

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.07.15

沉淀强化低碳-镍-铜-铬-钼-铌合金结构钢 焊接工艺研究

何 嘉, 侯金柱, 郝晓卫, 穆云平, 胡耀锋

中车唐山机车车辆有限公司, 河北 唐山 063000

摘 要: 沉淀强化低碳-镍-铜-铬-钼-铌合金结构钢 ASTM A710 A 级 3 类在不同的预热温度和层间温度、不同坡口形式条件下与其自身、低合金高强度钢 ASTM A588 A 级、铸钢 AAR M-201 进行 GMAW 焊接, 并对其焊接接头进行外观检测、射线检测、拉伸试验、弯曲试验和冲击试验, 确定沉淀强化低碳-镍-铜-铬-钼-铌合金结构钢的焊接工艺。结果表明: 对于 ASTM A710 A 级 3 类和 ASTM A710 A 级 3 类、ASTM A710 A 级 3 类和 ASTM A588 A 级的材料组合, 最低预热温度和层间温度不得低于 10℃; 对于 ASTM A710 A 级 3 类和 AAR M-201 的材料组合, 最低预热温度和层间温度不得低于 150℃; 不同坡口形式的 ASTM A710 A 级 3 类的焊接接头都具有良好的抗拉强度, 具有良好的塑性及延展性, 而且焊缝和热影响区均具有良好的低温冲击韧性; 相同坡口形式的 ASTM A710 A 级 3 类与不同材料组合的焊接接头都具有良好的抗拉强度, 具有良好的塑性及延展性, 而且焊缝和热影响区均具有良好的低温冲击韧性。

关键词: 低合金高强度钢; 沉淀强化; 焊接工艺; 力学性能

中图分类号: TG457.11 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)07-0114-05

Welding Process Research on Precipitation-Strengthened Low-Carbon Nickel-Copper-Chromium-Molybdenum-Columbium Alloy Structural Steel

HE Jia, HOU Jinzhu, HAO Xiaowei, MU Yunping, HU Yaofeng

CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan 063000, China

Abstract: Precipitation-strengthened low-carbon nickel-copper-chromium-molybdenum- Columbium alloy structural steel ASTM A710 Grade A Class 3 was welded to itself, to low-alloy high-strength steel ASTM A588 Grade A, and to cast steel AAR M-201 using the gas metal arc welding (GMAW) process. The effects of different preheat temperatures, interpass temperatures, and groove configurations on the quality and mechanical properties of the welded joints were systematically investigated. Joint performance was evaluated through visual inspection, radiographic testing, tensile testing, bending testing, and impact testing. The results demonstrate that for material combinations of ASTM A710 Grade A Class 3 with itself and with ASTM A588 Grade A, the minimum preheat and interpass temperatures must not be lower than 10℃. For the combination of ASTM A710 Grade A Class 3 with AAR M-201 cast steel, the minimum preheat and interpass temperatures must be maintained at or above 150℃ to prevent cracking and porosity. Welded joints of ASTM A710 Grade A Class 3 with different groove designs exhibit excellent tensile strength, favorable plasticity and ductility, and both the weld metal and heat-affected zone demonstrate outstanding low-temperature impact toughness at -39.9℃. Furthermore, joints between ASTM A710 Grade A Class 3 and dissimilar materials using identical groove configurations also exhibit sound tensile properties, good formability, and satisfactory low-temperature impact resistance, meeting the requirements of AWS D1.1/D1.1M and AWS D15.1/D15.1M.

Keywords: low-alloy high-strength steel; precipitation-strengthened; welding process; mechanical properties

收稿日期: 2025-08-25 修回日期: 2025-11-13

作者简介: 何 嘉(1987—),男,高级工程师,主要从事焊接工艺技术工作。E-mail: ts_jia1206@163.com。

引用格式:何嘉,侯金柱,郝晓卫,等. 沉淀强化低碳-镍-铜-铬-钼-钨合金结构钢焊接工艺研究[J]. 电焊机,2026,56(7):114-118.
Citation: HE Jia, HOU Jinzhu, HAO Xiaowei, et al. Welding Process Research on Precipitation-Strengthened Low-Carbon Nickel-Copper-Chromium-Molybdenum-Columbium Alloy Structural Steel[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(7): 114-118.

0 引言

端底架组成是轨道车辆车体结构中安全性要求最高的结构件,需承受高强度动态载荷,满足抗碰撞、防冲击及高承载的要求。在公司中标的美国费城双层车项目和加拿大蒙特利尔双层通勤车项目中,车体端底架组成均采用合金钢板材拼焊结构,结构复杂且焊接量很大。

在关键部件上,项目选用强度更高的碳-镍-铜-铬-钼-钨合金结构钢 ASTM A710 板材。按照 ASTM A710/A710M 标准,该材质分为 A 级和 B 级,每个级别分为 1 类、2 类、3 类,其区别主要在于热处理的组合方式不同。根据项目车体强度需求,端底架组成选用 ASTM A710 A 级 3 类,该材料在 870~925 °C 范围内进行淬火热处理,然后在 540~705 °C 范围内进行沉淀热处理^[1],热处理后钢材的强度、硬度及耐腐蚀性等力学性能有所提升。然而根据该材料的化学成分配比及碳当量计算公式 $C_{eq}=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Cu+Ni)/15^{[2]}$,ASTM A710 A 级 3 类的碳当量 C_{eq} 为 0.43%,焊接性较差,焊接时容易出现气孔、裂纹、夹杂等缺陷。此外,根据端底架组成的结构,与 ASTM A710 A 级 3 类连接的母材

共 3 种,分别为 ASTM A588 A 级、ASTM A710 A 级 3 类和 AAR M-201,其中 AAR M-201 为铸件,含碳量高、杂质较多,焊接性同样较差^[3-5]。目前,针对 ASTM A710 A 级 3 类的焊接工艺研究较少,尤其是该钢种与 ASTM A588 A 级及 AAR M-201 铸钢的异种钢焊接工艺缺乏报道。

本文针对上述工程背景,从不同材料组合、不同坡口形式、不同预热温度及层间温度出发,系统研究沉淀热处理碳-镍-铜-铬-钼-钨合金结构钢 ASTM A710 A 级 3 类的 GMAW 焊接工艺,确定适用于该材料的焊接参数及工艺要求,为该钢种在轨道车辆结构中的工程应用提供技术支撑。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验材料共 3 种,分别为 ASTM A710 A 级 3 类、ASTM A588 A 级和 AAR M-201,试板尺寸为 8 mm×150 mm×530 mm。焊接材料选用 AWS A5.28 ER100S-G(Ø1.2 mm),焊接方法为熔化极活性气体保护焊(GMAW)。试验材料的化学成分如表 1 所示,力学性能如表 2 所示。

表 1 试验材料的化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical composition of test materials (wt. %)

材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	V
ASTM A588 A 级	0.01	0.34	1.16	0.016	0.003	0.42	0.032	0.3	0.046
ASTM A710 A 级 3 类	0.04	0.25	0.55	0.007	0.001	0.69	0.83	1.14	0.003
AAR M-201	≤0.32	≤1.5	≤0.9	≤0.04	≤0.04	—	—	—	—
ER100S-G	0.12	0.67	1.36	0.015	0.014	0.58	0.52	0.04	0.01

根据项目需求及试验目的,制定焊接试验方案^[6-14]。试验变量包括不同的材料组合、不同的焊接预热温度^[15]、不同的坡口形式^[16]。试验方案设计如表 3 所示。

试验 1、2、3、4 旨在验证 ASTM A710 A 级 3 类与不同材料焊接的最低预热温度和层间温度;试验 1、试验 3 和试验 4 旨在验证在合适的预热温度和层间温度、相同的坡口形式条件下,ASTM A710 A 级 3

表 2 试验材料的力学性能

Table 2 The Mechanical properties of materials

材料	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa
ASTM A588 A 级	≥485	≥345
ASTM A710 A 级 3 类	≥585	≥550
AAR M-201	≥517	—
ER100S-G	≥690	—

类与不同材料的焊接工艺研究;试验 1 和试验 2 目的在于验证在合适的预热温度和层间温度、相同的

表3 焊接试验方案
Table 3 Welding test plan

试验序号	材料组合	坡口形式	预热温度/℃
1	ASTM A710 A级3类+ASTM A710 A级3类	8HV	10、50
2	ASTM A710 A级3类+ASTM A710 A级3类	4DHV	10、50
3	ASTM A710 A级3类+ASTM A588 A级	8HV	10、50
4	ASTM A710 A级3类+AAR M-201	8HV	10、100、150

材料组合条件下,ASTM A710 A级3类不同的坡口形式的焊接工艺研究。

1.2 试板检测方法

试板焊接完后,根据 AWS D1.1/D1.1M《Structural Welding Code-Steel》^[17]和 AWS D15.1/D15.1M《Railroad Welding Specification for Cars and Locomotives》^[18]标准要求进行相关检测。试板检测包括无损检测和破坏性检测两个方面,其中无损检测包括外观检测、射线检测或超声波检测,破坏性检测包括拉伸试验、弯曲试验、冲击试验,破坏性检测的试样尺寸按照 AWS D1.1/D1.1M《Structural Welding Code-Steel》的要求进行加工制备^[5]。

2 焊接工艺试验

焊接设备选用 Panasonic YD-350 GM3 焊机。焊接位置为 2G 位置(横焊)。保护气体为 82%Ar+18%CO₂,气体流量为 18L/min。坡口形式包含 8HV(单面 V 形坡口)和 4DHV(双面 V 形坡口)两种,间隙为 0 mm,钝边为 1.2 mm,坡口细节如图 1 所示。

2.1 预热温度及层间温度的确定

试验 1、试验 2 和试验 3 的工艺试验执行标准为 AWS D1.1/D1.1M《Structural Welding Code-Steel》^[17],

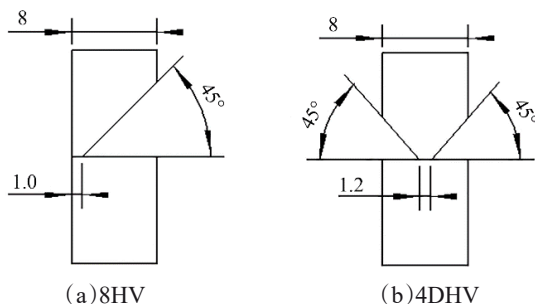


图1 焊接试板坡口细节

Fig. 1 Groove details of welding test plate

试验 4 的工艺试验执行标准为 AWS D15.1/D15.1M《Railroad Welding Specification for Cars and Locomotives》^[18]。根据标准要求,各材料的最低预热温度和层间温度规定如下:ASTM A588 A级为 0℃,ASTM A710 A级3类为 10℃,AAR M-201 为 10℃。按照标准要求,不同材料组合的焊接接头的最低预热温度和层间温度应以两者种较高的温度作为该组合的最低预热温度和层间温度,因此,试验 1、2、3、4 的最低预热温度和层间温度均为 10℃。按照上述确定的预热温度及层间温度进行焊接试验,结果如表 4 所示,由表 4 可知:

(1)对于 ASTM A710 A级3类与自身及 ASTM A588 A级的材料组合(试验 1、试验 2、试验 3),预热温度为 10℃和 50℃时焊缝成形均良好,满足 AWS D1.1 要求。考虑到经济性,确定试验 1、试验 2 和试验 3 的最低预热温度和层间温度为 10℃。

(2)对于 ASTM A710 A级3类与 AAR M-201 的材料组合(试验 4),预热温度为 10℃时,点固焊即发生崩裂,打底焊层出现贯穿裂纹;预热温度提高至 100℃时,焊缝表面仍出现裂纹和气孔;预热温度提高至 150℃时,焊缝成形良好,满足 AWS D15.1 要求。

表4 预热温度与层间温度试验结果

Table 4 Result of preheat temperature and interpass temperature test

试板编号	试验	预热温度/℃	试验结果
1-1	试验 1	10	焊缝成形良好,符合 AWS D1.1 要求
1-2	试验 1	50	焊缝成形良好,符合 AWS D1.1 要求
2-1	试验 2	10	焊缝成形良好,符合 AWS D1.1 要求
2-2	试验 2	50	焊缝成形良好,符合 AWS D1.1 要求
3-1	试验 3	10	焊缝成形良好,符合 AWS D1.1 要求
3-2	试验 3	50	焊缝成形良好,符合 AWS D1.1 要求
4-1	试验 4	10	点固焊崩裂,打底焊层贯穿裂纹
4-2	试验 4	100	焊缝表面裂纹,气孔
4-3	试验 4	150	焊缝成形良好,符合 AWS D15.1 要求

2.2 焊接工艺参数

采用 2.1 节确定的最低预热温度和层间温度进行焊接试验。焊缝成形良好,经射线检测未发现气孔、夹杂及裂纹等缺陷。通过试验确定的焊接工艺参数如表 5 所示。

表 5 焊接工艺参数
Table 5 Welding parameter

试验 序号	焊接 道数	电流 /A	电压 /V	焊接速度 /(mm·s ⁻¹)	预热温度和 层间温度/°C	最大热输入 /(kJ·mm ⁻¹)
1	1	256	26.8	10.21	17	0.67
	2	250	26.4	8.23	21	0.8
	3	250	26.4	9.9	20	0.67
2	1	256	26.8	10	19	0.69
	2	256	26.8	9.23	22	0.74
	3	256	26.8	9.38	20	0.73
	4	256	26.8	9.2	15	0.75
	5	256	26.8	7.41	21	0.93
	6	256	26.8	10.17	20	0.67
3	1	256	26.8	7.28	17	0.94
	2	250	26.4	6.52	19	1.01
	3	250	26.4	9.82	23	0.67
4	1	264	26.8	6.67	150	1.06
	2	248	26.4	9.34	155	0.7
	3	248	26.4	11.54	154	0.57

3 力学性能试验结果及分析

3.1 拉伸试验

分别对试验 1、试验 2、试验 3 和试验 4 的焊接接头进行拉伸试验,每组试验的焊接试板上取 2 个拉伸试样,拉伸试验结果如表 6 所示。

表 6 拉伸试验结果
Table 6 Results of tensile tests

试验 序号	尺寸 /mm	抗拉强度 /MPa	平均值 /MPa	断裂部位
1	8×20	655.7,652.1	653.9	母材位置
2	8×20	647.2,660.9	654.05	母材位置
3	8×20	639.4,631.8	635.6	ASTM A588 侧母材位置
4	8×20	629.9,615.5	622.7	AAR M-201 侧母材位置

由表 6 可知,试验 1 (ASTM A710+A710,8HV 坡口)的焊接接头抗拉强度平均值为 653.9 MPa,断裂位置位于母材;试验 2 (ASTM A710+A710,4DHV 坡口)的抗拉强度平均值为 654.05 MPa,断裂位置同样位于母材。两种坡口形式的同种钢焊接接头抗拉强度相近,均远高于 ASTM A710 A 级 3 类的标准下限值(585 MPa),表明坡口形式对拉伸强度的影响较小。试验 3 (ASTM A710+A588 异种钢焊接)的抗拉强度平均值为 635.6 MPa,断裂位置位于 ASTM A588 侧母材;试验 4 (ASTM A710+AAR M-201 异

种钢焊接)的抗拉强度平均值为 622.7 MPa,低于其他三组试验,断裂位置位于 AAR M-201 侧母材。AAR M-201 为铸钢,其力学性能离散性较大,且铸件内部可能存在的气孔、夹杂等缺陷会降低其实际承载能力。此外,铸钢的组织粗大且存在成分偏析,焊接热循环进一步加剧了热影响区的性能不均匀性,导致接头强度相对偏低。

上述结果表明,各试验的焊接接头抗拉强度满足标准 AWS D1.1/D1.1M《Structural Welding Code-Steel》^[17] 和 AWS D15.1/D15.1M《Railroad Welding Specification for Cars and Locomotives》^[18] 的要求,且断裂位置均位于母材,抗拉强度合格。

3.2 弯曲试验

根据标准 AWS D1.1/D1.1M 和 AWS D15.1/D15.1M 的要求,试验 1、试验 2、试验 3 和试验 4 的焊接接头弯曲试验采用 2 个面弯和 2 个背弯。弯曲试验的弯心直径为 30mm,弯曲角度为 180°。

试验结果表明:试验 1、试验 2、试验 3 和试验 4 的焊接接头弯曲试件经 180°弯曲变形后,外表面和侧面均未发现裂纹,表明两种坡口形式的焊接接头均具有良好的塑性及延展性,满足 AWS D1.1/D1.1M 和 AWS D15.1/D15.1M 的要求。

3.3 冲击试验

根据 AWS D1.1/D1.1M 和 AWS D15.1/D15.1M 标准要求,试验 1、试验 2、试验 3 和试验 4 的焊接接头冲击试验采用小尺寸试样,规格为 5 mm×10 mm×55 mm,冲击温度为-39.9 °C。根据 ASTM A370a-97 标准,最小合格冲击功的降低量需按规定确定,冲击功要求值≥11 J。冲击试验结果如表 7 所示。

由表 7 可知,无论是焊缝还是热影响区,所有试验焊缝的冲击功均大于 11J,具有良好的低温冲击韧性,满足标准 AWS D1.1/D1.1M 和 AWS D15.1/D15.1M 的要求。

4 结论

(1)对于 ASTM A710 A 级 3 类和 ASTM A710 A 级 3 类、ASTM A710 A 级 3 类和 ASTM A588 A 级的材料组合,最低预热温度和层间温度控制在 10 °C 以上时,焊缝质量合格,焊缝成形美观;对于 ASTM

表7 冲击试验结果

Table 7 Results of impact test

试验 序号	尺寸 /mm	冲击部位	平均值 AkV/J	温度 /°C
1	5×10×55	焊缝	62	-39.9
		熔合线+1 mm	110	
		熔合线+5 mm	116	
2	5×10×55	焊缝	46.3	-39.9
		熔合线+1 mm	93	
		熔合线+5 mm	118	
3	5×10×55	焊缝	34	-39.9
		熔合线+1 mm(A588 侧)	32	
		熔合线+1 mm(A710 侧)	92	
		熔合线+5 mm(A588 侧)	37.3	
		熔合线+5 mm(A710 侧)	102.7	
4	5×10×55	焊缝	36	-39.9
		熔合线+1 mm(A710 侧)	73.7	
		熔合线+1 mm(M-201 侧)	14.7	
		熔合线+5 mm(A710 侧)	108	
		熔合线+5 mm(M-201 侧)	26.3	

A710 A 级 3 类和 AAR M-201 的材料组合,最低预热温度和层间温度控制在 150℃以上时,焊缝质量合格,焊缝成形美观。

(2)在合适预热温度和层间温度条件下,不同坡口形式的 ASTM A710 A 级 3 类的焊接接头都具有良好的抗拉强度,具有良好的塑性及延展性,而且焊缝和热影响区均具有良好的低温冲击韧性。

(3)在合适预热温度和层间温度条件下,相同坡口形式的 ASTM A710 A 级 3 类与不同材料组合的焊接接头都具有良好的抗拉强度,具有良好的塑性及延展性,而且焊缝和热影响区均具有良好的低温冲击韧性。

参考文献:

- [1] ASTM A710/A710M: 2002. Standard Specification for Precipitation-Strengthened Low-Carbon Nickel-Copper-Chromium-Molybdenum-Columbium Alloy Structural Steel Plates[S].2002.
- [2] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册-材料的焊接[M]. 北京:机械工业出版社,1992.
- [3] 朱刚,周友龙,张志昌,等. B+级铸钢件缺陷低温焊补工艺试验研究[J]. 机车车辆工艺,2009,1:4-6.
- [4] 戴为志,李华,何乔生,等. 高强度钢焊接前沿技术的开发研究[J]. 电焊机,2014,44(5):42-50.
DAI W Z, LI H, HE Q S, et al. Development of advanced technology on high strength steel welding[J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(5): 42-50.
- [5] Schorghuber M, Eberhard M, Wimberger K. 现代 GMAW 焊机技术与高强度钢焊接[J]. 电焊机, 2014, 44(5): 1-5.
Schorghuber M, Eberhard M, Wimberger K. Welding of high strength steels with modern GMAW power source technology[J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(5): 1-5.
- [6] 贾军,杨益清,李好生,等. Q890 超高强度钢 GMAW 焊接工艺[J]. 电焊机, 2015, 45(5): 55-58.
JIA J, YANG Y Q, LI H S, et al. GMAW welding technology of Q890 ultra-high strength steel [J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(5): 55-58.
- [7] 董达善,俞翔栋,黄婉娟,等. Q690 高强度钢板 MAG 焊接工艺[J]. 电焊机, 2015, 45(4): 123-126.
DONG D S, YU X D, HUANG W J, et al. Study on MAG welding process for the thick plate of Q690 high-strength steel [J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(4): 123-126.
- [8] 张鸿,李小宇,周军,等. TS980QC 钢焊接工艺试验[J]. 电焊机, 2019, 49(8): 83-86.
ZHANG H, LI X Y, ZHOU J, et al. Welding procedure test of TS980QC steel [J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(8): 83-86.
- [9] 樊建兵,雷鸣. SUMITEN780 钢焊接工艺试验[J]. 电焊机, 2008, 38(10): 31-33.
FAN J B, LEI M. Experiments about welding procedure of SUMITEN780 alloy steel [J]. Electric Welding Machine, 2008, 38(10): 31-33.
- [10] 罗永剑,周友龙,赵艳丽,等. 35CrMo 钢焊接工艺试验[J]. 电焊机, 2013, 43(11): 130-132.
LUO Y J, ZHOU Y L, ZHAO Y L, et al. Research on the welding of 35CrMo steel [J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(11): 130-132.
- [11] 陈丽园,穆云平,郭瑞青,等. 铸钢 AAR M 201 焊接工艺研究[J]. 电焊机, 2021, 51(5): 88-90.
CHEN L Y, MU Y P, GUO R Q, et al. Welding procedures research for steel castings of AAR M 201 [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(5): 88-90.
- [12] 周林,盛连才,刘传宁. WHT590 高强度钢焊接性试验及工艺评定[J]. 电焊机, 2013, 43(8): 60-63.
ZHOU L, SHENG L C, LIU C N. Welding test and technical assessment for WHT590 high strength steel [J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(8): 60-63.
- [13] 章友谊,屈金山,王大春. 高强度 Domex700MC 焊接工艺及接头性能分析[J]. 电焊机, 2005, 35(12):