

# 热浸镀铝锌板镀层微观组织结构表征

崔桂彬, 鞠新华, 任群, 孟杨, 尹立新

(首钢集团有限公司技术研究院, 北京 100043)

**摘要:** **目的** 研究热浸镀铝锌板镀层微观组织结构。**方法** 利用扫描电镜、能谱和电子探针分析铝锌板表面与镀层的组织形貌与成分;利用 X 射线衍射与电子背散射衍射技术分析铝锌板镀层的物相组成与相结构。**结果** 铝锌板表面为典型的锌花形貌, 锌花内部呈现出有条理的枝晶状结构。铝锌板镀层沿厚度方向分为内外两层:外层为合金层, 其成分主要为 Al、Zn 和 Si, 该层主要是由富 Al 相、富 Zn 相以及少量条状高 Si 相构成;与钢基体接触的内层为过渡层或金属间化合物层, 该层的厚度仅约为 1 $\mu\text{m}$ , 其成分为 Fe、Al 和 Si, 该层由弥散致密的细颗粒与少量分散的粗颗粒构成。此外还发现, 有少量条状或颗粒状的高 Si 相分布在过渡层与合金层之间。**结论** 铝锌板镀层中合金层的富 Al 相、富 Zn 相以及条状高 Si 相的相结构分别为 Al 的面心立方结构、Zn 的密排六方结构和 Si 的面心立方结构, 高 Si 相的分布特性可以有效地控制镀层的厚度。过渡层的相结构更倾向于单斜结构的  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ , 该层在形成过程中, 部分细颗粒相长大并发生粗化, 从而形成粗颗粒相穿插于过渡层与合金层之间, 进一步加强了过渡层与合金层的连接, 进而间接地对镀层粘附性能和延伸性能的提高起到了关键性的作用。

**关键词:** 热浸镀铝锌板; 镀层; 微观组织; 相结构; EBSD; 菊池花样

**中图分类号:** TG174.443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)04-0361-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.04.038

## Characterization of Microstructure of Hot Dip Al-Zn Plated Coating

CUI Gui-bin, JU Xin-hua, REN Qun, MENG Yang, YIN Li-xin

(Shougang Group Company limited Research Institute of Technology, Beijing 100043, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the microstructure of the hot dip Al-Zn plated coating. Scanning electron microscope, energy spectrum and electron probe are used to analyze the structure and composition of the surface of the aluminum zinc plate and the coating. X-ray diffraction and electron backscatter diffraction are used to analyze the phase composition and phase structure of the Al-Zn plate coating. The surface of the Al-Zn plate is a typical spangle morphology, and the interior of the zinc flower shows a structured dendrite structure. The Al-Zn plate coating is divided into an inner layer and an outer layer along the thickness direction, the outer layer is an alloy layer which is mainly composed of Al, Zn and Si. The layer is mainly composed of Al-rich phase, Zn-rich phase, and a small number of strip-shaped high Si phase. The inner layer in contact with the steel substrate is a intermetallic compound layer. The thickness of this layer is only about 1  $\mu\text{m}$  and its composition is Fe, Al and Si which is composed of densely dispersed fine particles and a small amount of dispersed coarse particles. In addition, a small

收稿日期: 2020-06-11; 修订日期: 2021-02-23

Received: 2020-06-11; Revised: 2021-02-23

作者简介: 崔桂彬 (1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为钢铁材料微观表征。邮箱: 107634667@qq.com

**Biography:** CUI Gui-bin (1983—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: microstructure characterization of steel materials. E-mail: 107634667@qq.com

**引文格式:** 崔桂彬, 鞠新华, 任群, 等. 热浸镀铝锌板镀层微观组织结构表征[J]. 表面技术, 2021, 50(4): 361-368.

CUI Gui-bin, JU Xin-hua, REN Qun, et al. Characterization of microstructure of hot dip Al-Zn plated coating[J]. Surface technology, 2021, 50(4): 361-368.

amount of high Si phase in the form of strips or particles was found between the transition layer and the alloy layer. The phase structures of the Al-rich phase, Zn-rich phase, and strip high Si phase of the alloy layer in the Al-Zn plate coating are Al face-centered cubic structure, Zn close-packed hexagonal structure and Si face-centered cubic structure respectively. The distribution characteristics of the high Si phase can effectively control the thickness of coating. The phase structure of the transition layer is more inclined to the monoclinic  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ . During the formation of this layer, part of the fine particle phase grows and coarsens, thereby forming a coarse particle phase, interposed between the transition layer and the alloy layer, which further strengthens the transition layer and the alloy layer. The connection indirectly plays a key role in improving the adhesion and elongation of the coating.

**KEY WORDS:** hot dip Al-Zn plate; coating; microstructure; phase structure; EBSD; Kikuchi pattern

热浸镀铝锌合金板具有良好的涂装性、焊接性、抗高温氧化性、隔光和隔热性能以及更好的耐蚀性<sup>[1-7]</sup>, 被广泛用于建筑业、家用电器业、工业、农业以及汽车制造业中。最为常见的热浸镀铝锌合金板化学成分为 55%Al-Zn-1.6%Si<sup>[8-10]</sup>, 加入适量的 Si 是为了控制镀层的厚度。以往对该镀层的研究发现<sup>[11-13]</sup>, 其镀层结构主要由两部分组成: 外层为 Al-Zn 合金层, 与钢基体接触的内层主要由金属间化合物组成(简称化合物层或过渡层)。有关镀层的研究和报道<sup>[14-17]</sup>主要是借助扫描电镜、能谱和电子探针对其进行形貌和成分分析, 通过成分定量结果推测可能含有的相结构组成, 而采用菊池花样标定的方式对镀层相结构进行分析与研究鲜有报道。本文主要借助扫描电镜、电子探针、X 射线衍射仪和电子背散射衍射技术 (EBSD) 对铝锌镀层的相结构进行深入细致地分析, 为在实际生产中获得较好的产品提供技术支撑。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

试验材料为热浸镀铝锌钢板, 基板为铝镇静钢, 板厚 2 mm。镀铝锌工艺为: 试样经过退火后进入装有镀液的铝锌锅, 经气刀吹扫控制镀层厚度, 然后通过冷却塔冷却。镀液成分为: Al 55%, Zn 43.5%, Si 1.5%。

### 1.2 样品制备

将铝锌镀层样品加工成块状样, 尺寸为 10 mm×10 mm, 共计加工 5 块样品, 编号分别为 1#、2#、3#、4#和 5#。

将 1#样品进行超声波清洗, 清洗溶液为酒精, 清洗干净后, 利用扫描电镜 (JSM-7001F) 对其表面进行形貌与成分分析。

将 2#样品表面进行电解抛光, 电解抛光工艺参数为: 电压 20 V, 电解时间 15 s, 流速 10 mL/s, 电解温度 15 ℃, 实际电流 0.92 A, 电解液为 10% (体积分数) 高氯酸酒精溶液。抛光后, 利用扫描电镜

(JSM-7001F) 观察与分析高 Si 相在镀层中的分布状态。

将 3#样品进行截面制样, 机械抛光时, 用酒精代替水进行抛光, 尽量避免样品抛光面氧化, 然后用 0.4%硝酸酒精溶液腐蚀 5 s 左右, 再利用扫描电镜进行观察。对经扫描电镜观察后的 3#样品进行硅溶胶抛光, 抛光盘转速为 150 r/min, 抛光时间为 15~30 min。抛光的主要目的是去除机械抛光过程中引入的应力。再利用电子背散射衍射 (EBSD) 技术进行镀层的相结构分析。

将 4#样品表面进行机械抛光, 抛光时注意锌层的颜色变化, 尽量抛光掉合金层的部分, 然后用硅溶胶抛光, 再分别利用电子背散射衍射 (EBSD) 和 X 射线衍射 (D8 advance) 技术对镀层中过渡层的相结构进行分析。

将 5#样品同样进行电解抛光, 但电解抛光工艺参数有所不同, 需延长电解时间至 150 s, 尽量电解掉铝锌镀层中的合金层部分, 然后利用扫描电镜、能谱 (EDS) 和电子探针 (EPMA-1720) 分别对其过渡层进行观察与成分分析。

## 2 结果及分析

### 2.1 铝锌板表面形貌与成分

图 1 为 1#铝锌板样品的表面形貌与成分。图 1a 为金相体视镜下拍摄的照片, 可以看出铝锌板表面呈典型的锌花形貌特征, 锌花尺寸较大, 达到毫米级。经测量, 锌花平均尺寸约为 2.5 mm。图 1b—h 为扫描电镜下拍摄的形貌照片和成分。从图 1b 中可知, 每个锌花内部呈现出有条理的枝晶状结构。该形貌特征显示出两个典型的区域, 分别是低洼区和凸起区, 其中锌花边界 (图 1b 中箭头所指) 显示为枝晶主干 (低洼区域), 枝晶主干两侧的枝晶呈现出低洼区与凸起区相间分布。进一步放大, 如图 1c—e 所示, 凸起区更为平整光滑, 而低洼区为颗粒状的共晶相, 同时还有分布其上的条状颗粒相。对图 1d 中红色线框区域和图 1e、g 中白色虚线分别进行成分面分析和线分析, 其成分分布分别如图 1f、h。从成分面、线的

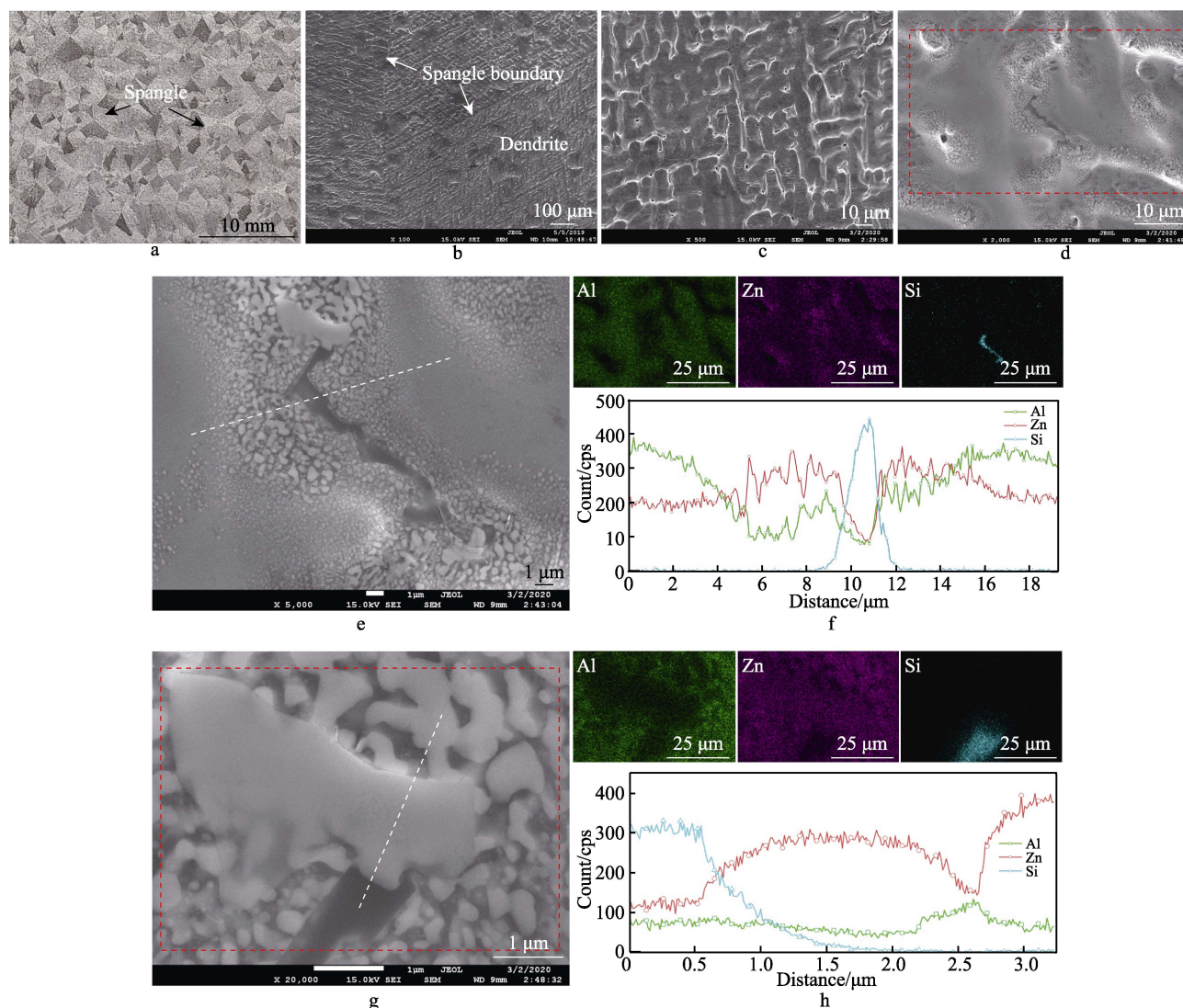


图 1 1#铝锌板样品表面形貌与成分  
Fig.1 Surface morphology and composition of 1# Al-Zn plate sample

综合分析可知, 凸起区为富 Al 相, 低洼区为 Al-Zn 共晶相, 同时在该区域还分布着黑色条状的高 Si 相。

图 2 为 2#铝锌板样品表面高 Si 相在基体中的分布。从图 2a—d 中不难发现, 铝锌板表面经电解抛光后, 高 Si 相由于在电解过程中难以被电解掉而保留了下来, 可以清楚地看出高 Si 相自身的形态、尺寸以及在基体中的分布: 高 Si 相呈鱼骨状, 沿着低洼区的共晶相分布。

## 2.2 铝锌板镀层截面形貌与成分

图 3 为 3#铝锌板样品截面形貌和成分面分布。结合镀层截面形貌与成分面分布可知, 镀层沿厚度方向分为两层: 内层和外层。与钢基体接触的内层为过渡层或金属间化合物层, 该层的厚度约为  $1\ \mu\text{m}$ , 其成分为 Fe、Al 和 Si。远离钢基体的外层为合金层, 该层的厚度约为  $21\ \mu\text{m}$ 。合金层中大部分为深灰色的富 Al 相, 同时穿插分布着河流状富 Zn 相, 在河流状

富 Zn 相附近分布着大量的颗粒状 Al-Zn 共晶相。这些河流状富 Zn 相延伸至表层低洼区, 同时还有少量黑色条状或颗粒状的高 Si 相分布于河流状富 Zn 相中或分布在过渡层与合金层界面之间。这些高 Si 相的存在可以阻碍过渡层的进一步生长, 从而有效地控制镀层的厚度。

## 2.3 铝锌板镀层微区 EBSD 分析

图 4 为 4#铝锌板样品表面的局部 EBSD 相分析。图 4a 为样品表面局部形貌, 经过样品制备去除应力后, 对红色线框内富 Zn 区域进行 EBSD 相分析, 其花样质量图如图 4b 所示, 图 4c、d 分别为该区域的晶体取向和相分布图。经相分析可知, 红色区域为 Al 相, 黄色区域为 Zn 相, 从晶体取向不难发现, 富 Al 相和中间的富 Zn 相各自的取向较为一致, 而介于两者之间的颗粒状 Al-Zn 共晶相的取向差异相对较大。



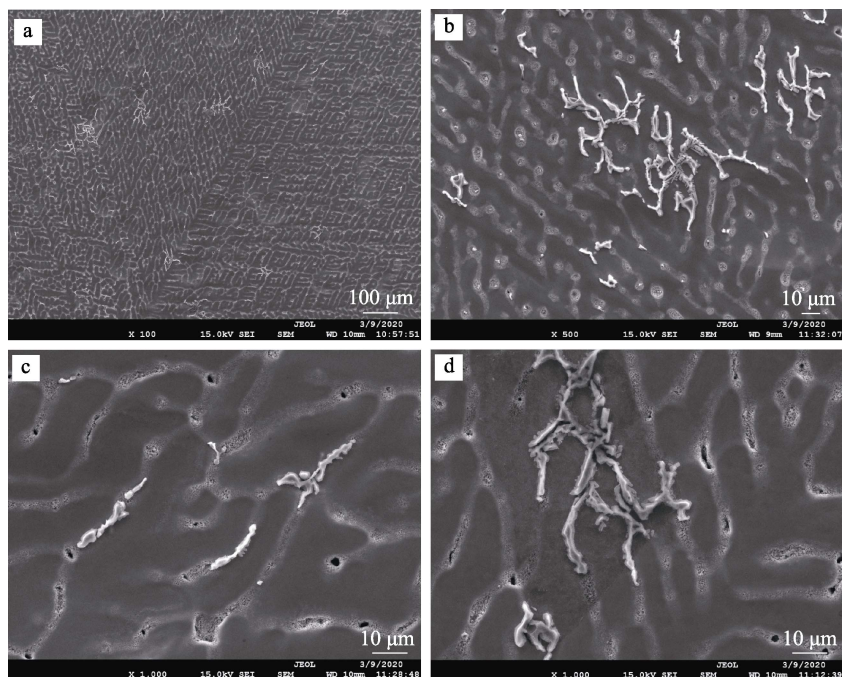


图2 2#铝锌板样品表面高 Si 相在基体中的分布  
Fig.2 Distribution of high Si phase on the surface of 2# Al-Zn plate sample

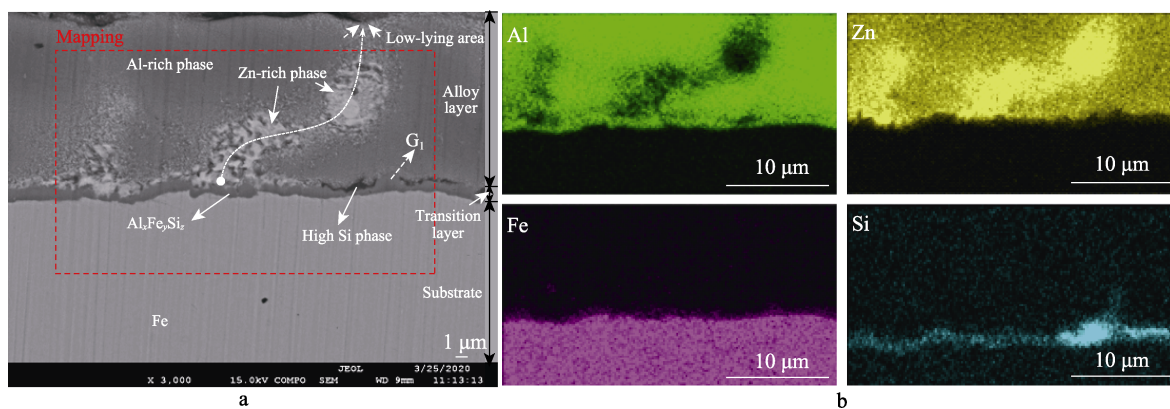


图3 3#铝锌板样品截面形貌与成分面分布  
Fig.3 Sectional morphology and composition distribution of 3# Al-Zn plate sample

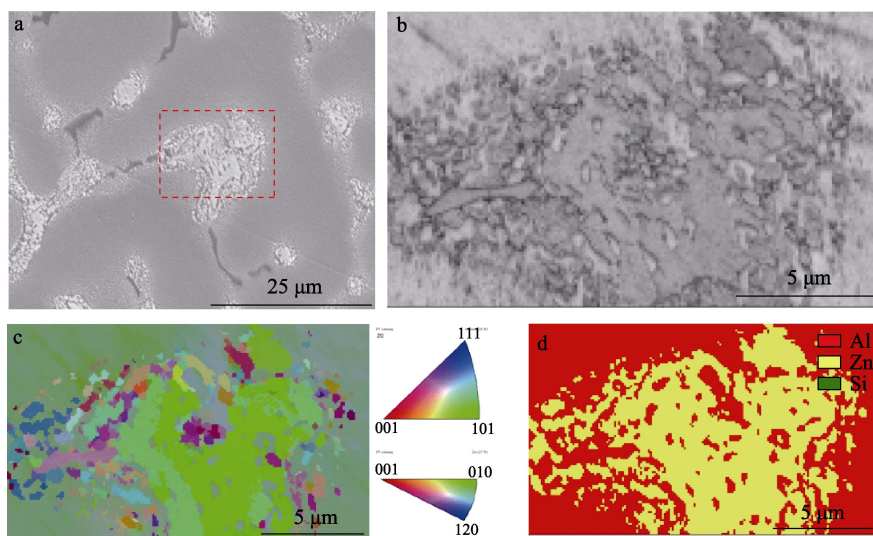


图4 4#铝锌板样品表面的局部 EBSD 相分析  
Fig.4 Local EBSD phase analysis on the surface of 4# Al-Zn plate sample

### 3 讨论

结合扫描电镜和 EBSD 相分析可知, 铝锌板镀层的外层为合金层, 合金层主要由富 Al 相、富 Zn 相和少量的高 Si 相构成, 其中富 Al 相具有纯 Al 的相结构(面心立方结构), 而富 Zn 相具有纯 Zn 的相结构, 条状或颗粒状的高 Si 相则具有单质 Si 的相结构; 镀层的内层为过渡层, 其成分主要为 Al、Fe 和少量 Si。以往对 55% Al-Zn-Si 镀层<sup>[18-19]</sup>的研究表明, 与基体接触的过渡层由金属间化合物构成, 其可能的相为  $\text{Al}_3\text{Fe}$  或  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 、 $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ 、 $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ 。

对 4# 铝锌板样品表面的过渡层进行 X 射线衍射(XRD)物相分析, 如图 5 所示。由对铝锌板完整镀层的物相分析可知, 其主要的物相组成为 Al、Zn 以及少量 Si, 如图 5 中黑色曲线所示。由于镀层中与钢基体接触的过渡层较薄(厚度约  $1\ \mu\text{m}$ ), 需要进行样品制备将镀层剪薄至过渡层附近, 再对其进行物相分析。分析时, 为了获得足够的衍射强度, 采用小角掠射模式。经计算, 满足过渡层厚度要求的掠射角为  $5^\circ$ , 步长为  $0.02^\circ$ , 扫描速度为  $0.5\ (^\circ)/\text{min}$ , 扫描角度为  $20^\circ\sim 60^\circ$ 。从 X 射线衍射图谱中可以看出, 比较明显的衍射峰有五个,  $2\theta$  分别是  $36.5^\circ$ 、 $39.2^\circ$ 、 $43.3^\circ$ 、 $44.3^\circ$  和  $54.5^\circ$ 。经相关研究报道<sup>[20-25]</sup>, 铝锌板镀层可能存在的物相结构与 X 射线衍射图谱如图 6 所示,

经与图 5 中红色曲线的物相比对, 过渡层中存在的物相为 Zn、 $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$  或  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 。其中 Zn 为镀层中合金层的物相, 主要是由于在制备样品时, 与过渡层接触的合金层没有被完全磨掉;  $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$  或  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$  为过渡层的主要物相, 从图 6 可知,  $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$  的最强衍射峰位  $2\theta$  为  $42.6^\circ\sim 44.3^\circ$ , 而  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$  的最强衍射峰位  $2\theta$  为  $43^\circ\sim 45^\circ$ , 从这两种物相的衍射图谱与实际测得的物相衍射峰位比对可知, 过渡层的物相更倾向于  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 。

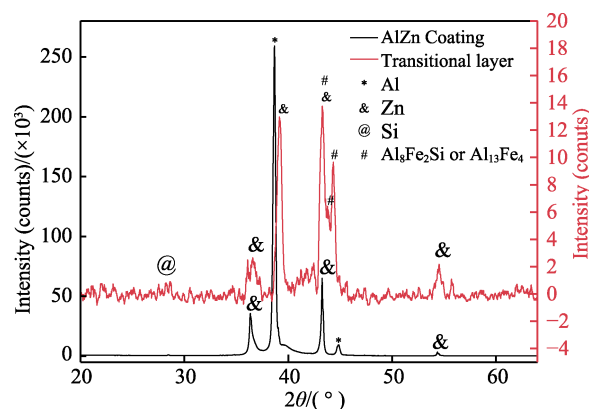


图 5 4# 铝锌板样品完整镀层和其过渡层的 X 射线衍射物相分析

Fig.5 X-ray diffraction phase analysis of intermetallic phase on the surface of 4# Al-Zn plate sample

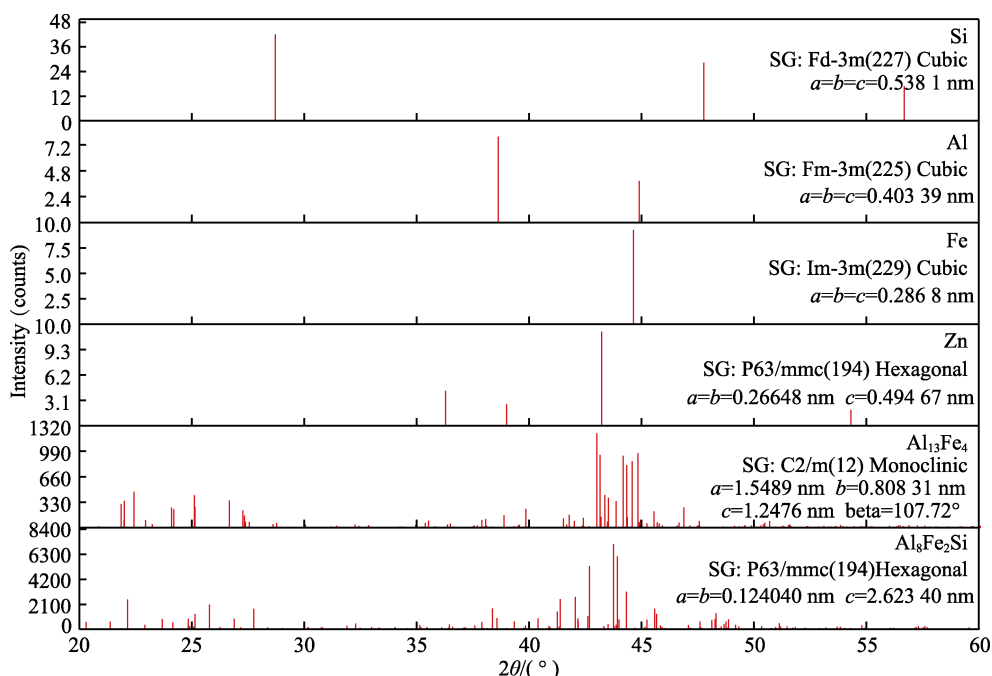


图 6 铝锌板镀层可能存在的物相结构和 X 射线衍射图谱

Fig.6 The possible phase structure and X-ray diffraction pattern of the Al-Zn plate coating

图 7 为 4# 铝锌板样品表面过渡层附近的局部形貌、成分面分布和菊池花样。从图 7a 中可以清晰地看到, 大部分基体呈灰色(如  $\text{P}_1$ ), 在基体上分布着黑色条状或片状颗粒  $\text{P}_2$ , 还有呈团簇分布的白色颗粒

$\text{P}_3$ , 以及少量的灰色颗粒(如  $\text{P}_4$ 、 $\text{P}_5$ )。

对图 7a 中红色线框区域进行成分能谱成分分析, 如图 7b 所示。从成分面分布可知, 呈灰色的基体成分主要为 Al 和 Zn, 黑色条状或片状颗粒成分为



Si, 呈团簇分布的白色颗粒成分为 Zn, 呈灰色的少量近似圆形的颗粒成分主要为 Al、Fe 和少量的 Si。对图 7a 中的 P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>、P<sub>3</sub>、P<sub>4</sub> 和 P<sub>5</sub> 位置进行 EBSD 相分析, 获得各个位置的菊池花样, 分别如图 7c 和图 8 所示。经菊池花样标定, 呈灰色的基体中位置 P<sub>1</sub> 的相结构为 Al, 黑色条状或片状颗粒 P<sub>2</sub> 的相结构为

Si, 呈团簇分布的白色颗粒 P<sub>3</sub> 的相结构为 Zn, 且呈灰色的少量近似圆形的颗粒的菊池花样中的部分菊池带具有成对出现的特点, 如图 8 中白色箭头所示。通过对 X 射线衍射获得的可能存在的两种相结构 Al<sub>13</sub>Fe<sub>4</sub> 和 Al<sub>8</sub>Fe<sub>2</sub>Si 分别进行菊池花样标定, 其中 Al<sub>13</sub>Fe<sub>4</sub> 相为单斜结构, 其菊池花样中部分菊池带具有

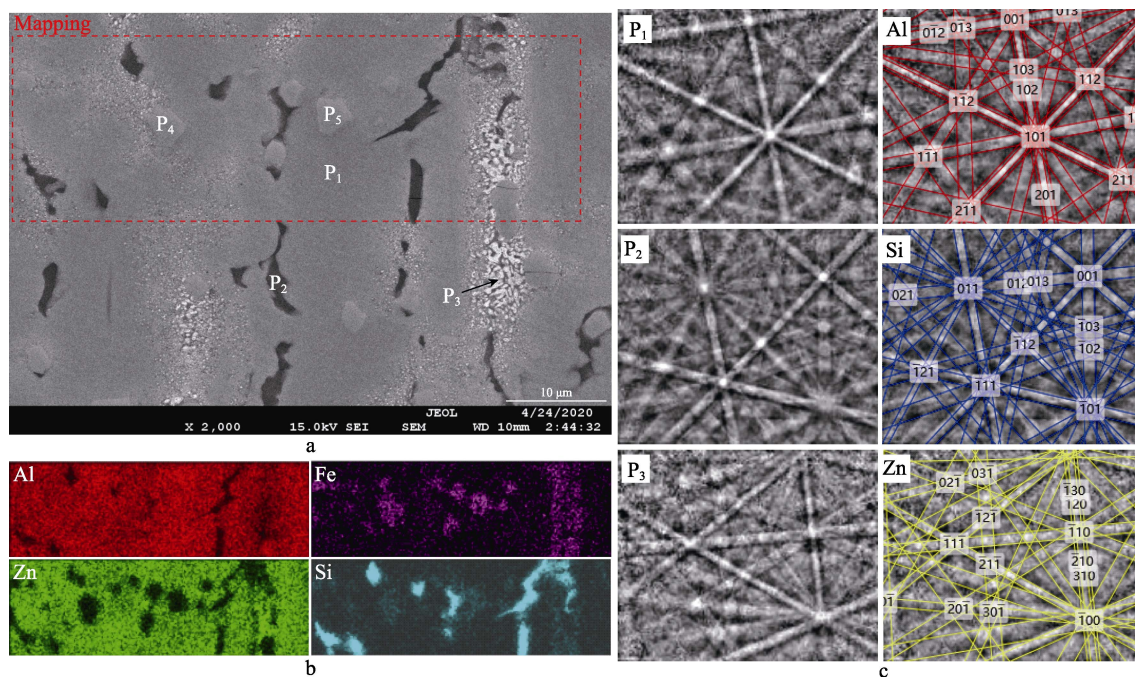


图 7 4#铝锌板样品表面过渡层附近的局部形貌、成分面分布和菊池花样

Fig.7 Local morphology, composition surface distribution and Kikuchi pattern of 4# Al-Zn plate sample near intermetallic phase

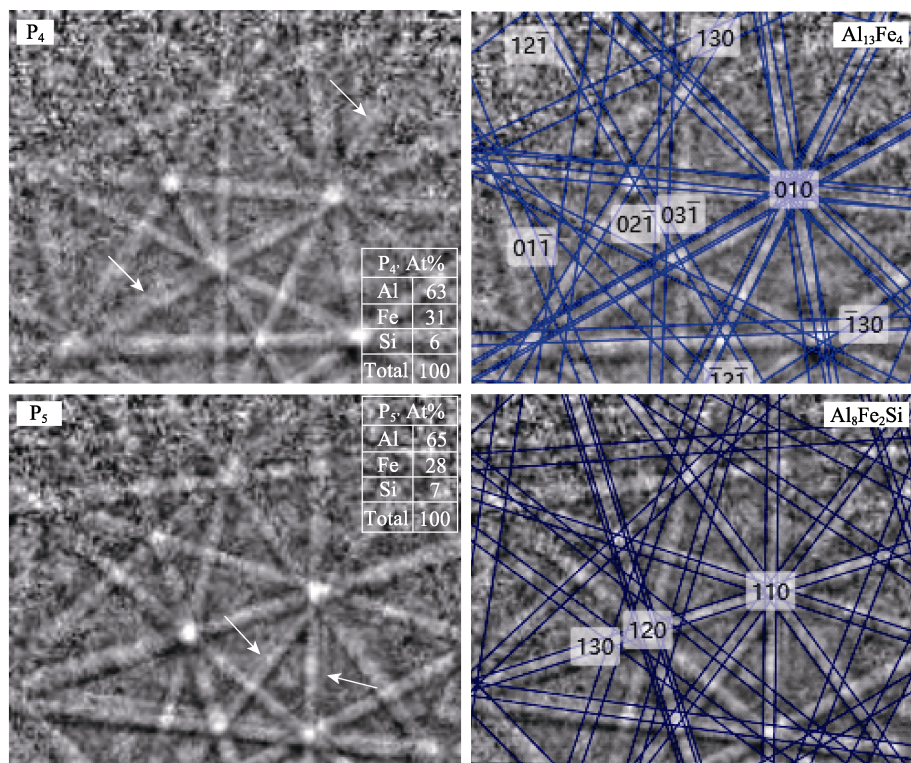


图 8 图 7 中 P<sub>4</sub> 和 P<sub>5</sub> 位置的能谱成分和相应的菊池花样

Fig.8 Spectrum component at position P<sub>4</sub> and P<sub>5</sub> in Fig.7 and corresponding Kikuchi patterns

成对特征，且与实测菊池花样匹配度较高，仅有晶带轴 $\langle 130 \rangle$ 和 $\langle 03-1 \rangle$ 两者连线的菊池带（3-13）与实测菊池带不完全匹配；而  $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$  相为六方结构，其菊池花样中的菊池带不具有成对出现的特点，且与实测菊池花样匹配度较低，除了晶带轴 $\langle 110 \rangle$ 以外的菊池带均不匹配。经上述分析可知，灰色的少量近似圆形的颗粒的相结构与  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$  相更为接近。

图 9 为 5# 铝锌板样品表面过渡层的形貌与成分。经电解抛光 150 s 后，将合金层尽可能地电解掉，从而裸露出过渡层，如图 9a 所示。从图中可以看出，过渡层中分布着近似圆形的粗颗粒  $\text{P}_2$  和大量弥散的细颗粒  $\text{P}_3$ ，同时还有少量的条状或片状颗粒  $\text{P}_1$ 。进一步放大图 9a 中红色线框内局部区域，如图 9b 所示，有少量微裂纹贯穿于粗颗粒与细颗粒之间，粗颗粒与细颗粒尺寸分别约为  $3\text{ }\mu\text{m}$  和  $260\text{ nm}$ 。对这些典型的

颗粒进行能谱（EDS）和电子探针（EPMA）分析，如图 9c、d 所示，条状或片状颗粒  $\text{P}_1$  的成分主要为 Si，近似圆形的粗颗粒  $\text{P}_2$  和弥散的细颗粒  $\text{P}_3$  的主要成分均为 Al、Fe、Si。经上述分析可知，过渡层与合金层之间常伴随有少量的条状或片状颗粒 Si 相，其截面特征如图 3a 中 Si 相所示。过渡层在形成过程中，部分细颗粒相长大并发生粗化，从而形成粗颗粒相，穿插于过渡层与合金层之间，其截面特征如图 3a 中  $\text{G}_1$  位置所示，进一步加强了过渡层与合金层的连接，进而间接地对镀层粘附性能和延伸性能的提高起到了关键性的作用。此外，过渡层为较脆的金属间化合物相，其晶体结构近似  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$  相，易形成微裂纹，因此该层不能过厚。通常在铝锌镀液中加入少量的 Si 来控制镀层的厚度，过渡层的厚度通常约为  $1\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ 。

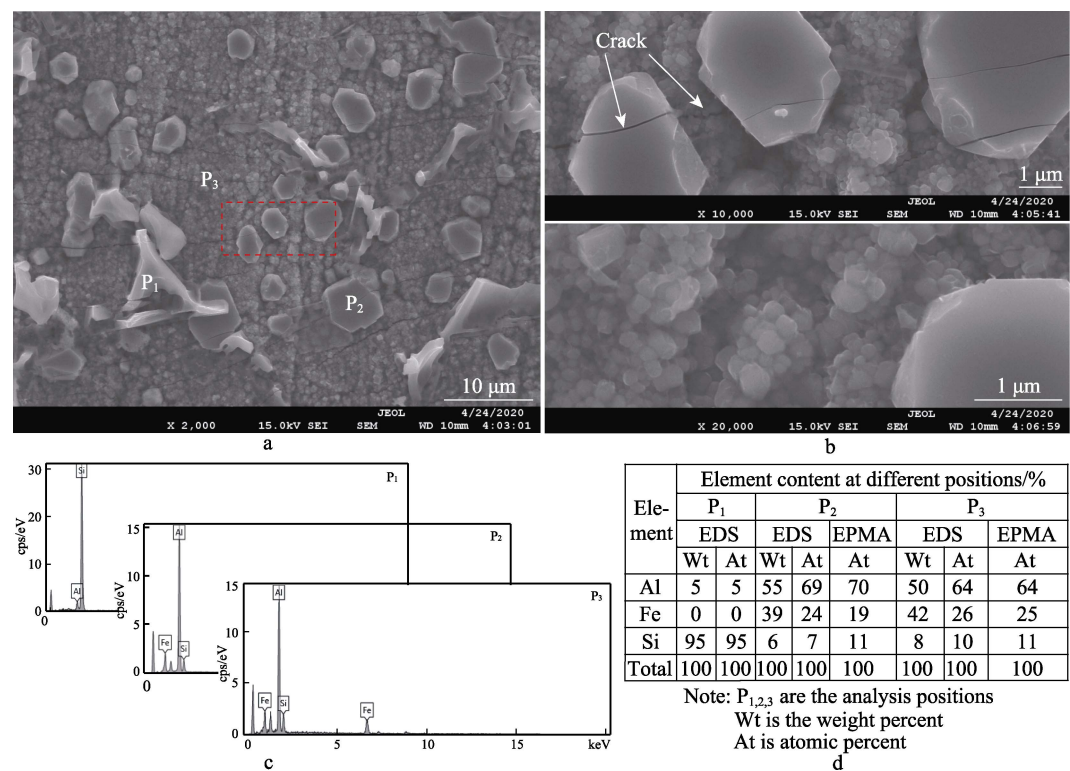


图 9 5# 铝锌板样品表面的过渡层形貌与成分  
Fig.9 Morphology and composition of intermetallic phase on the surface of 5# Al-Zn plate sample

## 4 结论

本文借助扫描电镜（SEM）、电子探针（EPMA）、X 射线衍射仪（XRD）和电子背散射衍射（EBSD）技术，详细地研究了铝锌板镀层的微观组织与相结构。研究结果如下：

1）铝锌板表面为典型的锌花形貌，锌花内部呈现出有条理的枝晶状结构。经成分面、线的综合分析，锌花内部的枝晶由富 Al 相、富 Zn 相、Al-Zn 共晶相以及弥散分布着条状的高 Si 相组成。经电解抛光后，

可以清楚地看出高 Si 相呈鱼骨状，沿着 Al-Zn 共晶相分布。

2）铝锌板镀层沿厚度方向分为内外两层。其外层为合金层，主要是由富 Al 相与河流状富 Zn 相构成，在河流状富 Zn 相附近分布着大量的颗粒状 Al-Zn 共晶相，同时还有少量条状或颗粒状的高 Si 相分布于河流状富 Zn 相中或在过渡层与合金层之间；与钢基体接触的内层为过渡层或金属间化合物层，该层的厚度仅约为  $1\text{ }\mu\text{m}$ ，其成分为 Fe、Al 和 Si。

3）对铝锌板镀层的物相分析可知，镀层可能的



物相组成为 Al、Zn、Si、 $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$  和  $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ 。经菊池花样标定与分析, 过渡层的物相更倾向于  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 。同时还发现, 过渡层由弥散致密的细颗粒与少量分散的粗颗粒构成。过渡层在形成过程中, 部分细颗粒相长大并发生粗化, 从而形成粗颗粒相, 穿插于过渡层与合金层之间, 进一步加强了过渡层与合金层的连接, 进而间接地对镀层粘附性能和延伸性能的提高起到了关键性的作用。

## 参考文献

- [1] 蒋穹, 缪强, 姚正军, 等. 水性 Al-Zn-Si 合金涂层微观组织及腐蚀性能研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32(4): 311-316.  
JIANG Qiong, MIAO Qiang, YAO Zheng-jun, et al. Microstructure and corrosion resistance of waterborne Al-Zn-Si alloy coating[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2012, 32(4): 311-316.
- [2] 曾根生, 陈俊岭. 输电杆塔结构热浸镀铝锌硅及铝锌硅稀土镀层的防腐性能研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(14): 50-54.  
ZENG Gen-sheng, CHEN Jun-ling. Corrosion resistant performance study of transmission tower structure with hot-dip Al-Zn-Si alloy coating and hot-dip Al-Zn-Si-Re alloy coating[J]. Building structure, 2016, 46(14): 50-54.
- [3] 侯蓉, 徐光, 戴方钦, 等. 铝锌镀层热轧板的耐蚀性[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(2): 94-95.  
HOU Rong, XU Guang, DAI Fang-qin, et al. Corrosion resistance of hot rolled plates with Al-Zn coating[J]. Corrosion and protection, 2018, 39(2): 94-95.
- [4] 汪前雨, 张丽, 陆江银. 双镀铝锌合金镀层的组织结构和耐蚀性[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39(7): 392-398.  
WANG Qian-yu, ZHANG Li, LU Jiang-yin, et al. Microstructure and corrosion resistance of zinc-aluminum alloy coating prepared by a two-step hot dipping[J]. Electropating and finishing, 2020, 39(7): 392-398.
- [5] 张杰, 于振花, 李焰. Zn-55%Al-Si 合金镀层钢丝在海水中的耐蚀性能[J]. 材料研究学报, 2008, 22(4): 347-352.  
ZHANG Jie, YU Zhen-hua, LI Yan. Corrosion behavior of hot-dipped Zn-55%Al-Si coated steel wires in seawater[J]. Chinese journal of materials research, 2008, 22(4): 347-352.
- [6] 卢燕平. 55%Al-Zn 合金镀层钢板组织与腐蚀特性[J]. 材料科学与工艺, 1997(4): 61-65.  
LU Yan-ping. Microstructure and corrosion properties of Al55%-Zn alloy coated steel sheet[J]. Material science and technology, 1997(4): 61-65.
- [7] LIN K L, HO J K, JONG C S, et al. Growth behavior and corrosion resistance of 5% Al-Zn coating[J]. Corrosion, 1993, 49: 759-762.
- [8] LENG Y H, FENG Y L, SONG M. Study on hot dip and coating structure of 55% Al-Zn alloy coated steel[J]. Advanced materials research, 2012, 415-417: 276-280.
- [9] SUGAWARA Y, ARAAKE K, MUTO I, et al. Effect of phosphate and chromate pigments on sacrificial corrosion protection by Al-Zn coating and delamination mechanism of pre-painted galvalume steel[J]. ISIJ international, 2016, 12: 2267-2275.
- [10] 杜鹏翔. 钢板热浸镀铝锌合金镀层的形成过程及其结构分析[J]. 材料保护, 2001, 34(11): 14-16.  
DU Peng-xiang. The forming process and structure analysis of the coating during hot dipping 55%Al-Zn alloy on the sheet steel[J]. Materials protection, 2001, 34(11): 14-16.
- [11] 陈鑫, 李龙, 周德敬. 铝钢金属间化合物生长及其抑制机理的研究现状[J]. 材料导报, 2016, 30(7): 125-132.  
CHEN Xin, LI Long, ZHOU De-jing. Review on the formation and inhibition mechanism of Fe-Al intermetallic compound[J]. Materials review, 2016, 30(7): 125-132.
- [12] 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, 30(1): 16-19.  
CHEN Bin-kai, YUAN Xun-hua, ZHANG Qi-fu. Coating structure and anti-corrosion mechanism of hot dipped 55% Al-Zn alloy on sheet steel[J]. Corrosion and protection, 2009, 30(1): 16-19.
- [13] 田亚强, 张源, 魏英立, 等. 热浸镀 55%Al-Zn-1.6%Si 金钢板镀层表面形貌及组织特征研究[J]. 材料导报, 2015, 29(1): 124-142.  
TIAN Ya-qiang, ZHANG Yuan, WEI Ying-li, et al. Study on the coating structure characteristics and morphology of hot-dip 55%Al-Zn-1.6%Si alloy on the steel substrate[J]. Materials review, 2015, 29(1): 124-142.
- [14] 李慧莉, 李国喜, 郑毅然, 等. 热浸镀铝钢的镀层结构分析[J]. 材料与冶金学报, 2003, 3(1): 51-53.  
LI Hui-li, LI Guo-xi, ZHENG Yi-ran, et al. Structure analysis of coating for hot-dip aluminum steel[J]. Journal of materials and metallurgy, 2003, 3(1): 51-53.
- [15] 周细枝. 45 钢热浸镀铝镀层结构分析[J]. 湖北工业大学学报, 2007, 22(5): 54-56.  
ZHOU Xi-zhi. Structure analysis of coating for hot-dip aluminum 45 steel[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2007, 22(5): 54-56.
- [16] EL-SAYED M H, NAKA M. Structure and properties of carbon steel-aluminum dissimilar joints[J]. Science and technology of welding and joining, 2005, 10(1): 27-31.
- [17] ARIZMENDI A M, SALINAS A R, NAVA E V. microstructure of Al-Zn-Si coatings on steel substrates[J]. Materials science forum, 2003, 442: 43-48.
- [18] SHAWKI S, ABDEL H Z. Effect of aluminum contents on the coating structures and dross formation of hot-dip galvanizing processes[C]// 3rd international conference on surface engineering. Cairo: [s. n.], 2002: 417-420.
- [19] XU B J, PHELAN D, DIPPENAAR R. Role of silicon in solidification microstructure in hot-dipped 55wt%Al-Zn-Si coatings[J]. Materials science and engineering A, 2008, 473: 76-80.
- [20] ULLAH I, MEHMOOD S, ALI Z, et al. Theoretical studies of the electronic structure and magnetic properties of aluminum-rich intermetallic alloy  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ [J]. International journal of modern physics B, 2018, 32: 1-12.
- [21] SAITO K, SUGIYAMA K, HIRAGA K.  $\text{Al}_{13}\text{M}_4$ -type structures and atomic models of their twins[J]. Materials science and engineering, 2000, 294-296: 279-282.