

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.06.007

# 机械能助Al-Zn-Cr共渗工艺及渗层组织\*

何祖新<sup>1,2</sup>, 苏旭平<sup>1</sup>, 彭浩平<sup>1</sup>, 刘亚<sup>1</sup>, 吴长军<sup>1</sup>, 涂浩<sup>1</sup>

(1. 常州大学 a. 江苏省材料表面科学与技术重点实验室, b. 江苏省光伏科学与工程协同创新中心, 江苏常州 213164; 2. 马鞍山钢铁股份有限公司, 安徽马鞍山 243003)

**摘要:** 采用机械能助渗技术, 在600 °C温度下对20钢进行Al-Zn-Cr共渗试验。利用光学显微镜、扫描电镜(SEM)、能谱仪(EDS)等仪器, 分析合金元素铬对渗层组织共渗速率的影响, 分析助渗时间对渗层组织的影响, 测定铬在渗层中的分布, 以及铬含量对渗层厚度的影响。结果表明: 在机械能助Al-Zn-Cr共渗的研究中, 铬含量的增加促进了渗层厚度的增加, 而铬在渗层中分布相对均匀, 无富集现象。在相同助渗时间下, 铬含量的增加, 促进了共渗速率的提高, 促使渗层组织由单一的铁铝渗层组织转变为铁铝、铁锌多层渗层组织。在同一渗剂配比条件下, 助渗时间的延长, 促进Fe-Zn相形成, Fe-Al相减少。在助渗条件为600 °C、3 h、5%Cr时, 渗层为 $\alpha$ -Fe(富锌)、Fe<sub>3</sub>Zn<sub>10</sub>、FeZn<sub>7</sub>、FeAl等相组成的多层组织, 而且相对致密; 渗层兼顾抗氧化性和阴极保护作用。

**关键词:** 机械能助渗; Al-Zn-Cr; 渗层

中图分类号: TG156.8

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2016)06-0044-08

## Al-Zn-Cr Diffusion Process Aided by Mechanical Energy and Microstructure of Alloying Layer

HE Zu-xin<sup>1,2</sup>, SU Xu-ping<sup>1</sup>, PENG Hao-ping<sup>1</sup>, LIU Ya<sup>1</sup>, WU Chang-jun<sup>1</sup>, TU Hao<sup>1</sup>

(1. a. Jiangsu Key Laboratory of Materials Surface Science and Technology, b. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Photovoltaic Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu; 2. Maanshan Iron & Steel Co. Ltd., Maanshan 243003, Anhui)

**Abstract:** Alloy layers containing Al-Zn-Cr were obtained on 20 steel by the mechanical-energy infiltration technology at 600 °C. With the aid of optical microscope, scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectrometry, the influence of alloying element Cr on co-permeation rate of alloying layer, the influence of infiltration time on the microstructure of alloying layer, the distribution of Cr in the layer and the effect of Cr content on the thickness of layer were investigated. The results show that the thickness of diffusion layer increases with the increase of the chromium content, chromium distributes uniformly in the diffusion layer and no chromium is enriched. In the condition with the same aided infiltration time, the co-permeation rate will be promoted and phase constitution in the diffusion layer will transform from a single layer to a multi-layer with the increase of the chromium content. At the same chromium content, the phases in the diffusion layer change as the time goes on. Reaction between Fe and Zn is accelerated and the formation of Fe-Al phase decreases. When the diffusion process is performed at 600 °C for 3 h and the chromium content (w%) in the Al-Zn-Cr infiltration powder is 5%, the obtained diffusion layer which is composed of  $\alpha$ -Fe(Zn-rich), Fe<sub>3</sub>Zn<sub>10</sub>, FeZn<sub>7</sub> and FeAl phases is a compact multiple structure. The alloying layer has good oxidation resistance and cathodic protection.

**Keywords:** mechanical energy aided diffusion; Al-Zn-Cr; diffusion layer

收稿日期: 2016-06-04; 修回日期: 2016-11-06; 基金项目: \*国家自然科学基金(51171031, 51301028)

通讯作者: 苏旭平(1961—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 材料设计与材料表面技术; Tel: (0519) 8633 0982; E-mail: sxping@cczu.edu.cn

网络出版日期: 2016-12-12 09:18; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20161212.0918.008.html>

引文格式: 何祖新, 苏旭平, 彭浩平, 等. 机械能助Al-Zn-Cr共渗工艺及渗层组织[J]. 中国表面工程, 2016, 29(6): 44-51. HE Z X, SU X P, PENG H P, et al. Al-Zn-Cr diffusion process aided by mechanical energy and microstructure of alloying layer[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(6): 44-51.

## 0 引言

我国的许多主力油田已进入中、高含水开发期, 随着综合含水的不断升高, 油气采集系统中的一些紧固件, 如: 螺栓、螺母, 由于受到腐蚀, 会严重影响其使用寿命以及其稳定性<sup>[1]</sup>。为了提高紧固件的综合性能, 在过去的长期研究中已开发出许多表面处理方法, 其中通过机械能助渗方式获得的渗锌<sup>[2-3]</sup>、渗铝<sup>[4-7]</sup>等合金层开始在工程领域中得到了较为广泛的应用。而庄光山<sup>[8]</sup>等人在进行机械能助Al-Zn共渗时发现, 在400 ℃温度下, 机械能助渗工艺便同时达到了渗锌和渗铝的目的, 充分发挥了元素的各自优点, 渗层效果较好, 但是也有不足之处, 其中共渗速率相对较低。为了提高机械能助Al-Zn共渗速率, 有必要对其进行进一步的研究。而铬是一种对钢的组织结构具有很大影响的元素<sup>[9]</sup>, 目前为止还没有铬元素对机械能助Al-Zn共渗速率影响的研究, 因此有必要开展机械能助Al-Zn-Cr共渗研究。

文中以常用的20钢为研究对象, 采用机械能助渗的方式对其进行Al-Zn-Cr共渗处理, 研究渗剂配比(铬含量)对渗层组织共渗速率的影响; 分析不同助渗时间对渗层组织的影响以及铬在渗层中的分布。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验基体材料为20钢。利用线切割机将基体材料加工成尺寸为15 mm×15 mm×3 mm的薄片, 经预磨机打磨除锈后, 用15%的氢氧化钠溶液在70~90 ℃温度下碱洗除油4 min, 清水冲洗, 然后用15%的盐酸酸洗2 min, 清水、无水乙醇依次冲洗, 最后吹干放到干燥箱备用。试验中所使用的铝粉、锌粉、铬粉、氧化铝粉以及氯化铵纯度均为99.9%(质量分数)。其中铝粉、锌粉、铬粉、氧化铝粉粒径均为74 μm(200目), 氯化铵为150 μm(100目)。渗剂中氯化铵作催化剂, 氧化铝粉作填充剂。

### 1.2 试验方法

按一定的质量比称量好试验所需的铝粉、锌粉、铬粉、氯化铵, 余量为氧化铝填充剂。室温下, 将上述粉末在大玻璃罐中混合均匀, 制得共

渗剂; 然后将预处理的样品与共渗剂按1:4的体积比一起装入RG-12-6型多元金属共渗炉的滚筒中, 滚筒预留1:3的容积; 装填完毕之后, 将滚筒盖盖紧并用机械泵抽至真空, 关掉真空阀, 通入氩气, 反复3~5次, 最后抽真空、密封; 然后打开电源开关, 使滚筒升温并以13 r/min的转速转动, 待温度达到600 ℃时开始计时, 达到设定保温时间后, 停止加热以及转动; 然后将样品随炉冷却至室温, 取出样品。设定保温时间分别为2、3、4 h。具体渗剂配比(质量比)为铝粉: 锌粉: 铬粉: 氯化铵为25:15:x:1(x分别为3, 5, 7, 9), 其余为氧化铝填充剂。为了便于区分, 相应的不同渗剂配比分别记为3Cr, 5Cr, 7Cr和9Cr, 具体配比如表1所示。

表1 不同渗剂配比名义成分

Table 1 Nominal composition of different infiltration agent (w/%)

Infiltration agent	Al	Zn	Cr	NH <sub>4</sub> Cl	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
3Cr	25	15	3	1	56
5Cr	25	15	5	1	54
7Cr	25	15	7	1	52
9Cr	25	15	9	1	50

选取助渗后样品横截面为观察面, 将其依次进行镶样、预磨、抛光、4%硝酸酒精溶液腐蚀、无水乙醇清洗、吹干等常规处理, 之后进行金相观察, 确定合金渗层大致形貌, 然后再用JSM-6510扫描电镜(SEM)对合金样品的组织进行观察和分析。利用OXFORD能谱仪(EDS)分析渗层物相成分以及元素组成, 根据已有的相图对渗层物相进行判定, 对每一个相成分的判定进行5次测量求其平均值。在计算渗层厚度时, 使用Smile View软件多次测量后求取平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同渗剂配比(铬含量)对共渗速率的影响

对20钢在600 ℃、2 h条件下, 经不同渗剂配比助渗后获得的渗层组织进行形貌观察及物相分析, 发现20钢在600 ℃、2 h条件下, 经不同渗剂配比助渗后获得的渗层组织形貌、结构以及物相组成差别较大。图1为20钢在不同渗剂配比600 ℃、2 h条件下机械能助Al-Zn-Cr共渗形成的显微组织。从图1(a)可以看出, 在渗剂配比为3Cr时, 渗

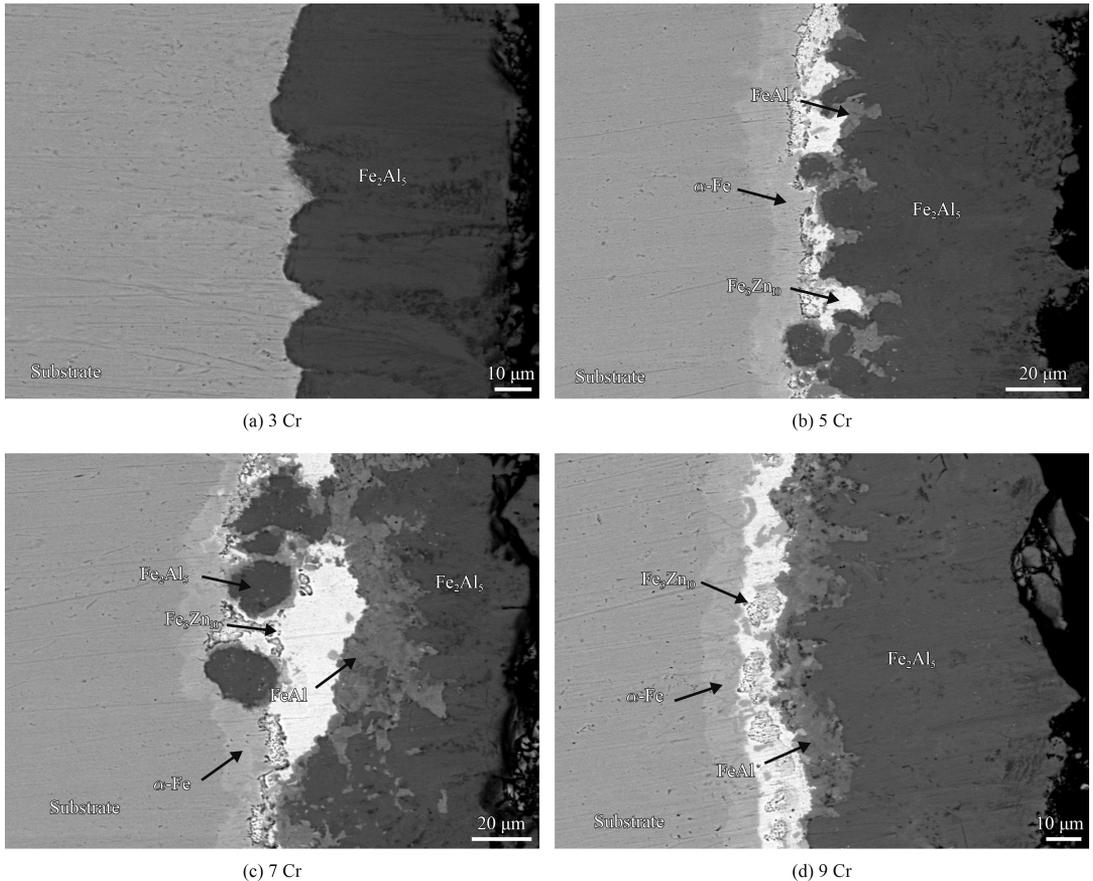


图1 20钢在600 °C、2 h条件下经不同渗剂配比助渗后的渗层截面组织

Fig.1 Cross section morphologies of the 20 steel coating after mechanical energy aided diffusion of different infiltration agent under the condition of 600 °C, 2 h

层组织由单一的 $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ 相组成。当渗剂配比由3Cr变为5Cr时, 渗层由单一的 $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ 相变为 $\alpha$ -Fe(富锌)、 $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ 、FeAl和 $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ 相组成, 如图1(b)所示。其中 $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ 相的形貌为白色组织, 上面有的存在着一些凹坑, 分析显示凹坑处仍为 $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ 相, 但铝的溶解量稍高。从上述组织结构变化可以看出, 铬比例的增加, 促进了共渗反应的进行, 提高了共渗速率, 致使锌原子可以很好的向铁基体进行扩散反应, 从而使单一的铁铝渗层变为铁铝、铁锌渗层。而随着铬含量继续增加, 如图1(c)(d)所示, 渗层的共渗速率加剧, 渗层的组织结构会进一步发生变化。

表2为20钢在600 °C、3 h不同渗剂配比下助渗后经能谱分析得到的合金相成分。结合表2, 对20钢在不同渗剂配比600 °C、3 h条件下助渗后获得的渗层组织结构以及其物相组成进行了分析。如图2(a)所示, 渗剂配比为3Cr的渗层组织由 $\alpha$ -Fe(富锌)、 $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ 、FeAl和 $\text{FeZn}_7$ 相组成。其中

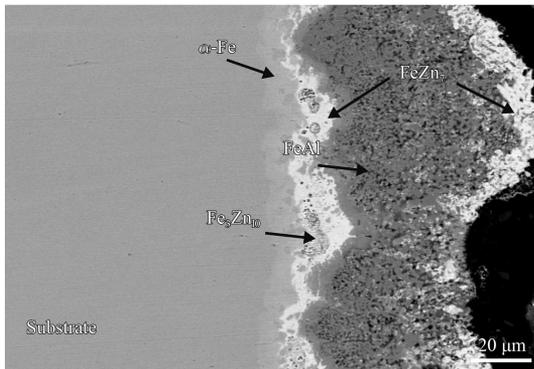
FeAl相为主要相, 而且物相较为疏松。如图2(b)所示, 随着渗剂中铬质量分数增加到5%时, FeAl相变薄而且变得致密, 渗层变为很有规律的多层结构。随着铬含量的进一步增加, 渗层主要由 $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ 和 $\text{FeZn}_7$ 相组成, 而FeAl相进一步减少, 由致密的相变得分散、弥化,  $\alpha$ -Fe(富锌)则分布于整个渗层中, 没有产生聚集现象(图2(c)(d))。综上, 在此助渗条件下, 铬的加入导致渗层共渗速率提高, 而且随着铬的增加, 渗层组织结构明显不同, 说明铬可以很好的促进共渗反应的进行。

对20钢在600 °C、4 h条件下, 经不同渗剂配比助渗后获得的渗层组织进行形貌、结构以及物相组成分析。如图3(a)(b)所示, 当渗剂配比为3Cr和5Cr时, 渗层组织均由 $\alpha$ -Fe(富锌)、 $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ 、FeAl和 $\text{FeZn}_7$ 相组成。而从图3(c)(d)可以看出, 渗层组织却均由 $\alpha$ -Fe(富锌)、 $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ 和 $\text{FeZn}_7$ 相组成。分析发现, 随着渗剂配比中铬含量的增加, FeAl相开始逐渐减少, 而当铬质量分数继续增加

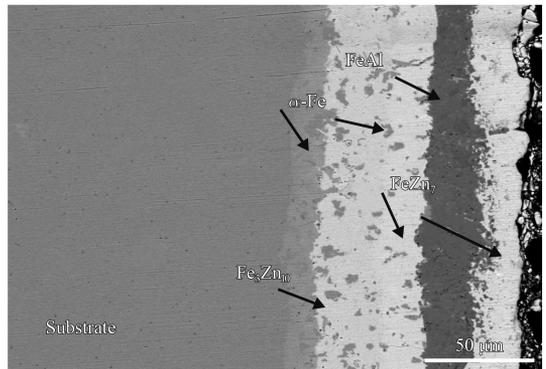
表2 20钢在600 °C、3 h条件下经不同渗剂配比助渗后经能谱分析得到的合金相成分

Table 2 Composition of the alloy phases obtained by EDS analysis of 20 steel coatings after mechanical energy aided diffusion of different infiltration agent under the condition of 600 °C, 3 h (a/%)

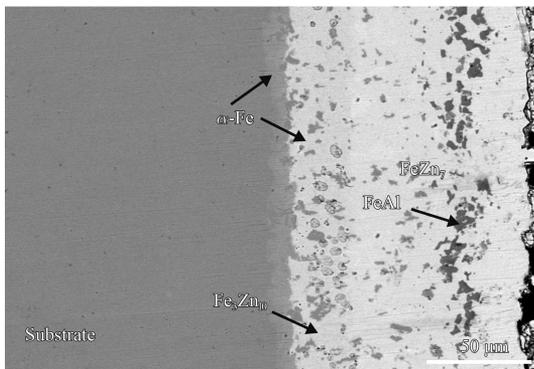
Infiltration agent	Phase	Al	Cr	Fe	Zn
3Cr	$\alpha$ -Fe(Zn-rich)	0.5	0.8	90.2	8.5
	$\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$	1.8	0.9	25.7	71.6
	FeAl	40.0	1.0	57.5	1.5
	FeZn <sub>7</sub>	0.5	1.0	13.9	84.6
5Cr	$\alpha$ -Fe(Zn-rich)	0.3	0.9	90.3	8.5
	$\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$	1.7	1.0	25.5	71.8
	FeAl	39.8	1.1	57.3	1.8
	FeZn <sub>7</sub>	0.4	1.0	13.9	84.7
7Cr	$\alpha$ -Fe(Zn-rich)	0.2	1.0	90.0	8.8
	$\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$	1.5	1.1	25.4	72.0
	FeAl	38.6	1.2	58.1	2.1
	FeZn <sub>7</sub>	0.2	1.0	13.8	85.0
9Cr	$\alpha$ -Fe(Zn-rich)	0.3	1.1	88.5	10.1
	$\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$	1.3	1.2	25.0	72.5
	FeAl	37.8	1.0	58.9	2.3
	FeZn <sub>7</sub>	0.2	1.2	13.3	85.3



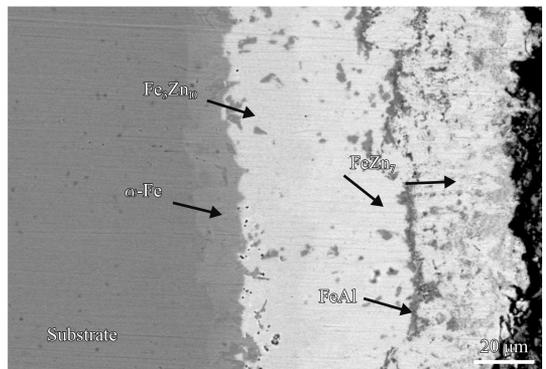
(a) 3 Cr



(b) 5 Cr



(c) 7 Cr



(d) 9 Cr

图2 20钢在600 °C、3 h条件下经不同渗剂配比助渗后的渗层截面组织

Fig.2 Cross section morphologies of the 20 steel coatings after mechanical energy aided diffusion of different infiltration agent under the condition of 600 °C, 3 h

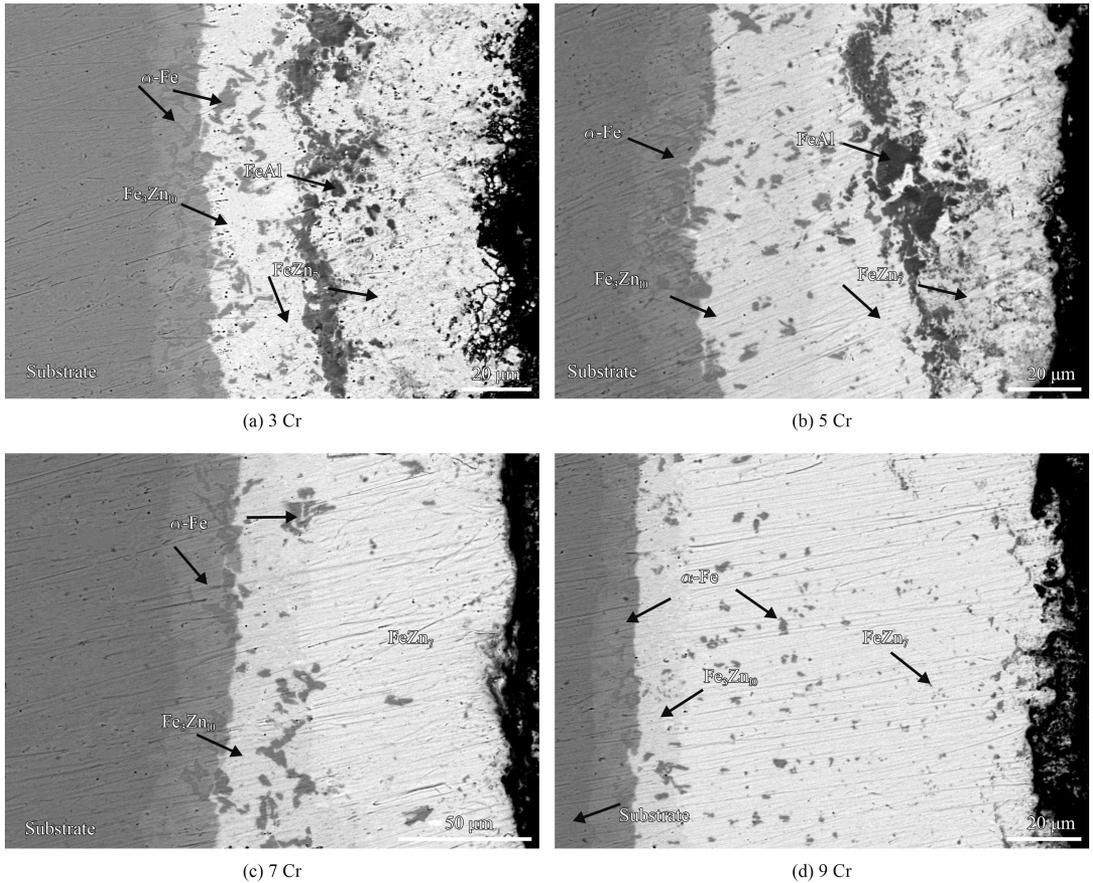


图3 20钢在600 °C、4 h条件下经不同渗剂配比助渗后的渗层截面组织

Fig.3 Cross section morphologies of the 20 steel coatings after mechanical energy aided diffusion of different infiltration agent under the condition of 600 °C, 4 h

到7%时, FeAl相完全消失, 渗层主要由铁锌化合物组成。结合以上分析, 说明在一定条件下, 合理的铬含量可以较好的控制渗层的共渗速率, 从而控制渗层的物相组成。

综合以上对20钢在600 °C、经不同助渗时间(2 h、3 h、4 h)、不同渗剂配比助渗后获得的渗层组织进行形貌观察以及物相成分分析发现, 随着渗剂配比中铬含量的增加, 渗层的共渗速率明显增加, 渗层组织开始由之前主要由铁铝相组成, 变为铁铝、铁锌相组成, 而且随着铬含量的进一步增加, 渗层中铁铝相所占比例继续减少, 铁锌相所占比例继续增加, 说明铬可以很好的提高共渗速率, 促进扩散反应的进行。对于上述渗层组织结构的形成机制, 结合相关理论知识进行分析, 由Al-Cr二元相图<sup>[10-13]</sup>可知, 铝与铬易于形成多种二元化合物, 如 $Al_8Cr_5$ 、 $Al_{11}Cr_4$ 、 $Al_4Cr$ 、 $Al_{11}Cr_2$ 、 $Al_7Cr$ 等, 而同样结合Al-Zn-Cr三元相图<sup>[14]</sup>分析可知, 锌的加入易于形成铝锌铬组成的三元

化合物, 如 $\tau_3$ 、 $\tau_4$ 。分析上述化合物可以发现, 铝与铬具有较强的亲和力, 铬的加入会导致铝向基体扩散的活性降低, 同时铬也会消耗一部分铝, 从而致使铝的扩散变慢, 铁铝相减少。由于铁铝相的减少, 铁铝抑制层<sup>[15]</sup>对铁锌扩散反应的抑制作用大大降低, 从而导致铁锌相的生成, 并随着铬含量的增加, 铁铝层逐渐变薄, 铁锌层逐渐变厚。

对于铁铝化合物渗层而言, 其对基体能起到隔离保护, 并且具有良好的抗氧化性能, 但当渗层出现破损时, 其保护能力较差<sup>[16]</sup>; 加入Cr以后出现铁锌层, 铁锌化合物由于电极电位低, 可以起到牺牲阳极的阴极保护作用, 当渗层破损, 仍然可以通过牺牲自己保护基体<sup>[17]</sup>。当渗层中同时出现铁铝化合物和铁锌化合物时, 两种化合物的优势便能得到发挥, 即抗氧化性和阴极保护作用的同时体现。例如: 5%铝的铝锌镀层、55%铝的铝锌镀层都比单一的镀铝层和镀锌层具有更高的

抗腐蚀性能<sup>[18-19]</sup>。致密铁铝化合物和铁锌化合物两种化合物的混合渗层是一种潜在的具有优良抗腐蚀性的渗层。通过对上述机械能助Al-Zn-Cr共渗的研究发现, 在一定条件下, 合理的控制渗剂配比中的铬含量, 可以获得结构较好的多层渗层组织, 其中在助渗条件为600 °C、3 h、5Cr时, 渗层为 $\alpha$ -Fe(富锌)、 $Fe_3Zn_{10}$ 、 $FeZn_7$ 和FeAl等相组成的多层组织, 而且渗层相对致密。渗层包含具有抗氧化的铁铝化合物和具有阴极保护作用的铁锌化合物的混合渗层。

### 2.2 铬含量对渗层厚度的影响

图4为渗层厚度随渗剂配比(铬含量)变化的关系。从图中可以发现, 在600 °C、2 h、3 h和4 h条件下, 随着渗剂中铬含量增加, 渗层厚度均有所增加。分析认为, 其机理和上述渗层组织变化类似, 主要为铝与铬具有较强的亲和力, 铬的加入会导致铝的活性降低, 从而致使铝的扩散受阻, 导致铁铝层减薄, 由于铁铝层的减薄, 大大减少了铁铝抑制层<sup>[15]</sup>对铁锌扩散反应的抑制作用, 致使铁锌相的生成, 因而导致渗层厚度增加。结合图4可以分析铬对加工工艺中温度参数的影响, 从渗层厚度随铬含量变化的关系可以看出, 随着铬的增加, 渗层的生长速度略微有所提高, 说明加入铬后可以略调低工艺温度。

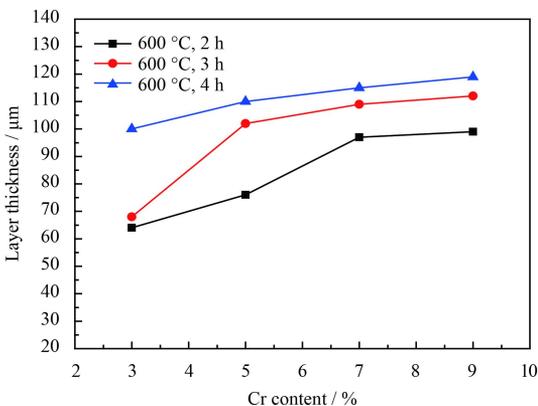


图4 渗层厚度随铬质量分数的变化

Fig.4 Layer thickness of the coatings various with Cr content

### 2.3 铬元素在渗层中的分布

对20钢在600 °C、2 h、5Cr条件下助渗后获得的渗层进行能谱分析, 研究铬元素在渗层中的分布情况。图5为渗层形貌, 表3为能谱分析。分析发现, 合金元素铬在渗层中分布相对均匀。结合

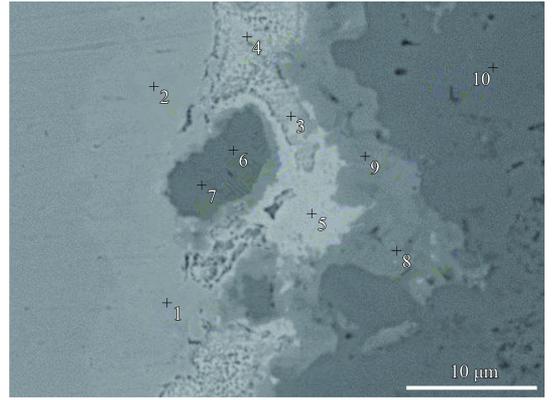


图5 20钢在600 °C、2 h、5Cr条件下助渗后渗层截面组织  
Fig.5 Cross section morphology of the 20 steel coatings after mechanical energy aided diffusion under the condition of 600 °C, 2 h and 5Cr

表3 20钢在600 °C、2 h、5Cr条件下助渗后渗层的能谱分析  
Table 3 EDS analysis of the 20 steel coatings after mechanical energy aided diffusion under the condition of 600 °C, 2 h and 5Cr

Energy spectrum	(a/%)			
	Al	Cr	Fe	Zn
1	0.6	0.7	89.8	8.9
2	0.4	0.8	90.2	8.6
3	2.3	0.8	26.1	70.8
4	2.5	0.9	25.6	71.0
5	1.9	1.0	25.8	71.3
6	61.3	0.9	27.8	10.0
7	62.1	0.8	27.3	9.8
8	43.7	0.6	52.5	3.2
9	43.5	0.7	52.3	3.5
10	61.7	0.9	28.1	9.3

表2中20钢在600 °C、3 h不同渗剂配比助渗后渗层组织的能谱分析, 得出随着渗剂中铬比例的增加, 渗层中的铬含量有所增加。综上可得, 在铬质量分数为3%~9%时, 随着渗剂配比中铬含量的增加, 渗层中铬含量有所增加, 但没有铬元素富集现象, 铬元素分布相对均匀。

### 2.4 助渗时间对渗层组织的影响

结合上述研究的不同试验条件下获得的渗层组织, 分析助渗时间对渗层组织的影响, 在600 °C、3Cr助渗条件下, 随着助渗时间的增加, 渗层由助渗2 h时的 $Fe_2Al_5$ 相变为 $\alpha$ -Fe(富锌)、 $Fe_3Zn_{10}$ 、FeAl、 $FeZn_7$ 等相组成的多层渗层组织, 当助渗时间继续增加到4 h时, 渗层组织物相组成没有发生变化, 但是物相比例却发生了很大的变化, 其中

FeZn<sub>7</sub>相比比例增加,而FeAl相比比例减少。在600℃、5Cr条件下,随着助渗时间的延长,渗层组织由助渗2h的α-Fe(富锌)、Fe<sub>3</sub>Zn<sub>10</sub>、FeAl、Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>相转变为α-Fe(富锌)、Fe<sub>3</sub>Zn<sub>10</sub>、FeAl、FeZn<sub>7</sub>相组成。当助渗时间达到4h时,渗层组织为α-Fe(富锌)、Fe<sub>3</sub>Zn<sub>10</sub>、FeAl、FeZn<sub>7</sub>相组成,说明助渗时间的增加可以促进渗层组织结构发生转变。同样在600℃、7Cr和600℃、9Cr条件下,随着助渗时间的增加,也促进了渗层组织结构的转变。分析原因认为,在600℃、同一渗剂配比条件下,助渗时间的延长,会充分保证各原子间的扩散反应进行,导致渗层组织的变化。综上所述可得,在600℃、同一渗剂配比下,助渗时间的增加,对渗层组织的转变具有促进作用。

### 3 结论

(1) 在600℃、相同助渗时间下,随着铬含量的增加,促进了渗层厚度的增加。而且铬比例的提高,促进了共渗速率的增加,促使渗层组织由较为单一的铁铝渗层转变为铁铝、铁锌多层渗层。其中在助渗条件为600℃、3h、5Cr时,渗层为α-Fe(富锌)、Fe<sub>3</sub>Zn<sub>10</sub>、FeZn<sub>7</sub>和FeAl等相组成的相对致密的多层组织,该渗层包含具有抗氧化的铁铝化合物和具有阴极保护作用的铁锌化合物两种化合物的混合渗层,是一种潜在的具有优良抗腐蚀性的渗层。

(2) 在600℃、相同助渗时间下,随着渗剂配比中铬含量的增加,渗层中铬的溶解量有所增加,但铬元素没有出现富集现象,铬元素分布相对均匀。

(3) 在600℃、同一渗剂配比条件下,助渗时间的延长对渗层组织结构的转变具有促进作用,表现为促进铁锌相形成,铁铝相减少。

### 参考文献

[1] 李勇刚,李波.天然气管道螺栓螺母保护帽设计方案的研究[J].科技信息,2010(16):387.  
LI Y G, LI B. Study on design scheme of bolt and nut protective cap for natural gas pipeline[J]. Science & Technology Information, 2010(16): 387 (in Chinese).

[2] 马青华,付大海,董作敬.机械能助渗锌及其海洋环境防腐蚀效果[J].中国表面工程,2009,22(6):61-63.  
MA Q H, FU D H, DONG Z J. Zincing technology by aid of mechanical-energy and its anticorrosion property in marine

environment[J]. China Surface Engineering, 2009, 22(6): 61-63 (in Chinese).

[3] 武传杰,林志峰,李相波,等.粉末渗锌工艺及应用发展趋势[J].热加工工艺,2013(22):20-22.  
WU C J, LIN Z F, LI X B, et al. Study on zinc powder sherardizing manufacturing process and its application trends[J]. Hot Working Technology, 2013(22): 20-22 (in Chinese).

[4] 孙希泰,付建设,徐英,等.机械能助渗铝的研究[J].金属热处理,2000(7):21-23.  
SUN X T, FU J S, XU Y, et al. Study on mechanical energy aided aluminizing[J]. Heat Treatment of Metals, 2000(7): 21-23 (in Chinese).

[5] 董瑞华,王修春,孙希泰,等.机械能辅助渗铝工艺及渗铝层性能研究[J].热处理技术与装备,2007,28(4):35-38.  
DONG R H, WANG X C, SUN X T, et al. Study on mechanical energy aided aluminizing process and its coating property[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2007, 28(4): 35-38 (in Chinese).

[6] 王吉会,张兴华,张跃.机械能助渗铝工艺与渗层性能研究[J].热处理,2010,25(6):22-25.  
WANG J H, ZHANG X H, ZHANG Y. Aluminizing process aided by mechanical energy and properties of aluminized case[J]. Heat Treatment, 2010, 25(6): 22-25 (in Chinese).

[7] 张跃,李海涛,吕丹,等.机械能辅助渗铝层显微形貌及性能的研究[J].铸造技术,2014,35(6):1167-1170.  
ZHANG Y, LI H T, LV D, et al. Microstructure and property of aluminizing layer by mechanical energy aided diffusing[J]. Foundry Technology, 2014, 35(6): 1167-1170 (in Chinese).

[8] 庄光山,马勇,徐英,等.机械能助Zn-Al共渗[J].金属热处理,2000,25(12):25-27.  
ZHUANG G S, MA Y, XU Y, et al. Study on mechanical energy aided zinc-aluminizing[J]. Heat Treatment of Metals, 2000, 25(12): 25-27 (in Chinese).

[9] 楼芬丽,张开,章建华.盐浴渗铬工艺研究[J].金属热处理,2002,27(12):43-45.  
LOU F L, ZHANG K, ZHANG J H. Salt bath chromizing process[J]. Heat Treatment of Metals, 2002, 27(12): 43-45 (in Chinese).

[10] GRUSHKO B, KOWALSKA-STRZECIWILK E, PRZEPIÓRZYŃSKI B, et al. Investigation of the Al-Cr  $\gamma$ -range[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2005, 402(1/2): 98-104.

[11] GRUSHKO B, PRZEPIÓRZYŃSKI B, KOWALSKA-STRZECIWILK E, et al. New phase in the high-Al region of Al-Cr[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2006, 420(1/2): L1-L4.

[12] GRUSHKO B, PRZEPIÓRZYŃSKI B, PAVLYUCHKOV D. On the constitution of the high-Al region of the Al-Cr al-

- loy system[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 454: 214-220.
- [13] WU H, ZHANG M, XU B J, et al. Preparation and characterization of Al<sub>11</sub>Cr<sub>4</sub> phase by diffusion of Al/Cr composite film[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 610: 492-497.
- [14] HE Z X, SU X P, PENG H P, et al. 600°C isothermal section of the Al-Cr-Zn ternary phase diagram[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 649: 1239-1245.
- [15] 李正明, 张伟, 张德晶, 等. 热镀锌镀层合金最新研究进展和发展趋势[J]. 湖南有色金属, 2011, 27(2): 35-39.
- LI Z M, ZHANG W, ZHANG D J, et al. The latest research progress and development trend of hot dip galvanized coatings[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2011, 27(2): 35-39 (in Chinese).
- [16] 李华飞, 俞敦义, 郑家桑, 等. 热浸镀铝钢的性能及用途[J]. 材料保护, 2001, 34(5): 21-23.
- LI H F, YU D Y, ZHENG J S, et al. Performance and application of hot dip aluminized steel[J]. Materials Protection, 2001, 34(5): 21-23 (in Chinese).
- [17] 卢锦堂, 孔纲, 陈锦虹, 等. 热浸镀锌性能及质量要求[J]. 材料保护, 2000, 33(3): 21-22.
- LU J T, KONG G, CHEN J H, et al. Quality requirements for hot dip galvanized coating[J]. Materials Protection, 2000, 33(3): 21-22 (in Chinese).
- [18] 朱铄金, 朱丽慧, 刘茜, 等. 热浸镀锌合金技术的研究现状[J]. 热处理, 2008, 23(3): 20-23.
- ZHU S J, ZHU L H, L Q, et al. The development of hot-dip technology for zinc alloy coatings[J]. Heat Treatment, 2008, 23(3): 20-23 (in Chinese).
- [19] 陈斌锴, 袁训华, 张启富. 热浸镀55%Al-Zn合金镀层钢板的镀层结构及防腐蚀机理[J]. 腐蚀与防护, 2009(1): 16-18.
- CHEN B K, YUAN X H, ZHANG Q F. Coating structure and anti-corrosion mechanism hot dipped 55% Al-Zn alloy on sheet steel[J]. Corrosion and Protection, 2009(1): 16-18 (in Chinese).

(责任编辑: 王文宇)

• 本刊讯 •

### 《中国表面工程》新增3篇论文入选“领跑者5000——中国精品科技期刊顶尖学术论文”

2016年10月12日, 中国科学技术信息研究所(中信所)公布了2016年度“领跑者5000——中国精品科技期刊顶尖学术论文”(F5000)名单。《中国表面工程》新增3篇论文入选2016年度F5000论文。

中信所于2012年启动F5000项目, 集中对外展示和交流我国的优秀学术论文, 所有论文在f5000.istic.ac.cn平台上进行展示。目前F5000论文已实现在Web of Science上的引用链接, 将进入汤森路透的Incites评价数据库平台。

2016年度F5000论文是中信所通过定量分析遴选和同行评议、期刊推荐相结合的方式, 从各个精品科技期刊2011~2015年发表的论文中遴选出的学术水平和影响较为突出的科技论文。截至目前, 《中国表面工程》共计41篇论文入选F5000论文。2016年度新入选的论文是:

- [1] 陈群志, 康献海, 刘健光, 等. 军用飞机腐蚀防护与日历寿命研[J]. 中国表面工程, 2010, 23(4): 1-6.
- [2] 邵天敏, 耿哲. 图形化固体薄膜技术及其摩擦学性能的研究进展[J]. 中国表面工程, 2015, 28(2): 1-26.
- [3] 温海骏, 刘长义, 刘从虎. 基于RS-TOPSIS的再制造曲轴毛坯质量评价方法[J]. 中国表面工程, 2015, 28(1): 101-108.

(本刊编辑部 供稿)