

不锈钢轨道车辆底架 TIG 焊接技术研究*



康丽齐 郭 猛 王成菲 王亚男 刘海伟 高 雅

(中车长春轨道客车股份有限公司工程技术中心, 130062, 长春)

摘 要 [目的] 不锈钢轨道车辆底架波纹板波谷须粘贴橡胶座, 因此要求波纹板的焊接不能像其他弧焊方式那样形成焊缝余高。须研究一种新的焊接工艺技术, 满足粘贴橡胶座的需求。[方法] 分析了 TIG(非熔化极惰性气体钨极保护焊)电钎焊的工作原理, 根据实际生产中母材的平度特点, 分析了 TIG 电钎焊压紧装置和焊枪保护装置的结构形式和工艺要求。以西安地铁 4 号线的实际车辆结构完成焊接试件焊接为例, 对试件进行了外观检查、拉伸试验、断面试验和凿开试验, 对试验所得的拉伸剪切力、金相试验的焊核直径及熔深、凿开试验焊核直径进行了分析。[结果及结论] 通过选用合理的焊接参数, 设计了合适的焊枪保护装置和压紧装置, 实现了 TIG 电钎焊焊接。TIG 电钎焊的焊接内部无缺陷, 符合电阻点焊作业标准, 能够满足焊接要求。对于不锈钢轨道车辆, 采用 TIG 电钎焊技术焊接产品, 上层板采用厚度为 0.6~0.8 mm 的薄板时, 焊接性能可靠。

关键词 不锈钢轨道车辆; 底架; 非熔化极惰性气体钨极保护焊; 技术研究

中图分类号 U270.6

DOI: 10.16037/j.1007-869x.20253002

Research on TIG Welding Technology for Stainless Steel Rail Vehicle Underframes

KANG Liqi, GUO Meng, WANG Chengfei, WANG Yanan, LIU Haiwei, GAO Ya

(Engineering Technology Department, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China)

Abstract [Objective] A rubber seat must be attached to the troughs of the corrugated plates on stainless steel rail vehicle underframes. Therefore, it is required that the corrugated plate welding should not form excess weld metal like other arc welding methods. A new welding process technology must be investigated to meet the requirement for attaching the rubber seats. [Method] The working principle of TIG (tungsten inert

gas) rivet welding is analyzed. Based on the flatness characteristics of the base material in actual production, the structural forms and process requirements for TIG rivet welding clamping device and welding gun protection device are analyzed. Taking the welding specimens completed on an actual vehicle structure on Xi'an Metro Line 4 as an example, their visual inspection, tensile test, cross-sectional test, and chisel-open test are conducted. The obtained tensile shear force, weld nugget diameter and penetration depth in metallographic tests, and weld nugget diameter in chisel-open tests are analyzed. [Result & Conclusion] By selecting reasonable welding parameters and designing appropriate welding gun protection device and clamping device, TIG rivet welding is successfully implemented. This welding technology shows no internal defects, conforming to resistance spot welding standards, and meeting the welding requirements successfully. For stainless steel rail vehicles, when TIG rivet welding technology is employed to weld products, and the upper plate thickness ranges from 0.6 mm to 0.8 mm, the welding performance proves to be reliable.

Key words stainless steel rail vehicle; underframe; TIG welding; technical research

城市轨道交通车辆的轻量化是未来发展主流, 轻量化的车辆能够节约车辆运营成本。不锈钢作为轻量化车辆的首选材料, 能够实现车辆的绿色化生产。为了增加不锈钢材质车辆的刚度, 其底架中部地板一般采用厚度为 0.6~0.8 mm 的波纹板结构, 底架波纹板^[1]与底架横梁^[2]通过焊接成为一个整体。

中车长春轨道客车股份有限公司生产的不锈钢车辆, 在底架波纹板的波谷位置, 安装了粘贴橡胶座, 并将车辆的铝蜂窝地板安装在橡胶座上。

* 中国中车股份有限公司资助项目(2024CKB353)

引用格式: 康丽齐, 郭猛, 王成菲, 等. 不锈钢轨道车辆底架 TIG 焊接技术研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(12): 68-73.

KANG Liqi, GUO Meng, WANG Chengfei, et al. Research on TIG Welding Technology for Stainless Steel Rail Vehicle Underframes[J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(12): 68-73.

粘贴在波纹板波谷上的橡胶座,要求波纹板波谷位置不能有高出波谷平面的焊缝,如果采用填丝焊接,形成的焊缝将影响橡胶座的粘贴,因此,须采用不填丝的 TIG(非熔化极惰性气体钨极保护焊)电铆焊焊接技术。

1 TIG 电铆焊原理

TIG 电铆焊原理为:将钨极装夹在 TIG 焊接机的焊钳内,焊接电流通过钨极,在钨极与工件之间产生电弧,电弧将上下叠加的 2 层母材中的上层薄板母材全熔化,下层母材部分熔化,由此形成焊接^[3]。TIG 电铆焊原理如图 1 所示。图 1 中:序号 1 是产品中底架横梁的厚板母材,序号 2 是上层薄板的底架波纹板,序号 3 是“碗形”的焊核(由底架波纹板全部熔化,厚板母材部分熔化,冷却后所形成)。焊接过程中要求上层母材为厚度较薄的薄板,并且需要外界施加压力将上下搭接的 2 层板压紧贴合。

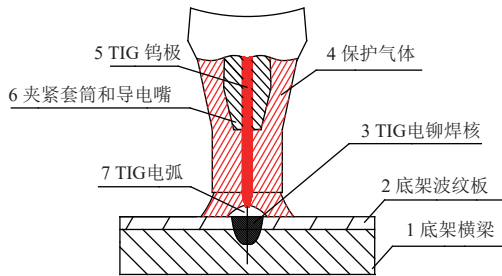


图 1 TIG 电铆焊原理
Fig. 1 Principle of TIG electric rivet welding

2 TIG 电铆焊压紧装置和焊枪保护装置

应当保证图 1 中的 TIG 钨极与底架波纹板垂直,同时在焊接时,保证 TIG 钨极端部不与波纹板接触,不产生粘连,对此,需要定制特殊的焊枪保护装置,如图 2 所示。由于底架波纹板存在不平度公差,需要制作简易的压紧装置(见图 3),以实现图 1 中底架波纹板和底架横梁的贴合,满足焊接工艺要求。

由图 2 可知:焊枪保护装置由手柄、上套管、连接套筒、下套管组成,4 个部件采用螺纹连接方式安装。连接套筒采用直径 $\phi 50$ mm 的圆钢管,材质为 45# 钢,内侧加工 M36-7H 的螺纹,连接套筒总长度为 200 mm。下套管和上套管在外侧加工 M36-7H 螺纹,分别与连接套筒螺纹相连接。上套管上部横向加工 M16-7H 的螺纹,左右 2 个手柄一

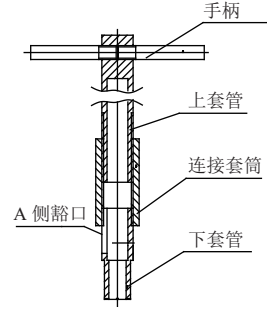
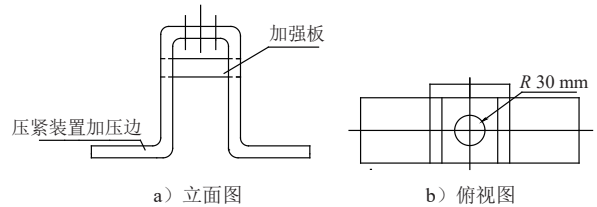


图 2 焊枪保护装置
Fig. 2 Welding gun protection device



注:R——圆圈直径。
图 3 压紧装置
Fig. 3 Clamping device

端开螺纹,安装于上套管。在下套管 A 侧开豁口,便于安装 TIG 焊枪,下套管与地板接触的端面对称增开 4 个方形豁口,便于保护气体的释放。图 2 中的各部件在制造加工完成后进行热处理,使部件达到 HRC35-45(洛氏硬度 C 标尺在 35-45 之间)标准,提高其硬度,并对其进行发黑处理,以增加防腐性能。

由图 3 可知:压紧装置采用不锈钢钢板折弯成槽型带翻边结构,槽型顶部增开 $\phi 60$ mm 的圆孔,槽型装置立面焊接加强板,增加被施加压力时整个槽型压紧装置的刚度。

焊接前,先将 TIG 焊枪安装到下套管中(从 A 侧豁口处安装,见图 2);再安装连接套筒与下套管,在连接套筒上端安装压紧装置,连接套筒从压紧装置槽型顶部中心孔穿过;将上套管安装到连接套筒中上部,最后安装手柄。

3 TIG 电铆焊焊接试样及试验

以西安地铁 4 号线车辆底架主横梁与波纹板焊接结构为例,底架主横梁采用不锈钢 SUS301L 系列中 DLT(深冲用低硬度热处理)级^[4]材料,厚度为 3.0 mm,波纹板采用不锈钢 SUS301L 系列中的 HT(半冷作硬化)级^[4]材料,厚度为 0.6 mm。接头形式为:3.0 mm 厚 DLT 材料(下母材)+0.6 mm 厚 HT 材料(上母材)(以下简称“3.0 mm DLT+

0.6 mm HT”)。

TIG电钎焊焊接是以1个焊接位置点为1个单位,完成1个焊接点后,提升TIG焊枪,移动焊枪到下一位置再焊接第2点;焊接的接头形式为上下母材搭接,焊接过程中上层薄板母材全部自熔,下层母材部分自熔,冷却后形成焊核。与此类似,电阻点焊^[5]是上下母材搭接,通过电阻点焊设备施加压力,上下焊接电极通电,使上下母材自熔,冷却后形成焊接,焊接1个位置点,移动焊接设备,再焊接下一位置。两者焊接过程相同,母材的接头形式也相同,均不需要填充金属^[6],均为依靠搭接的上下母材自熔后冷却,形成焊核,完成焊接。区别在于,TIG电钎焊只能实现2层板的搭接焊接,电阻点焊可实现多层板^[7]的焊接,TIG电钎焊要求上层板是薄板,电阻点焊要求搭接的母材厚度比不大于1:3。

由于TIG电钎焊的焊接原理和焊接过程与电阻点焊基本相同,因此参照电阻点焊制定了TIG电钎焊的焊接试验与检验标准,开展了外观检查试验^[8]、拉伸试验^[9]、金相试验^[10]、凿开试验^[11]。对于外观检查试验,所有试验的试件外观应无裂纹缺陷;对于拉伸试验,试验标准是最小拉伸载荷 $\geq 4.33 \text{ kN}$ ^[12-13],最小拉伸载荷的计算方法是:以3.0 mm DLT+0.6 mm HT的焊接接头中0.6 mm厚母材(HT)的抗拉强度3.33 kN为基准,再乘以1.3倍的安全系数,得到最小拉伸载荷4.33 kN;对于金相试验,测量3.0 mm DLT+0.6 mm HT焊接接头中搭接面位置处焊核直径 D ^[14]的长度尺寸,按照日本JIS Z 3104—1989《点焊部位的检查方案》标准,以薄板0.6 mm为基准,焊核直径 D 应大于3.9 mm;对于凿开试验,检验标准是母材出现裂纹。

3.1 TIG电钎焊焊接前准备

1) 材料准备:将3.0 mm厚DLT材料加工为150.0 mm(长)×35.0 mm(宽)的试样,将0.6 mm厚HT材料加工为110.0 mm(长)×40.0 mm(宽)的试样^[15],采用激光切割^[16]工艺,材料四周清除毛刺,用干净擦布将材料正反面擦拭干净。再准备焊接用的支撑板,尺寸为1000.0 mm(长)×500.0 mm(宽)。

2) 设备准备:使用日本进口的水冷式OTC牌号的TIG电焊机,额定焊接电流为300 A,额定负载持续率为40%。负载持续率为100%时,焊接电流不小于220 A。设备配备了15 m焊枪电缆和自循环冷却水箱,焊接电源形式为IGBT(绝缘栅双极

型晶体管)逆变式^[17]。钨极端部加工成锥形,采用直流负极型连接试样、钨极修磨的磨光机。

3) 焊接辅助材料准备:焊接保护气体采用高纯度的氩气,氩气的质量分数为99.99%。

4) 钨极准备:选用质量分数为2%钍的钨极,容易起弧,电极端部不容易粘接杂物,电极规格为 $\phi 2.4 \text{ mm}$ 。钨极端部打磨成锥形,要求同心度良好^[18],将焊钳中钨极末端到母材的距离调整为4.0 mm。

5) 焊接环境准备:焊接工作场地的风速不超过1 m/s,否则会影响保护气体的保护效果。

3.2 TIG电钎焊试件焊接

准备0.6 mm厚HT材料试验片,规格为110.0 mm(长)×40.0 mm(宽),以及3.0 mm厚DLT材料试验片,规格为150.0 mm(长)×35.0 mm(宽),沿着试样长度方向搭接,搭接量为40.0 mm,共准备6组试件,编号为1-6。再准备3组试件,编号为7-9,采用叠放方式,2个试验片的板边一端对齐,放置到焊接支撑平台上,TIG焊接设备的焊接地线连接到焊接支撑平台,对焊接试样搭接位置的中心处进行TIG电钎焊。焊接时,双脚压紧图3所示压紧装置的压边,目的是保证TIG焊枪钨极与焊接试件垂直,同时保证实际产品焊接过程中波纹板与主横梁贴严。焊接试件时,由于试验片是经过加工后的尺寸较小的母材,平度非常理想,焊接接头接触贴合非常好,压紧装置只是起到保证焊枪与被焊件垂直的作用。9组试件全部进行外观检查试验,搭接的6组试件中,有3组进行拉伸试验,另3组进行金相试验,叠放的3组试件则进行凿开试验。6组焊接完成后的试件搭接方式如图4所示。

TIG电钎焊焊接参数如表1所示。其中,焊接时间起止为:自TIG焊枪启动按钮,工件通电,钨极端部形成电弧^[19],开始熔化被焊母材,直到冷却后,熔化金属形成焊核^[20]。气体滞后时间起止为:自焊接结束后,保护气体继续施加,冷却钨极直到其温度冷却至300°C。后一过程可以提高钨极使用寿命。

3.3 试验检验

3.3.1 外观检查试验

9组试件焊接完成后,对焊点外观质量进行检查,包括:焊点周围与母材之间是否存在裂纹,是否圆滑过渡,是否存在未熔合和气孔等缺陷。外

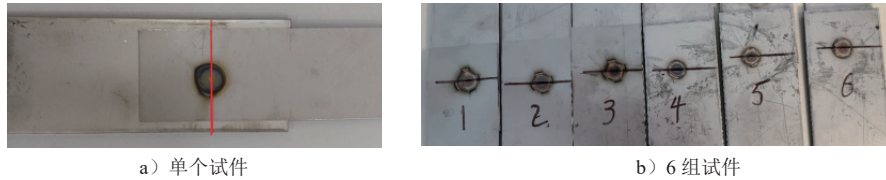


图 4 焊接完成后的试件搭接方式

Fig. 4 Welded lap joint for test specimens

表 1 TIG 电铆焊焊接参数

Tab. 1 TIG electric rivet welding parameters

焊接电流/A	焊接电压/V	气体流量/(L/min)	焊接时间/s	气体滞后时间/s
180	18~20	15	3.0	3.2

观检查合格后,进行其余试验检验。

3.3.2 拉伸试验检验

取编号为 1、2、3 的 3 组焊接试件,在室温条件下进行拉伸试验,将焊接试件在长度方向上的两端夹持在万能拉伸机上,缓慢拉伸试样,记录拉

伸结果。试件 1、试件 2、试件 3 的拉伸载荷分别为 11.20 kN、11.10 kN、11.05 kN。

3.3.3 金相试验检验

取编号为 4、5、6 的 3 组焊接试件,开展金相试验。沿着试件宽度方向,在焊核中心位置划出加工中心线,沿加工中心线将试件截断,对试样断面进行打磨、研磨、草酸腐蚀、温水清洗,在显微镜下观察焊核,包括是否存在气孔、未熔合等内部缺陷,试件金相如图 5 所示,图 5 中 D 为焊核直径、 t 为下层板熔深。

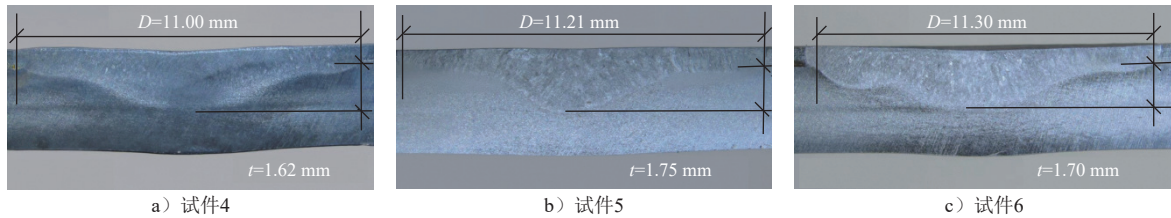


图 5 试件金相

Fig. 5 Metallography of test specimens

3.3.4 凿开试验检验

取编号为 7、8、9 的 3 组焊接试件,开展凿开试验检验,凿开试验如图 6 所示。试件对齐端的板边夹紧在夹钳上,用带有半圆缺口的凿铲伸入到 2 层叠放的试验片 1 和试验片 2 之间,用铁锤对凿铲施加竖向外力 F ,将 2 个试验片凿开,目测母材是否开裂,再用游标卡尺测量焊核直径。试件 7、试

件 8、试件 9 的焊核直径分别为 10.1 mm、9.8 mm、9.7 mm。

4 试验结果和分析

参考电阻点焊拉伸试验对最小拉伸剪切力的标准,试件 1、试件 2、试件 3 的拉伸数值均符合标准要求。参考电阻点焊对金相焊核尺寸的标准 (0.2 倍下层板厚 $\leq t \leq 0.9$ 倍下层板厚,即 $0.6 \text{ mm} \leq t \leq 2.7 \text{ mm}$),试件 4、试件 5、试件 6 的下层板熔深 t 均符合标准要求。焊核焊缝形貌呈“碗形”,无气孔等内部缺陷,焊核对称度较好,9 组试件表面均无裂纹。对于试件 7、试件 8、试件 9 的凿开试件,目测检查均是母材出现裂纹,用游标卡尺测量的焊核直径均比金相试验测量值小。

根据上文所述 TIG 电铆焊的焊接原理,要求上层板为薄板,上层板全熔透,下层板部分熔透,如果上层板的板厚过大,则不能实现全熔透,无法形成焊接。TIG 焊枪中的钨极与工件垂直也是焊

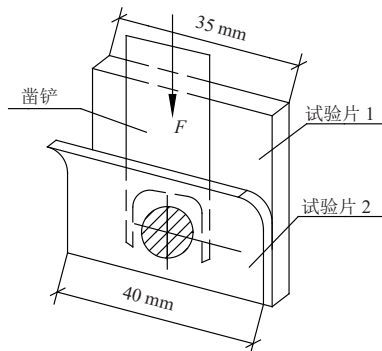


图 6 凿开试验

Fig. 6 Chisel-open test

接过程中的重要因素,能保证电弧对母材金属均匀加热,形成均匀的碗状焊核。

不锈钢 SUS301L 系列由于产品化学成分中 Cr、Ni 等元素的质量分数较高,因此具有良好的化学稳定性。熔化过程中,容易形成金属氧化物(如 Cr_2O_3),从而恶化焊缝质量,宜采用氩气作为保护熔池,以提高焊缝质量。

5 应用效果

按照上述要求,使用 TIG 焊枪保护装置、压紧装置、焊接参数对不锈钢轨道车辆的底架波纹板与主横梁进行 TIG 电钎焊焊接。中车长春轨道客车股份有限公司从 2005 年生产的不锈钢轨道车辆开始即实施使用了这套焊接工艺和技术。车辆在现场运行良好,整车气密性良好,没有出现任何质量开焊的缺陷。

对特殊结构的城市轨道交通车辆,其底架波纹板采用 0.8 mm 厚度的材料,通过调整焊接参数,也能实现焊接要求。

6 结语

1) 通过选用合理的焊接参数,设计了合适的焊枪保护装置和压紧装置,实现了 TIG 电钎焊焊接。经过外观检测、拉伸试验、金相试验检测、凿开试验检测,TIG 电钎焊的焊接内部无缺陷,符合电阻点焊作业标准,能够满足焊接要求。

2) 对于不锈钢轨道车辆,采用 TIG 电钎焊技术焊接产品,上层板采用薄板,厚度在 0.6~0.8 mm 之间,焊接性能可靠,能满足焊接要求。

参考文献

- [1] 彭章祝,吴志明. 城轨不锈钢车体制造焊接工艺研究[J]. 现代机械, 2012(3): 1.
PENG Zhangzhu, WU Zhiming. Application of welding process in manufacture of stain steel metro vehicle[J]. Modern Machinery, 2012(3): 1.
- [2] 陶斯嘉,王玉艳,赵阔,等. 地铁铝合金车体静强度分析及底架横梁尺寸优化[J]. 科技创新与应用, 2018(14): 15.
TAO Sijia, WANG Yuya, ZHAO Kuo, et al. An analysis of static strength of metro aluminum-alloy car body and the dimension optimization of underframe crossbeam[J]. Technology Innovation and Application, 2018(14): 15.
- [3] 赵先锐,左敦稳,张强勇,等. 304 不锈钢 TIG 焊接工艺及数值模拟[J]. 电焊机, 2021, 51(5): 49.
ZHAO Xianrui, ZUO Dunwen, ZHANG Qiangyong, et al. TIG welding technology and numerical simulation of 304 stainless steel[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(5): 49.
- [4] 康丽齐,邵有发,魏良,等. 电阻点焊在不锈钢轨道车辆上的应用研究[J]. 电焊机, 2018, 48(3): 349.
KANG Liqi, SHAO Youfa, WEI Liang, et al. Application study of spot welding equipment in stainless steel rail vehicles[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(3): 349.
- [5] 康丽齐. 电阻点焊工艺在高铁奥氏体不锈钢车辆的应用研究[J]. 黑龙江科技信息, 2015(11): 7.
KANG Liqi. Study on the application of resistance spot welding technology in high strength austenitic stainless steel vehicles[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2015(11): 7.
- [6] 陈今良,王海波,周洪. 填充金属对 2205 双相不锈钢 TIG 焊接头组织与性能的影响[J]. 焊接, 2019(1): 55.
CHEN Jinliang, WANG Haibo, ZHOU Hong. Effect of filler metal on microstructure and properties of 2205 duplex stainless steel TIG welded joint[J]. Welding & Joining, 2019(1): 55.
- [7] 李凌,程方杰,廉金瑞,等. 两种点焊机多层板点焊工艺性的比较[J]. 焊接技术, 2005, 34(3): 33.
LI Ling, CHENG Fangjie, LIAN Jinrui, et al. Comparison of spot welding technology of two kinds of spot welding machines for multilayer plates[J]. Welding Technology, 2005, 34(3): 33.
- [8] 朱昌通. 焊工考试试板外观检查的几个问题[J]. 电焊机, 1991, 21(3): 34.
ZHU Changtong. Several points on welding specimen appearance inspection in welder examination[J]. Electric Welding Machine, 1991, 21(3): 34.
- [9] 魏红军. 金属材料室温拉伸试验影响因素分析[J]. 天津冶金, 2015(3): 76.
WEI Hongjun. Analysis on influencing factors of metallic material tensile test at room temperature[J]. Tianjin Metallurgy, 2015(3): 76.
- [10] 华昊,孔谅,王敏,等. 单脉冲及多脉冲电流模式对 AA5182 点焊工艺的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(13): 212.
HUA Hao, KONG Liang, WANG Min, et al. Effects of monopulse and multipulse direct current modes on spot welding process for AA5182[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(13): 212.
- [11] 康丽齐,梁辰,魏良,等. 表面不涂装不锈钢车体点焊试验技术研究[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(2): 61.
KANG Liqi, LIANG Chen, WEI Liang, et al. Experimental study on spot welding test of stainless steel vehicle without surface coating[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(2): 61.
- [12] 康丽齐,于菲. 电阻点焊电极头形式对高强不锈钢焊点强度影响的试验研究[J]. 工程机械, 2014, 45(2): 56.
KANG Liqi, YU Fei. Test and research on impact of electrode tip shapes of resistant dot welding on welding strength of highstrength stainless steel[J]. Construction Machinery and Equipment, 2014, 45(2): 56.
- [13] 康丽齐,孙志鹏,王香,等. 导电密封胶对不锈钢车体电阻点焊焊接性能影响研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(2): 8.
KANG Liqi, SUN Zhipeng, WANG Xiang, et al. Research on the

- influence of conductive sealant on the resistance spot welding performance of stainless steel vehicle body[J]. *Urban Mass Transit*, 2020, 23(2): 8.
- [14] 康丽齐, 张雪峰, 王涛, 等. 单面双点和单面单点焊接形式对电阻点焊焊点强度的影响 [J]. *电焊机*, 2017, 47(5): 120.
KANG Liqi, ZHANG Xuefeng, WANG Tao, et al. Influence of welding of single side double point and single side single point on solder joint strength[J]. *Electric Welding Machine*, 2017, 47(5): 120.
- [15] 康丽齐. 不锈钢多层板电阻点焊接头焊接前的强度试验方法: 201210552477.1[P]. 2013-04-24.
KANG Liqi. Strength test of resistance spot welding joints of stainless steel multi-layer plates before welding: 201210552477.1 [P]. 2013-04-24.
- [16] 孙晓, 蒋明, 陈聪, 等. 三维激光切割在机械加工机床中的集成研究 [J]. *制造技术与机床*, 2015(1): 29.
SUN Xiao, JIANG Ming, CHEN Cong, et al. Research on the 3D laser cutting integrated in machine tool[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2015(1): 29.
- [17] 顾景林. 逆变式焊接电源 [J]. *焊管*, 1996, 19(6): 30.
GU Jinglin. The welding converter power source[J]. *Welded Pipe and Tube*, 1996, 19(6): 30.
- [18] 张银阶. 钨极氩弧焊在不锈钢薄皮管焊接中的应用 [J]. *石油化工建设*, 2008, 30(4): 29.
ZHANG Yinjie. Application of TIG welding in the welding of thin stainless steel tube[J]. *Petroleum and Chemical Construction*, 2008, 30(4): 29.
- [19] 曹梅青, 邹增大, 杜宝帅, 等. 双丝间接电弧焊的电弧形态 [J]. *焊接学报*, 2006, 27(12): 49.
CAO Meiqing, ZOU Zengda, DU Baoshuai, et al. Electric arc shape of twin-wire indirect arc welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 27(12): 49.
- [20] 霍成鹏, 董晓丹, 马广辉. 薄板电阻焊焊核尺寸模拟研究 [J]. *汽车实用技术*, 2015, 40(1): 63.
HUO Chengpeng, DONG Xiaodan, MA Guanghui. Weld nugget size sheet simulation of resistance welding[J]. *Automobile Applied Technology*, 2015, 40(1): 63.
- 收稿日期: 2025-01-07 修回日期: 2025-07-05 出版日期: 2025-12-10
Received: 2025-01-07 Revised: 2025-07-05 Published: 2025-12-10
· 通信作者: 康丽齐, 正高级工程师, 13596189597@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license
- (上接第 67 页)
- [12] 姜新生, 杨春宇, 陈伟, 等. 三相四桥臂辅助逆变器并联供电控制策略研究 [J]. *电力电子技术*, 2023, 57(5): 5.
JIANG Xinsheng, YANG Chunyu, CHEN Wei, et al. Research on parallel power supply control strategy of three-phase four-leg auxiliary inverters[J]. *Power Electronics*, 2023, 57(5): 5.
- [13] 赵清良, 饶东杰, 易滔, 等. 标准地铁列车辅助供电系统与产品平台 [J]. *电力机车与城轨车辆*, 2021, 44(5): 23.
ZHAO Qingliang, RAO Dongjie, YI Tao, et al. Auxiliary power supply system and product platform for standard metro train[J]. *Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles*, 2021, 44(5): 23.
- [14] 任宝兵, 周方. 系列化标准地铁列车辅助电源系统平台设计 [J]. *智慧轨道交通*, 2022, 59(6): 27.
REN Baobing, ZHOU Fang. Research on auxiliary power system platform for Chinese standard metro train[J]. *Smart Rail Transit*, 2022, 59(6): 27.
- [15] 孙南. 城市轨道交通列车辅助供电系统分析 [J]. *科技创新导报*, 2016, 13(28): 25.
SUN Nan. Analysis of auxiliary power supply system for urban rail transit trains[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2016, 13(28): 25.
- [16] 王政. 城市轨道交通列车辅助供电系统及相关问题研究 [J]. *华东科技(学术版)*, 2017(11): 398.
WANG Zheng. Research on auxiliary power supply system of urban rail transit trains and related problems[J]. *East China Science & Technology*, 2017(11): 398.
- [17] 裘文超, 杨树松, 蒋晓东, 等. 采用并网供电和高频变流技术的宁波轨道交通车辆辅助供电系统 [J]. *机车电传动*, 2020(3): 73.
QIU Wenchao, YANG Shusong, JIANG Xiaodong, et al. Auxiliary power supply system with grid connected power supply and high frequency converter technology of Ningbo rail transit vehicles[J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2020(3): 73.
- [18] 何凡, 沈红伟, 来龙坤, 等. 一种高频单片 GaN DC-DC 降压转换器设计 [J]. *微电子学*, 2024, 54(3): 417.
HE Fan, SHEN Hongwei, LAI Longkun, et al. Design of a high-frequency monolithic GaN DC-DC buck converter[J]. *Microelectronics*, 2024, 54(3): 417.
- [19] 周洋, 程广洋, 陈波. 高压直进空调在城轨车辆中的应用 [J]. *轨道交通装备与技术*, 2024(3): 26.
ZHOU Yang, CHENG Guangyang, CHEN Bo. Application of high-pressure direct-inlet air conditioning in urban rail vehicles[J]. *Rail Transportation Equipment and Technology*, 2024(3): 26.
- 收稿日期: 2025-01-07 修回日期: 2025-07-05 出版日期: 2025-12-10
Received: 2025-01-07 Revised: 2025-07-05 Published: 2025-12-10
· 通信作者: 姜宇, 正高级工程师, 013200018166@crrecg.cc
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license