

热浸镀铝硅镀层微观组织结构表征

崔桂彬, 鞠新华, 尹立新, 严春莲

(首钢集团有限公司技术研究院, 北京 100043)

摘要: **目的** 研究热成形钢热浸镀铝硅镀层的微观组织与物相组成。**方法** 利用扫描电镜 (SEM) 和能谱仪 (EDS) 分析铝硅镀层表面与截面的微观组织形貌与成分, 利用 X 射线衍射 (XRD) 和电子背散射衍射技术 (EBSD) 分析铝硅镀层的物相组成与比例。**结果** 热浸镀铝硅镀层表面由富 Al 相、少量的富 Fe 相以及树枝晶网状分布的高 Si 相构成, 截面是由内外两层组成, 其靠近铁基体的内层为 Fe-Al-Si 合金层, 外层为 Al-Si 层。进一步的研究显示, Al-Si 层由富 Al 相、少量的富 Fe 相以及柱状分布的高 Si 相构成, 高 Si 相主要存在于合金层与铝硅层界面以及 Al-Si 层中。**结论** 热浸镀铝硅镀层中富 Al 相、富 Fe 相、高 Si 相和 Fe-Al-Si 三元合金层的物相分别为 Al、 Al_3Fe_4 、Si 和 $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ 。对热浸镀铝硅镀层中高 Si 相的研究显示, 分布于合金层与铝硅层界面处的高 Si 相, 可以有效阻碍镀层的生长, 而分布于铝硅层中的高 Si 相在空间中以立体网状骨架的结构形式存在, 这种立体网状结构形式作为镀层的主体框架, 可以有效地提高镀层的强韧性和成形性能。

关键词: 热浸镀; 铝硅镀层; 物相; EBSD; 菊池花样

中图分类号: TQ153 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)08-0375-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.08.037

Characterization of Microstructure of Hot-dip Al-Si Coating

CUI Gui-bin, JU Xin-hua, YIN Li-xin, YAN Chun-lian

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

ABSTRACT: This paper aims to study the microstructure and phase composition of hot-dip Al-Si coating on hot-formed steel. Scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) were used to analyze the microstructure and composition of the surface and cross-section of the Al-Si coating; X-ray diffraction (XRD) and electron backscatter diffraction (EBSD) were used to analyze the phase composition and ratio of the Al-Si coating. The surface of the hot-dip Al-Si coating is composed of Al-rich phase, a small amount of Fe-rich phase, and high Si phase with dendritic network distribution; the cross-section of the hot-dip Al-Si coating is composed of inner and outer layers, the inner layer close to the iron matrix is an Fe-Al-Si alloy layer, and the outer layer is an Al-Si layer. Further research shows that the Al-Si layer is composed of Al-rich phase, a small amount of Fe-rich phase, and columnar distributed high Si phase; the high Si phase mainly exists at the interface between the alloy layer and the Al-Si layer and in the Al-Si layer. The phases of Al-rich phase, Fe-rich phase, high Si phase and Fe-Al-Si ternary alloy layer in the hot-dip Al-Si coating are Al, Al_3Fe_4 , Si and $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ respectively. The study of high Si phase in hot-dip Al-Si coating has shown that the high-Si phase distributed at the interface between the alloy layer and the Al-Si layer can effectively hinder the growth of the coating, while the high-Si phase distributed in the Al-Si layer exists in the form of a three-dimensional network framework in space. This three-dimensional network structure as the main frame of the coating can

收稿日期: 2020-10-07; 修订日期: 2020-12-14

Received: 2020-10-07; Revised: 2020-12-14

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。

Biography: CUI Gui-bin (1983—), Male, Master, Senior engineer. Research focus: microstructure characterization of steel materials.

引文格式: 崔桂彬, 鞠新华, 尹立新, 等. 热浸镀铝硅镀层微观组织结构表征[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 375-381.

CUI Gui-bin, JU Xin-hua, YIN Li-xin, et al. Characterization of microstructure of hot-dip Al-Si coating[J]. Surface technology, 2021, 50(8): 375-381.

effectively improve the strength and toughness and formability of the coating.

KEY WORDS: hot dip; Al-Si coating; phase; EBSD; Kikuchi pattern

随着热成形技术的快速发展,以 22MnB5 高强度钢为代表的热成形钢在汽车领域被广泛采用^[1-6]。热成形钢之所以能快速地发展起来,主要是因为借助表面镀层处理技术很好地解决了热成形钢在成形过程中的表面高温氧化和脱碳问题^[7-12]。热成形钢经过表面镀层处理后,可以获得良好的耐高温、耐腐蚀等特性,同时具有良好的外观。最典型的镀层为热浸镀 Al-10%Si 镀层^[13-16]。对该镀层的研究发现,镀层主要由 Al-Fe 二元合金和 Al-Si-Fe 三元合金构成^[17]。对于铝硅镀层的研究有诸多报道,如镀液成分、热浸镀工艺、热成形工艺、镀层结构等对铝硅镀层的影响^[18-20]。这些研究报道主要是借助扫描电镜、电子探针和 X 射线衍射仪对铝硅镀层进行形貌和成分分析,通过成分和物相定量结果,推测可能含有的物相组成和比例,而通过菊池花样标定的方式进行物相结构分析鲜有报道。因此,本文主要借助电镜扫描、X 射线衍射和电子背散射衍射技术对铝硅镀层的微观结构进行深入细致的分析,为最终满足实际生产中获得较好的产品提供技术支撑。

1 试验

1.1 材料

试验材料为热浸镀铝硅镀层钢板,基板为 22MnB5,板厚 2 mm。镀铝硅工艺为:经过退火后,进入装有

镀液的铝硅锅,经气刀吹扫控制镀层厚度,然后通过冷却塔冷却。镀液成分:Al 90%,Si 10%。

1.2 样品制备

将铝硅镀层样品加工成块状样,尺寸为 10 mm×12 mm,共计加工 2 块样品,编号分别为 1#和 2#。首先将 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)和能谱(EDS)对其进行表面形貌观察与成分分析。然后将 1#样品进一步电解抛光,电解液为 10% (体积分数)的高氯酸酒精溶液,再利用扫描电镜观察高 Si 相在基体中的分布情况。将 2#样品截面进行机械抛光,然后进行硅溶胶抛光,抛光盘转速为 100 r/min,抛光时间为 30 min,抛光的主要目的是去除机械抛光过程中引入的应力,再利用扫描电镜、能谱仪和电子背散射衍射仪(EBSD)对镀层截面分别进行形貌观察、成分分析和物相结构分析。然后将硅溶胶抛光后的样品进行电解抛光,再利用扫描电镜对镀层截面中的高 Si 相进行观察与成分分析。

2 结果及讨论

2.1 铝硅镀层表面形貌与成分

1#铝硅镀层样品表面的形貌与成分如图 1 所示。图 1a 为扫描电镜下的二次电子形貌,从图中无法分

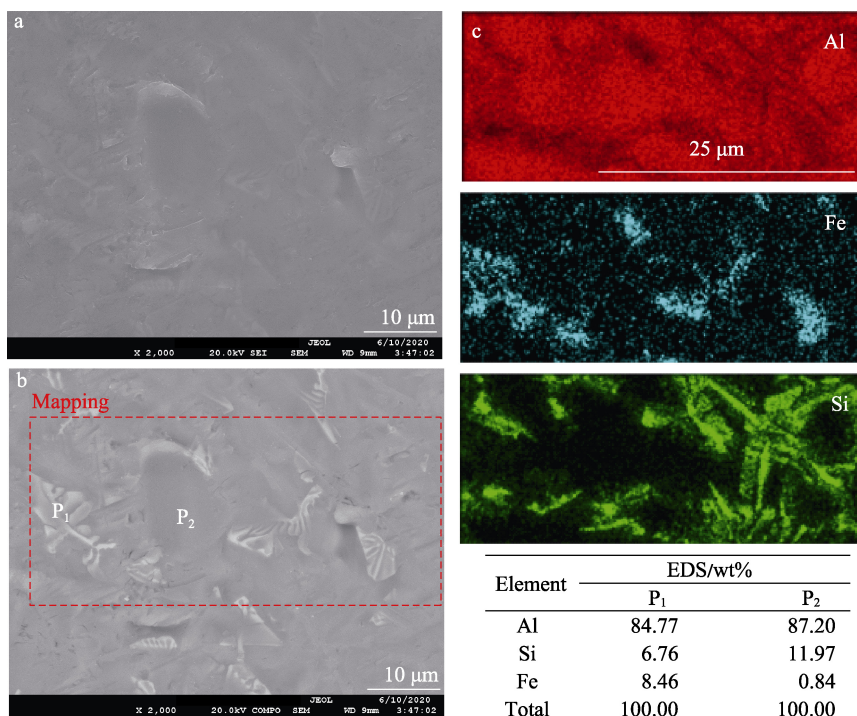


图 1 1#铝硅镀层样品表面的形貌与成分

Fig.1 Morphology and composition of the surface of 1# Al-Si coating sample

辨具体的形貌特征。图 1b 为扫描电镜下的背散射电子图像，图中呈现出 2 种形貌特征：一种是以深灰色显示的基体；另外一种是以灰白色显示并具有鱼骨状形貌的物相。图 1c 为图 1b 中红色虚线框区域对应的成分面分布和位置 P₁、P₂ 的成分。不难发现，深灰色的基体为富 Al 相，如位置 P₂。另外灰白色鱼骨状的形貌特征为富 Fe 相，如位置 P₁。除此之外，成分面分布图中显示还分布着少量的高 Si 相，无论是二次电子图像，还是背散射电子图像，这些高 Si 相在铝硅镀层表面没有对应的形貌。

为了弄清楚铝硅镀层样品表面中高 Si 相的形貌与其在基体中的分布情况，对样品表面进行电解抛光，对应的电解抛光工艺参数：电压为 15 V，电解时间为 8 s，流速为 10 mm²/s，电解温度为 15 ℃，实际电流为 0.8 A。电解抛光后，高 Si 相的形貌与成分如图 2 所示。从图 2a—c 中可以看出，以亮白色显示且具有清晰的树枝晶状形貌特征的物相即为图 1c 成分面分布中的高 Si 相。这点通过位置 P₁ 的成分分析（见图 2d）得到证实，其主要成分近似为 70%Si 和 30%Al，即高 Si 相。位置 P₂ 为基体成分，经成分分析为高 Al 相。

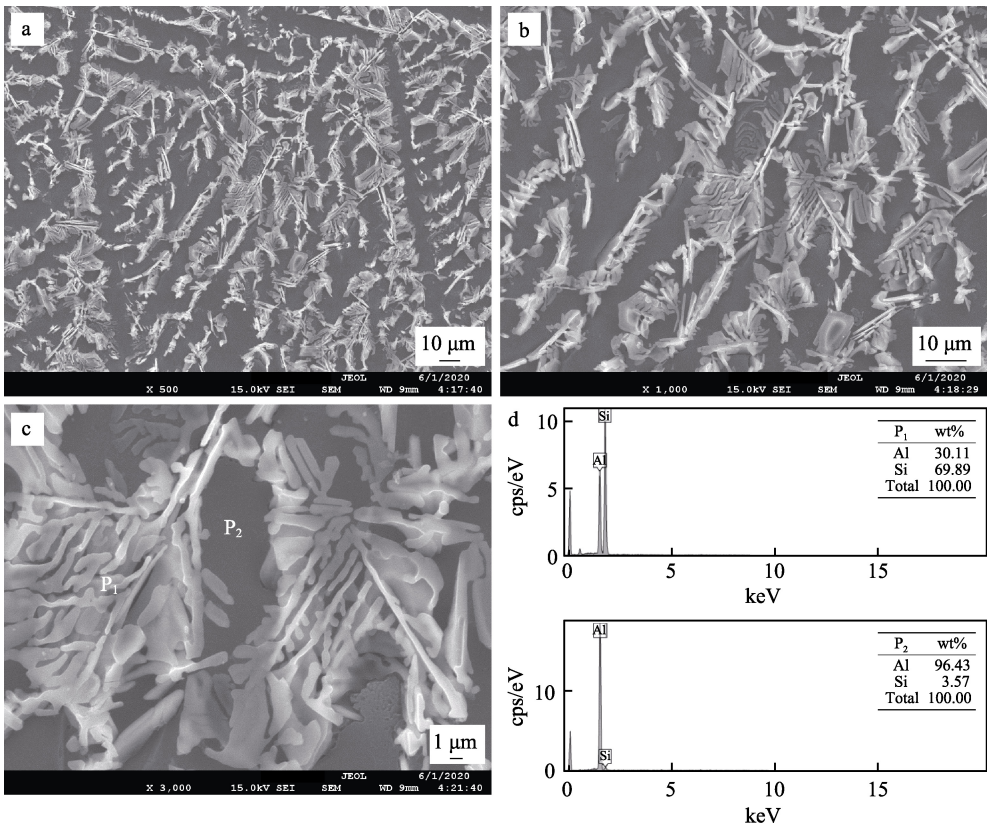


图 2 1#铝硅镀层样品表面电解抛光后高 Si 相的形貌与成分
Fig.2 Morphology and composition of high Si phase of the surface of 1# Al-Si coating sample after electropolishing

2.2 铝锌板镀层截面形貌与成分

2#铝锌板样品截面形貌和能谱成分分析如图 3 所示。结合镀层截面形貌与能谱（EDS）成分分布可知，镀层沿厚度方向分为 2 层：与钢基体接触的内层为合金层，该层的厚度约为 5 μm，其成分为 Fe、Al、Si，如图 3a 中的位置 P₃；远离钢基体的外层为铝硅层，该层的厚度约为 25 μm，合金层中大部分为深灰色的富 Al 相，如图 3a 中的位置 P₁，同时还有少量浅灰色的条状或片状颗粒，如图 3a 中位置 P₂，其 Fe 含量明显比富 Al 相高。除此之外，从图 3b 中 Si 的分布可以看出，有大量的高 Si 相存在，但在图 3a 中并没有与之对应的形貌特征。

同样，为了弄清楚铝硅镀层样品截面沿着厚度方向上高 Si 相的形貌与其分布情况，对样品截面进行

电解抛光，对应的电解抛光工艺参数：电压为 10 V，电解时间为 3 s，流速为 10 mm²/s，电解温度为 15 ℃，实际电流为 0.5 A。电解抛光后，高 Si 相的形貌与成分如图 4 所示。图 4a 为铝硅镀层截面二次电子形貌，图 4b 为与之对应的铝硅镀层截面背散射电子图像（成分像）。经电解抛光后，基体相被电解掉，不容易被电解的亮白色条状或片状的高 Si 相保留了下来，主要存在于合金层与铝硅层界面以及铝硅层中。在合金层与铝硅层的界面处开始形成一薄层，同时还有一部分高 Si 相持续生长，一直延续到表层，如图 4b 中位置 P₁。对图 4b 中红色线框区域进行面分析（如图 4c 所示），不难发现，这些高 Si 相与图 3b 中 Si 的分布相呼应。对图 4b 中位置 P₁ 处的亮白色条状颗粒进行菊池花样标定（如图 4d 所示），其物相可以确定为 Si。

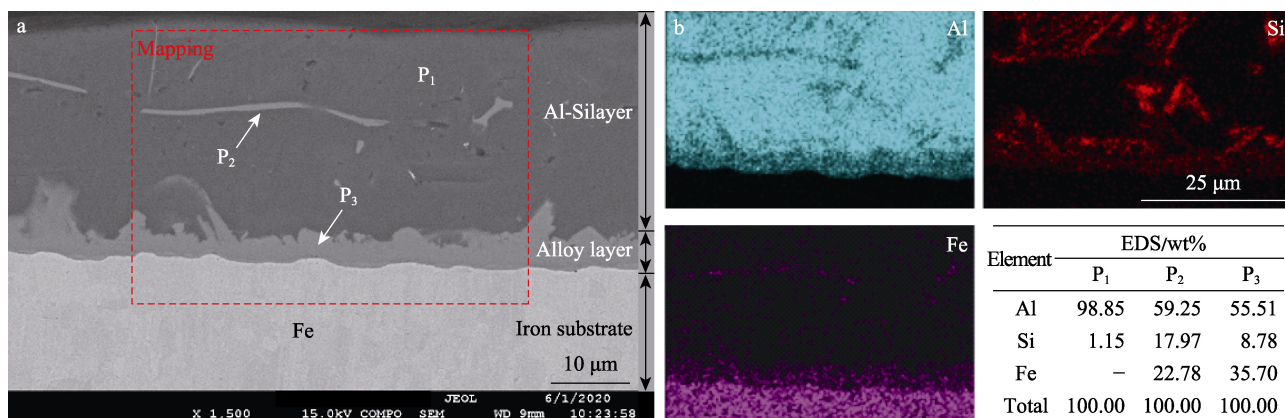


图3 2#铝硅镀层样品截面的形貌与成分

Fig.3 Morphology and composition of the cross-section of the 2# Al-Si coating sample

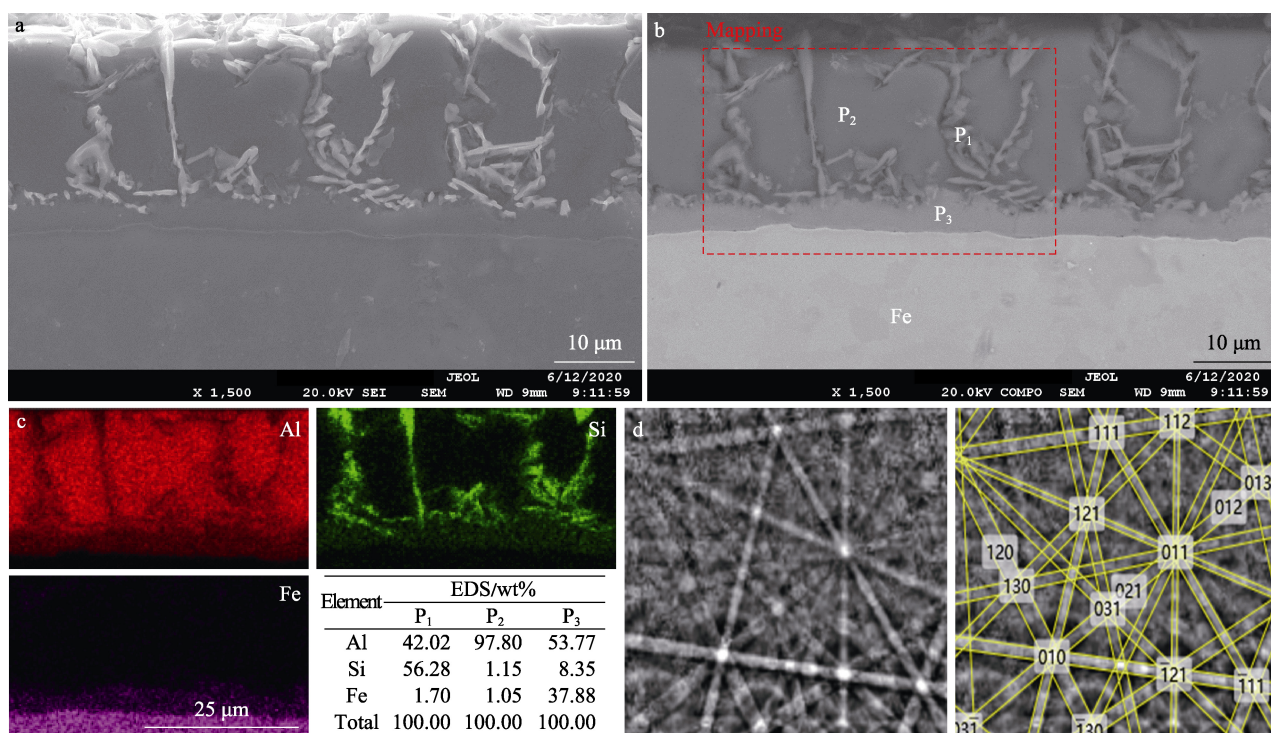


图4 2#铝硅镀层样品截面经电解抛光后的形貌与成分

Fig.4 Morphology and composition of the cross-section of 2# Al-Si coating sample after electropolishing

结合铝硅镀层中高 Si 相表面与截面的形貌和成分分析,不难发现,分布在合金层与铝硅层界面处的高 Si 相可以进一步阻碍镀层的生长,从而间接控制镀层的厚度。同时,分布于铝硅层中的高 Si 相,在三维空间中以三维立体网状骨架的结构形式存在,这种立体网状结构形式作为镀层的主体框架,可以有效地提高镀层的强韧性和成形性能。

2.3 铝硅镀层物相分析

对 1#铝硅镀层样品表面进行 X 射线衍射(XRD)物相分析,如图 5 所示。根据铝硅镀层可能存在的物相和实际厚度,获得物相分析的参数为采用耦合扫描模式,步长为 $0.01^{\circ}\sim 0.03^{\circ}$,扫描速度为 $1^{\circ}/\text{min}$,扫

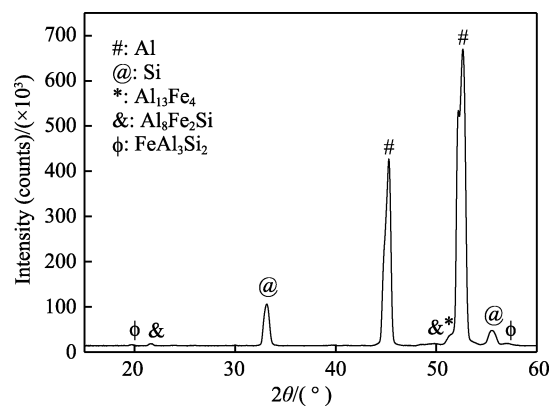


图5 1#铝硅镀层样品表面的 X 射线衍射物相分析

Fig.5 X-ray diffraction phase analysis on the surface of 1# Al-Si coating sample

描角度范围为 15°~60°。经 X 射线衍射图谱与 PDF 卡片对比可以看出, 镀层中存在的物相为 Al、Si、 $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 、 $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ 、 FeAl_3Si_2 。从衍射峰强度可知, 物相组成中大部分为 Al 和 Si, 其他物相含量很低。综上所述, 镀层中必然存在的物相为 Al 和 Si, 可能存在的物相为 $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 、 $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ 、 FeAl_3Si_2 。

表 1 中给出了铝硅镀层可能存在的物相晶体结构和空间群数据^[21-25]。从表 1 中可知, Al、Fe、Si 为常见的立方晶体结构, 具有较高的对称性。其中, Al 和 Si 均为面心立方结构, 仅仅是点阵常数稍有差异; $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 为单斜结构, 对称性较差, $\beta=107.72^\circ$; $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ 为六方结构, $\gamma=120^\circ$; FeAl_3Si_2 为正交结构。

根据上述 X 射线衍射物相分析, 镀层中可能存在的物相有 $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 、 $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ 、 FeAl_3Si_2 , 这些物相含量较低, 衍射峰强度较弱, 且峰位较为接近, 需要借助 EBSD 菊池花样标定来识别。图 6 给出了 2#铝硅镀层样品截面形貌与菊池花样。图 6a 为 2#铝硅镀层截面沿厚度方向的微观形貌, 可以看出, 有 4 种不同的衬度, 对应位置 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 。经上述成分分

表 1 铝硅镀层可能存在的物相晶体结构和空间群
Tab.1 Possible phase crystal structure and space group of Al-Si coating

| No. | Phase | Type of structure and lattice | Space group |
|-----|-----------------------------------|---|-------------|
| 1 | Al | Cubic, $a=b=c=0.403\ 39\ \text{nm}$ | Fm-3m |
| 2 | Si | Cubic, $a=b=c=0.5381\ \text{nm}$ | Fd-3m |
| 3 | Fe | Cubic, $a=b=c=0.2868\ \text{nm}$ | Im-3m |
| 4 | $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ | Monoclinic, $a=1.5489\ \text{nm}$, $b=0.808\ 31\ \text{nm}$, $c=1.2476\ \text{nm}$, $\beta=107.72^\circ$ | C2/m |
| 5 | $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ | Hexagonal, $a=b=1.2404\ \text{nm}$, $c=2.6234\ \text{nm}$, $\gamma=120^\circ$ | P63/mmc |
| 6 | FeAl_3Si_2 | Orthorhombic, $a=b=0.6061\ \text{nm}$, $c=0.9525\ \text{nm}$ | Pbcn |

析可知, 位置 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 对应的相分别为富 Al 相、Fe 基体、富 Fe 相和 Fe-Al-Si 三元相。为了确定其物相结构, 进行了 EBSD 分析, 分别对 4 个位置进行菊池花样标定, 如图 6b 所示。从菊池花样标定结果可知, 位置 P_1 处富 Al 相的物相为 Al, 位置 P_2 处 Fe 基体的物相为 Fe, 位置 P_3 处富 Fe 相的物相为

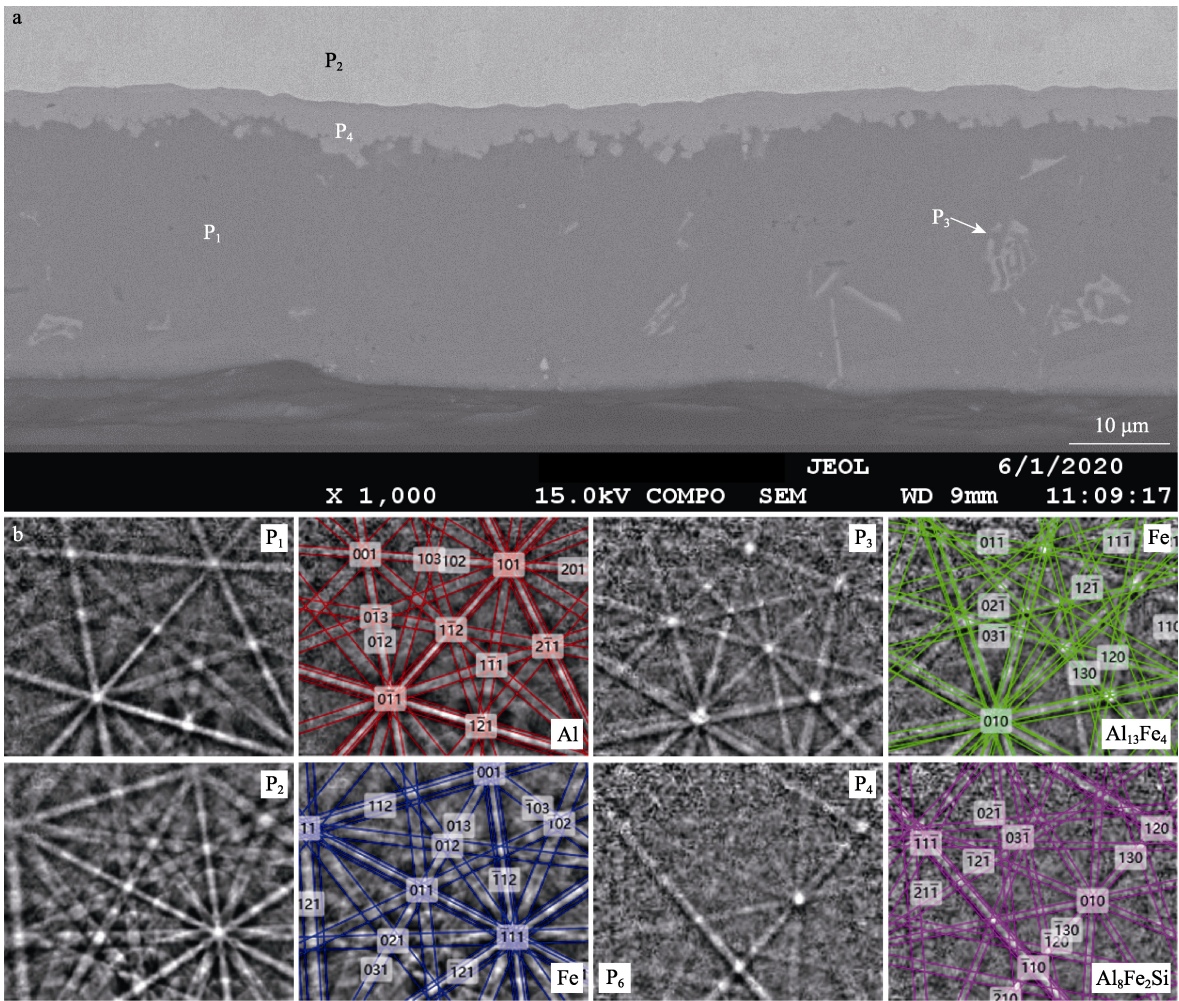


图 6 2#铝硅镀层样品截面形貌与菊池花样
Fig.6 Cross-sectional morphology and Kikuchi pattern of Al-Si coating sample

$\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$, 位置 P_4 处 Fe-Al-Si 三元相的物相为 $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ 。图 1b 中位置 P_1 处的富 Fe 相, 经菊池花样标定, 其物相同样为 $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 。

3 结论

1) 铝硅镀层表面由富 Al 相、少量的富 Fe 相以及树枝晶状分布的高 Si 相构成。

2) 铝硅镀层沿厚度方向分为内外两层, 其外层为铝硅层, 主要由富 Al 相、少量富 Fe 相以及柱状高 Si 相构成, 高 Si 相主要存在于合金层与铝硅层界面以及铝硅层中。其靠近铁基体的内层为合金层, 其成分显示由 Fe-Al-Si 三元相构成。

3) 对铝硅镀层的物相分析可知, 镀层中富 Al 相的物相为 Al, 富 Fe 相的物相为 $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$, 合金层 Fe-Al-Si 三元相的物相为 $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ 。对铝硅镀层中高 Si 相的研究显示, 分布于合金层与铝硅层界面处的高 Si 相可以有效阻碍镀层的生长, 从而间接地控制镀层的厚度, 而分布于铝硅层中的高 Si 相在空间中以立体网状骨架的结构形式存在, 这种立体网状结构形式作为镀层的主体框架, 可以有效地提高镀层的强韧性和成形性能。

参考文献:

- [1] MU Yan-hong, WANG Bao-yu, ZHOU Jing, et al. Influences of hot stamping parameters on mechanical properties and microstructure of 30MnB₅ and 22MnB₅ quenched in flat die[J]. Journal of central south university, 2018, 25(4): 736-746.
- [2] 杨洪林, 张深根, 洪继要, 等. 22MnB₅ 热冲压钢的研究进展[J]. 锻压技术, 2014, 39(1): 1-5.
YANG Hong-lin, ZHANG Shen-gen, HONG Ji-yao, et al. Development research on 22MnB₅ hot stamping steel[J]. Forging & stamping technology, 2014, 39(1): 1-5.
- [3] 程俊业, 赵爱民, 陈银莉, 等. 回火温度对淬火后 30MnB₅ 热成形钢组织与性能影响[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(9): 1150-1157.
CHENG Jun-ye, ZHAO Ai-min, CHEN Yin-li, et al. Effect of tempering temperature on the microstructure and mechanical properties of 30MnB₅ hot stamping steel after quenching[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(9): 1150-1157.
- [4] 高凯翔, 王武荣, 韦习成, 等. 22MnB₅ 硼钢裸板热成形中的高温摩擦[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(9): 1136-1142.
GAO Kai-xiang, WANG Wu-rong, WEI Xi-cheng, et al. High-temperature friction of uncoated 22MnB₅ boron steel in hot stamping[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2019, 53(9): 1136-1142.
- [5] NIKRAVESH M, NADERI M, AKBARI G H. Influence of hot plastic deformation and cooling rate on martensite and bainite start temperatures in 22MnB₅ steel[J]. Materials science and engineering: A, 2012, 540: 24-29.
- [6] 李勇, 李家栋, 付天亮, 等. 热成形加热新技术[J]. 金属热处理, 2014, 39(7): 66-71.
LI Yong, LI Jia-dong, FU Tian-liang, et al. New heating technology of hot stamping[J]. Heat treatment of metals, 2014, 39(7): 66-71.
- [7] 左源, 李琦, 纪沙沙, 等. 22MnB₅ 热成形钢铝硅镀层的制备工艺及抗氧化性能研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(8): 145-148.
ZUO Yuan, LI Qi, JI Sha-sha, et al. Research on preparing process and oxidation resistance of aluminum silicon coating for 22MnB₅ hot forming steel[J]. Hot working technology, 2019, 48(8): 145-148.
- [8] WANG C J, CHEN S M. The high-temperature oxidation behavior of hot-dipping Al-Si coating on low carbon steel[J]. Surface and coatings technology, 2006, 200(22-23): 6601-6605.
- [9] ZANDRAHIMI M, VATANDOOST J, EBRAHIMIFAR H. Al, Si, and Al-Si coatings to improve the high-temperature oxidation resistance of AISI 304 stainless steel[J]. Oxidation of metals, 2011, 76(3-4): 347-358.
- [10] 崔李苹, 李里, 杨世伟, 等. 硅元素对镍基合金 Al-Si 涂层抗高温氧化性能的影响[J]. 金属材料研究, 2004(3): 36-39.
CUI Li-ping, LI Li, YANG Shi-wei, et al. Effect of silicon on resistant high temperature oxidation of Ni-based super-alloy with Al-Si coating[J]. Research on metallic materials, 2004(3): 36-39.
- [11] 潘晓龙, 李争显, 黄春良, 等. 钛合金表面熔结 AlSiCrTi 涂层的高温性能[J]. 热加工工艺, 2010, 39(10): 144-146.
PAN Xiao-long, LI Zheng-xian, HUANG Chun-liang, et al. High-temperature properties of AlSiCrTi coating on Ti alloy surface prepared by slurry roasting process[J]. Hot working technology, 2010, 39(10): 144-146.
- [12] 谢昀映, 成毅, 吴广新. 热处理工艺对 22MnB₅ 钢铝硅镀层氧化层厚度和组织演变的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 245-253.
XIE Yun-ying, CHENG Yi, WU Guang-xin. Effect of heat treatment on the thickness of Al₂O₃ scale and microstructure evolution of Al-Si coating on 22MnB₅ steel[J]. Surface technology, 2020, 49(4): 245-253.
- [13] BADARUDDIN M, WANG C J. Microstructure and high temperature oxidation of the hot-dipping Al-Si coating on low carbon steel in ethanol, water vapor and air at 700 °C [J]. Advanced materials research, 2009, 79-82: 1775-1778.
- [14] 杨忠林, 莫龙生, 蔡玉林, 等. 铝-硅涂层防护性能的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1981, 1(4): 28-37, 79.
YANG Zhong-lin, MO Long-sheng, CAI Yu-lin, et al. High temperature performance of the aluminium-silicon coatings[J]. Journal of Chinese society for corrosion and protection, 1981, 1(4): 28-37, 79.

- [15] 刘安民, 冯毅, 赵岩, 等. 铌钒微合金化对 22MnB₅ 热成形钢显微组织与性能的影响[J]. 机械工程材料, 2019, 43(5): 34-37, 53.
LIU An-min, FENG Yi, ZHAO Yan, et al. Effect of niobium and vanadium micro-alloying on microstructure and property of 22MnB₅ hot press forming steel[J]. Materials for mechanical engineering, 2019, 43(5): 34-37, 53.
- [16] 刘浩, 谭宁, 金鑫焱. 变形量对铝硅镀层热冲压用钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(9): 147-151.
LIU Hao, TAN Ning, JIN Xin-yan. Effect of deformation on microstructure and mechanical properties of aluminum-silicon coating hot stamping steel[J]. Heat treatment of metals, 2019, 44(9): 147-151.
- [17] 吕家舜, 李锋, 杨洪刚, 等. 连续热浸镀铝硅钢板镀层微观结构研究[J]. 钢铁, 2014, 49(1): 74-78.
LÜ Jia-shun, LI Feng, YANG Hong-gang, et al. Research on coating microstructure of continuous hot dip aluminizing coated steel sheet[J]. Iron and steel, 2014, 49(1): 74-78.
- [18] 李国勇. 耐热钢热浸镀 Al-Si 合金的工艺及组织研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(22): 139-140.
LI Guo-yong. Research on process and microstructure of hot-dipped Al-Si alloy on heat-resistant steel[J]. Hot working technology, 2013, 42(22): 139-140.
- [19] 王滕, 赵云龙, 柴立涛, 等. 热浸镀工艺对热成形钢铝硅镀层的影响[J]. 中国冶金, 2016, 26(12): 20-25.
WANG Teng, ZHAO Yun-long, CHAI Li-tao, et al. Influence of hot dip process on aluminum silicon coating for hot forming steel[J]. China metallurgy, 2016, 26(12): 20-25.
- [20] CHENG W J, WANG C J. EBSD characterization of high-temperature phase transformations in an Al-Si coating on Cr-Mo steel[J]. Materials characterization, 2012, 64: 15-20.
- [21] ULLAH I, MEHMOOD S, ALI Z, et al. Theoretical studies of the electronic structure and magnetic properties of aluminum-rich intermetallic alloy Al₁₃Fe₄[J]. International journal of modern physics B, 2018, 32(16): 1850201.
- [22] SAITO K, SUGIYAMA K, HIRAGA K. Al₁₃M₄-type structures and atomic models of their twins[J]. Materials science and engineering: A, 2000, 294-296: 279-282.
- [23] KORCHEF A, NJAH N, CHAMPION Y, et al. Material flow during equal channel angular pressing of aluminum containing Al₈Fe₂Si precipitates[J]. Advanced engineering materials, 2004, 6(4): 222-228.
- [24] KORCHEF A, CHAMPION Y, NJAH N. X-ray diffraction analysis of aluminium containing Al₈Fe₂Si processed by equal channel angular pressing[J]. Journal of alloys and compounds, 2007, 427(1-2): 176-182.
- [25] SKJERPE P. Intermetallic phases formed during DC-casting of an Al-0.25 Wt Pct Fe-0.13 Wt Pct Si alloy[J]. Metallurgical and materials transactions A, 1987, 18(2): 189-200.

(上接第 348 页)

- [18] 王勇, 李明宇, 孙丽丽, 等. FeCrNiCo(Cu/Mn)高熵合金组织及腐蚀性能[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(1): 94-102.
WANG Yong, LI Ming-yu, SUN Li-li, et al. Microstructure and corrosion property of FeCrNiCo(Cu/Mn) high entropy alloys[J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2020, 30(1): 94-102.
- [19] GUO Sheng, LIU C T. Phase stability in high entropy alloys: Formation of solid-solution phase or amorphous phase[J]. Progress in natural science: Materials international, 2011, 21(6): 433-446.
- [20] 赵雪柔, 吕煜坤, 石拓. 高熵合金相形成理论研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(7): 1174-1181.
ZHAO Xue-rou, LYU Yu-kun, SHI Tuo. Advances in the study of phase formation theory of high entropy alloys[J]. Materials reports, 2019, 33(7): 1174-1181.
- [21] GUO Sheng, NG C, LU Jian, et al. Effect of valence electron concentration on stability of fcc or bcc phase in high entropy alloys[J]. Journal of applied physics, 2011, 109(10): 103505.
- [22] 张勇. 先进高熵合金技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.
ZHANG Yong. Advanced technology in high-entropy alloys[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019.
- [23] 谭金花, 孙荣禄, 牛伟, 等. 激光扫描速度对 TC4 合金表面激光熔覆复合涂层组织及性能的影响[J]. 材料导报, 2020, 34(12): 12094-12100.
TAN Jin-hua, SUN Rong-lu, NIU Wei, et al. Effect of laser scanning speed on microstructure and properties of TC4 alloy surface laser cladding composite coating[J]. Materials reports, 2020, 34(12): 12094-12100.
- [24] 刘恕蹇, 黄维刚. AlCoCrNiSi_x 高熵合金微观组织结构与力学性能[J]. 材料工程, 2012, 40(1): 5-8.
LIU Shu-qian, HUANG Wei-gang. Microstructure and mechanical performance of AlCoCrNiSi_x high-entropy alloys[J]. Journal of materials engineering, 2012, 40(1): 5-8.
- [25] CAI J, LV P, ZHANG C L, et al. Microstructure and properties of low carbon steel after surface alloying induced by high current pulsed electron beam[J]. Nuclear instruments and methods in physics research section B: Beam interactions with materials and atoms, 2017, 410: 47-52.
- [26] 王彦芳, 闫晗, 李娟, 等. 电火花沉积 FeCoCrNiCu 高熵合金涂层的组织结构与耐腐蚀性[J]. 表面技术, 2019, 48(6): 144-149.
WANG Yan-fang, YAN Han, LI Juan, et al. Microstructure and corrosion resistance of FeCoCrNiCu high-entropy alloy coating prepared by electro-spark deposition[J]. Surface technology, 2019, 48(6): 144-149.
- [27] 李冬梅. CuCrFeNiMn 高熵合金的耐蚀性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.
LI Dong-mei. Corrosion resistance of CuCrFeNiMn high entropy alloys[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010.