

· 综述 ·

国内高速列车转向架用钢的发展

张瑞琦 刘志伟 孙傲 郭晓宏 孙杭 杨玉
(鞍钢集团钢铁研究院, 鞍山 114009)

摘要 对国内铁路列车转向架用钢从 1950 年至 2010 年的材质变化和性能要求进行了概述;同时对铸钢和焊接式转向架用钢的化学成分设计、强度级别、耐大气腐蚀性能等进行了简要介绍;着重对现有高速列车转向架用钢的低温韧性、耐大气腐蚀性能、焊接性能和疲劳性能的研究现状进行了梳理。

关键词 铁路列车 高速列车 转向架用钢

Development of Domestic High Speed Train Bogie Steel

Zhang Ruiqi, Liu Zhiwei, Sun Ao, Guo Xiaohong, Sun Hang and Yang Yu
(Ansteel Iron and Steel Research Institute, Anshan 114009)

Abstract The material changes and property requirements of domestic railway bogie steel from 1950's ~2010's are summarized. At the same time, the chemical composition design, strength grade and atmospheric corrosion resistance mechanism of steel for cast steel and welded bogies are briefly introduced. The research status of low temperature toughness, atmospheric corrosion resistance, welding property and fatigue property of current high-speed train bogie steel is reviewed.

Material Index Railway Train, High Speed Train, Bogie Steel

转向架是铁路列车的运行部件,集承载、牵引、缓冲、转向及制动等功能于一身,对整个列车安全运行起到至关重要的作用^[1-2]。建国初期,铁路列车转向架以三大件式铸造结构件为主,从 20 世纪 60 年代的主型转 8A 型发展到后来的转 K6 型^[3],三大件式铸钢转向架及簧下自重大,轮轨磨损严重、制造和维护成本高,列车运行品质差,不利于提速和重载^[4-6]。20 世纪 80 年代为适应国民经济发展的需要,开始进行焊接式转向架的试用研究,结果表明,该转向架结构合理、维修工作量小、运行品质高^[7-9]。

截止到 2020 年 7 月我国铁路营运里程已突破 14 万 km,其中高速铁路 3.6 万 km。高速列车运行速度已达 350 km/h,因而对制造焊接转向架使用的钢材在性能上要求也更加严格^[10-11],要求高速列车转向架用钢不仅具有一定的强度和较高的韧性,同时具有良好的焊接性能、抗疲劳性能和耐大气腐蚀性能。

1 转向架用钢的发展概况

我国三大件式转向架的铸钢

材料主要采用北美 AAR-M201-2005 标准,钢材分为六个等级,主要使用 B 级钢、B+级钢、C 级钢来制造转向架^[12-13]。

我国焊接转向架用钢经历了从低合金高强度结构钢到耐候钢的变迁,初始设计时选用的是焊接性能较好的 235 MPa 和 345 MPa 级别的低合金钢,在实际应用过程中考虑到焊接转向架的腐蚀问题,开始采用耐候钢作为制造材料^[11,14]。图 1 所示为国内客车转向架用钢的应用与发展历程。

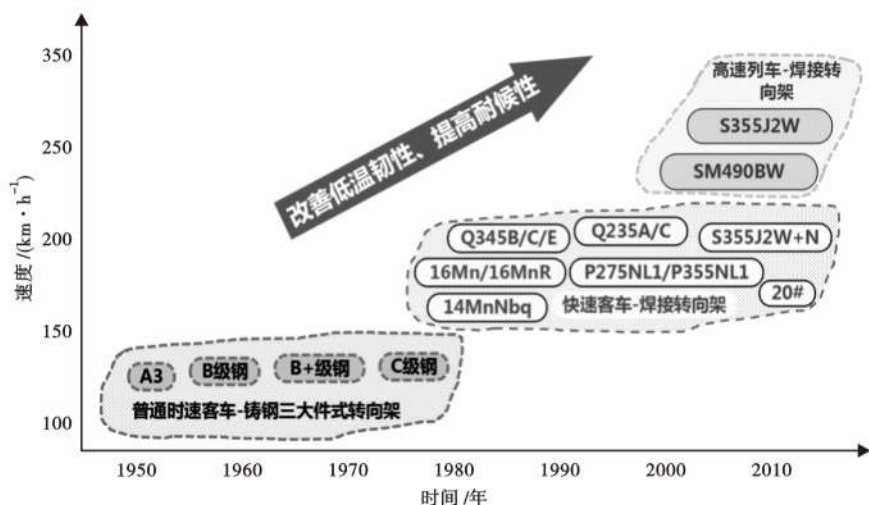


图 1 国内客车转向架用钢的发展历史

Fig. 1 Development history of domestic railway bogie steel

2 化学成分设计

三大件式转向架用铸钢的化学成分见表 1, 焊接转向架用钢的化学成分见表 2。

Cu 是最早最普遍应用的耐大气腐蚀合金元素^[15]。它的耐大气腐蚀性能的作用机理主要有: (1) 托马晓夫^[16]提出的促进阳极钝化论, 认为钢与表面二次析出 Cu 之间的阴极接触, 能促进钢阳极钝化, 并形成保护性较好的锈层; (2) 张全成等^[17] Cu 富集说, 认为在基体与锈层之间形成以 CuO 为主要成分、与基体结合牢固的中间阻挡层, 因而具有较好的保护作用; (3) Dunnwald 等^[18]认为 Cu 和 P 等合金元素一起改变了锈层的吸湿性, 增加了临界湿度, 从而有利于提高基体的耐大气腐蚀能力。前两种解释都是基于在钢的表面及锈层中的富集现象, 刘丽宏等^[19]认为这两种机制可能同时起作用。Cr 能在钢表面形成致密的氧化膜, 从而提高钢的钝化能力, 与 Cu 同时加入钢中时效果尤为明显。Cr 元素在锈层中的去向有两种: (1) 在锈层中形成铁铬的多元合金氧化物; (2) 在锈层中的微裂纹、晶界及与基体界面处富集^[19]。在钢中加入适量的微合

金元素(Nb、V、Ti), 与 C、N 结合成碳化物、氮化物和碳氮化物, 这些化合物在高温下溶解, 低温下析出, 其作用表现在: (1) 加热时阻碍原始奥氏体晶粒长大; (2) 在轧制过程中抑制再结晶及再结晶后的晶粒长大; (3) 低温时起到沉淀析出强化的作用。配合控轧控冷工艺, 使钢中晶粒得到充分细化, 同时取得良好的沉淀析出强化效果, 使钢板不仅具有高强度, 并且具有良好的塑性、韧性、可焊性和低的韧脆转变温度冷成形能力也十分优异^[20]。

3 低温韧性

我国疆域辽阔, 南北地域温度差异较大, 北方地区冬季的最低温度可达 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, 为此要求转向架用钢的冷脆转变温度应低于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。国内在 20 世纪 80 年代开始引进焊接转向架, 最初使用 Q235A 或 Q235C 钢板, 由于当时钢中杂质元素控制水平较低, 铸坯内部质量不佳, 且钢板低温冲击性能、抗疲劳性能、强度不足^[6,10]; 通过技术改进到 90 年代批量应用时, 低合金高强度钢板 Q345 (16Mn) 系列满足了强度和抗疲劳性能要求, 当时 V 型冲击指标的推广使用, 暴露出我国钢板冲击韧性不足的缺陷, 如

表 1 三大件式转向架用铸钢化学成分/%
Table 1 Chemical composition of cast steel for three piece bogies /%

铸钢	C	Si	Mn	Ni	Cu	Cr	Mo	P	S
B 级钢	0.20~0.28	0.2~0.4	0.7~1.0	0.3~0.4	≤0.3	-	-	≤0.030	≤0.030
B+级钢	0.23~0.29	0.3~0.5	0.8~1.0	0.2~0.4	≤0.3	0.3~0.5	-	≤0.030	≤0.030
C 级钢	≤0.32	≤1.5	≤1.85	0.4~0.6	0.1~0.3	0.3~0.6	0.2~0.3	≤0.030	≤0.030

表 2 焊接转向架用钢化学成分/%
Table 2 Chemical composition of steel for welding bogies /%

钢种	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Nb	V	Ti	Mo	Alt
Q235A	≤0.22	≤0.50	≤1.40	≤0.045	≤0.050	-	-	-	-	-	-	-	-
Q235C	≤0.18	≤0.30	0.35~0.85	≤0.040	≤0.040	-	-	-	-	-	-	-	-
16Mn	0.12~0.20	0.20~0.55	1.20~1.60	≤0.045	≤0.045	-	-	-	-	-	-	-	-
16MnR	≤0.20	0.20~0.55	1.20~1.60	≤0.035	≤0.030	-	-	-	-	-	-	-	-
Q345B	≤0.20	≤0.55	1.00~1.60	≤0.040	≤0.040	-	-	-	0.016~0.060	0.02~0.15	0.02~0.20	-	-
Q345C	≤0.20	≤0.55	1.00~1.60	≤0.035	≤0.035	-	-	-	0.016~0.060	0.02~0.15	0.02~0.20	-	≥0.015
Q345E	≤0.18	≤0.55	1.00~1.60	≤0.025	≤0.025	-	-	-	0.016~0.060	0.02~0.15	0.02~0.20	-	≥0.015
P275NL1	≤0.16	≤0.40	0.80~1.50	≤0.025	≤0.015	≤0.30	≤0.50	≤0.30	≤0.05	≤0.05	≤0.03	≤0.08	≥0.020
P355NL1	≤0.18	≤0.50	1.10~1.70	≤0.025	≤0.015	≤0.30	≤0.50	≤0.30	≤0.05	≤0.10	≤0.03	≤0.08	≥0.020
S355J2W/ S355J2W+N	≤0.16	≤0.50	0.50~1.50	≤0.030	≤0.030	0.40~0.80	≤0.65	0.25~0.55	0.015~0.060	0.02~0.12	-	≤0.30	≥0.020
SMA490 BW	≤0.18	0.15~0.65	≤1.40	≤0.035	≤0.035	0.45~0.75	0.05~0.30	0.30~0.50	≤0.15	≤0.15	≤0.15	≤0.15	-

表3中的16Mn/16MnR/Q345B所示,20℃的冲击功都在100J以下;通过控制S、C含量并配合微合金化和控轧控冷技术,大幅度提高钢板低温冲击韧性(表3中Q345C/Q345E的-40℃冲击功到达140J以上),解决了强韧性匹配问题^[21-22];2002年之后我国高速铁路正式进入国产化时代^[11],当时的动车组车辆均命名为“和谐号”,长春客车轨道客车有限公司和青岛四方机车车辆有限公司制造转向架使用的材料分

别为Cr-Ni-Cu合金体系的S355J2W和SMA490BW耐候钢(表3中所示两种钢板的-40℃冲击功都在160J以上),该材料一直沿用至今的350km时速“复兴号”标准动车组,这两种材料在动车组技术引进初期主要依赖于进口,近几年鞍钢大力推进高铁关键零部件国产化进程,已成功实现部分产品替代。随着我国地铁车辆的发展,正火钢板P355NL1也成为常用钢板之一^[23],这些材料都具有优异的低温韧性。表3所示为不同时期焊接转向架用钢拉伸和冲击性能。

4 耐大气腐蚀性

焊接转向架的使用对我国铁路客车的提速起到了重要作用^[29],我国不同地域长时间运行的列车,需要经受不同环境的大气侵蚀,造成焊接转向架的腐蚀问题,有时甚至影响车辆的正常运行,因此转向架钢板需要有良好的耐大气腐蚀性能。李恒奎等^[30]开展75h周期浸润腐蚀实验(TB/T 2375-1993“铁路用耐候钢周期浸润腐蚀试验方法”)、168h中性盐雾(GB/T 10125-1997“人造气氛腐蚀试验盐雾试验”)以及电化学腐蚀试验(0.01 mol/L NaHSO₃溶液)对高速列车转向架用钢S355J2W和SMA490BW的耐大气腐蚀性能进行评估,采用Q235钢作为对比试样。结果表明,S355J2W和SMA490BW钢在不同腐蚀试验中的耐大气腐蚀性能皆优于Q235,SMA490BW钢在周期浸润腐蚀试验中的腐蚀速率最低,S355J2W钢在中性盐雾试验中耐腐蚀表现最好;S355J2W钢在电化学试验中自腐蚀电流最小,耐腐蚀性能表现相对突出。鲁二敬等^[31]根据TB/T 2375-1993“铁路用耐候钢周期浸润腐蚀试验方法”对S355J2W和Q345R开展100h周

表3 不同时期焊接转向架用钢拉伸和冲击性能

Table 3 Tensile and impact properties of steel for welding bogies in different periods

钢种	规格/ mm	$R_{cl}/$ MPa	$R_m/$ MPa	$A/$ %	冲击功 A_{KV}/J				
					20℃	0℃	-20℃	-40℃	-60℃
16Mn ^[21]	16	395	520	26	95	-	-	-	-
16MnR ^[21]	14	395	555	24	39	-	-	-	-
	16	425	565	24	51	-	-	-	-
Q345B ^[24]	10	396	522	27	88	-	-	-	-
Q345C ^[25]	12	377	524	-	209	208	154	144	79
Q345E ^[26]	12	390	535	28	-	-	-	141	-
P355NL1 ^[27]	12	≥350	≥490	≥22	198	187	175	154	-
S355J2W + N ^[28]	12	480	557	33	-	-	142	-	-
S355J2W ^[29]	16	360	495	33.5	356	354	350	333	233
SMA490BW ^[11]	16	384	548	26.7	191	168	-	161	-
		401	552	29.7					

期浸润腐蚀实验,结果表明S355J2W钢的耐腐蚀性能优于Q345R钢。S355J2W耐候钢经100h试验后,表面被棕红色锈层所覆盖,锈层致密且与钢板基体结合牢固,不易脱落,能有效地阻止腐蚀性介质的侵入,减缓钢板的腐蚀程度。崔坤强等^[32]研究SMA490BW耐候钢在不同时间(72、144、216、288、360h)中性盐雾腐蚀条件下(GBT 10125-2012“人造气氛腐蚀试验盐雾试验”)的腐蚀行为,结果表明:随着腐蚀时间的增加,耐候钢的腐蚀失重先增加后降低;对腐蚀360h后的耐候钢表面锈层进行XRD图谱分析,腐蚀产物主要为 α -FeOOH、 γ -FeOOH和Fe₃O₄;对耐候钢锈层截面进行观察,锈层截面分为内外两层,其中内锈层比较致密,与基体表面结合良好,基本没有孔洞、裂纹等缺陷,外锈层致密度较差,极易脱落,对基体的保护性较差。从相关文献和实际运行情况来看,目前我国高速动车组采用的S355J2W和SMA490BW耐候钢板,对减轻转向架腐蚀效果良好。

5 焊接性能

转向架在列车运行中主要承受安装部件的工作载荷、制动、牵引和惯性力等交变载荷的作用,这就对焊接工艺、焊接方法、焊接位置适应性等提出了更苛刻的要求,即需根据转向架在工作中的受力情况,设计、选择合适的焊接工艺^[33]。高速动车组转向架用S355J2W和SMA490BW耐候钢板,实际一般采用熔化极活性气体保护焊(MAG)方法,保护气体一般选用富氩混合保护气体(80% Ar + 20% CO₂),采用手工焊或自动焊方式,焊丝采用TB/T 2374“铁道货车用高强度耐大气腐蚀钢焊丝订货技术条件”中的气体保护焊丝TH550-NQ-II,其化学成分和力学

表 4 焊丝化学成分和力学性能
Table 4 Chemical composition and mechanical properties of welding wire

焊丝牌号	化学成分 / %								力学性能			
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	$R_{cl}/$ MPa	$R_m/$ MPa	$A/$ %	A_{KV}/J (-40 °C)
TH550-NQ-II	≤0.10	≤0.60	1.20~1.60	≤0.020	≤0.025	0.30~0.90	0.20~0.60	0.20~0.50	≥450	≥550	≥22	≥60

性能如表 4 所示。

对 12 mm-SMA490BW 耐候钢进行双丝 MAG 焊接结果表明^[34], SMA490BW 耐候钢双丝焊缝成型美观, 接头硬度和抗拉强度满足生产要求, 焊接残余应力较小, 接头综合性能优良; 武永寿等^[35]研究了要 12 mm-SMA490BW 钢 MAG 焊接接头组织, 在 0 至 -40 °C 范围内对接头进行拉伸、冲击试验, -40 °C 进行弯曲试验, 结果表明接头宏观形貌成型良好, 低温性能良好, 未见明显焊接缺陷; 吴向阳等^[36]对 12 mm-SMA490BW 耐候钢常温、-20 °C、-50 °C 环境下 MAG 焊接接头开展拉伸试验、冲击试验, 研究抗拉强度、冲击值随温度变化规律, 试验结果表明, 随着温度的降低, 接头的抗拉强度略有提高, 韧性降低, 但即使在 -50 °C 下, 焊缝区冲击功平均值仍在 70 J 以上, 焊接性能良好。对 12 mm-S355J2W 耐候钢进行室温焊接试验结果表明^[37], 耐候钢的焊接接头的力学性能优良, 强度满足使用要求; 董洪达等^[38]采用两种焊丝匹配材料, 考察 12 mm-S355J2W 耐候钢焊接接头力学性能, 两种焊丝焊接接头的拉伸断裂强度接近, 断裂位置均位于母材, 强度达到标准要求; 赵忠成等^[39]采用 MAG 多层焊工艺, 对 12 mm-S355J2W 耐候钢焊接接头拉伸、弯曲、冲击、硬度等性能进行检测, 结果表明, 焊接接头具有良好的力学性能, 焊接工艺切实可行。

SMA490BW 和 S355J2W 耐候钢焊接接头组织中, 焊缝组织主要为粗大的先共析铁素体、针状铁素体和粒状贝氏体; 熔合区温度处于液相线和固相线温度之间, 局部晶粒熔化, 化学成分和组织不均匀; 热影响区的过热区组织主要为粗大的块状先共析铁素体, 晶内含有粒状贝氏体, 且容易有粗大魏氏组织出现; 正火区为均匀细小的铁素体和珠光体组织, 不完全重结晶区为晶粒大小不均匀的铁素体和珠光体组织^[34-39]。

6 疲劳性能

疲劳断裂是焊接结构件最常见的失效形式之一, 转向架在列车运行中需要承受循环交变载荷的作用, 因此对转向架焊接接头疲劳性能的研究是非常必要的。列车转向架焊接接头的主要受载方式轴

向拉伸和压缩载荷, 对没有缺口效应的钢板母材其疲劳性能主要与抗拉强度有关, 焊接接头疲劳性能受包括母材本身性能等多方面原因影响^[40], 其他因素在焊接接头疲劳破坏中的影响经常超过母材本身。焊缝周围有缺口效应产生, 实际应用中焊接接头疲劳性能很大程度上取决于局部缺口效应的大小。接头缺口效应主要受 5 方面因素影响: (1) 接头形式; (2) 接头受载情况; (3) 焊缝的几何形状; (4) 焊接工艺; (5) 焊接质量。在转向架用钢焊接接头疲劳试验中, 在应力小于或等于某一值时, S-N 曲线将无限逼近一条与 N (疲劳寿命) 轴平行的水平线疲劳寿命将等于无限次循环, 这个应力值称为疲劳极限。由于试验不可能无限次进行下去, 因此通过试验方法确定焊接接头极限应力, “无限次”一般被定义为一定的次数, 如 2×10^6 循环, 此时的疲劳极限称为条件疲劳极限。

在应力比 $R = -1$, 载荷大小 260 ~ 285 MPa 条件下, 对不同状态下 S355J2W 钢板母材和焊接对接接头开展等轴对称疲劳试验, 结果表明^[41], 空冷状态焊接接头的疲劳极限 49.2×10^4 周次低于母材的疲劳极限 52.5×10^4 周次; 退火状态焊接接头的疲劳极限 44.1×10^4 周次低于退火状态母材的疲劳极限 50.1×10^4 周次, 空冷母材试样疲劳极限最高。许良等^[42]对 SMA490BW 耐候钢在横纵向分别取样、在不同应力比 ($R = -1, R = 0, R = 0.5$) 置信度 95%、循环周次 1×10^7 条件下开展疲劳性能研究, 结果表明: 纵向试样的疲劳极限应力为 470 MPa, 较横向 446 MPa 高出 5.4%; $R = 0.5$ 时疲劳强度为 551.7 MPa、 $R = 0$ 疲劳强度为 470 MPa、 $R = -1$ 疲劳强度为 260 MPa、应力比越大, 疲劳强度越大。孙中文^[34]对 SMA490BW 耐候钢双丝 MAG 焊接对接接头, 在 $R = 0$ 、循环周次 1×10^7 条件下开展疲劳试验, 疲劳强度为 420 MPa。江明明等^[43]对 SMA490BW 耐候钢 MAG 焊十字接头, 在 $R = 0.1$ 、 2×10^6 循环周次条件下开展疲劳试验, 疲劳强度约为 166 MPa。高速列车转向架用钢的疲劳性能在不同试验条件下, 表现较好, 满足列车运行要求。

7 结语

随着我国铁路客车的高速化发展,转向架经历了从铸钢式到焊接式的变迁,同时转向架用钢也随之从铸钢、普碳钢、低合金高强度钢更新到耐候钢。时速 200 ~ 350 km 高速铁路具有正点率高、舒适性好、移动设备运用率高、运行里程长、运行环境复杂

多变的特点,因此对高速列车转向架用钢的综合力学性能提出了更高要求。本文对转向架用钢的发展历程以及用钢的耐大气腐蚀性能、低温韧性、焊接性能、抗疲劳性能等技术指标进行了系统阐述,为其今后进一步的研究提供了参考。

十三五国家重点研发计划(2017YFB0304600)资助

参考文献

- [1] 李玲玲. 高速列车转向架用钢组织性能控制参数研究[D]. 沈阳:东北大学,2008.
- [2] 杨颖,刘永梅. 高速动车关键材料技术[J]. 机车电传动,2003,12(1):1-4.
- [3] 杨爱国,邵文东. 我国货车转向架的现状与发展趋势[J]. 铁道车辆,2005,43(6):1-6.
- [4] 岑学良. 铁路货车焊接转向架展望[J]. 铁道车辆,1994(10):1-4.
- [5] 刘民达. 浅谈货车焊接式转向架[J]. 轨道交通装备与技术,1995(6):25-27.
- [6] 陈明资. 货车用焊接转向架可行性研究[J]. 铁道车辆,1993(12):62-65.
- [7] 邵文东,李立东,周国东,等. 我国铁路重载货车转向架技术及发展[J]. 铁道车辆,2012,50(12):15-18.
- [8] 博科. 客车转向架的发展[J]. 铁道知识,2001(4):12-13.
- [9] 杨松柏,陆强. 客车焊接转向架腐蚀现状及对策[J]. 中国铁路,2013(8):47-53.
- [10] 张鑫鑫. 对高速列车转向架焊接构架选材的探讨[J]. 机车车辆工艺,1994(1):41-45.
- [11] 孙皓. 火焰矫正参数对转向架焊接构架 SMA490BW 钢组织与性能的影响[D]. 大连:大连交通大学,2013.
- [12] 王宽. 高强度韧性转向架用钢成分优化及 CCT 曲线研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2015.
- [13] 李茂华. 转向架用钢成分及热处理工艺优化[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2017.
- [14] 曾令金. 客车焊接转向架腐蚀情况调查研究[J]. 铁道车辆,2011,49(3):37-40.
- [15] 封辉. 355 MPa 级耐候钢中 Cu、Cr 和 P 元素的作用[D]. 沈阳:东北大学,2010.
- [16] 托马晓夫 H. 金属腐蚀理论[M]. 北京:科学出版社,1957:17.
- [17] 张全成,吴建生,郑文龙,等. 耐候钢表面稳定锈层形成机理的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术,2001,13(3):143-146.
- [18] Dunwald J and Otto A. An Investigation of Phase Transitions in Rust Layers Using Raman Spectroscopy[J]. Corrosion Science, 1989,29(9):1167-1175.
- [19] 刘丽宏,齐慧滨,卢燕平,等. 耐大气腐蚀钢的研究概况[J]. 腐蚀与防护,2003,15(2):86-89.
- [20] 王有铭,李曼云,韦光,等. 钢材的控制轧制和控制冷却[M]. 北京:冶金工业出版社,1990.
- [21] 张晓军,丁韦,周晓峰,等. 14MnNbq 钢板及其焊接材料用于严寒地区机车车辆的可行性研究[J]. 铁道机车车辆,2003,23(5):5-9.
- [22] 丁韦,刘学文,黄辰奎,等. 高速铁道车辆焊接转向架材质性能分析与研究[J]. 中国铁道科学,2001,22(2):68-72.
- [23] 李泽文,刘拥军,周友龙,等. 地铁转向架用 P355NL1 钢焊缝金属的低温冲击韧性[J]. 机械工程材料,2017,41(5):100-104.
- [24] 孙彦文. Q345B 钢等离子-MAG 复合焊接工艺研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
- [25] 刘拥军,李泽文. Q345C 钢 MAG 焊接接头低温韧性研究[J]. 热加工工艺,2016,45(19):66-69.
- [26] 刘静,隋国欣,张天宜. 焊后热时效工艺对 Q345E 钢焊接接头焊接残余应力的影响[J]. 金属加工(热加工),2017(10):33-35.
- [27] 李泽文,刘拥军,何轩. 转向架构架 P355NL1 钢 MAG 焊接接头低温力学性能研究[J]. 热加工工艺,2016,45(13):62-65.
- [28] 李季涛,兆文忠,丁成钢,等. 焊后热处理工艺对 S355J2W + N 钢焊接接头组织和力学性能的影响[J]. 2016,37(1):64-69.
- [29] 刘志泰,杨德惠. S355J2W 与 S355J2 结构钢组织性能研究[J]. 热加工工艺,2012,41(2):82-83.
- [30] 李恒奎,马立军,李晓燕,等. 动车组转向架构架板材耐候性分析[J]. 腐蚀科学与防护技术,2014,26(1):8-12.
- [31] 鲁二敬,卢峰华,许鸿吉,等. S355J2W 耐候钢的耐腐蚀性能[J]. 机械工程材料,2012,36(12):77-79.
- [32] 崔坤强,吴向阳,张志毅,等. SMA490BW 耐候钢及其焊接接头的盐雾腐蚀行为[J]. 热加工工艺,2018,47(13):68-71.
- [33] 李晓娜. SMA490BW 耐候钢手工焊与自动焊接接头低温性能对比[J]. 电焊机,2015,45(6):81-85.
- [34] 孙中文,吴向阳,张志毅,等. SMA490BW 钢双丝焊接接头组织及力学性能研究[J]. 热加工工艺,2016,45(11):55-58.
- [35] 武永寿,张志毅,何永攀,等. SMA490BW 耐候钢接头组织及低温力学性能研究[J]. 热加工工艺,2016,45(13):51-54.
- [36] 吴向阳,张志毅,刘拥军,等. 高速列车转向架 SMA490BW 耐候钢焊接接头低温性能研究[J]. 热加工工艺,2015,44(19):29-35.
- [37] 张励忠,刘博维,张淘,等. S355J2W 耐候钢焊接接头显微组织与力学性能[J]. 北京交通大学学报,2012,36(4):127-130.
- [38] 董洪达,楚永萍,倪宝成,等. 母材及焊丝对转向架用耐候钢焊接接头性能的影响[J]. 电焊机,2016,46(8):37-42.
- [39] 赵忠诚,李晓娜. S355J2W 焊接接头的组织和力学性能[J]. 电焊机,2016,46(12):93-95.
- [40] 兰东琳. 客车转向架典型焊接接头疲劳性能及其影响因素研究[D]. 北京:北京交通大学,2007.
- [41] 刘维博. S355J2W 耐候钢焊接接头组织及性能研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.
- [42] 许良,苏居季,周松,等. 转向架用 SMA490BW 钢的疲劳性能研究[J]. 热加工工艺,2020,49(14):30-34.
- [43] 江明明,何柏林. 超声冲击对 SMA490BW 耐候钢十字焊接接头疲劳性能的影响[J]. 热加工工艺,2018,47(5):50-53.

张瑞琦(1988-),男,硕士(2014年东北大学),高级工程师,2011年江苏科技大学(本科)毕业,耐候钢研究。

E-mail:450836191@qq.com

收稿日期:2021-07-21