

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170329004

Q195 钢双镀 Galfan 合金镀层组织及耐蚀性

吴长军¹, 冯子跃¹, 刘亚¹, 涂浩¹, 王建华¹, 苏旭平^{1,2}

(1. 常州大学 江苏省材料表面科学与技术重点实验室, 江苏 常州 213164; 2. 常州大学 江苏省光伏科学与工程协同创新中心, 江苏 常州 213164)

摘要: 为在结构钢表面获得质量优良的高耐蚀性 Galfan 合金镀层, 尝试在 450 °C 先预镀纯锌再浸镀 Galfan 合金的双镀方法, 并研究预镀时间和浸镀时间对镀层组织及耐蚀性的影响。结果表明, 450 °C 预镀 5 s 以上的纯锌后再浸镀 Galfan 合金, 镀层表面质量优良。镀层主要由 $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{-Zn}_x$ 、 $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x$ 和合金液的凝固组织组成, 没有 Fe-Zn 化合物。随预镀时间增加, $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x\text{+G}$ (液相凝固组织) 层变厚; 随浸镀时间的增加, $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{-Zn}_x$ 层厚度逐渐增加, 并逐渐形成 $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x$ 层。 $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x\text{+G}$ 两相层在浸镀 60 s 以下均能稳定存在。通过电化学测试发现, 双镀 Galfan 合金镀层耐蚀性明显优于纯锌镀层, 但延长浸镀 Galfan 合金时间会降低镀层的耐蚀性。

关键词: 热浸镀; 高尔凡; 双镀; 微观组织

中图分类号: TG174.44; TG113.23

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)05-0052-08

Microstructure and Corrosion Resistance of Two-step Hot-dipped Galfan Coating on Q195 Steel

WU Chang-jun¹, FENG Zi-luo¹, LIU Ya¹, TU Hao¹, WANG Jian-hua¹, SU Xu-ping^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Materials Surface Science and Technology, Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Photovoltaic Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu)

Abstract: To obtain high corrosion resistance Galfan coating on structural steel with excellent surface quality, the Q195 steel was pre-dipped in pure zinc bath before being immersed in Galfan bath at 450 °C. The effects of the pre-dipping time and the immerse time on the microstructure and corrosion resistance of the coating were investigated. Experiment results show that the Galfan coating with excellent surface quality can be obtained after the steel is pre-dipped in zinc bath for more than 5 s. The coating is composed mainly of $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{-Zn}_x$, $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x$ and the solidification structure of the liquid phase, while no Fe-Zn compound is observed. With the increase of the pre-dipping time, the $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x\text{+G}$ (coagulation structure of liquid phase) layer becomes thicker. With the increase of the immerse time in Galfan bath, the thickness of the $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{-Zn}_x$ layer increases gradually, and even forms a $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x$ layer. When the pre-dipped sample is immersed in Galfan bath for less than 60 s, the $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x\text{+G}$ two-phase layer can stably exist. Electrochemical test results show that the corrosion resistance of the two-step hot-dipped Galfan coating is better than that of the pure zinc coating. However, the corrosion resistance decreases with prolonging immersion time in Galfan bath.

Keywords: hot-dip galvanizing; Galfan; two-step hot-dip; microstructure

收稿日期: 2017-03-29; 修回日期: 2017-07-10

网络出版日期: 2017-09-11 16:44; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170911.1644.010.html>

通讯作者: 苏旭平 (1961—), 男 (汉), 教授, 博士; 研究方向: 合金热力学及材料设计, 材料表面处理; **E-mail:** sxping@cczu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (51471037, 51201023)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51471037, 51201023)

引文格式: 吴长军, 冯子跃, 刘亚, 等. Q195 钢双镀 Galfan 合金镀层组织及耐蚀性[J]. 中国表面工程, 2017, 30(5): 52-59.

WU C J, FENG Z L, LIU Y, et al. Microstructure and corrosion resistance of two-step hot-dipped Galfan coating on Q195 steel[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(5): 52-59.

0 引言

结构钢在热浸镀锌时,由于存在硅反应性,钢中的Si往往会使镀层灰暗、超厚、粘附性差^[1-3]。目前抑制硅反应性的方法主要有预镀镍、热浸镀锌合金、高温镀锌等^[3]。Galfan合金(Zn-5%Al-RE)是一种新型锌铝合金镀层材料^[3-4],其耐蚀性是纯镀锌层的2~3倍,即使在高氯离子的恶劣环境下也具有很好的耐蚀性^[5],且其熔点低、力学性能良好,因此日益受到重视。

Al是提高抗腐蚀能力的决定因素,当镀层中Al含量约为6%时(除特别说明外,文中均使用质量分数)为共晶组织,具有极佳的抗腐蚀性能和其它综合性能,是替代传统的纯锌镀层的新型镀层。微量稀土元素的加入,不仅可以有效改善镀层表面光泽,提高镀层耐蚀性能和机械加工性能,延长使用寿命,还可以使镀层组织均匀、细化晶粒,细小的共晶组织能阻止裂纹的扩展,从而降低镀层脆性。

工业上生产Galfan合金主要用森吉米尔法和熔剂法^[6-8]。但是由于Galfan合金中含有5%Al,会与常规氯化锌铵助镀剂发生反应,导致漏镀、表面极不平整等缺陷,无法获得均匀的镀层。国内外一些学者也尝试研发适用于单镀Galfan合金的新型助镀剂^[9-12],但还未在工业生产中得到应用。庞建超等^[13-14]尝试使用电解助镀方法在钢丝上单镀Galfan合金,测试得到的腐蚀速率约为镀锌钢丝的2/5~5/7,并认为其主要受共晶结构和过渡层的影响;俞国峰和李鹏涛等^[15-16]也证实钢丝双镀锌-铝稀土合金的镀层具有更好的耐蚀性。

为了抑制结构钢热浸镀锌时的硅反应性,合理控制Fe-Zn层厚度同时能获得表面质量优良的高耐蚀性合金镀层,采用先镀纯锌后再浸镀Galfan合金的双镀法可能是一种行之有效的解决方法。即在浸镀Galfan合金前,通过常规批量热浸镀方法使钢件表面预镀覆盖一层Fe-Zn化合物或/和自由锌层,可避免因合金液中的Al与助镀剂发生反应导致表面质量极差的现象。为优化双镀Galfan合金工艺,文中研究了预镀时间及浸镀时间对Q195钢双镀Galfan合金的镀层组织及耐蚀性的影响,为开发结构钢件双镀Galfan合金的工艺奠定基础。

1 材料与方法

试验使用的原材料为0号锌锭、高纯铝锭(99.99%)、高纯金属铈块(99.9%)。通过向熔融的Zn-Al合金液中添加真空熔炼的Zn-Ce中间合金的方法制备Zn-5%Al-0.1%Ce的Galfan合金浴。镀件基体选用常用的结构钢Q195,其含硅量小于0.3%,为结构钢的典型。将钢板切割为10 mm×12 mm的样品,经过60~80℃的15%NaOH溶液碱洗3 min除油→水洗→15%盐酸溶液酸洗3 min除锈→水洗→70~90℃的200 g/L锌铵比为1:1.2的氯化锌铵水溶液助镀3 min→干燥1 min等预处理后,在450℃纯锌浴中预镀1~30 s后取出再于并排放置的450℃的Galfan合金浴中浸镀5~120 s,然后水冷。为进行对比研究,样品还在450℃的纯锌浴或Galfan合金浴中浸镀1~30 s。为简洁文字,文中的“预镀”均指预镀纯锌,“浸镀”均指浸镀Galfan合金。

获得的样品首先观察表面形貌,然后用JSM-6510扫描电子显微镜(SEM)观察镀层显微组织及测量合金层厚度,使用INCA能谱仪(EDS)分析各镀层成分。为研究预镀和浸镀时间对镀层耐蚀性的影响,使用CS400电化学测试系统测试不同预镀时间和浸镀时间下样品的耐蚀性。浸镀获得的样品使用硅胶包裹住样品上半部分,露出下部5 mm×10 mm的面积。测试时仅将下部露出的5 mm×10 mm的面积浸入10% NaCl溶液中,以5 mV/s的扫描速度测试样品在溶液中的电化学性能。

2 结果与讨论

2.1 表面形貌

表面质量是衡量镀层质量的重要标准。使用常规热浸镀方法单镀Galfan合金,获得的表面质量极差,如图1(a)所示,存在大量积瘤、漏镀等缺陷。部分表面质量虽好的区域,合金液也未与钢基体发生反应,只是粘在钢件上。也就是说,使用氯化锌铵溶液为助镀剂单镀法Galfan合金时,Al元素会与助镀剂发生反应,使镀层质量很差。图1(b)~(d)为Q195钢在450℃的纯锌浴中预镀3、5、10 s后再于Galfan合金浴中浸镀10 s后镀层表面形貌。在预镀3 s后,镀层表面虽然还存在部分不平整的区域,但比单镀Galfan合金已改善很多。随着预镀时间的增加,镀层表面质量

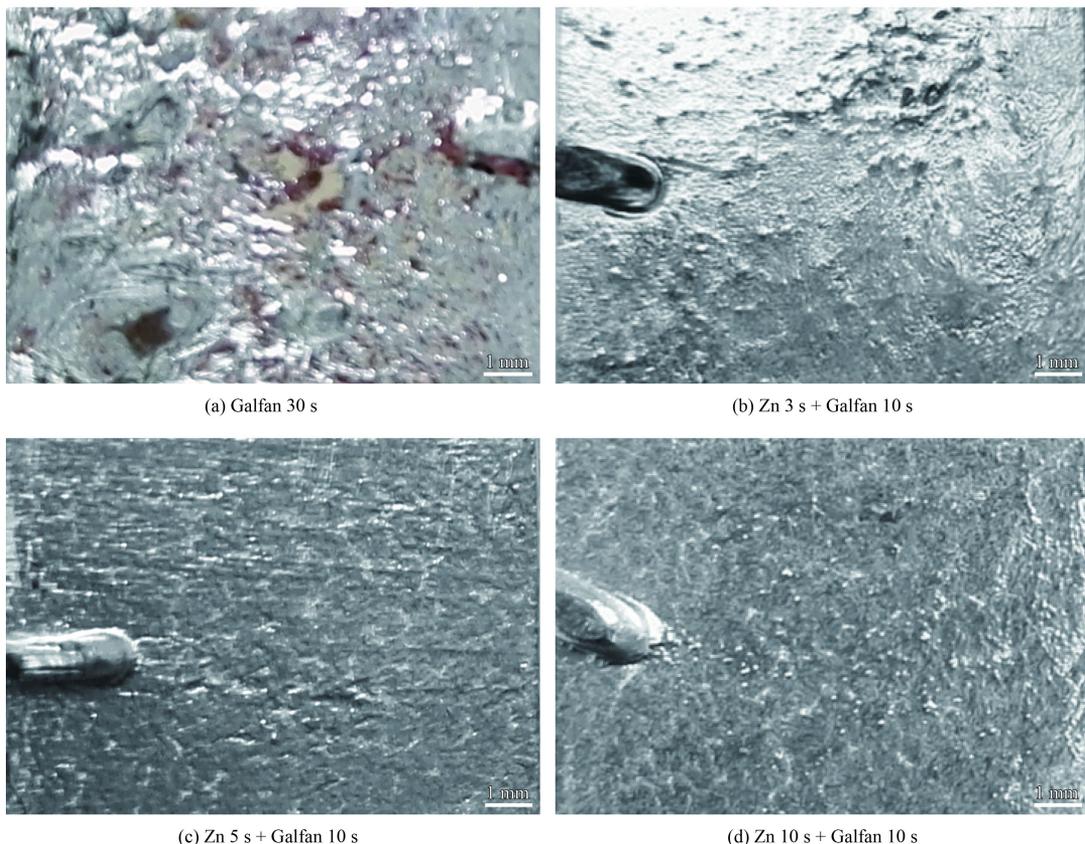


图1 Q195钢450℃时单镀Galfan合金及预镀纯锌后再浸镀Galfan合金的镀层表面形貌

Fig.1 Surface morphologies of Q195 steel galvanized in Galfan alloy by one-step and two-step methods at 450℃

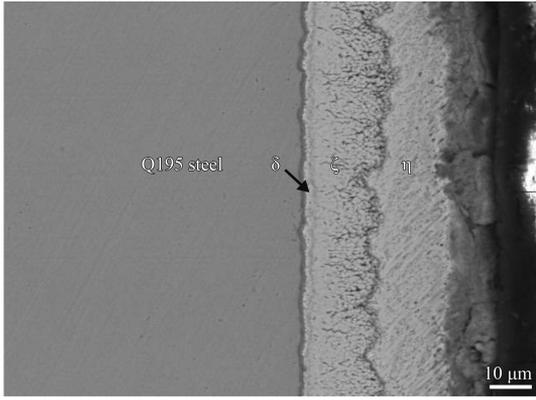
逐渐变好, 不平整的缺陷越来越小, 表面越来越平整。在预镀5s和10s再浸镀10s后的镀层表面质量已很好。因此, 通过双镀方法可获得表面质量优良的Galfan合金镀层。

2.2 双镀Galfan合金典型镀层组织

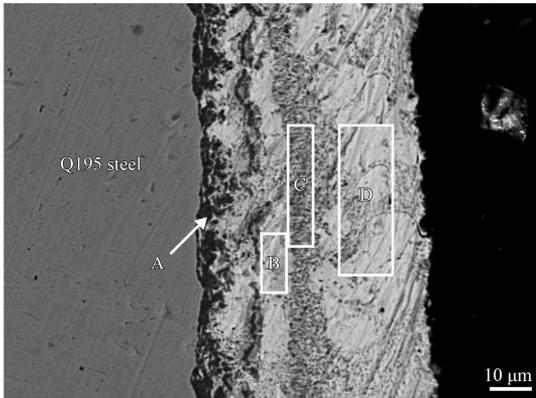
结构钢热浸镀纯锌后的合金层由Fe-Zn化合物 δ 和 ζ 组成, 其显微组织已有许多报道^[2,17]。如图2(a)所示, Q195钢在450℃的纯锌浴中预镀10s后, 靠近钢基体的为厚度约为1 μ m、Fe含量为9.2%的 δ 层, 再往外是厚度约13 μ m、Fe含量为6.6%的 ζ 层。这两相的成分与Fe-Zn二元相图完全一致。最外层 η 层中几乎不含Fe, 为液相锌凝固后的组织, 即为自由锌层。

在分析预镀时间、浸镀时间及浸镀温度对镀层组织的影响之前, 为避免不必要的重复, 便于分析, 首先以Q195钢在450℃的纯锌中浸镀10s后再于Galfan合金液中浸镀10s后的镀层组织为例, 分析双镀Galfan合金的典型组织, 如图2(b)所示。通过SEM-EDS分析的结果如表1所示。

SEM-EDS分析表明, 最靠近钢基体的黑色相(A区域)的成分为13.5%Zn-49.8%Al-36.7%Fe。根据Zn-Fe-Al三元相图^[18], 该层为溶解了13.5%Zn的 Fe_2Al_5 相(标注为 $Fe_2Al_5-Zn_x$)。往外淡灰色的B区域的成分为97.6%Zn-1.3%Fe-1.1%Al, 为液相的凝固组织。图2(b)中的C区域明显有两相组成, 但由于两相十分细小, 用EDS点分析无法获得准确的成分。试验中对这个区域进行了区域成分分析, 其成分为75.0%Zn-6.8%Fe-18.2%Al, 在Zn-Fe-Al三元系450℃截面中, 对应接近Galfan合金成分的液相与 $FeAl_3-Zn_x$ 的两相区。凝固至室温后, 文中标注为 $FeAl_3-Zn_x+G$ 层。最外层D区域含有4.8%Al、0.3%Fe和约0.1%Ce。根据Zn-Al二元相图^[19]可知, 该处为Zn和Zn-Al共晶组织。成分为Zn-5%Al的合金液在冷却过程中, 先形成 η -Zn, 温度降低到380℃时形成Zn-Al共晶体。正因为表层组织中存在先共晶的 η -Zn和Zn-Al共晶组织, 它们对光的反射程度不一样, 从而导致表面有时会出现网状形貌。



(a) Pre-dipped in pure Zn bath for 10 s



(b) Pre-dipped in pure Zn bath for 10 s and then immersed in Galfan alloy for 10 s

图2 Q195 钢 450 °C 时单镀纯锌及双镀 Galfan 合金的典型镀层组织

Fig.2 Typical coating microstructure of Q195 steel galvanized in pure Zn and two-step dipped in Galfan alloy at 450 °C

表1 图2(b)中对应位置的EDS成分分析结果

Table 1 EDS results of the region composition in Fig. 2(b) (wt%)

Region	Al	Fe	Zn	Ce	Phase
A	49.8	36.7	13.5		$\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{-Zn}_x$
B	1.1	1.3	97.6		$\eta\text{-Zn}$
C	18.2	6.8	75.0		$\eta\text{-Zn}+\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{-Zn}_x$
D	4.8	0.3	94.8	0.1	$\eta\text{-Zn}+\alpha\text{-Al}$

在预镀纯锌后, 从锌浴中取出镀件并轻轻甩去表面多余的锌液, 随后再快速浸入到并排放置的 Galfan 合金浴中。其中经历的时间约为 3 s, 表面粘附的锌液基本凝固。由于镀件温度较高和 Galfan 合金液对 Fe-Zn 合金层的浸蚀, 浸镀 10 s 后, Fe-Zn 合金层已完全消失, 形成 $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x$ 和 Galfan 合金液的两相层 ($\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x+\text{G}$)。C 区域中的 Fe 含量与预镀形成的 ζ 层中的 Fe 含量一致, 说明 C 区域的两相层由 Galfan 合金液浸镀 Fe-Zn 合金层形成, 且 Fe 元素没有明显向合金液中

扩散。根据 Zn-Fe-Al 三元相图 450 °C 截面^[18], 含 5%Al 的液相与 $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x$ 是平衡的, 所以形成的 $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x+\text{Galfan}$ 合金液的两相层能稳定存在。但是, Galfan 合金液很容易穿过 $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x+\text{Galfan}$ 合金液的两相层向钢基体方向扩散。在靠近钢基体的区域, 由于 Fe 和 Al 的亲合力较大, 容易形成 Fe-Al 化合物, 所以形成 $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{-Zn}_x$ 时消耗了大部分的 Al 而 Zn 被排斥形成 B 区的富锌液相层。由于镀层中没有 Fe-Zn 化合物层, 因此, 镀层组织也不会受到钢基体中硅的影响, 不会出现硅反应性。

2.3 预镀时间和浸镀时间对镀层组织的影响

为优化双镀 Galfan 合金工艺, 研究了预镀时间对镀层组织的影响。图 3 为预镀 1~30 s 再浸镀 10 s 后的镀层截面显微组织。可以看出, 镀层中的 Fe-Al 合金层很薄, 甚至不连续。预镀 1 s 时, 由于未形成连续的 Zn-Fe 合金层, 合金层厚度较小。而自由锌层仍保持单镀 Galfan 的特征, 故其厚度比预镀 3 s 要厚一些。预镀 3 s 后, 由于形成了连续的 Fe-Zn 合金层, 再浸镀 Galfan 合金时, 形成的 $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x+\text{G}$ 层厚度均匀。预镀 5 s 后, 合金层厚度明显增厚。同图 2(b) 对比可以看出, 黑色的 Fe_2Al_5 层厚度明显小于预镀 10 s 浸镀 10 s, Fe_2Al_5 层与 $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x+\text{G}$ 层之间没有明显的 Fe-Zn 层, 镀层较薄。预镀 30 s 浸镀 10 s 样品内层 Fe_2Al_5 层仍然较薄, 但 $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x+\text{G}$ 层显著增厚。由此可见, 即使预镀 30 s 再浸镀 10 s Galfan 合金后, 预镀时形成的 Zn-Fe 合金层也会完全被浸蚀而形成 $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x+\text{G}$ 层。且预镀时间越长, $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x+\text{G}$ 层越厚。

图 4 为 Q195 钢在 450 °C 的锌池中预镀 10 s 后再于 Galfan 合金浴中浸镀 20、30、60 和 120 s 的镀层组织。浸镀 20 s 与浸镀 10 s(图 2(b)) 的组织相似, $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{-Zn}_x$ 层没有明显变厚。浸镀 30 s 后, $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{-Zn}_x$ 层增厚, $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x+\text{G}$ 层比较细密, $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{-Zn}_x$ 层与 $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x+\text{G}$ 层间的先共晶 Zn 更加明显。浸镀 60 s 时, $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{-Zn}_x$ 层增厚较大, $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x+\text{G}$ 层向靠近基体一方靠拢。在 $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{-Zn}_x$ 层的外侧, 还形成了 $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x$ 层。浸镀 120 s 后, $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{-Zn}_x$ 层变得较致密, 外侧的 $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x$ 层也明显变厚。也就是说, 在预镀 10 s 后, 随浸镀时间延长, $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{-Zn}_x$ 层明显增厚, 甚

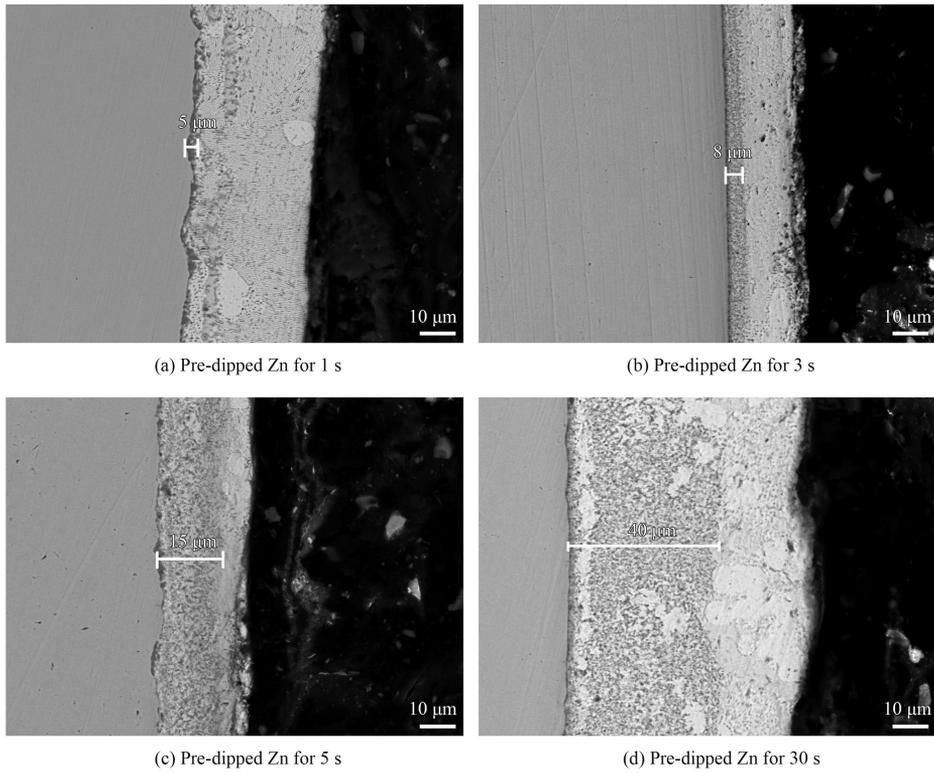


图3 Q195 钢预镀不同时间的纯锌再于 Galfan 合金浴中浸镀 10 s 后的镀层组织

Fig.3 Microstructure of the coatings on Q195 steel by pre-dipped in pure Zn bath for different time and then immersed in Galfan alloy for 10 s

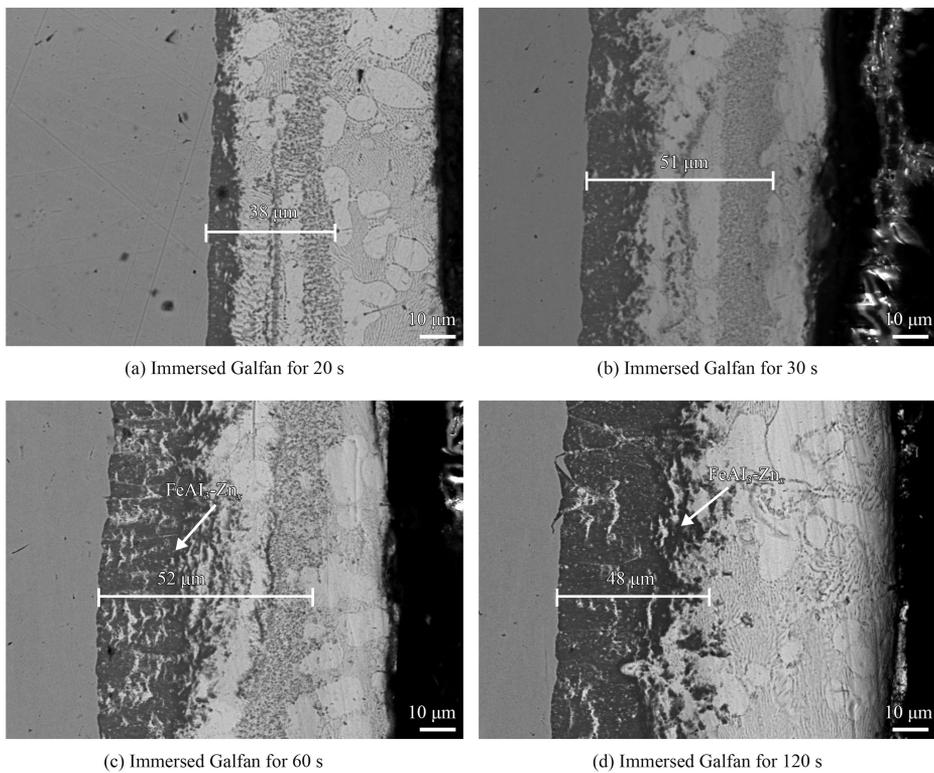


图4 Q195 钢 450 °C 预镀 10 s 纯锌再于 Galfan 合金浴中浸镀不同时间后的镀层组织

Fig.4 Microstructure of the Galfan coatings on Q195 steel by pre-dipped in pure Zn bath for 10 s and then immersed in Galfan alloy for different time at 450 °C

至在其外侧还会形成 $FeAl_3-Zn_x$ 层。而 $FeAl_3-Zn_x+G$ 层在浸镀 60 s 以下能稳定存在, 且在该层消失之前, 其厚度不随浸镀时间的延长而减薄。

图 5 为预镀时间对 Q195 钢浸镀 10 s 后合金层的厚度变化。可见随预镀时间的增长合金层厚度明显增加。预镀时间低于 5 s 时合金层较薄, 在预镀 5 s 时厚度在 16 μm 左右。预镀 1~10 s 内, 合金层厚度随预镀时间线性增加, 随后, 其增长速度放缓。预镀 30 s 再浸镀 10 s 后, 合金层厚度为 41 μm 。

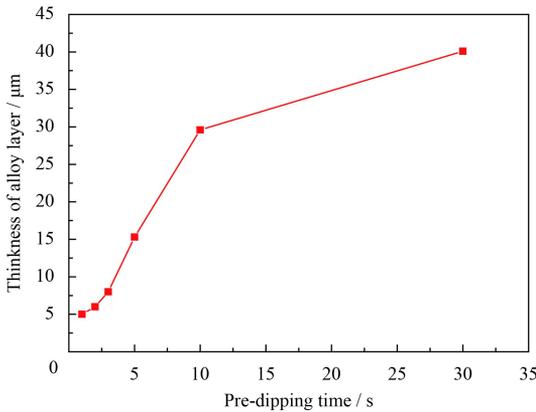


图 5 Q195 钢预镀 1~30 s 纯锌再浸镀 10 s Galfan 后的合金层厚度变化

Fig.5 Thickness of alloy layers for Q195 steel after pre-dipped in Zn bath for 1~30 s and then immersed in the Galfan bath for 10 s

图 6 是 Q195 钢预镀 10 s 后再浸镀不同时间后合金层厚度的变化。可以看出合金层厚度整体随浸镀时间增加而变厚。在样品刚开始浸镀的阶段, 合金层快速形成, 厚度增长迅速, 随着浸镀

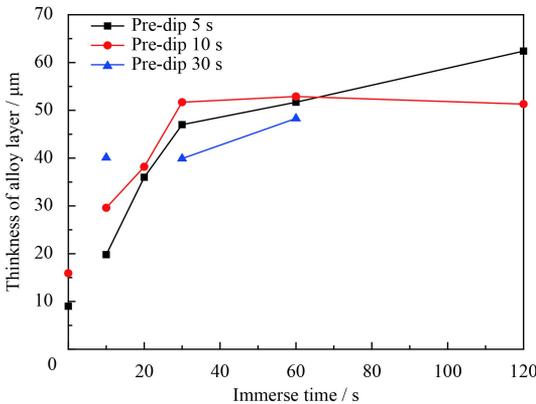


图 6 Q195 钢预镀 5, 10 和 30 s 纯锌后再于 Galfan 合金浴中浸镀 0~120 s 时合金层厚度的变化

Fig.6 Thickness of alloy layers for Q195 steel after pre-dipped in Zn bath for 5, 10, 30 s and then immersed in the Galfan bath for 0~120 s

时间继续延长, 在浸镀时间达到 30 s 后镀层增厚速率变慢。因此在选择浸镀时间时, 应该根据合金层随浸镀时间的变化规律, 考虑在预镀时间选定的基础上, 选定的浸镀时间可以得到厚度适中的合金层。

2.4 镀层耐蚀性

通过电化学试验研究了镀层的耐蚀性, 电化学试验数据通过 origin 软件处理得到的部分电极化曲线如图 7 所示。

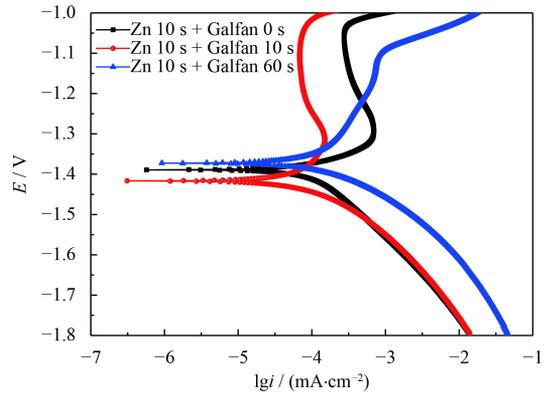


图 7 Q195 钢单镀纯锌及双镀 Galfan 合金镀件的电极化曲线
Fig.7 Polarization curves of Q195 steel after plating pure Zn coating and the two-step hot-dipped Galfan coating

根据电极化曲线, 通过 Corrtest 电化学测试系统计算得到样品镀层单位面积的腐蚀电流密度和腐蚀速率结果如表 2 所示。从表 2 可明显看出, 双镀热浸镀 Galfan 合金镀层的耐蚀性普遍优于单镀纯锌镀层。预镀 3 s 再浸镀 10 s 的样品与预镀 10 s 再浸镀 10 s 的样品耐蚀性相当, 且都明显优于纯锌镀锌。也就是说, 预镀时间对镀层的耐蚀性影

表 2 纯锌镀层及双镀 Galfan 合金镀层的电化学极化参数
Table 2 Electrochemical polarization parameters for the Zn coating and two-step hot-dipped Galfan coatings

Dipping condition	$I_{corr} / (\mu A \cdot cm^{-2})$	$R_{corr} / (mm \cdot a^{-1})$
Pre-dip Zn 3 s	106.7	3.17
Pre-dip Zn 10 s	94.7	2.82
Pre-dip Zn 30 s	97.2	2.89
Zn 3 s+Galfan 10 s	55.4	1.65
Zn 3 s+Galfan 30 s	76.6	2.28
Zn 3 s+Galfan 60 s	123.4	3.67
Zn 10 s+Galfan 10 s	50.8	1.51
Zn 10 s+Galfan 30 s	71.3	2.12
Zn 10 s+Galfan 60 s	90.6	2.69

响不大。但预镀相同时间, 随浸镀时间的延长, 镀层的耐蚀性下降。这可能是因为浸镀时间增加导致镀层外层溶解的 Fe 含量增多, 从而降低镀层的耐蚀性。因此, 浸镀时间不宜过长。

3 结论

(1) 结构钢预镀纯锌 5 s 以上再浸镀 Galfan 合金, 镀层表面质量良好。

(2) 双镀 Galfan 合金镀层中无 Fe-Zn 化合物, 其组织由 $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{-Zn}_x$ 、 $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x\text{+G}$ 、 $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x$ 及液相凝固组织组成。双镀 Galfan 合金时, $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x\text{+G}$ 两相层在镀层中能长时间稳定存在。

(3) 随预镀时间增加, $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x\text{+G}$ 层变厚; 随浸镀时间的增加, $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{-Zn}_x$ 层厚度逐渐增加, 并逐渐形成 $\text{FeAl}_3\text{-Zn}_x$ 层。

(4) 双镀 Galfan 合金镀层耐蚀性明显优于纯锌镀层。预镀相同时间, 镀层的耐蚀性随浸镀时间延长而降低。

(5) 浸镀温度为 450 °C 时, 预镀 10 s 纯锌后再浸镀 10 s Galfan 合金, Q195 钢可获得质量最佳的镀 Galfan 合金镀层。

参考文献

- [1] 苏旭平, 李智, 尹付成, 等. 热浸镀中硅反应性研究[J]. 金属学报, 2008, 44(6): 718-722.
SU X P, LI Z, YING F C, et al. A study of the silicon reactivity in galvanizing[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(6): 718-722 (in Chinese).
- [2] 吴长军, 苏旭平, 王建华, 等. Zr, Co, Ni, V 微合金化对含硅结构钢热浸镀锌性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(1): 69-73.
WU C J, SU X P, WANG J H, et al. Effect of multi-alloying addition in bath on hot-dip galvanizing of Si-containing steels[J]. Transactions of Materials And Heat Treatment, 2012, 33(1): 69-73 (in Chinese).
- [3] MARDER A R. The metallurgy of zinc-coated steel[J]. Progress in Materials Science, 2000, 45(3): 191-271.
- [4] 杨廷志, 吴长军, 王建华, 等. 冷却条件和 Ce 含量对 Galfan 合金凝固组织及其耐蚀性的影响[J]. 稀有金属, 2015, 39(7): 583-588.
YANG T Z, WU C J, WANG J H, et al. Solidification microstructure and corrosion resistance of Galfan alloy with different cooling conditions and Ce content[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2015, 39(7): 583-588 (in Chinese).
- [5] ZHANG X, LEYGRAF C, WALLINDER I O. Atmospheric

corrosion of Galfan coatings on steel in chloride-rich environments[J]. Corrosion Science, 2013, 73: 62-71.

- [6] 刘玉春, 高福宝, 曹晓明. 热镀 Galfan 合金的现状与发展[J]. 天津冶金, 2004, 123: 42-44.
LIU Y C, GAO F B, CAO X M. Current situation and development of hot-dip Galfan alloy[J]. Tianjin Metallurgy, 2004, 123: 42-44 (in Chinese).
- [7] 马瑞娜, 杜安, 高秋志, 等. 森吉米尔法和双镀 Galfan 合金镀层的分析[J]. 金属热处理, 2009, 34(5): 53-56.
MA R N, DU A, GAO Q Z, et al. Analysis of Galfan coatings prepared by Sendzimir and double-step hot-dip process[J]. Heat Treatment of Metals, 2009, 34(5): 53-56 (in Chinese).
- [8] WU J J, LI K, FAN Y Z. The Formation process of transition layer of steel wire hot-dipped Galfan by sendzimir process[J]. Advanced Materials Research, 2011, 383-390: 3917-3921.
- [9] 曹晓明, 乔腾波, 温鸣. 一种批量热镀 Galfan 的助镀剂及其制备方法: 201510687839[P]. 2016-01-06.
CAO X M, QIAO T B, WEN M. A kind of flux and its preparation method for general hot-dip Galfan: 201510687839[P]. 2016-01-06 (in Chinese).
- [10] 范永哲, 王彦文, 马瑞娜, 等. 一种用于热浸镀 Galfan 合金的助镀剂及助镀液: CN201510670492[P]. 2015-12-16.
FAN Y Z, WANG Y W, MA R N, et al. A plating solution for general hot-dip Galfan: CN201510670492[P]. 2015-12-16 (in Chinese).
- [11] 孙海燕, 马瑞娜, 范永哲, 等. 两种助镀工艺热浸镀 Galfan 合金的比较[J]. 热加工工艺, 2007, 36(14): 45-46, 49.
SUN H Y, MA R N, FAN Y Z, et al. Comparison of hot-dipping Galfan alloy aided by two techniques[J]. Material & Heat Treatment, 2007, 36(14): 45-46, 49 (in Chinese).
- [12] DU A, MA R N, FAN Y Z, et al. Study of process of hot-dipped galfan coating on Q235 structural steel[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 665: 85.
- [13] 庞建超, 马瑞娜, 温鸣, 等. 钢丝单镀 Galfan 合金耐蚀性能研究[J]. 河北工业大学学报, 2006, 35(1): 76-80.
PANG J C, MA R N, WEN M, et al. Study on the anticorrosion of Galfan alloy coating with one-step hot-dipping on steel wire[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2006, 35(1): 76-80 (in Chinese).
- [14] 孙海燕, 范永哲, 马瑞娜, 等. 钢丝热浸镀纯 Zn 与单镀 Galfan 合金的对比[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2008, 20(1): 41-43.
SUN H Y, FAN Y Z, MA R N, et al. Comparison and analysis for a galvanized coating and a single step galfan coating for steel wire[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2008, 20(1): 41-43 (in Chinese).

- [15] 俞国峰, 邓意达, 胡文彬. 钢丝热浸双镀锌-铝稀土合金镀层的组织性能研究[J]. 电镀与环保, 2007, 27(3): 34-37.
YU G F, DENG Y D, HU W B. Study on structure properties of two-step hot-dipping Zn-Al coating on steel wire[J]. Electroplating & Pollution Control, 2007, 27(3): 34-37 (in Chinese).
- [16] 李鹏涛, 支宇堃, 罗贤, 等. 钢丝双浸镀 Galfan 合金涂覆层的显微组织[J]. 金属热处理, 2014, 39(5): 36-39.
LI P T, ZHI Y K, LUO X, et al. Microstructure of double-step hot-dipped Galfan coating on steel wire[J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(5): 36-39 (in Chinese).
- [17] 吴长军, 范赛林, 苏旭平, 等. Zn-Ni-Ti 热浸镀层组织及其耐蚀性[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(9): 156-160.
WU C J, FAN S L, SU X P, et al. Microstructure and corrosion resistance of hot-dipped Zn-Ni-Ti coatings[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(9): 156-160 (in Chinese).
- [18] TANG N Y. 450 °C isotherm of Zn-Fe-Al phase diagram update[J]. Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 1996, 17(5): 396-398.
- [19] BLUNI S T, MARDER A R, GOLDSTEIN J I. Surface characterization of hot-dip Galfan coatings[J]. Materials Characterization, 1994, 33(2): 93-97.

(责任编辑: 常青)

• 本刊讯 •

第六届世界摩擦学大会在北京成功召开

9月18日上午, 第六届世界摩擦学大会(The 6th World Tribology Congress)在北京国际会议中心开幕, 国务院副总理刘延东专门致信祝贺, 中外2000余名摩擦学工作者共聚北京, 探讨世界摩擦学科学、工程及技术的可持续发展。本次大会是世界摩擦学大会成立20年来第一次在中国举办, 由中国机械工程学会摩擦学分会主办、清华大学承办。

在大会开幕式上, 中国机械工程学会摩擦学分会副主任委员、总干事顾卡丽宣读了刘延东副总理的贺信。清华大学党委书记、校务委员会主任陈旭, 国家自然科学基金委主任杨卫院士, 大会主席、中国机械工程学会常务理事、清华大学机械学院院长崔建斌院士, 国际摩擦学学会(ITC)新任主席、美国阿尔贡国家实验室阿里·埃尔代米尔(Ali Erdemir)教授等分别致辞。

开幕式后, 中国机械工程学会理事、中国科学院兰州化学物理研究所刘维民院士和以色列魏兹曼科学研究所雅各布·克莱因(Jacob Klein)教授分别以“空间科学中的摩擦”和“生物学润滑”为题, 进行大会报告。此后, 美国阿尔贡国家实验室阿里·埃尔代米尔(Ali Erdemir)教授、清华大学孟永钢教授等6位摩擦学领域的顶尖专家学者相继围绕涂层、多物理场界面、摩擦学与环境保护等方面做了大会报告。

本次大会为期5天, 旨在总结近期摩擦学各个方向的研究成果, 探讨摩擦学未来的研究方向, 增强摩擦学的基础与应用研究同工业界之间的联系。来自中国、美国、日本、英国、德国、法国等国家的高等院校、科研院所、公司企业的2022名摩擦学工作者注册参会, 其中中国籍摩擦学工作者1186人, 外籍摩擦学工作者836人, 包括国际摩擦学领域顶级专家、中国科学院和中国工程院院士、国家千人计划特聘教授、国家杰出青年基金获得者、长江学者和企业界专家学者, 以及各高校和科研院所的研究生。

世界摩擦学大会始于1997年, 每四年一届, 前五届分别在英国(伦敦)、奥地利(维也纳)、美国(华盛顿)、日本(京都)和意大利(都灵)举办。中国能够与在美国、瑞典及南非等国家的竞争中脱颖而出, 获得此次大会的主办权, 得益于近年来国家科技实力的快速发展。自2013年起, 在摩擦学领域, 中国摩擦学的SCI论文数已经超过美国排名世界第一, 是排名第三位的2倍多。中国在摩擦学领域诸如超滑、苛刻工况摩擦学、生物与仿生摩擦学等方向的研究已达到世界先进水平。

(摘自中国机械工程学会官网)