

# 焊接工艺对 SMA490BW 耐候钢接头 腐蚀行为的影响

谢旭<sup>1</sup>, 吴向阳<sup>2</sup>, 张志毅<sup>2</sup>, 齐维闯<sup>2</sup>, 黄诗铭<sup>1</sup>, 史春元<sup>1</sup>

(1. 大连交通大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116028;

2. 南车青岛四方机车车辆股份有限公司 技术工程部, 山东 青岛 266111)

**摘要:** **目的** 研究转向架焊接构架用 SMA490BW 耐候钢及其在不同焊接工艺条件下制得的焊接接头在模拟工业大气环境下的腐蚀行为。**方法** 采用周浸腐蚀试验方法, 利用扫描电镜 (SEM)、X 射线衍射 (XRD) 和能谱 (EDS) 等方法, 研究了腐蚀产物的表面形貌、锈层结构及相组成。**结果** 在模拟工业大气环境条件下, SMA490BW 耐候钢母材、自动 MAG 焊接头、手工 MAG 焊接头的腐蚀失重率呈先增后减的变化规律, 其中自动 MAG 焊接头腐蚀失重率最小, 手工 MAG 焊接头腐蚀失重率最大, 而 SMA490BW 耐候钢母材居于两者之间。耐候钢母材及其焊接接头腐蚀产物的相组成均为  $\gamma$ -FeOOH、 $\alpha$ -FeOOH、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 。经过 150 h 腐蚀后, 耐候钢母材及其焊接接头腐蚀产物中 Cr、Ni、Cu 合金元素含量有所差异, 其中自动 MAG 焊焊缝腐蚀产物中 Cr、Ni、Cu 合金元素含量最高, 分别为 1.79%、0.23%、0.17%。Cr、Ni、Cu 合金元素将直接对耐候钢母材及其焊接接头耐腐蚀性产生影响。**结论** 与手工 MAG 焊接头相比, 自动 MAG 焊接头耐蚀性较高的主要原因是焊缝中主要抑制锈层腐蚀的 Cr、Ni、Cu 合金元素含量较高。

**关键词:** SMA490BW 耐候钢; 手工焊接头; 自动焊接头; 模拟工业大气; 周期湿润腐蚀

**中图分类号:** TG407; TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)10-0256-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.10.034

## Effects of Welding Processes on Corrosion Behavior of SMA490BW Weathering Steel Joints

XIE Xu<sup>1</sup>, WU Xiang-yang<sup>2</sup>, ZHANG Zhi-yi<sup>2</sup>, QI Wei-chuang<sup>2</sup>, HUANG Shi-ming<sup>1</sup>, SHI Chun-yuan<sup>1</sup>

(1. School of Material Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China; 2. Department of Technology Engineering, CSR Qingdao Sifang Locomotive and Rolling Stock Co. Ltd, Qingdao 266111, China)

**ABSTRACT:** The work aim to study corrosion behavior of SMA490BW weathering steels for bogie welded structures and their welding joints fabricated under different welding process conditions in simulated industrial atmospheric environment. In the method of cyclic immersion corrosion test, surface morphology, rust layer structure and phase composition of corrosion products were studied by using scanning electron microscope (SEM), X ray diffraction (XRD) and energy dispersive spectroscopy (EDS). Corrosion weight loss rate of SMA490BW weathering steel base metal, automatic MAG welding joint and manual MAG welding joint firstly increased and then decreased in simulated industrial atmospheric environment. The corrosion weight loss rate of

收稿日期: 2018-01-23; 修订日期: 2018-03-25

Received: 2018-01-23; Revised: 2018-03-25

作者简介: 谢旭 (1993—), 男, 在读硕士, 主要研究方向为先进焊接及连接技术。

**Biography:** XIE Xu (1993—), Male, Master, Research focus: advanced welding and connection technology.

通讯作者: 黄诗铭 (1986—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为热喷焊、热喷焊及轨道列车研究工艺。邮箱: huangsm@djtu.edu.cn

**Corresponding author:** HUANG Shi-ming (1986—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: thermal spray welding, thermal spray welding and rail train research process. E-mail: huangsm@djtu.edu.cn

automatic MAG welding joint was the smallest, that of the manual MAG welding joint was the largest, while that of the SMA490BW weather steel base metal fell in between. Phase composition of the weathering steel base metal and its welded joints was all  $\gamma$ -FeOOH,  $\alpha$ -FeOOH,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . After 150 h corrosion, content of Cr, Ni and Cu alloying elements in the corrosion products of the weathering steel base metal and its welding joints were different. The maximum content of Cr, Ni and Cu alloying elements in the corrosion products of automatic MAG welding seams was 1.79% 0.23%, 0.17%, respectively. Cr, Ni and Cu alloying elements would directly affect corrosion resistance of weathering steel base metal and its welding joints. Compared with the manual MAG welding joint, main reason for high corrosion resistance of automatic MAG welding joint is high content of Cr, Ni, Cu alloy elements which mainly suppress corrosion of rust layer in welding seams.

**KEY WORDS:** SMA490BW weathering steel; manual welding joint; automatic welding joint; simulated industrial atmosphere; cyclic immersion corrosion

随着我国高速动车组的快速发展,转向架及其焊接接头的安全可靠性变得十分重要<sup>[1]</sup>。转向架是连接列车车轮与车厢之间的关键部件之一,其焊接接头质量及性能的优劣直接关系到列车运行的安全与寿命。列车行驶过程中,在大气等广域的环境中,转向架构架及其焊接接头的很多部位会发生腐蚀现象。目前,国内外研究主要集中在耐候钢在大气环境中的腐蚀行为<sup>[2-5]</sup>,但对耐候钢焊接接头的腐蚀研究较少。因此,研究转向架及其接头的耐腐蚀性十分重要。

现代城市工业化的快速发展,会产生大量的硫化物气体,排放到大气中,因此对转向架构架腐蚀影响最大的是工业大气环境中的  $\text{SO}_3^{2-}$ 。周期浸润腐蚀试验可模拟干湿交替的大气环境,较为适合于耐候钢表面形成稳定化锈层<sup>[6]</sup>。本文针对转向架及其焊接接头

进行周期浸润试验,建立耐候钢及其焊接接头周期浸润腐蚀失重与腐蚀时间关系的动力学曲线,观察分析腐蚀产物及腐蚀形貌,对腐蚀机理进行深入讨论分析,为转向架构架及其焊接接头工艺优化提供数据分析支持。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验选用制造转向架焊接构架的 SMA490BW 耐候钢板材,钢板尺寸为 350 mm×150 mm×12 mm。焊接填充材料选用 CHW-55CNH 焊丝,直径为 1.2 mm。焊接保护气体采用 80%Ar+20%CO<sub>2</sub> 混合气体。SMA480BW 耐候钢板及焊丝的主要化学成分见表 1。

表 1 试验材料的化学成分  
Tab.1 Chemical composition of test materials

Test material	Elements/wt%							
	C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Ni
SMA490BW	0.18	0.55	1.40	0.005	0.035	0.32	0.54	0.25
CHW-55CNH	0.08	0.45	1.40	0.008	0.012	0.35	0.65	0.35

1.2 试验方法

焊接工艺分别采用手工 MAG 焊和自动 MAG 焊的多道焊接工艺。焊接接头为对接形式,焊接坡口为 V 形,坡口角度 60°,钝边尺寸为 1 mm,焊接间隙为 0~2 mm。手工 MAG 焊接设备采用松下 TD-500GL3 焊机,自动 MAG 焊接设备使用弗尼斯 TPS5000 焊机。

焊接工艺参数列于表 2。

参照 TB/T 2375—93 对 SMA490BW 耐候钢及其焊接接头进行周期浸润腐蚀试验,试验环境模拟工业大气环境。腐蚀试样尺寸为 60 mm×40 mm×4 mm,其中焊接接头腐蚀试片中,焊缝的面积占整个试片面积的 28.3%,在试样一端的中部钻取直径  $\phi$  2.5 mm 通

表 2 焊接工艺参数  
Tab.2 Welding process parameters

Welding process	Number of weld passes	Welding current (I)/A	Arc voltage (U)/V	Welding speed (v)/(mm·s <sup>-1</sup> )	Welding heat input (E)/(kJ·cm <sup>-1</sup> )
The manual MAG welding	1	115	16	2.3	4.7
	2—4	240~245	27	3.0~5.8	9.1
The automatic MAG welding	1	240	25	8.3	4.3
	2—4	245~250	27	5.0~8.3	6.4

孔,以便于悬挂试件。试验前先用砂纸将试件打磨光滑,去掉表面氧化层,再用石油醚、无水酒精和丙酮进行超声清洗,去除表面油污。将试样置于干燥器中24 h后,采用电子天平称量样品的初始质量,精度为0.1 mg。

采用 FL-65 型周期浸润腐蚀试验机,试验溶液为初始浓度 $(1.0\pm 0.05)\times 10^{-2}$  mol/L 的  $\text{NaHSO}_3$  溶液,补充液为 $(2.0\pm 0.05)\times 10^{-2}$  mol/L 的  $\text{NaHSO}_3$  溶液。试验溶液温度为 $(45\pm 2)^\circ\text{C}$ ,湿度为 $(70\pm 5\%)$ RH,每一循环周期 $(60\pm 3)$  min,浸润时间为 $(12\pm 1.5)$  min,烘烤后试样表面的最高温度为 $(70\pm 10)^\circ\text{C}$ 。每组材料取5个平行样,悬挂入腐蚀箱中,试验分为5个周期,分别在50、75、100、125、150 h后将试样取出,其中1块进行组织观察,另外4块为失重测量平行试样。试验后采用含有缓蚀剂(六次甲基四胺)的盐酸溶液清洗表面锈蚀产物,酸洗后用清水冲净,用无水乙醇、丙

酮浸泡,取出后立即用热风吹干,放入干燥器中保存24 h后对试样进行称量(精确到1 mg)。

$$\text{试样腐蚀失重率计算: } W = \frac{m_0 - m_1}{2(a \times b + b \times c + a \times c)} \times 10^6.$$

式中,  $W$  表示腐蚀失重率 ( $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ );  $m_0$  表示试样原始质量 ( $\text{g}$ );  $m_1$  表示试样试验后质量 ( $\text{g}$ );  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别表示试样的长度、宽度、厚度 ( $\text{mm}$ );  $t$  表示试验时间 ( $\text{h}$ )。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 腐蚀动力学

通过分析试样腐蚀前后的失重情况,得到 SMA490BW 耐候钢母材及其焊接接头在模拟工业大气环境条件下的周期浸润腐蚀失重试验数据,如表3所示。

表3 腐蚀失重试验数据  
Tab.3 Test data of corrosion weight loss

Experiment material	Corrosion rate of weight loss( $W$ )/( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )				
	50 h	75 h	100 h	125 h	150 h
The base metal	3.2601	3.601	3.0601	2.5381	2.1462
The manual MAG welding	3.4096	3.8087	3.1792	2.7143	2.2815
The automatic MAG welding	2.9059	2.9427	2.788	2.384	2.0137

图1为 SMA490BW 耐候钢母材及其焊接接头的腐蚀失重拟合线。可以看出,在腐蚀时间为75 h之前,随着时间的增加,由于锈层刚刚形成,对基体没有保护作用,耐候钢母材及其焊接接头的腐蚀失重率逐渐增大。在腐蚀75 h之后,随着腐蚀的继续进行,由于表面锈层不断增厚,这在一定程度上阻碍了腐蚀的进一步进行,腐蚀失重呈逐渐减小的趋势。从腐蚀动力学曲线中可以得出,在模拟工业大气环境条件下,SMA490BW 耐候钢母材、自动 MAG 焊接头、手工 MAG 焊接头的腐蚀失重率呈先增后减的变化规

律,其中自动 MAG 焊接头的腐蚀失重率最低,耐候钢母材次之,而手工 MAG 焊接头的失重率最高。这表明在模拟工业大气环境条件下,SMA490BW 自动 MAG 焊接头的耐腐蚀性优于手工 MAG 焊接头及耐候钢母材。

### 2.2 锈层宏微观形貌及相组成

图2为试样腐蚀150 h后的宏观形貌。可以看出,SMA490BW 耐候钢母材和其焊接接头经腐蚀后的表面宏观形貌特征基本相同,即在表层出现黄褐色的腐蚀产物层,黄褐色腐蚀产物层下为黑色的基体腐蚀产物层。黑色腐蚀产物基层较为致密,基本覆盖试样的整体外表面。随着腐蚀试验时间的增长,腐蚀产物的厚度相应增加,其中母材表面存在较多腐蚀坑,锈层较为疏松,部分锈层开始脱落。手工 MAG 焊接头的腐蚀较为严重,尤其是在焊缝金属区域,腐蚀锈层出现脱落现象;相比于手工 MAG 焊接头,自动 MAG 焊接头锈层表面较为致密,且紧密贴附于金属表面,对基体具有良好的保护作用。

SMA490BW 母材及其焊接接头周浸腐蚀后的 X 射线衍射分析结果如图3所示。显然,母材及其接头腐蚀产物的相组成均含有  $\gamma\text{-FeOOH}$ 、 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 。并且,随着腐蚀时间的增加, $\alpha\text{-FeOOH}$  衍射峰明显增强,而  $\gamma\text{-FeOOH}$  衍射峰强度逐渐降低,

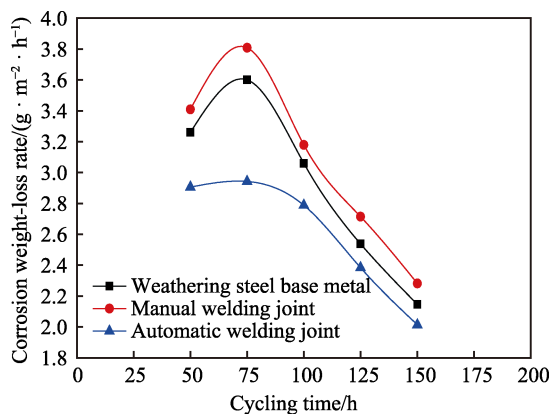


图1 SMA490BW 母材及其焊接接头的腐蚀动力学曲线  
Fig.1 Corrosion kinetics curves of SMA490BW base metal and its welding joints

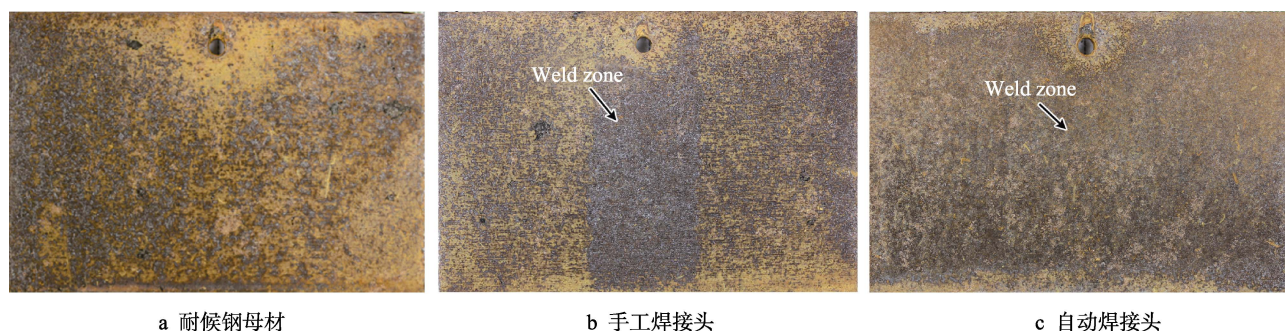
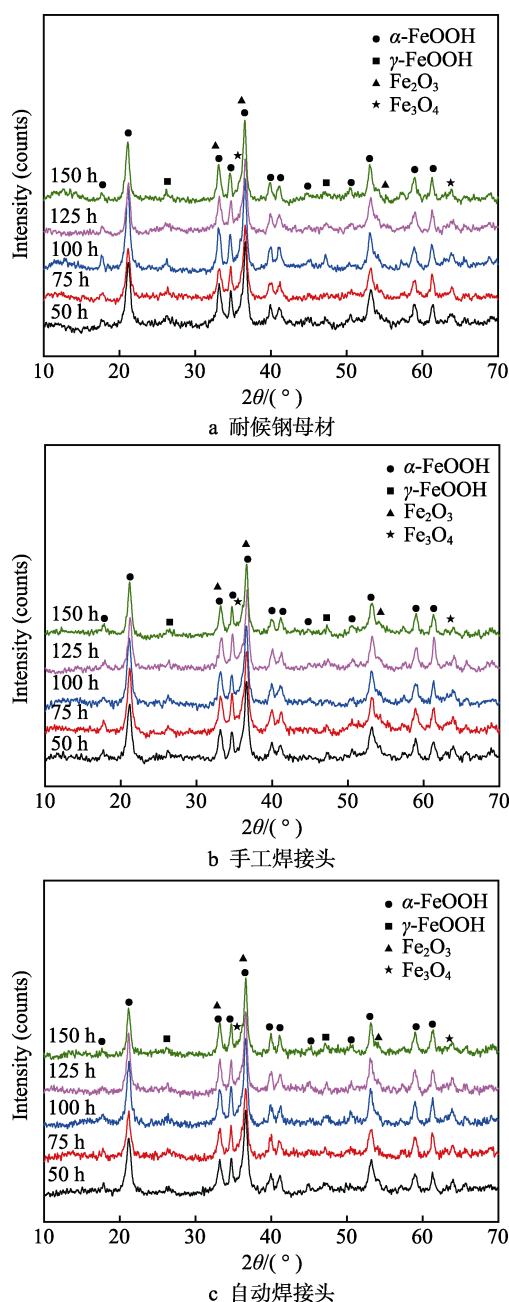


图 2 耐候钢母材及其焊接接头宏观腐蚀形貌

Fig.2 Macroscopic corrosion morphology of weathering steel base metal and its welding joints: a) weathering steel base metal, b) manual welding joint, c) automatic welding joint

图 3 耐候钢母材及其焊接接头腐蚀后的 XRD 分析结果  
Fig.3 XRD analysis results of weathering steel base metal and its welded joints after corrosion: a) weathering steel base metal, b) manual welding joint, c) automatic welding joint

表明在耐候钢母材及其焊接接头的锈层中,  $\alpha$ -FeOOH 的含量增多,  $\gamma$ -FeOOH 含量降低。通过不同相组成的衍射峰强度可以看出,  $\alpha$ -FeOOH 衍射峰在 SMA490BW 自动 MAG 焊接接头腐蚀相中最强, 耐候钢母材次之, 手工 MAG 焊接接头的峰强最弱。说明在模拟工业大气环境中, 自动焊接接头的耐腐蚀性优于耐候钢及手工焊接接头。

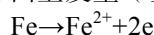
图 4 为通过扫描电镜观察的试样腐蚀表面的微观结构。结合腐蚀表面的相组成可以发现, 经 150 h 长时间腐蚀后, SMA490BW 耐候钢母材腐蚀锈层存在微裂纹、腐蚀坑等缺陷, 腐蚀产物多呈球状。手工 MAG 焊焊缝表面较为疏松, 且有较深的孔穴和较大裂纹, 腐蚀产物不密集, 多呈丛状和球状。但相较于手工 MAG 焊焊缝, 手工 MAG 焊热影响区表面多呈针状和球状, 致密性较差, 且孔穴较多。自动 MAG 焊接接头表面裂纹细小, 且腐蚀产物紧密贴附于基体表面, 多为球状结构。但相较于自动 MAG 焊焊缝, 自动 MAG 焊热影响区表面出现较大的裂纹, 且表层腐蚀产物较为疏松, 多呈丛状和球状。

结合 XRD 分析结果可知, 球状产物为  $\alpha$ -FeOOH, 针状和丛状产物为  $\gamma$ -FeOOH。在腐蚀的初期, 腐蚀产物主要为  $\gamma$ -FeOOH, 由于其化学性质不稳定, 形成的锈层较为疏松, 容易脱落, 对基体的保护作用较小。随着腐蚀的不断进行,  $\gamma$ -FeOOH 逐渐转变为  $\alpha$ -FeOOH。 $\alpha$ -FeOOH 是绝缘的非活性物质, 晶体枝晶纤细, 其稳定性最强, 是保护性锈层的主要成分<sup>[7]</sup>。

## 2.3 锈层腐蚀机理分析

模拟工业大气环境下的周期浸润腐蚀, 主要是钢铁材料在薄液膜下发生的电化学腐蚀过程, 而腐蚀溶液覆盖在试样表面, 形成具有电解质性质的液膜, 为试样发生电化学反应提供了外部条件。根据 Evans 和 Taylor 提出的锈层下钢铁大气腐蚀机理, 可将周浸腐蚀试验分为湿润和干燥两种不同环境的腐蚀条件<sup>[8-9]</sup>。

在湿润的腐蚀条件下, 阳极反应在金属基体/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的界面上发生 (基体铁发生溶解):





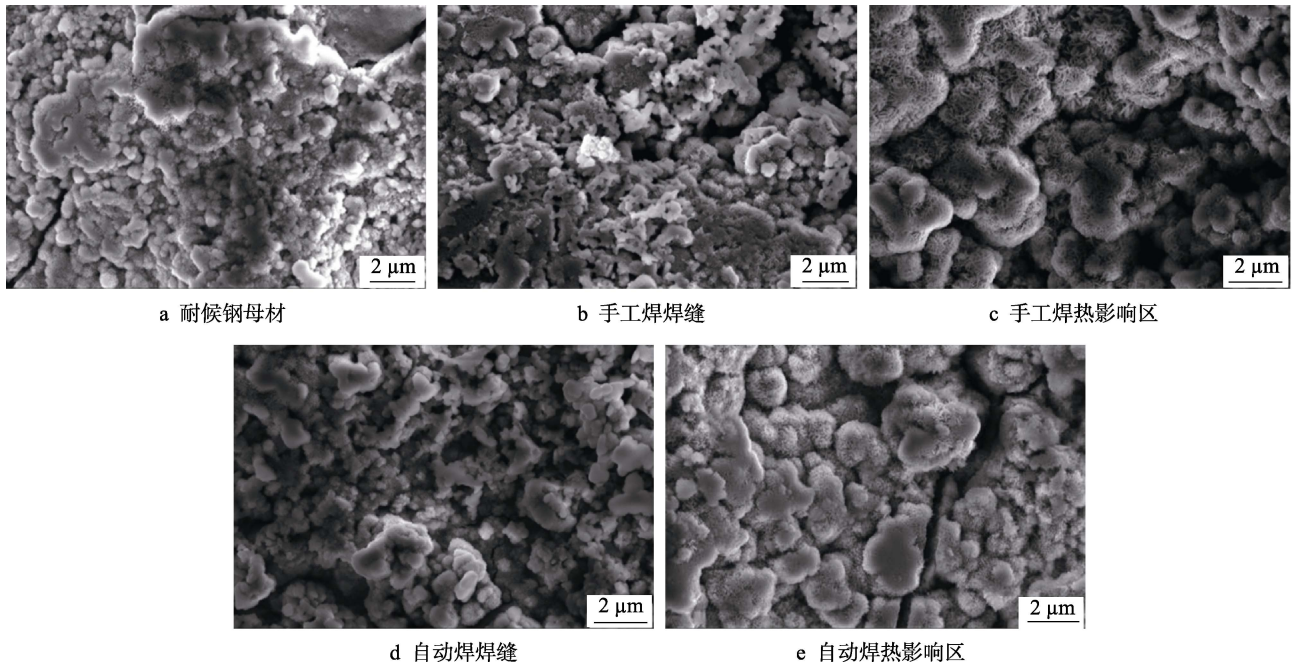
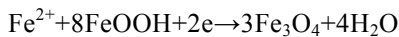


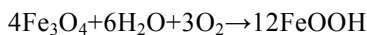
图 4 耐候钢母材及其焊接接头不同区域的微观腐蚀形貌

Fig.4 Microscopic corrosion morphology of weathering steel base metal and its welded joints in different areas: a) weathering steel base metal, b) manual welding seam, c) manual welding HAZ, d) automatic welding seam, e) automatic welding HAZ

阴极反应在  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{FeOOH}$  的界面上发生（即腐蚀锈层内发生还原反应  $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ ）：



在干燥的腐蚀条件下， $\text{Fe}_3\text{O}_4$  发生氧化反应，生成  $\text{FeOOH}$ （锈层的再氧化）：



SMA490BW 耐候钢母材及其焊接接头中的合金元素，对腐蚀反应的进行会产生影响，从而影响其耐腐蚀性能<sup>[10-11]</sup>。其中，元素 Cr 有助于形成具有阳离子选择性的锈层，抑制腐蚀性阴离子的进入，加速  $\text{Fe}_x\text{H}_y\text{O}_z \rightarrow \gamma\text{-FeOOH} \rightarrow \alpha\text{-FeOOH}$  的转化。同时由于 Cr 可以部分置换 Fe，形成铬铁羟基氧化物  $\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{OOH}$ <sup>[12]</sup>，使锈层具有阳离子选择性，从而在基体表面形成致密的氧化膜，这有助于细化  $\alpha\text{-FeOOH}$ ，阻止  $\text{SO}_4^{2-}$  向基体表面渗透，提高耐候钢的耐腐蚀性。在金属腐蚀过程中，Cu 在钢表面形成氢氧硫酸铜，在锈层的孔隙中析出，从而提高锈层的致密性，增强锈层对钢基体的保护作用<sup>[13]</sup>。当 Cr 与 Cu 同时存在时，效果更明显。Ni 在耐候钢锈层中并未出现富集现象<sup>[14]</sup>，而是

以  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  存在于尖晶石型氧化物中，有效促进氧化物向均匀、致密结构型转变，增强内锈层致密性，并促进钢的腐蚀电位正移<sup>[15]</sup>。

因此，合金元素含量会直接影响到耐候钢母材及其焊接接头的耐腐蚀性能。SMA490BW 耐候钢母材及其焊接接头腐蚀前后的能谱分析结果列于表 4 和表 5，其中 Cr、Ni、Cu 元素为主要抑制锈层腐蚀的合金元素。

表 4 耐候钢母材及其焊接接头不同区域化学成分  
Tab.4 Chemical composition of weathering steel base metal and its welded joints in different areas

Experiment area	Elements/wt%			
	Fe	Cr	Ni	Cu
The base metal	92.9	0.54	0.25	0.32
The manual MAG welding seam	88.76	0.34	0.15	0.27
The manual MAG welding HAZ	88.65	0.31	0.12	0.24
The automatic MAG welding seam	89.94	0.75	0.50	0.36
The automatic MAG welding HAZ	88.91	0.52	0.23	0.31

表 5 耐候钢母材及其焊接接头不同区域经 150 h 腐蚀后腐蚀产物的合金成分

Tab.5 Alloy composition of weathering steel base metal and its welded joints in different areas after 150 h corrosion

Experiment area	Elements/wt%					
	Fe	O	S	Cr	Ni	Cu
The base metal	57.61	35.97	1.39	1.16	0.15	0.15
The manual MAG welding seam	54.8	38.66	1.14	0.82	0.08	0.11
The manual MAG welding HAZ	54.76	39.21	1.44	0.76	0.06	0.10
The automatic MAG welding seam	59.31	33.27	1.09	1.79	0.23	0.17
The automatic MAG welding HAZ	56.79	35.64	1.19	1.08	0.14	0.13

由表 4 和表 5 可知, 与自动 MAG 焊接相比, 手工 MAG 焊接速度低、熔池热输入大, 从而导致焊缝金属中主要抑制锈层腐蚀的 Cr、Ni、Cu 合金元素含量明显减少。与耐候钢母材相比, 自动 MAG 焊接过程中, 由于填充材料中含有较高的 Cr、Ni、Cu 合金元素, 使得焊缝金属中主要抑制锈层腐蚀的 Cr、Ni、Cu 合金元素含量高于耐候钢母材。在腐蚀初期, 由于  $\text{NaHSO}_3$  具有还原性, 使得锈层中  $\text{FeOH}^+$  的浓度较高, 因此在基体表面优先形成黄褐色的腐蚀产物  $\gamma\text{-FeOOH}$ 。但  $\gamma\text{-FeOOH}$  的致密度较差, 极易发生脱落, 对基体的保护作用较差。

经过 150 h 周浸腐蚀后, 在耐候钢母材及其接头的锈层腐蚀产物中, 由于 Cr、Ni、Cu 元素会促进  $\text{Fe}^{2+}$  转化成  $\text{Fe}^{3+}$ , 加速  $\gamma\text{-FeOOH}$  转化成为  $\alpha\text{-FeOOH}$ , 在基体表面形成致密的氧化膜, 阻挡  $\text{SO}_3^{2-}$  与基体金属的进一步接触, 从而有效地抑制腐蚀的继续进行。由此可见, 在模拟工业大气环境条件下, 自动 MAG 焊接头的耐腐蚀性要优于手工 MAG 焊接头。

### 3 结论

1) 在模拟工业大气环境条件下, SMA490BW 耐候钢母材及其焊接接头的腐蚀失重率随腐蚀时间的延长, 呈先增后减的变化规律。其中自动 MAG 焊接头腐蚀失重率最小, 手工 MAG 焊接头腐蚀失重率最大, 而 SMA490BW 耐候钢母材居于两者之间。

2) 自动 MAG 焊接头、手工 MAG 焊接头及 SMA490BW 母材表面锈层的腐蚀产物均为  $\gamma\text{-FeOOH}$ 、 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , 其中  $\alpha\text{-FeOOH}$  中 Fe 元素被部分置换为 Cr 元素而形成  $\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{OOH}$ , 并在基体表面形成致密的氧化膜。

3) 与自动 MAG 焊接头的耐腐蚀性能相比, 手工 MAG 焊接头的耐腐蚀性能降低, 其主要原因是由于手工 MAG 焊热输入量较大, 合金烧损导致焊缝中主要抑制锈层腐蚀的 Cr、Ni、Cu 合金元素含量明显减少。

#### 参考文献:

- [1] 王元良, 骆德阳, 王一戎. 我国高速列车焊接技术及其新发展[J]. 电焊机, 2008, 38(8): 8.  
WANG Yuan-liang, LUO De-yang, WANG Yi-rong. Welding and its development of bullet train[J]. Electric welding machine, 2008, 38(8): 8.
- [2] 于千. 耐候钢发展现状 & 展望[J]. 钢铁研究学报, 2007, 19(11): 14.  
YU Qian. Review and prospect of weathering steel[J]. Journal of iron and steel research, 2007, 19(11): 14.
- [3] 张全成, 王建军, 吴建生, 等. 锈层离子选择性对耐候钢抗海洋大气腐蚀性能的影响[J]. 金属学报, 2001, 37(2): 193-196.  
ZHANG Quan-cheng, WANG Jian-jun, WU Jian-sheng, et al. Effect of ion selective property on protective ability of rust layer formed on weathering steel exposed in the marine atmosphere[J]. Acta metallurgica sinica, 2001, 37(2): 193-196.
- [4] MORCILLO M, CHICO B, DÍAZ I, et al. Atmospheric corrosion data of weathering steels: A review[J]. Corrosion science, 2013, 77: 6-24.
- [5] WANG Z F, LIU J R, WU L X, et al. Study of the corrosion behavior of weathering steels in atmospheric environments[J]. Corrosion science, 2013, 67: 1-10.
- [6] 汪川, 曹公旺, 潘辰, 等. 碳钢、耐候钢在 3 种典型大气环境下的腐蚀规律研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2016, 36(1): 39-46.  
WANG Chuan, CAO Gong-wang, PAN Chen, et al. Atmospheric corrosion of carbon steel and weathering steel in three environments[J]. Journal of chinese society for corrosion and protection, 2016, 36(1): 39-46.
- [7] MARCUS P, OUDAR J. Corrosion mechanism in theory and practice[M]. New York: Marcel Dekker Inc Press, 2002.
- [8] EVANS U R. Mechanism of rusting[J]. Corrosion science, 1969, 9: 813-821.
- [9] EVANS U R, TAYLOR C A J. Mechanism of atmospheric rusting[J]. Corrosion science, 1972, 12: 227-246.
- [10] 杨海洋, 黄桂桥, 丁国清, 等. 合金元素对耐候钢腐蚀性能的影响[J]. 环境试验, 2015(2): 25-27.  
YANG Hai-yang, HUANG Gui-qiao, DING Guo-qing, et al. Effect of alloying elements on the corrosion resistance of weathering steel[J]. Environmental testing, 2015(2): 25-27.
- [11] ZHANG X, YANG S W, ZHANG W H, et al. Influence of outer rust layers on corrosion of carbon steel and weathering steel during wet-dry cycles[J]. Corrosion science, 2014, 82: 165-172.
- [12] KAMIMURA T, NASU S, SEGI T. Corrosion behavior of steel under wet and dry cycles containing  $\text{Cr}^{3+}$  ion[J]. Corrosion science, 2003, 45: 1863-1879.
- [13] 柯伟, 董俊华. Mn-Cu 钢大气腐蚀锈层演化规律及其耐候性的研究[J]. 金属学报, 2010, 46(11): 1365.  
KE Wei, DONG Jun-hua. Study on the rusting evolution and the performance of resisting to atmospheric corrosion for Mn-Cu steel[J]. Acta metallurgica sinica, 2010, 46(11): 1365.
- [14] 顾家林, 闫睿, 久本淳, 等. 镍含量对钢材大气腐蚀的影响[J]. 腐蚀与防护, 2010, 31(1): 5-9.  
GU Jia-lin, YAN Rui, JUN Hisamoto. Effect of Ni content on atmospheric corrosion of low alloy steels[J]. Corrosion and protection, 2010, 31(1): 5-9.
- [15] CHEN X H, DONG J H, HAN E H, et al. Effect of Ni on the ion-selectivity of rust layer on low alloy steel[J]. Materials letters, 2007, 61(1): 4050-4053.