

城市轨道交通客车异种钢焊接工艺性能研究

周 勇 胡立国 冯朝明 韩晓茹 张 野 郭 猛 裴 起 郭 帅

(中车长春轨道客车股份有限公司工程技术中心, 130062, 长春//第一作者, 工程师)

摘 要 针对某城市轨道交通客车底架端部中枕梁组成(550W 碳钢)与纵梁组成(301LN 不锈钢)之间的异种钢焊接工艺性能,根据相关资料及标准,选择气体保护电弧焊(GMAW),使用 ER309LSi 焊丝进行焊接工艺试验。通过探伤检测、力学性能检测、低倍焊缝组织观察及硬度检测等方式,验证 550W 碳钢和 301LN 不锈钢之间的焊接工艺性能。结果表明,试样拉伸、弯曲性能良好,满足相关标准要求;焊缝接头检测合格,焊缝区域熔深及熔合质量满足标准要求。由此确定了 550W 碳钢和 301LN 不锈钢异种钢焊接工艺的可行性。

关键词 城市轨道交通; 客车; 异种钢; 焊接工艺

中图分类号 U270.6;TG44

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.02.021

Dissimilar Steel Welding Process Performance for Urban Rail Transit Vehicles

ZHOU Yong, HU Ligu, FENG Chaoming, HAN Xiaoru, ZHANG Ye, GUO Meng, PEI Qi, GUO Shuai

Abstract Aiming at the welding performance of dissimilar steel between the compositions of pillow beam (560W carbon steel) and longitudinal beam (301LN stainless steel) at the bottom end of an urban rail transit vehicle, according to the relevant data and standards, the gas metal arc welding (GMAW) method is adopted and ER309LSi welding wire is used for a welding process test. The welding process performance between 550w and 301LN dissimilar steels is verified by means of flaw detection, mechanical properties, observation of low power weld microstructure and hardness testing. Results show that the tensile and bending properties of the samples are good and can meet the requirements of relevant standards. The weld joint is also qualified, the weld penetration and fusion quality both meet the standard requirements. Thus, the feasibility of the dissimilar steel welding process between 560W carbon steel and 301LN stainless steel are determined.

Key words urban rail transit; passenger train; dissimilar steel; welding process

Author's address Engineering Technology Center, CRRC

Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

随着国内外城市轨道交通客车市场的快速发展,不锈钢客车得到广泛使用。不锈钢客车主要为不锈钢结构,但其中某些部分为不锈钢+碳钢的异种钢焊接结构。由于不同金属之间的化学成分、熔点、导热率、比热容、线膨胀系数及焊接收缩率等的差异,使得焊接后焊缝应力得不到释放,容易产生残余应力,引起裂纹失效等问题,对焊接接头质量影响很大^[1]。因此,异种钢间的焊接工艺性能及焊接接头的综合力学性能研究是目前国内外研究的热点之一^[2]。

中车长春轨道客车股份有限公司承接的某国外项目,其底架端部组成中枕梁组成为 550W 碳钢材质,纵梁组成为 301LN 不锈钢材质。两种金属之间的焊接工艺无参考资料,亦无相关生产经验。为确定焊接工艺,保证焊接质量,本文对异种钢相关焊接工艺性能进行了试验。通过对试样进行探伤检测、力学性能测试、低倍焊缝组织观察及硬度检测,综合试验结果,结合相关标准,对异种钢制定了最终的焊接工艺方案。

1 550W 碳钢和 301LN 不锈钢焊接性能分析

301LN 是一种低碳奥氏体不锈钢,广泛应用于城市轨道交通客车行业。由于其含有较高的镍、铬、钼等合金元素,能够使金属表面形成一层不溶解于某些介质的坚固的氧化薄膜(钝化膜),使金属与外界介质隔离而不发生化学作用,故 301LN 不锈钢具有很好的耐腐蚀、抗氧化性能,并具有较好的塑性、韧性、加工性能与焊接性能。

550W 为瑞典 SSAB 公司生产的一种高强度耐候钢。该高强钢具有较好的耐腐蚀、易焊接等性能,主要用于压力容器、轨道交通客车等行业。目

前,国内外对此无相应的标准可参考。

由于两种金属所含合金元素种类及含量不同,两种金属之间的焊接属于典型的异种钢焊接。为获得理想的焊接接头,需注意以下问题。

1.1 熔点差异

由于两种金属含碳量不同,导致其熔点存在差别,故其焊接过程中存在一侧母材金属为固态、一侧母材金属为液体的情况,造成焊接过热区合金元素大量烧损、流失或蒸发,出现局部区域焊缝性能降低,难以获得满意的焊接接头^[3]。

1.2 热导率和比热容差异

金属的热导率和比热容与被焊材料的熔化、熔池的形成、焊接区温度场和焊缝凝固结晶有关。不锈钢热导率大约是碳钢的1/3,使得被焊材料熔化不同步,熔池形成与金属结合不良,最终因焊缝结晶条件变坏而导致焊缝性能和成形不良。

1.3 线膨胀系数差异

碳钢和不锈钢的线膨胀系数不同,其焊接冷却过程中,导致焊缝及两侧母材的收缩量不同,易造成焊缝或热影响区产生裂纹,降低焊缝性能,甚至出现焊缝与母材金属剥离的情况。

1.4 电磁性差异

不锈钢和碳钢焊接时,由于焊缝两侧母材电磁性存在着较大的差异,容易出现熔池电弧偏弧、电弧燃烧不稳定的情况,造成焊缝成形不良,甚至出现局部未熔合的情况。

1.5 脆性化合物

由于不同金属所含合金元素的种类及含量不同,其焊接过程中,易发生冶金反应,且在焊缝及熔合区形成新的物质,成为金属间化合物。由于靠近不同母材侧所含化合物的种类及含量存在差异,且某些物质的物理属性较脆,就可能对接头处力学性能产生较大影响,甚至会降低焊缝处的塑性和韧性。

某些金属焊接后,接头处性能良好,但易生成其他物质。例如,在热影响区的晶界上形成一种贫铬层,这种物质含有碳化物,一旦产生,就会导致在其使用过程中设备之间产生晶间腐蚀效果,影响设备的使用寿命,存在焊缝开裂的风险。

2 550W 碳钢与 301LN 不锈钢焊接工艺试验

550W 碳钢与 301LN 不锈钢在化学成分、物理性能等方面存在较大差异。为获得理想状态的焊

接接头,需要从焊接性能分析着手,正确选择焊接方法、焊接材料和焊接工艺。

2.1 焊接材料及焊接方法

焊接处金属的化学成分由填充金属决定。从抑制熔合区中碳扩散、提高焊缝金属抗裂纹能力、调整焊缝和熔合区的组织和性能、改变焊接接头应力分布等方面考虑,焊接材料应选用含 Cr、Ni 等合金元素高于不锈钢母材的焊接材料,并使焊接接头满足较低级别母材的力学性能,同时应具备良好的工艺性能,以满足实际生产中所有的焊接位置。

采用手工焊时可以选择含 Cr 的质量分数为 19.0%、含 Ni 的质量分数为 11.3% 的 A022 不锈钢焊条;采用非熔化极钨极氩弧焊时,填充焊丝可以选择综合性能较好的 ER309L 氩弧焊丝;采用气体保护熔化极点焊时,可以选择 E309LTi 药芯焊丝或 ER309LSi 实心焊丝。

考虑到现场施焊条件及实际生产需要,选择公司常用的气体保护熔化极电弧焊(GMAW)。

结合 AWS A5.9/A5.9M—2006《不锈钢焊条及焊棒规范》,焊接材料选择抗拉强度 ≥ 510 MPa 的 ER309LSi 实心焊丝。该焊接材料相当于 ISO 14343: 2017 Welding consumables — Wire electrodes, strip electrodes, wires and rods for arc welding of stainless and heat resisting steels — Classification 中的 G2312LSi,焊丝直径为 1 mm。保护气体选择 97% Ar + 3% O₂。

根据 Swedish Steel AB 公司提供的相关资料及 ASTM A666: 2015 Standard Specification for Annealed or Cold-Worked Austenitic Stainless Steel Sheet, Strip, Plate, and Flat Bar 和 ISO 14343: 2017,两种金属及焊接材料的化学成分见表 1。

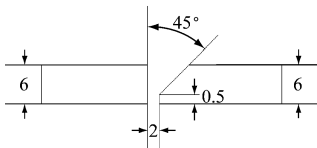
2.2 焊接接头

对于异种钢焊接工艺性能试验,需要结合设计结构的接头形式,同时按照 AWS D1.6/D1.6M: 2007《结构焊接标准 不锈钢》中的规定进行设计,并开展焊接工艺性能试验,确保该试验可以覆盖实际生产中的接头类型和焊接位置。

根据 AWS D1.6/D1.6M: 2007 中第 4 章“非管材连接的 CJP 坡口焊缝”,选择厚度均为 6 mm 的 550W 碳钢和 301LN-1/4H 不锈钢;301LN-1/4H 不锈钢单侧开 45°坡口,钝边厚 0.5 mm,具体坡口形式见图 1;焊接位置为横焊(2G)。焊接前对坡口两侧及边缘 20 mm 范围区域进行打磨,去除氧化皮、

表 1 试验用母材及焊接材料所含化学成分的质量分数

材料名称	不同材料所含化学成分的质量分数							
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni
550W	≤0. 10	≤0. 45	≤0. 80	≤0. 12		≤0. 35	≤0. 95	
301LN	≤0. 03	≤1. 00	≤2. 00	≤0. 045	≤0. 03		16. 0 ~ 18. 0	6. 00 ~ 8. 00
ER309LSi	≤0. 03	0. 65 ~ 1. 20	1. 50 ~ 2. 50	≤0. 030	≤0. 02	≤0. 50	22. 0 ~ 25. 0	11. 0 ~ 14. 0



单位:mm

图 1 坡口形式

Fig. 1 Groove type

杂质、油污、油漆等,保证焊接时无杂质元素侵入,确保试验的准确性。

2.3 焊接工艺参数

结合公司以往项目经验,本试验采用 2 层 2 道焊接,焊接时采用直流反接;焊接过程中利用红外测温仪测量道间温度,保证道间温度不低于 20 ℃,不高于 200 ℃;焊接时进行层间清理,保证焊接质量,要求每层焊缝一次完成。本试验选取的焊接工艺参数见表 2。

表 2 焊接工艺参数

Tab. 2 Welding parameter

焊层	焊接方式	电流极性	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(mm/min)	热输入/(kJ/mm)
1	GMAW DCEP(+)	185	18. 5	400. 0	0. 51	
2	GMAW DCEP(+)	198	21. 5	361. 9	0. 71	

注:DCEP 为直流反接,+ 为正极性。

2.4 焊接试验方法

试样制作完成后,根据 AWS D1. 6/D1. 6M: 2007 中的规定对试验焊缝进行无损检测、力学性能检测、低倍观察及硬度检测。

3 试验结果分析

3.1 无损检测

根据 AWS D1. 6/D1. 6M: 2007 中第 6 章的规定,对焊接完成的焊接试样进行无损检测。无损检测包括目视检测及 X 射线探伤检测。

目视检测焊缝外观,无咬边、焊瘤、气孔、未熔合、裂纹、夹渣、根部凹槽等缺陷,焊缝余高符合标

准要求。

目视检测合格后,对试样进行 X 射线探伤检测。检测表明,试样焊缝区域无明显纵向裂纹、横向裂纹及弧坑裂纹,内部无条状、块状、簇状等气孔,不存在内部夹渣等缺陷,焊缝成形良好,X 射线照射检测评定结果合格。

3.2 焊接试样力学性能检测

对探伤合格的试样,按照 AWS D1. 6/D1. 6M: 2007 中第 4 章的规定加工样块,并进行拉伸试验和弯曲试验。

试验用母材及试样的力学性能见表 3。由表 3 可见,试样的抗拉强度分别为 650 MPa 和 660 MPa,试样断裂于焊缝处,表明异种钢连接位置的强度能够满足设计结构对其强度的要求。

表 3 试验用母材及试样拉伸性能

Tab. 3 Tensile properties of test base metal and samples

名称	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %	断口位置
550W 碳钢	570	690	20	
301LN-1/4H 不锈钢	745	860	30	
试样		650 或 660		焊缝

分析认为,ER309LSi 焊丝中的碳元素含量比 550W 碳钢中的碳元素含量要低,与 301LN-1/4H 不锈钢中碳元素含量近似。较低的碳元素含量对合金的拉伸性能是有利的,同时 ER309LSi 焊丝中的镍元素也起到了减弱熔合区碳原子的迁移作用^[4],避免接头焊缝中裂纹的产生。碳钢中锰元素与铁发生固溶强化^[5],提高了异种钢焊接接头的抗拉强度。

根据 AWS D1. 6/D1. 6M: 2007 中第 4 章的规定,当试样板厚小于等于 10 mm 时,弯曲试验包括 2 个根部弯曲(背弯)试验和 2 个正面弯曲(正弯)试验。焊缝区焊接接头弯曲试验结果见表 4。由表 4 可见,弯曲试验中正弯和背弯弯曲 180°后,试样的拉伸面均未出现裂纹、焊缝断裂等不合格问题,说

明焊接接头的塑性性能即变形能力符合标准要求,弯曲性能优良,焊接接头弯曲试验评定为合格。

表 4 焊缝区焊接接头弯曲试验结果

Tab.4 Bending test of welded joints in weld zone				
样品编号	检验项目	弯曲角度/ (°)	弯曲压头 直径/mm	评定
1	正弯	180	24	合格
2	正弯	180	24	合格
3	背弯	180	24	合格
4	背弯	180	24	合格

3.3 低倍观察

低倍焊缝组织观察主要为检验焊接试样中焊缝金属与母材的熔合情况、焊缝熔深及焊缝余高等。观察本试验中的低倍焊缝组织(见图 2)可以发现,焊缝金属与母材熔合良好,根部熔合良好,焊缝熔深 6 mm,无夹渣、咬边、侧壁未熔合、未焊透等缺陷。由于焊接位置为 2G 横焊,焊缝余高相较于 1G 平焊略高,但焊缝余高小于 AWS D1. 6/D1. 6M—2007 中第 5 章规定的最大值 3 mm,属于理想状态的焊缝余高。由此可判定,焊接接头低倍焊缝组织观察结果合格。

3.4 硬度检测

选取 1 个焊接接头低倍焊缝组织观察合格的试样,使用维氏硬度计对其进行硬度检测。检测载荷取 10 kg,加载时间取 15 s。分别在试样母材区、熔合区及焊缝区各选取 3 个测点,总共 30 个测点。试样硬度测点见图 3。

表 5 试样焊缝区焊接接头硬度

Tab.5 Hardness of welded joints in sample weld zone																
测量线 位置	不同焊缝区各测点的焊接接头硬度															
	碳钢母材区			熔合区 1			焊缝区			熔合区 2			不锈钢母材区			
	测点 1	测点 2	测点 3	测点 1	测点 2	测点 3	测点 1	测点 2	测点 3	测点 1	测点 2	测点 3	测点 1	测点 2	测点 3	
<i>f</i>	266	260	226	240	236	235	208	174	179	190	193	226	258	278	328	
<i>r</i>	228	230	216	208	204	173	196	191	208	206	226	253	269	300	331	

4 结论

- 1) 综合目视检测、X 射线照射结果及焊接接头低倍焊缝组织结果,可以发现焊缝区域组织无气孔、夹渣、未熔合、微裂纹等缺陷,焊缝横断面内部质量满足标准要求。
- 2) 综合拉伸试验、弯曲试验及硬度试验结果,确认使用焊接材料 ER309LSi 可以保证焊接接头具

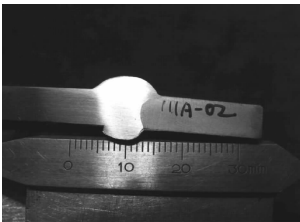
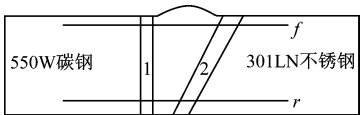


图 2 焊接接头低倍焊缝组织观察
Fig. 2 Microstructure observation of low magnification weld on the welded joints



注:测量线 *f* 距试样上表面 0.5 mm;测量线 *r* 距试样根部 0.5 mm;测量区域 1 为 550W 碳钢侧熔合区;测量区域 2 为 301LN 不锈钢侧熔合区。

图 3 试样硬度测点简图
Fig. 3 Diagram of sample hardness measuring points

表 5 为焊缝区焊接接头硬度。由表 5 可见,焊缝区焊接接头硬度最小。这是因为母材和热影响区的奥氏体组织含量变化不大,但焊缝中的奥氏体数量明显多于母材和热影响区。

焊缝根部硬度比上部略高,主要是因为:焊接过程中根部焊接速度较快,焊接停留时间较短,液体金属流动性较差,熔化的母材金属和填充金属混合不充分,使得在此侧焊缝金属中碳钢占比增大,从而形成一个成分梯度很大的过渡层,而在过渡层中存在一层硬度很高的马氏体组织。

备良好的机械性能,满足相关设计及标准要求。

3) 综合无损检测、力学性能检测、低倍组织观察及硬度检测结果,可以确认该焊接工艺性能试验符合 AWS D1. 6/D1. 6M: 2007 中第 4 章规定的 CJP 焊缝工艺评定要求。根据 AWS D1. 6/D1. 6M: 2007, 该次焊接性能试验的相关参数可应用于以下情况的焊接:焊接母材板厚 2 ~ 12 mm,焊

(下转第 91 页)