

Al-Si 镀层热成形零件表面颜色差异性研究

单明东¹, 夏益新¹, 王娜¹, 刘海涛¹, 曹奇¹, 张丹荣²

(1.上海宝钢高新技术零部件有限公司, 上海 201908;

2.上海宝钢国际经济贸易有限公司, 上海 200122)

摘要: **目的** 研究加热温度、加热时间等工艺参数对 Al-Si 镀层材料在热成形过程中存在的表面颜色差异、镀层厚度和扩散层厚度的影响规律, 及影响零件表面颜色差异的主要原因。**方法** 在不同加热时间及加热温度条件下, 对厚度为 1.0 mm 的新日铁 Al-Si 镀层材料进行热冲压试验, 测量热成形零件的镀层厚度和扩散层厚度, 并对典型不同颜色零件表面进行 SEM 及 EDS 分析研究。**结果** Al-Si 镀层热成形零件表面颜色与加热温度和加热时间存在较好的对应关系, 同时镀层厚度及扩散层厚度随着加热时间的增加及加热温度的提高而增大, Al-Si 镀层热成形零件表面的颜色与镀层中不同铁氧化物的混合比例存在较好的对应一致性。**结论** Al-Si 镀层热成形零件表面颜色的状态可以间接反应镀层厚度及扩散层厚度。

关键词: Al-Si 镀层; 锌基镀层; 热成形; 表面颜色差异

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.06.019

中图分类号: TG162.79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)06-0099-05

Research on Surface Color Difference of Hot Stamping Part for Al-Si Coating

SHAN Ming-dong¹, XIA Yi-xin¹, WANG Na¹, LIU Hai-tao¹, CAO Qi¹, ZHANG Dan-rong²

(1.Shanghai Baosteel High-Tech Auto Parts Co., Ltd., Shanghai 201908, China;

2.Shanghai Baosteel International Economic & Trading Co., Ltd., Shanghai 200122, China)

ABSTRACT: The paper aims to study influences of technological parameters such as heating temperature and heating time on surface color differences of Al-Si coating material, influencing law on thickness of coating and inter-diffusion layer in hot stamping, and reasons of color difference on the surface of parts. The hot stamping test was carried out with 1.0 mm thick Al-Si coating material from Nippon Steel at different heating time and heating temperatures; and then the coating thickness and the inter-diffusion layer thickness of hot forming parts were measured; and the typical different surface color parts were analyzed and researched by SEM and EDS. There was a good correspondence relationship between surface color of Al-Si coating hot stamping parts and heating temperature & heating time. At the same time, the thickness of the coating and the inter-diffusion layer increased with the increase of heating time and heating temperature; and there was a good correspondence relationship between the hot stamping parts surface color with Al-Si coating and the mix proportion of different iron oxides during coating. The surface color of the hot stamping parts with Al-Si coating can indirectly reflect thickness of the coating and the inter-diffusion layer.

KEY WORDS: Al-Si coating; Zn coating; hot stamping; surface color difference

随着汽车工业的发展, 世界各国对汽车的安全、绿色环保的要求越来越苛刻, 采用超高强度钢是实现汽车减重、节能减排及提升安全的最经济性的选择。

然而, 通常钢的成形性随着钢强度的提高而下降, 以往通过将成形性和强化分为两个工艺步骤来实现。热成形技术是实现超高强度汽车零件的一种全新工艺,

收稿日期: 2017-10-10

作者简介: 单明东 (1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为热成形工艺及配套工装模具开发。

通过热成形可以有效解决零件成形性和零件性能强化相矛盾的问题^[1-2]。目前热成形材料主要包括非镀层板和镀层板两种,镀层板主要包括 Al-Si 镀层和锌基镀层^[3-5],其中 Al-Si 镀层应用最为广泛,镀层板相对于非镀层板具备如下优点:在加热过程中无需保护气氛,加热及成形过程中零件表面无氧化皮,成品零件无需抛丸处理,零件可以避免抛丸变形风险,改善热成形生产现场环境,减少氧化皮对模具的磨损,同时带镀层热成形零件的涂装效果及耐腐蚀性能要明显优于非镀层热成形零件,但是 Al-Si 镀层板在热成形生产过程中存在零件表面镀层颜色受加热工艺波动影响较大的问题。

文中通过现场生产工艺调整,验证了加热时间和温度对 Al-Si 镀层热成形零件表面镀层颜色的影响,并通过微观形貌解释造成颜色差异的内在原因。

1 Al-Si 热成形工艺

热成形生产过程中的主要设备包括:自动化拆剥装置、辊底式加热炉、自动化上料装置、高速伺服压机、自动化下料装置^[8-9]。Al-Si 镀层板热成形工艺过程为将常温下强度为 450~800 MPa 的异形料片在干燥压缩空气的保护气氛下,通过辊底式加热炉加热到 870~950 °C,使之均匀奥氏体化,然后通过专用机械手,将高温料片快速准确地送入内部带有冷却系统的热成形模具中,完成冲压成形和冷却淬火,得到一个复杂的高强度热成形零件^[6-7],再根据客户需要,完成零件孔边的激光切割后,得到最终成品零件,但是 Al-Si 镀层热成形材料在正常热成形生产过程中,零件表面的颜色存在明显差异,如图 1 所示。

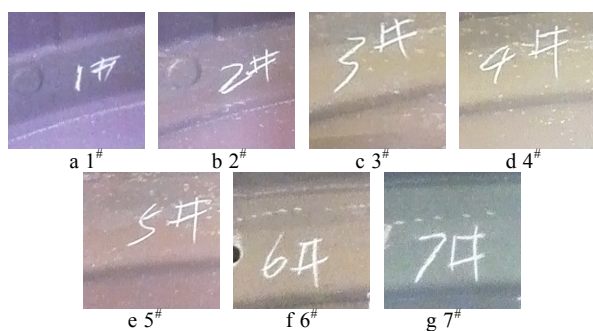


图 1 不同颜色 Al-Si 镀层热成形零件

Fig.1 Al-Si coated hot stamping parts with different colors

2 加热工艺试验

Al-Si 镀层热成形零件表面颜色主要受加热过程中的加热温度和加热时间的影响较大,分别进行加热温度和加热时间对零件表面颜色的影响试验^[10-12]。试验原材料牌号为 GMW14400M-ST-S-HS1300T/950Y-MS-AS60G60G-U,厚度 t 为 1.0 mm,原材料表

面镀层质量为 70~90 g/m²,镀层厚度为 20~33 μm,材料供应商为新日铁,其基材含有质量分数为 0.19%~0.25%的 C,1.00%~1.50%的 Mn,不小于 0.010%的 Al,不大于 0.50%的 Si,不大于 0.030%的 P,不大于 0.005%的 S,不大于 0.35%的 Cr,0.020%~0.055%的 Ti,不大于 0.010%的 N,0.0005%~0.04%的 B。

2.1 加热时间

针对加热时间对镀层表面颜色的影响,制定试验 1-1—试验 1-8,其加热炉的温度设置为 930 °C,加热时间分别为 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 s。加热炉保护气体为干燥压缩空气,炉内露点温度为 -6 °C,针对上述不同加热时间的试验分别连续进行了 4 个冲程,以消除同组试验间偏差,试验后得到的 Al-Si 镀层热成形零件表面颜色状态见图 2,并针对不同颜色的 Al-Si 镀层热成形零件取样,进行截面镀层厚度金相分析,同时根据 GMW14400 的标准,对上述不同颜色的 Al-Si 镀层热成形零件截面镀层厚度及扩散层厚度进行评价,试验 1-1—1-8 的镀层总厚度分别为 27, 33.5, 36.6, 39.5, 42.5, 43.5, 50, 52 μm,扩散层厚度分别为 4.5, 8.8, 10.4, 11.5, 13.4, 14.3, 21.5, 22 μm,其中试验 1-2—1-6 的结果为 OK,其余试验为 NG。

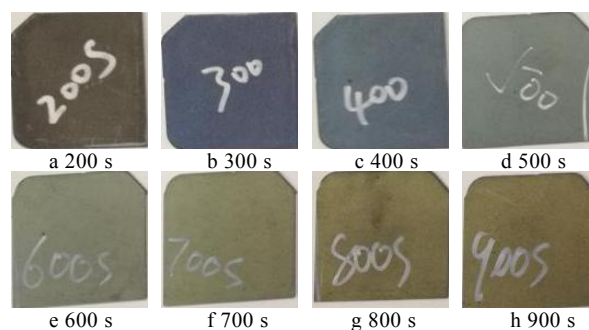


图 2 不同加热时间的 Al-Si 镀层表面颜色

Fig.2 Surface colors of Al-Si coating with different heating time

从图 2 可见, Al-Si 镀层热成形零件表面颜色随着时间的增加,由棕褐色,向蓝色、灰色、黄色转变。根据生产经验,随着时间的继续增加,表面颜色会继续向紫色变化。试验 1-1 的 Al-Si 镀层热成形零件表面镀层颜色呈棕褐色,其由于加热时间较短,表面镀层尚未进行充分的氧化,表面镀层总厚度偏低,不满足标准要求(30~50 μm),试验 1-7 和试验 1-8 的 Al-Si 镀层热成形零件表面镀层颜色呈深黄色,其由于加热时间过长,表面镀层及扩散层厚度均不满足标准要求,均判断为不合格。

2.2 加热温度

针对加热温度对镀层表面颜色的影响,制定如下试验:试验分为 2 组,将加热时间为 300 s 的试验记为第 2 组,将加热时间为 750 s 的试验记为第 3 组(将

2.1 节中改变加热时间的试验记为第 1 组), 每组分别在 880, 890, 900, 910, 920, 930, 940 ℃下进行 7 个试验。加热温度为 300 s 时, 将 7 个试验分别记作 2-1—2-7, 加热时间为 750 s 时, 将 7 个试验分别记作 3-1—3-7。加热炉保护气体为干燥压缩空气, 炉内露点温度为-6 ℃, 试验后得到的 Al-Si 镀层热成形零件表面颜色状态见图 3—图 4。并针对不同颜色的 Al-Si 镀层热成形零件取样, 进行截面镀层厚度金相分析, 同时根据 GMW14400 的标准对上述不同颜色的 Al-Si 镀层热成形零件截面镀层厚度及扩散层厚度进行评价分析, 结果见表 1。

从图 3、图 4 可见, Al-Si 镀层热成形零件在同样加热时间下, 零件表面颜色随着加热温度的增加, 表面颜色由棕褐色, 向蓝色、灰色、黄色转变。表 1 表明: 加热时间为 300 s 时, 加热温度≤900 ℃的 Al-Si 镀层零件 (试验 2-1—2-3), 表面镀层未得到充分的氧化, 镀层总厚度不满足标准要求(30~50 μm); 在加热时间为 750 s 的条件下, 加热温度≥940 ℃的 Al-Si 镀层热成形零件 (试验 3-7), 表面镀层过分氧化, 表面镀层及扩散层厚度均不满足标准要求, 所以均判断为不合格。

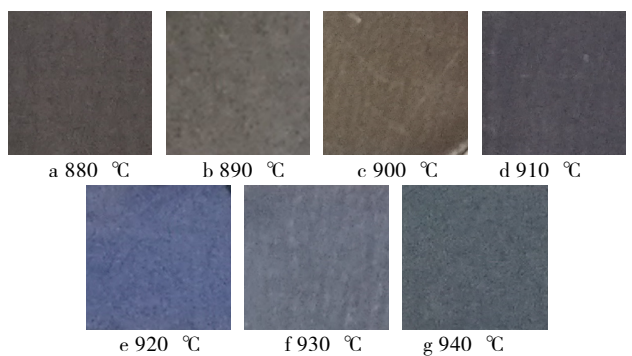


图 3 加热 300 s 时 Al-Si 镀层热成形件表面颜色随加热温度的变化
Fig.3 Evolution of Al-Si coating colors with heating temperature when heating for 300 s

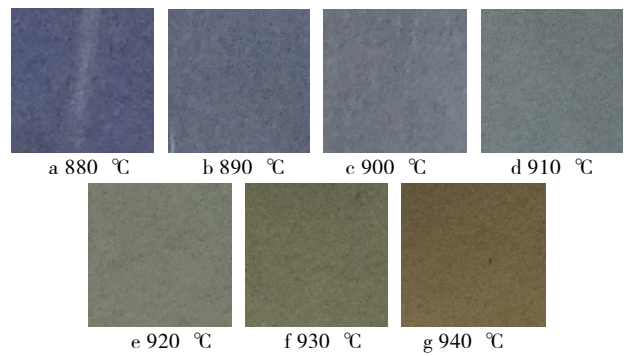


图 4 加热 750 s 时 Al-Si 镀层热成形件表面颜色随加热温度的变化
Fig.4 Evolution of Al-Si coating colors with heating temperature when heating for 750 s

表 1 不同颜色 Al-Si 镀层热成形件截面镀层厚度		Tab.1 Coating thickness of Al-Si coated materials with different colors						
		μm						
试验组	项目	880 ℃	890 ℃	900 ℃	910 ℃	920 ℃	930 ℃	940 ℃
第2组 (加热 300 s)	镀层总厚度	25.4	28.3	29.2	32.4	33.7	34.6	38.7
	扩散层厚度	4.4	5.7	6.5	8.4	9.3	10.1	12.4
	镀层结论	NG	NG	NG	OK	OK	OK	OK
	镀层结论	31.7	35.8	39.6	42.1	44.8	49.5	52.8
第3组 (加热 750 s)	镀层总厚度	4.6	8.3	10.9	12.3	14.2	15.7	21.6
	扩散层厚度	4.6	8.3	10.9	12.3	14.2	15.7	21.6
	镀层结论	OK	OK	OK	OK	OK	OK	NG
	镀层结论	OK	OK	OK	OK	OK	OK	NG

3 Al-Si 镀层热成形零件表面颜色原因分析

从第 1 组试验中选择典型的棕褐色 (试验 1-1)、蓝色 (试验 1-2) 和黄色 (试验 1-7) 试样见图 5, 并对试样进行重新编号为 N1(棕褐色)、N2 (蓝色)、N3 (黄色)。在 1000 倍的光学显微镜条件下, 对 3 种不同颜色试样表面进行微观形貌观察, 见图 6。

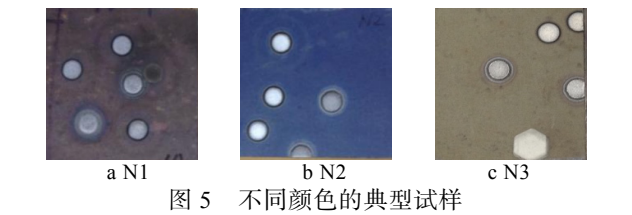


图 5 不同颜色的典型试样
Fig.5 Typical specimens with different colors

通过图 6 可知, 在光学显微镜下, 微观颜色与宏观颜色一致, 其中棕褐色试样微观下为黑色、蓝色、

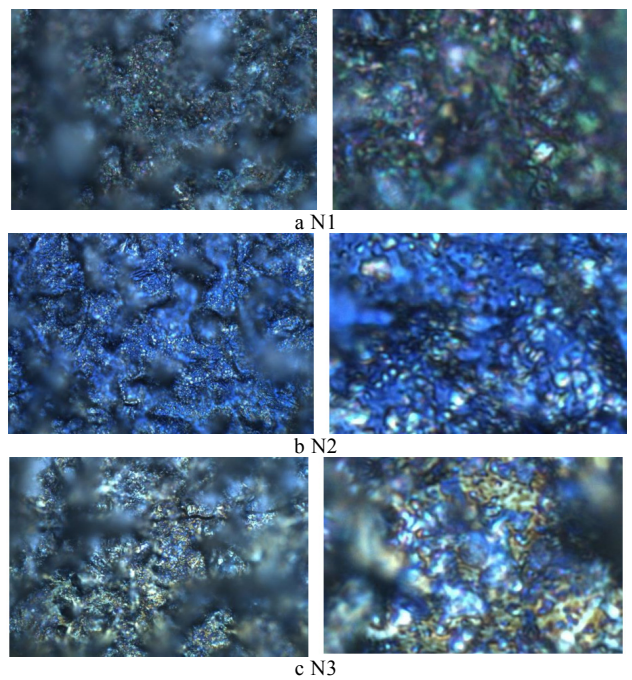


图 6 不同颜色试样表面光学显微照片
Fig.6 OM images of specimens with different colors

黄色、红色混合状,蓝色试样微观下基本全蓝,黄色试样微观下为蓝色、黄色及少量红色混合。

通过 SEM 对不同颜色试样表面形貌进行分析,同时在背散射电子像下,试样表面有 3 种灰度的区域(箭头 1—3 所指),见图 7。对 3 个灰度区域进行能谱分析,分析结果见表 2,可知其中箭头 1 所示位置 O、Fe 含量最高,其次是箭头 2 所示位置,箭头 3 所示位置 O、Fe 含量较低。由此推测箭头 1 为 Fe_2O_3 (红色),箭头 2 为 Fe_3O_4 (蓝色),箭头 3 为 FeO (黑色)^[13]。

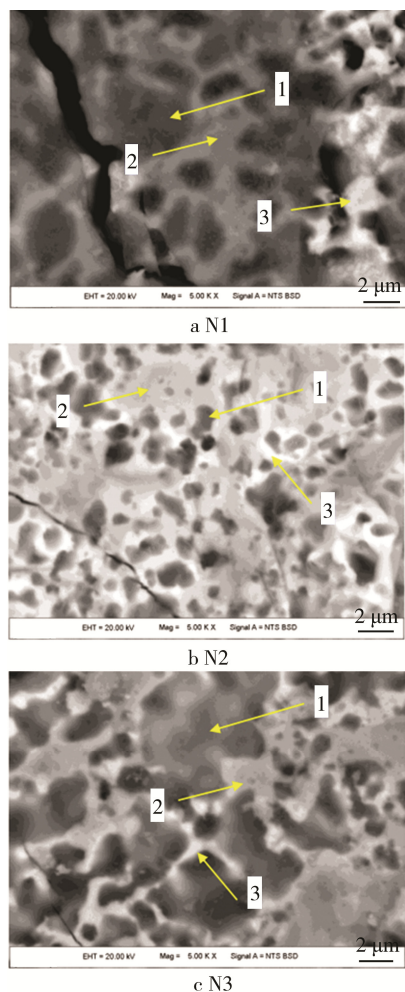


图 7 不同颜色试样表面 SEM 形貌

Fig.7 SEM micrographs of specimen surfaces with different colors

表 2 不同位置典型能谱分析结果(质量分数)

Tab.2 Results of EDS in different locations (Mass Fraction)

区域	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Total
1	14.50	22.38	0.65	0.36	0.76	61.35	100
2	15.25	28.13	8.40	0.32	1.47	46.43	100
3	12.17	48.10	1.41	0.33	0.43	37.56	100

通过不同颜色零件微观形貌及成分分析可知, Al-Si 镀层零件表面颜色的差异与零件表面镀层的氧

化程度存在一定关系,即在加热过程中, Al-Si 镀层料片基材中的 Fe 元素会向零件表面镀层中扩散, Fe 元素扩散程度随着加热温度的升高或加热时间的增加而增加^[14—15],扩散过程中的 Fe 与炉内气氛中的氧发生氧化反应,氧化过程中镀层中 Fe 的氧化物由 FeO (黑色),向 Fe_3O_4 (蓝色)、 Fe_2O_3 (红色)转换。上述不同氧化 Fe 的混合比例导致零件表面呈现不同的颜色。

4 结论

1) Al-Si 镀层颜色随着加热工艺的不同,表面颜色呈现多样化转变,对应的镀层厚度及扩散层厚度也相应不同。

2) 通过对典型不同颜色试样进行表面微观及能谱分析,在加热过程中基材中的 Fe 元素不断向镀层中扩散,同时发生氧化反应,Fe 的氧化程度及不同氧化铁的混合比例与 Al-Si 镀层表面颜色差异存在一致的关系。

参考文献:

- [1] 高云凯,高大威,余海燕,等. 汽车用高强度钢热成型技术[J]. 汽车技术, 2010(8): 56—60.
GAO Yun-kai, GAO Da-wei, YU Hai-yan, et al. Analysis on High-strength Steel Hot Forming Technology for Automobile[J]. Automobile Technology, 2010(8): 56—60.
- [2] 林建平,王立影,田浩彬,等. 超高强度钢板热冲压成形研究与进展[J]. 热加工工艺, 2008, 37(21): 140—144.
LIN Jian-ping, WANG Li-ying, TIAN Hao-bin, et al. Research and Progress of Hot Stamping of Ultrahigh Strength Steel[J]. Hot Working Technology, 2008, 37(21): 140—144.
- [3] 杨洪林,刘昕,李俊,等. 热冲压钢镀层技术的研究现状[J]. 钢铁研究学报, 2013, 25(6): 1—7.
YANG Hong-lin, LIU Xin, LI Jun, et al. Research Status on Hot Stamping Steel Coating[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2013, 25(6): 1—7.
- [4] 徐伟力,艾健,罗爱辉,等. 钢板热冲压新技术介绍[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(4): 39—43.
XU Wei-li, AI Jian, LUO Ai-hui, et al. Introduction of Sheet Metal Hot-forming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(4): 39—43.
- [5] 张杰,江社明,张启福. 热成形钢镀层研究进展[J]. 金属热处理, 2015, 40(3): 169—172.
ZHANG Jie, JIANG She-ming, ZHANG Qi-fu. Current Status of Coating for Hot Forming Steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(3): 169—172.
- [6] 谷净巍,姜超. 超高强度钢板冲压件热成型工艺[J]. 汽车工艺与材料, 2009(4): 15—17.
GU Zheng-wei, JIANG Chao. Hot Forming Process of

- Ultrahigh Strength Steel Stamping Parts[J]. *Automobile Technology & Material*, 2009(4): 15—17.
- [7] 李兵, 张春, 王敏, 等. 汽车地板纵梁用带 Al-Si 涂层硼钢板的热冲压[J]. *金属热处理*, 2017, 42(3): 38—42.
- LI Bing, ZHANG Chun, WANG Min, et al. Hot Stamping of Al-Si Coated Boron Steel Plate Used for Car Floor Beam[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2017, 42(3): 38—42.
- [8] 张杰. 超高强度热成形钢镀层组织和性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- ZHANG Jie. Study on Microstructure and Properties of Hot Stamping Steel Coating[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [9] KARBASIAN H, TEKKAYA A E. A Review on Hot Stamping[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(15): 2103—2118.
- [10] GUI Zhang-xiang, LIANG Wei-kang, ZHANG Yi-sheng. Formability of Aluminum-silicon Coated Boron Steel in Hot Stamping Process[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014(24): 1750—1457.
- [11] 邢忠文, 包军, 杨玉英, 等. 可淬火硼钢板热冲压成形实验研究[J]. *材料科学与工艺*, 2008, 16(2): 172—175.
- XING Zhong-wen, BAO Jun, YANG Yu-ying, et al. Hot Stamping Processing Experiments of Quenchable Boron Steel[J]. *Materials Science & Technology*, 2008, 16(2): 172—175.
- [12] 张杰, 江社明, 张启福, 等. 加热工艺对热成形钢表面纯锌镀层组织和表面氧化物的影响[J]. *腐蚀与防护*, 2014, 35(5): 450—453.
- ZHANG Jie, JIANG She-ming, ZHANG Qi-fu, et al. Effects of Heat-treatment Process on Microstructure and Surface Oxide of GI Coating on Hot Stamped Steel[J]. *Corrosion & Protection*, 2014, 35(5): 450—453.
- [13] SUEHIRO M, MAKI J, KUSUMI K, et al. Properties of Aluminum-coated Steels for Hot-forming[J]. *Nippon Steel Technical Report*, 2003, 88: 16—21.
- [14] 于武刚, 邱肖盼, 张杰, 等. 预合金化时间对热成形钢锌基镀层组织和成分的影响[J]. *钢铁*, 2017, 52(7): 84—88.
- YU Wu-gang, QIU Xiao-pan, ZHANG Jie, et al. Influence of Pre-alloying Time on Zinc-based Coatings of Hot Forming Steel in Structure and Component[J]. *Iron and Steel*, 2017, 52(7): 84—88.
- [15] 王腾, 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.