

焊丝成分对高速列车转向架焊接接头性能的影响

陆善平¹, 魏世同¹, 李殿中¹, 李依依¹, 何广忠², 赵旭²

(1. 中国科学院金属研究所 沈阳材料科学国家联合实验室, 沈阳 110016)

2. 长春轨道客车股份有限公司, 长春 130062)

摘 要: 采用富氩基 CO_2 焊工艺对高速列车转向架用 S55 2G3 钢板进行焊接, 分析了焊丝中 C Mn Si 和 Nb 元素在焊接过程中的烧损及过渡规律, 并研究了焊丝中 C Mn Si 和 Nb 元素含量变化对焊接接头力学性能的影响。结果表明, 在富氩基 CO_2 保护焊工艺中, Mn Si 元素会产生烧损, 合理提高焊丝中 Mn Si 元素含量, 才能获得与母材相匹配的焊接接头性能。C 元素的烧损规律与焊丝中各元素的原始含量有关。随着焊丝中 C Si Mn 元素含量的增加, 焊缝金属的强度增加, 断后伸长率降低。Nb 元素的加入会显著提高焊缝金属的强度, 但同时会恶化其塑性和韧性, 因此应严格控制焊丝中的 Nb 元素含量。

关键词: 熔合比; 过渡系数; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG457.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2010)06-0021-04



陆善平

0 序 言

为满足国内日益增长的快速铁路客运服务需要, 时速 200 km 及以上的铁路动车组得到了快速发展, 转向架是轨道列车的核心部件, 构架是转向架的主体, 铁路高速发展对转向架提出了轻量化要求。高速列车转向架采用焊接结构来代替传统的铸造结构, 这样可以通过选择合适的材料来减薄板厚, 减轻转向架重量, 构架焊接质量直接影响转向架的使用性能、寿命和安全性。目前富氩混合气体保护焊由于具有操作方便、生产效率高、成本低等优点而被广泛应用在高速列车的生产和制造过程中。富氩焊与 CO_2 及纯氩焊相比, 具有焊缝表面成形好、飞溅少等特点。由于富氩焊的保护气体具有一定的氧化性, 焊丝采用了 Mn Si 元素为主的合金系统, 焊接过程中 Mn Si 元素具有脱氧和合金化增强焊缝强度的作用, 焊丝成分与高速列车转向架所使用钢材的合金成分有较大差异, 焊接时存在元素烧损及母材元素对熔敷金属的稀释。焊缝熔合比是指熔入焊缝的母材在焊缝金属中所占的比例, 熔合比越高, 说明熔入焊缝的母材所占比例越高, 母材对熔敷金属的稀

释作用越明显^[1-3]。因此为获得合适的焊缝成分, 提高焊接接头质量, 有必要研究焊丝中各元素在焊接过程中的烧损和过渡规律, 以及焊丝中各元素含量变化对焊接接头性能的影响。

该研究针对时速 200 km 高速列车转向架构架焊接材料及焊接接头进行研究, 考察了焊丝中各元素在焊接过程中的烧损和过渡规律, 以及焊丝中各元素含量变化对焊接接头性能的影响, 为设计高速列车转向架构架焊接材料, 以及提高和控制全焊结构转向架焊接质量积累数据并提供参考。

1 试验方法

采用富氩基 CO_2 焊工艺对高速列车转向架用 S55 2G3 钢板进行焊接, 钢板尺寸为 600 mm×150 mm×12 mm。为考察合金元素对焊接接头性能的影响, 设计了 6 种不同成分的焊丝, 母材与设计焊丝的成分见表 1。焊接接头形式如图 1 所示, 使用 Y 形坡口, 采用 4 道次进行焊接, 保护气体成分为 85% Ar+15% CO_2 , 焊丝直径为 1.2 mm, 焊后对试板进行回火处理 (590 °C 保温时间 3 h) 以消除焊接应力。

焊后采用化学分析方法测定不同焊丝所得焊缝金属中各种元素的含量, 并计算焊缝熔合比及焊丝中各元素的过渡系数, 分析焊丝中各元素的烧损规律。从焊接接头上取样进行焊缝金属微观组织分

收稿日期: 2008-12-29

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目 (2009BAG12A07-D06);
2009 年度吉林省与中国科学院高技术产业化专项资金支持项目 (2009SYH40018)

表 1 试验钢板及所用焊丝成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of base material and welding wires

材料	C	Si	Mn	S	P	Cu	Nb	Fe
母材	0.140	0.18	1.10	0.002	0.014	0.012	0.019	余量
焊丝 1号	0.031	0.87	1.51	0.008	0.008	0.076	—	余量
焊丝 2号	0.072	0.88	1.54	0.006	0.007	0.071	—	余量
焊丝 3号	0.120	0.90	1.56	0.005	0.007	0.076	—	余量
焊丝 4号	0.070	0.71	1.35	0.005	0.007	0.082	—	余量
焊丝 5号	0.068	0.94	1.52	0.004	0.008	0.082	0.060	余量
焊丝 6号	0.072	1.18	1.73	0.006	0.007	0.085	—	余量

表 2 焊缝金属化学成分分析结果 (质量分数, %)

Table 2 Chemical compositions of weld metals

所用焊丝	C	Si	Mn	P	S	Nb	Fe
1号	0.047	0.75	1.42	0.009	0.011	—	余量
2号	0.080	0.73	1.40	0.009	0.010	—	余量
3号	0.110	0.77	1.45	0.009	0.009	—	余量
4号	0.077	0.52	1.21	0.009	0.009	—	余量
5号	0.078	0.70	1.38	0.009	0.008	0.048	余量
6号	0.081	0.87	1.53	0.009	0.010	—	余量

定程度的烧损,而 C元素的烧损规律与焊丝中各元素的原始含量有关.因此在设计焊接材料时,必须考虑焊接过程中各元素的烧损程度,以保证焊后焊缝金属的性能与母材相匹配.

表 3 焊丝中主要元素的过渡系数

Table 3 Transition coefficients of main elements in welding wires

所用焊丝	过渡系数 γ (%)			
	C	Si	Mn	Nb
1号	110.7	95.1	96.9	—
2号	99.7	91.5	93.6	—
3号	88.3	94.5	96.0	—
4号	97.7	79.8	90.7	—
5号	102.3	82.0	93.3	86.6
6号	101.3	81.7	91.8	—

析,试样经研磨、抛光,及用体积分数为 4%的硝酸酒精溶液浸蚀后,采用光学显微镜观察焊缝金属区的组织,并使用透射电镜分析焊缝金属中析出相的结构.对不同成分焊丝所得接头进行焊缝金属拉伸性能及不同温度下的焊缝金属 V形缺口冲击性能测试,分析焊丝成分对焊缝金属拉伸及冲击性能的影响. V形缺口冲击试验的温度分别为 0—20—40—60℃,冲击试验后使用扫描电镜观察冲击试样断口形貌.

2 试验结果与分析

2.1 焊缝熔合比及各元素过渡系数

采用化学分析方法测定焊缝金属中各元素的含量见表 2.由表 2可知焊缝金属中各元素含量随焊丝中相应元素的含量变化而变化,但由于在焊接过程中元素烧损及母材元素熔入焊缝共同作用,导致焊缝金属中各元素含量与焊丝中的原始含量有较大差别.

焊缝熔合比与所采用的接头坡口形式及焊接工艺参数有关.由于 6种焊丝焊接时采用相同的接头坡口形式和焊接工艺参数,因此焊缝熔合比均相同,通过计算可得 6种焊丝的焊缝熔合比均为 0.12%.按照焊丝、焊缝金属及母材的成分,可得到焊丝中 C、Si、Mn及 Nb元素在焊接过程中的过渡系数,见表 3.除 C元素外,其余元素在焊接过程中均有一

2.2 焊缝金属组织分析

不含 Nb元素及含 Nb元素的 2号和 5号焊丝所得焊缝金属的光学显微镜和透射电镜分析结果如图 2和图 3所示.由图 2观察发现不含 Nb元素焊缝金属中包含大量的多边形的先共析铁素体以及少量的魏氏组织,而在含 Nb元素焊缝金属中,多边形的先共析铁素体明显减少,魏氏组织明显增多.说明焊缝中 Nb元素的加入抑制了多边形铁素体的形成,而促进了魏氏组织的形成.魏氏组织铁素体增多将提高焊缝金属的强度,但会恶化焊缝金属的塑性和韧性.由图 3可知,在不含 Nb元素的焊缝金属中未发现析出相,而在含 Nb元素的焊缝金属中观察到析出相,衍射斑点分析结果表明析出相为面心立方结构的 NbC,这种析出相对焊缝金属的强度及韧性均有较大影响.

2.3 焊缝金属拉伸性能

不同成分焊缝金属的屈服强度、抗拉强度及断后伸长率如表 4所示.在所使用的焊丝成分范围内,随着 C元素含量的增加(表 4中 1号、2号及 3号试样),焊缝金属的屈服强度和抗拉强度先明显升高后趋于稳定,断后伸长率则先降低后趋于稳定.

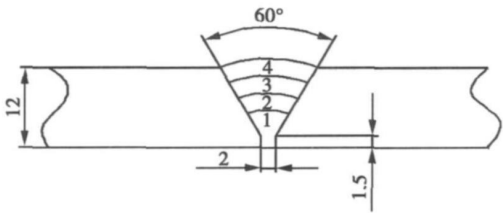
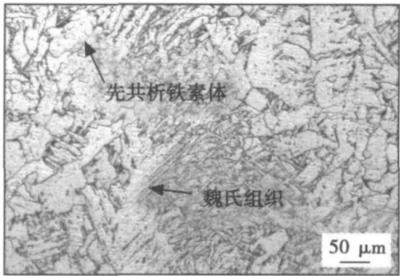
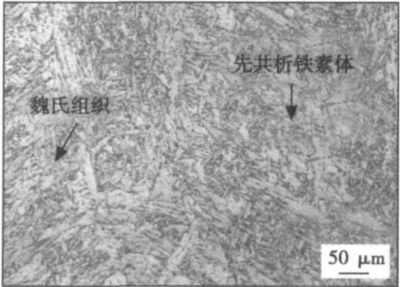


图 1 焊接接头形式 (mm)

Fig. 1 Schematic diagram of welded joint

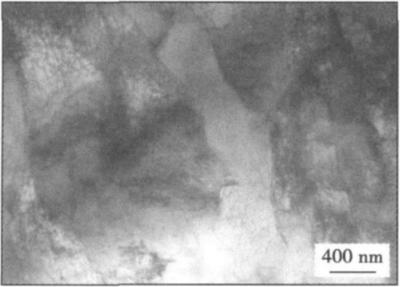


(a) 不含Nb元素焊缝

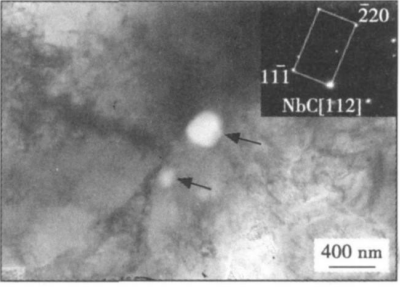


(b) 含Nb元素焊缝

图 2 焊缝区金相组织形貌
Fig. 2 Microstructure of weld zone



(a) 不含Nb元素焊缝



(b) 含Nb元素焊缝

图 3 透射电镜照片及析出相衍射斑点分析
Fig. 3 TEM micrographs and SAD pattern analysis of precipitates

焊丝中 C S和 M元素含量的增加对焊缝金属拉伸性能的影响在开始阶段较明显,随着含量的增加影响逐渐减小.随着 Nb元素的加入(表 4中 2号和 5号试样),焊缝金属的屈服强度和抗拉强度明显升高,断后伸长率显著降低.这是由于随着 Nb元素的加入,焊缝金属中形成了较多的魏氏组织(图 2)而且析出了 NbC颗粒(图 3).这两个因素均会提高焊缝金属强度,而恶化其塑性和韧性.

表 4 焊缝金属拉伸性能
Table 4 Tensile properties of weld metal

所用焊丝	屈服强度 R_{d}/MPa	抗拉强度 R_{m}/MPa	断后伸长率 $A(\%)$
1号	332	478	32.2
2号	402	542	28.0
3号	392	555	28.2
4号	350	497	33.3
5号	610	703	22.3
6号	403	550	28.7

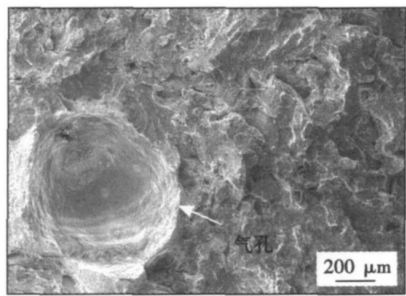
2.4 焊缝金属冲击性能

不同成分焊缝金属不同温度下的冲击吸收功及平均冲击吸收功见表 5.随着冲击温度的降低,焊缝金属的平均冲击功呈下降趋势,个别反常变化,如表 5中 3号焊丝焊缝金属 -60°C 的平均冲击吸收功高于 -40°C 的冲击吸收功,这是由于焊缝金属中存在气孔或夹渣等焊接缺陷所致.使用扫描电镜观察 3号焊丝焊缝金属 -40°C 冲击吸收功为 33 J 的试样断口,发现断口中存在的气孔和夹渣缺陷,见图 4.由表 5可知,在所使用的焊丝成分范围内,随着焊丝中 C元素含量的增加(表 5中 1号、2号及 3号试样),焊缝金属的冲击吸收功变化不明显,而随

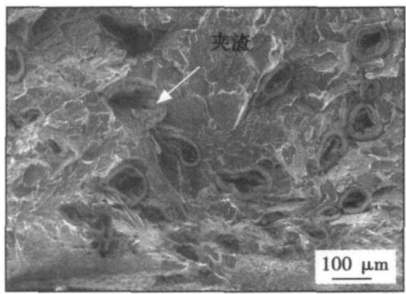
表 5 焊缝金属冲击性能
Table 5 Impact properties of weld metal

所用焊丝	冲击吸收功 A_{KV}/J											
	0 $^{\circ}\text{C}$			-20°C			-40°C			-60°C		
1号	144	151	167	144	133	138	20	106	108	67	87	10
	154			138			78			55		
2号	159	136	144	107	85	132	125	72	47	28	26	26
	146			108			81			27		
3号	180	164	158	120	118	124	51	33	54	44	54	51
	167			121			46			50		
4号	182	176	193	156	158	122	104	119	116	65	97	64
	184			145			113			75		
5号	100	80	25	16	43	19	12	10	10	6	4	6
	68			26			11			5		
6号	104	26	35	25	30	16	26	38	14	8	11	9
	55			24			26			9		

随着 Mn S元素含量的增加(表 4中 4号、2号及 6号试样),焊缝金属的屈服强度和抗拉强度均升高,而断后伸长率先降低后趋于稳定.由以上分析可知



(a) 气孔缺陷



(b) 夹渣缺陷

图 4 3号焊丝焊缝金属-40℃冲击断口形貌
Fig. 4 SEM fractographs of impact specimen welded with No. 3 welding wire at -40℃

着 Mn、S 元素含量的增加 (表 5 中 4 号、2 号及 6 号试样) 焊缝金属的冲击吸收功明显下降, 这说明焊丝中 Mn、S 元素含量变化对焊缝金属冲击性能的影响远高于 C 元素含量变化的影响。随着 Nb 元素的加入 (表 5 中 2 号和 5 号试样), 焊缝金属的冲击吸收功显著降低, 这是由于魏氏组织和析出相 NbC 颗粒共同作用的结果, 微量元素 Nb 对焊缝金属冲击性能的影响远高于 Mn、S 元素, 因此对于焊后不进行正火处理的低合金钢焊缝应严格控制焊丝中的 Nb 元素含量。

3 结 论

- (1) 焊丝中的 Si、Mn、Nb 元素在焊接过程中均有一定程度的烧损, 其过渡系数均小于 1, 而 C 元素的烧损规律与焊丝中各元素的原始含量有关。
- (2) 随着焊缝金属中 C 元素含量的增加, 焊缝金属的强度增高, 断后伸长率先降低后趋于稳定, 冲击性能变化不明显。
- (3) 随着焊缝金属中 Si、Mn 元素含量的增加, 焊缝金属的强度增高, 断后伸长率先降低后趋于稳定, 但冲击性能显著降低。
- (4) 焊缝中微量元素 Nb 的加入会使焊缝金属中形成较多的魏氏组织并析出 NbC 颗粒, 显著提高焊缝金属的强度, 但明显降低焊缝金属的断后伸长率和冲击性能, 因此应严格控制焊丝中的 Nb 元素含量。

参考文献:

[1] 宋思利, 高进强, 张红燕, 等. 焊接工艺参数对对接焊缝熔合比影响的研究[J]. 焊接技术, 2004 33(4): 9-10
Song Sili, Gao Jinqiang, Zhang Hongyan, et al. Effect of welding parameters on fusion ratio of butt weld[J]. Welding Technology, 2004 33(4): 9-10

[2] 周玉生, 于凤福, 贺文雄. 碳极氩气拘束电弧粉末堆焊工艺[J]. 焊接学报, 2003 24(2): 71-74
Zhou Yusheng, Yu Fengfu, He Wenxiong. Powder surfacing of carbon electrode arc constrained by argon[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003 24(2): 71-74

作者简介: 陆善平, 男, 1971 年出生, 博士, 副研究员, 主要从事材料焊接与表面改性研究工作, 发表论文 50 余篇。
Email: shp@mr.ac.cn

[上接第 20 页]

[2] 李志刚. 高压水环境旋转电弧焊接特性及其焊缝传感跟踪研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2009.

[3] 李志刚, 张 华, 高延峰. 旋转电弧传感器特征谐波法的改进[J]. 焊接学报, 2009 30(5): 53-56
Li Zhigang, Zhang Hua, Gao Yanfeng. The improvement of characteristic harmonic method in rotational arc sensor[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009 30(5): 53-56

[4] 高延峰. 移动机器人旋转电弧传感焊枪偏差与倾角检测及角焊缝跟踪[D]. 南昌: 南昌大学, 2008

[5] 敖俊卿. 模糊滑模控制应用方法研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2007

[6] 王丰尧. 滑模变结构控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.

[7] 刘 凯. 移动机械臂模糊滑模控制研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2008

作者简介: 李志刚, 男, 1971 年出生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为焊接机器人及焊接自动化, 发表论文 10 余篇。
Email: gordon7456@163.com

Abstract The information detection and weld seam tracking system is analyzed on the high-pressure water environment rotating arc welding hardware platform, and the system transfer function and discrete state equation is obtained. Based on the discrete state equation, the fuzzy and fuzzy sliding mode controller is used to trace the step signal with noise; the result shows that fuzzy sliding mode controller is very good at anti-jamming. By using the suitable fuzzy sliding mode controller design, the seam tracking experiment is done in the high-pressure water environment. The theoretical analysis and experimental results show that fuzzy sliding mode controller used in rotating arc welding seam tracking in high-pressure water environment is effective.

Key words high-pressure water environment welding seam tracking; fuzzy sliding mode controller

Effects of welding wire composition on properties of welding joints for high-speed train bogie LU Shanping, WEI Shitong, LID Jianzhong, LI Yiyi, HE Guangzhong, ZHAO Xu (1. Institute of Metal Research Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China). P21—24

Abstract S355 HGS steel plates for high-speed train bogies were welded by Ar rich CO_2 gas shielded welding. The burning loss and transition law of C, Si, Mn and Nb elements in welding wire were analyzed. Furthermore, the effects of the C, Si, Mn and Nb elements in welding wire on the mechanical properties of the weld metal were researched. The experimental results show that the burning loss of Mn and Si will happen during the Ar rich CO_2 gas shielded welding process, and the welded joint properties matched with the base metal can be obtained by increasing the Mn and Si contents in the welding wire. The burning loss rule of C relates to the original contents of all elements in the welding wire. With the increase of the C, Si and Mn contents in the welding wire, the strength of the weld metal increases, and the elongation of the weld metal decreases. The addition of Nb can improve the strength of the weld metal significantly but deteriorate its plasticity and impact toughness, and so the Nb content in the welding wire should be controlled strictly.

Key words Penetration ratio; transfer coefficient; microstructure; mechanical properties

Formation of laser cladding layer of TC-NCrBSi composites ZHAO Weinip, HE Qingkui, HAN Bin, YANG Minglei (College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong, China). P25—28, 32

Abstract A TC-NCrBSi composite was deposited on the surface of carbon steel by CO_2 laser, and powder formula was adjusted to improve the appearance and microstructure uniformity of the cladding layer. Causation of gas porosity and cracks was analyzed and corresponding measures were taken to acquire integral cladding layer. The results show that good appearance of cladding layer can be obtained with the increase in TC content to 40%, while the appearance can be improved with the addition of molybdenum iron. Molybdenum iron can also be used to improve the uniformity of TC distributed in microstructure. Cracks in cladding layer are cold cracks, adding TC to NCrBSi alloy can refine grain and thus inhibit cracking. But adding too much mo-

lybdenum iron will promote the sensitivity of cracking. Gas porosities in cladding layer are produced by the use of organic binder, and using low laser scan rate or inorganic binder can remove the gas porosity.

Key words metal matrix composites; laser cladding; formation; cracks; gas porosity

Microstructures and properties of Nd:YAG laser welded 800 MPa TRIP steel WANG Wenquan, MA Kai, SUN Daqian, KANG Chunyun (1. School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China; 2. Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China; 3. Department of Material Science & Engineering, Pusan National University, Pusan 609, Korea). P29—32

Abstract Nd:YAG laser welding of cold rolled TRIP steel sheet with tensile strength of 800 MPa and thickness of 1.2 mm was carried out. The effects of welding speed on bead morphology and cross-section shape were investigated. The microstructures of welded joint were observed. The hardness distribution, tensile strength and formability of the welded joint were tested. The results show that for the same laser power, blowholes occur on weld bead at low welding speed and spatters occur at high welding speed. In addition, welding speed also has influence on penetration and bead width. The weld metal is mainly composed of martensite due to high cooling rate of laser welding. The amount of martensite decreases rapidly approaching base metal from weld bead center. Therefore, the weld metal or heat affected zone has maximum hardness for the whole welded joint. The tensile strength of the welded joint perpendicular to the weld line is equal to that of the base metal, but the tensile strength of welded joint parallel to the weld line is higher than that of the base metal. The plasticity and formability of the welded joint are impaired because of the formation of martensite in the weld metal.

Key words laser welding; ultrahigh strength steel; microstructure; property

Sensing signal pattern analysis of high-speed rotational arc in GMAW SHI Yonghua, ZENG Songsheng, WANG Guorong (School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China). P33—36

Abstract Welding electrical signals are used directly by arc sensor to track weld seams. Rotational arc has great importance because it can be further used to improve the weld bead appearance. The current signals are simulated based on the mathematical model of gas metal arc welding (GMAW) and the dynamic model of wire tip motion. Welding experiments with different welding parameters have been performed and the welding waveforms have been acquired. The results show that the simulated current waveforms are consistent with the acquired waveforms in experiments. The asymmetry of current waveform in each arc rotating cycle is proportion to the torch deviation. The higher the arc rotating speed is, the smaller the current amplification is. The bigger the rotating radius is, the higher the sensitivity of the arc sensor is. The results of this work are helpful to the design and application of high speed rotational arc sensor systems.

Key words arc sensing; mathematical model; seam tracking