。

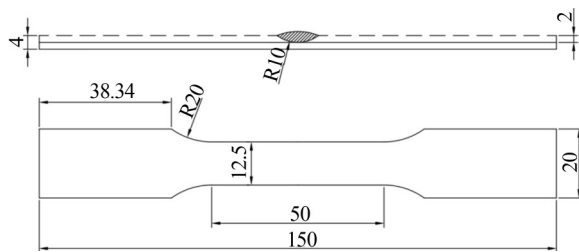


图2 拉伸试样

Fig. 2 Tensile test specimen

2 试验结果及分析

2.1 截面宏观形貌和变形量

不同工艺堆焊焊接头截面的宏观形貌如图3所示,由图可知,脉冲冷焊和TIG焊的堆焊层都与母材实现了良好的冶金结合,在未预热的情况下,均未发现气孔、未熔合及裂纹等焊接缺陷。脉冲冷焊的

热影响区很窄,仅为约1 mm左右,TIG焊的热影响区达到4~5 mm。TIG焊较大范围的热影响区,也造成了工件较大的变形,如表2所示,TIG焊试板的焊后角变形量约为脉冲冷焊的6倍,可见脉冲冷焊工艺在减小热输入和控制焊接变形方面有较大优势。但脉冲冷焊的熔覆效率低,焊接时,脉冲冷焊由多层多道堆焊完成,焊满试板的预制沟槽总用时约100 min,TIG焊仅需两层即可焊满,单层的熔覆效率也显著提高,总用时小于20 min。

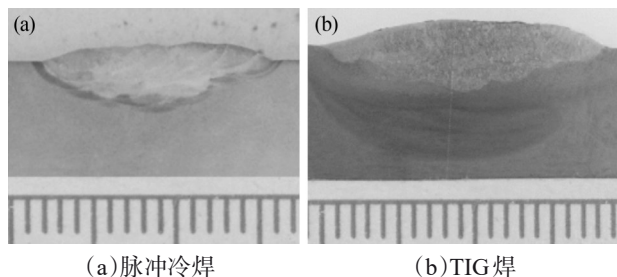


图3 截面宏观形貌

Fig. 3 Macroscopic morphology of cross section

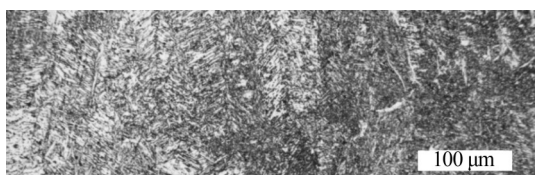
表2 不同工艺试板的焊后角变形量

Table 2 Post weld angular deformation of test plates with different processes

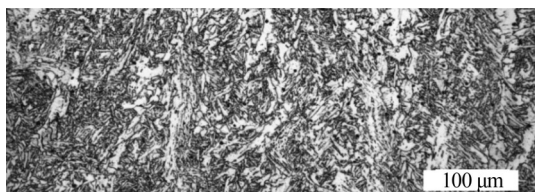
焊接工艺	焊接时长/min	热影响区宽度/mm	角变形量/(°)
脉冲冷焊	100	1	0.191
TIG焊	17	4	1.23

2.2 显微组织和硬度分布

两种工艺补焊层的显微组织如图4所示。两种工艺焊缝区都以马贝混合组织为主,脉冲冷焊的焊缝组织更细,与冷焊的热输入低、冷却速度快有关。TIG焊焊缝不仅组织略显粗大,并且马氏体含量少,



(a)脉冲冷焊



(b)TIG焊

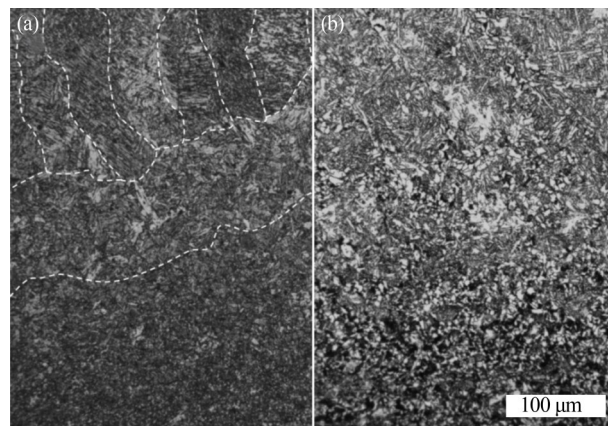
图4 焊缝区组织

Fig. 4 Weld seam zone organization

贝氏体含量多,还分布较多块状铁素体。

按在焊接热循环过程中的峰值温度和高温停留时间的不同,可淬硬钢电弧焊热影响区可分为全淬火粗晶区、完全淬火细晶区、不完全淬火区和回火区4个微区^[15]。图5为两种工艺的热影响区微观组织。脉冲冷焊的完全淬火粗晶区较窄,宽度仅约100 μm,随后的完全淬火细晶区不明显,大部分为不完全淬火区,由细小马氏体和颗粒状铁素体组成,回火区也非常窄。TIG焊热影响区各区的范围都较大,整体都比脉冲冷焊晶粒粗大,也在过热区观察到淬火马氏体,但混有较多铁素体块,特别是超过完全淬火细晶区后,不完全淬火区中析出了大量的珠光体,回火区逐渐恢复索氏体形貌。

硬度分布更能反映两种工艺补焊接头的组织特征,如图6所示。两种工艺的硬度高点都出现在完全淬火粗晶区,相差约100 HV。脉冲冷焊单个焊接脉冲的热输入量很低,使热影响区中温度超过Ac3的范围也较小,热量随后迅速向周围母材冷金属传导散失,造成极高的冷却速度,因而形成一薄层高硬度的马氏体区。TIG焊与脉冲冷焊不同,由于电弧持续加热,不仅使热影响区的范围变宽,高温停留的时间也增长,奥氏体晶粒长大较多,温度梯度趋缓,冷却速度趋慢,因此焊缝硬度和热影响区的硬度都没有脉冲冷焊的高,并且不完全淬火区由于珠光体析出导致有很大范围的明显软化。



(a)脉冲冷焊

(b)TIG焊

图5 热影响区组织

Fig. 5 Heat affected zone organization

2.3 补焊结合强度

通过弯曲试验、剪切试验和拉伸试验分析和比

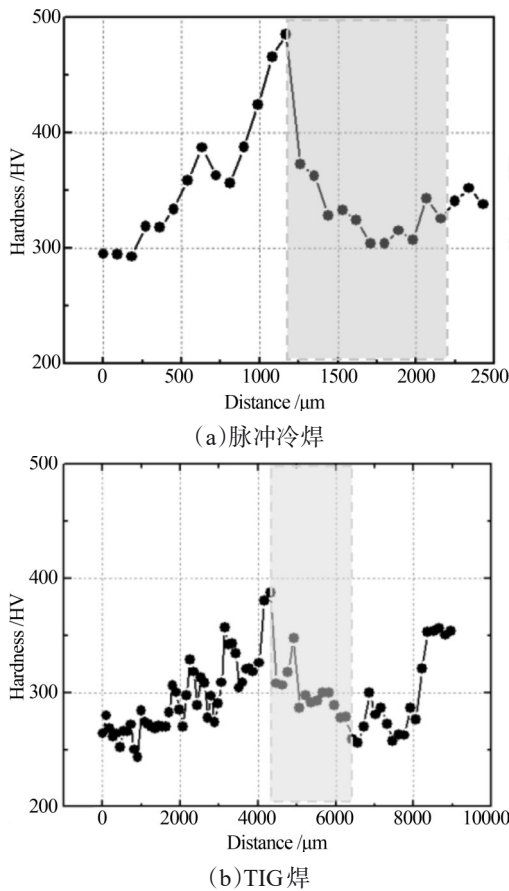


图6 硬度分布

Fig. 6 Hardness distribution

较了两种工艺的堆焊结合强度,结果见表3。两种工艺补焊接头横向侧弯 120°后均未发现裂纹,弯曲性能合格。抗剪强度测试主要检验补焊层与母材基体的结合强度,脉冲冷焊比TIG焊高约60 MPa,表明脉冲冷焊虽然母材熔化量较少,但结合强度仍然较高。拉伸试验可综合考察补焊的结合强度和熔覆金属强度,TIG焊带补焊层的试样全部断于焊接区,抗拉强度比母材低约200 MPa。脉冲冷焊的堆焊层组织比TIG焊的细小,并且马氏体含量多,拉伸试样部分断于母材,部分断于堆焊层,抗拉强度比TIG焊高约170 MPa。

表3 不同工艺的结合强度试验结果

Table 3 Combined with strength test results

焊接工艺	弯曲性能	抗剪强度/MPa	抗拉强度/MPa
脉冲冷焊	合格	677	932
TIG焊	合格	617	762

2.4 对母材热影响区性能的影响

通过对热影响区进行室温下的拉伸试验和和

冲击试验考察每种工艺焊接热循环对母材热影响区性能的影响,结果见表4。脉冲冷焊的热影响区范围小,尤其是回火软化区非常窄,因此抗拉强度与母材相差不大,而TIG焊的热影响区比母材强度下降超过50 MPa,两种工艺对热影响区影响程度的差异与硬度分布的特征吻合较好,图6中阴影区域为热影响区拉伸试验的取样位置,脉冲冷焊的取样范围内组织的硬度都在300 HV以上,而TIG焊的取样范围内大部分组织的硬度都低于300 HV。

表4 热影响区性能

Table 4 Heat affected zone performance

焊接工艺	抗拉强度/MPa	冲击功/J
40Cr母材	970	60
脉冲冷焊	959	57
TIG焊	918	66

测试热影响区冲击功的主要目的是考察热影响区部分组织被淬硬后对其冲击韧性造成的影响,从试验结果看,两种工艺热影响区的冲击功都大于47 J,符合GB/T 3077和ISO 15614标准规定。脉冲冷焊热影响区较窄,特别是硬度较高的完全淬火粗晶区宽度仅为100 μm左右,在热影响区的总面积占比较少,未造成冲击韧性显著下降。而TIG焊热影响区中软化区占比较大,冲击功比母材略有升高。

3 结论

(1)采用ER80S-G焊丝在焊前不预热的条件下对调质态40Cr钢进行焊补,脉冲冷焊和TIG焊的补焊层都结合良好,热影响区均未发现冷裂纹。

(2)脉冲冷焊的热输入较低,热影响区较窄,焊后试件的角变形量仅为TIG焊的1/6,用于牵引拉杆局部焊补时造成内孔尺寸变形的风险显著减小。

(3)脉冲冷焊的冷却速度高,补焊层和热影响区的晶粒都比TIG焊细小,强度和硬度都高于TIG焊的补焊接头。

(4)虽然脉冲冷焊的熔覆效率低,但补焊的连接强度高、变形小、对母材性能的影响小,比TIG焊更适合于转向架牵引拉杆的局部修复。

参考文献:

[1] 郭纯金. 动车组转向架关键部件维修决策研究[D].

- 天津:天津大学,2023.
- GUO C J. Research on Maintenance Decision of Key Components of High Speed Train Bogie [D]. Tianjin: Tianjin University, 2023.
- [2] 田云. 对电火花沉积修复的试验研究[J]. 内燃机与配件, 2018(14):96-98.
- TIAN Y. Experimental research on electrical spark deposition repair[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2018(14):96-98.
- [3] 纪贤达,连勇,刘畅,等. 电火花沉积技术研究进展及其在航空制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2020, 63(17):61-70.
- JI X D, LIAN Y, LIU C, et al. Research Progress on Electrospark Deposition Technology and Its Application in Aeronautical Manufacturing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(17):61-70.
- [4] 张善霞,邴晨阳,韩生宝,等. 电刷镀修复接线端子的电气性能及耐蚀性[J]. 焊接技术, 2023, 52(08):26-29.
- ZHANG S X, BING C Y, HAN S B, et al. Electrical properties and corrosion properties of connecting terminals repaired by brush plating technology [J]. Welding Technology, 2023, 52(08):26-29.
- [5] 闫晓孟,齐欢,阳义. 大型铸锻件的激光熔覆修复技术研究现状[J]. 大型铸锻件, 2022(05):27-32.
- YAN X M, QI H, YANG Y. Research status of laser cladding repair technology for large castings and forgings[J]. Heavy Casting and Forging, 2022(05):27-32.
- [6] 李方义,戚小霞,李燕乐,等. 盾构机关键零部件再制造修复技术综述[J]. 中国机械工程, 2021, 32(07):820-831.
- LI F Y, QI X X, LI Y L, et al. Review on Repair Technologies for Key Part Remanufacturing of Shield Machines [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(07):820-831.
- [7] 陈湘平,唐杰,卫国强,等. 钢/铜火焰钎焊接头组织和性能研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(21):235-237.
- CHEN X P, TANG J, WEI G Q, et al. Study on Microstructure and Properties of Steel/Copper Flame Brazing Joints [J]. Hot Working Technology, 2017, 46(21):235-237.
- [8] 陈剑锋,黄炜,李锋,等. 电弧增材制造技术在滑动轴承领域的应用[J]. 轴承, 2021(07):1-7.
- CHEN J F, HUANG W, LI F, et al. Application of Arc-Additive Manufacturing Technology in the Field of Sliding Bearings [J]. Bearing, 2021(07):1-7.
- [9] 周方明,张富强,缪保海,等. MIG堆焊在大功率柴油机排气阀再制造中的应用[J]. 电焊机, 2012, 42(05):86-89.
- ZHOU F M, ZHANG F Q, LIAO B H, et al. MIG surfacing welding applied in large power diesel engine exhaust valve remanufacturing [J]. Electric Welding Machine, 2012, 42(05):86-89.
- [10] 马国良. 无磁承压钻杆接头的堆焊修复[J]. 电焊机, 2023, 53(10):125-130.
- MA G L. Cladding Repair for Non-magnetic Pressurized Drill Pipe Joints [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(10):125-130.
- [11] 黄智泉,贺定勇,刘仁培,等. 堆焊技术发展及应用综述[J]. 电焊机, 2023, 53(4):56-62.
- HUANG Z Q, HE D Y, LIU R P, et al. Overview of development and application of built-up welding technology [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(4):56-62.
- [12] 张广成,高俊,朱子越,等. TIG电弧堆焊条件下Ni基熔覆层的微观组织及性能研究[J]. 热加工工艺, 2022, 51(24):63-67.
- ZHANG G C, GAO J, ZHU Z Y, et al. Microstructure and Properties of Ni-based Melting Layer by TIG Arc Welding [J]. Hot Working Technology, 2022, 51(24):63-67.
- [13] 王强,王晓军,武建生,等. 40Cr钢脉冲冷焊修复层组织与性能研究[J/OL]. 热加工工艺:1-5[2023-09-22]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20221920>.
- WANG Q, WANG X J, WU J S, et al. Study on the microstructure and properties of pulse cold welding repair layer of 40Cr steel [J/OL]. Hot Working Technology: 1-5[2023-09-22]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20221920>.
- [14] 陈体磊,张忠洁,张志强,等. 精密脉冲冷焊技术在航空修理中的应用研究[J]. 长沙航空职业技术学院学报, 2019, 19(04):74-77.
- CHEN T L, ZHANG Z H, ZHANG Z Q, et al. Research on Application of Precision Pulse Cold Welding Technology in Aviation Repair [J]. Journal of Changsha Aeronautical Vocational and Technical College, 2019, 19(04):74-77.
- [15] 连明洋. 齿轮用40CrNiMo调质钢CMT堆焊HAZ组织和性能研究[D]. 河南:郑州大学, 2021.
- LIAN M Y. Research on HAZ microstructure and properties of 40CrNiMo quenched and tempered steel for gears during CMT overlay welding [D]. Henan: Zhengzhou University, 2021.