

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20170394

加热气氛对一种 C-Mn-Si-Al 高强钢选择性氧化的影响

蒋光锐^{1,2}, 王海全^{1,2,3}, 刘李斌^{1,2}, 刘华赛^{1,2}

(1. 首钢集团有限公司技术研究院, 北京 100043; 2. 绿色可循环钢铁流程北京市重点实验室, 北京 100043;
3. 中国钢研科技集团先进金属材料涂镀国家工程实验室, 北京 100081)

摘要: 为了研究局部露点技术在含铝高强钢上应用的潜力, 采用热浸镀工艺模拟器研究了加热过程的露点温度对一种 C-Mn-Si-Al 高强钢选择性氧化的影响。加热过程中的露点温度设置为 -10、-20 和 -50 °C, 而在保温过程中的露点温度为 -50 °C。采用 SEM/EDS 表征了退火后试样表面的氧化形貌和元素质量分数, 使用 GDOES 分析了退火试样表层的元素深度分布, 采用 XPS 分析鉴定了试样表面的氧化物种类。试验结果表明, 使用 -10 °C 露点温度加热时, 试样表面氧化轻微, 铝元素出现明显内氧化现象。随着加热过程露点温度降低到 -50 °C, 试样表面出现较多富含锰和铝的氧化物。因此, 加热过程中较高的露点温度可以抑制合金元素向外表面的富集, 减少试样表面的氧化物数量。

关键词: 高强钢; 退火; 露点温度; 选择性氧化

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)03-0066-06

Effects of heating atmosphere on selective oxidation of a C-Mn-Si-Al high strength steel

JIANG Guang-rui^{1,2}, WANG Hai-quan^{1,2,3}, LIU Li-bin^{1,2}, LIU Hua-sai^{1,2}

(1. Research Institute of Technology, Shougang Group Co., Ltd., Beijing 100043, China; 2. Beijing Key Laboratory of Green Recyclable Process for Iron and Steel Production Technology, Beijing 100043, China;
3. National Engineering Laboratory of Advanced Coating Technology for Metal Materials, China Iron and Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China)

Abstract: To research potential of applying local dew point technology on Al-bearing high strength steel, effects of dew points during heating on selective oxidation behavior of a C-Mn-Si-Al steel were studied through a hot-dip process simulator (HDPS). The dew points during heating were set as -10, -20 and -50 °C, respectively, while the dew point during soaking was -50 °C. External surface of as-annealed steel samples was characterized by SEM/EDS. Alloying element profiles were detected by GDOES. Kinds of compound on the external surface were identified by XPS. As heating with the dew point of -10 °C, little oxides could be found on the external surface and remarkable internal oxidation of Al could be found. As the dew point during heating decreased to -50 °C, much more oxides composed with manganese and aluminum were observed on the external surface. Therefore, high dew point during heating extremely suppress enrichment of alloying elements and formation of oxides on the external surface for the C-Mn-Si-Al steel.

Key words: high strength steel; annealing; dew point; selective oxidation

为了减少燃料消耗和二氧化碳排放, 大量先进高强钢被用于汽车车身制造^[1-5]。为了获得较高强度和良好塑性, 先进高强钢普遍含有较多的合金元素, 如 Cr、Mn、Si、Al 等^[6-9]。与铁相比, 这些合金元素与氧的亲合力更强^[10]。因此, 在退火过程中, 合金元素倾向于在表面发生选择性氧化, 造成高强钢热浸镀性能下降, 不利于后续的热浸镀锌处理^[11-14]。

为了改善先进高强钢的热浸镀性能, 抑制合金

元素在高强钢表面形成氧化物, 研究者研究了退火过程的露点温度对高强钢合金元素选择性氧化行为的影响^[15]。Gong Y F 等^[16]研究了退火过程的露点温度对 0.11%C-1.53%Mn-1.46%Si 成分高强钢选择性氧化行为的影响, 发现较高的露点温度可以使含硅高强钢表面的合金元素从外氧化转变为内氧化。Bellhouse M E 等^[17]研究了退火过程的露点温度对 0.2%C-1.5%Mn-1.5%Si-0.5%Al 高强钢选择性氧

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0304305)

作者简介: 蒋光锐(1982—), 男, 博士, 高级工程师; **E-mail:** guangrui82@qq.com; **收稿日期:** 2017-08-01

化的影响,认为较高的气氛露点温度会导致含铝高强钢表面出现更多的表面氧化物。因而可以推测,铝元素的添加会导致高强钢的选择性氧化行为发生显著变化。由于在传统的连续退火炉中炉内气氛的露点温度通常较低,因此,为了减少高强钢中合金元素在连续退火时发生表面选择性氧化,开发了多种用铝部分代替硅的高强钢^[17-18]。

然而,通过采取局部封闭或内置加湿舱等措施,可以使连续退火炉内加热过程露点的温度和均热过程的露点温度显著不同,从而开发出“局部露点技术”^[19]。Maki J等^[20]研究了加热过程的露点温度对不同成分体系 TRIP 钢表面选择性氧化的影响,发现在加热过程中采用较高的露点温度可以改善 C-Mn-Si 体系 TRIP 钢的表面浸润性,但是对 C-Mn-Al 体系 TRIP 钢的浸润性没有改善效果。GAO N 等^[21]研究了加热过程露点温度对多种 C-Mn-Si 体系高强钢表面选择性氧化行为的影响,认为在加热过程中采用较高的露点温度可以抑制 C-Mn-Si 体系高强钢表面的合金元素选择性氧化。因此,加热过程和保温过程使用不同的露点温度是控制高强钢表面选择性氧化的重要方式。然而,很少有研究者探索加热过程的露点温度对 C-Mn-Si-Al 体系高强钢的选择性氧化行为的影响规律。

此外,在高温退火时使用较高的露点温度气氛可能导致退火炉的炉辊表面形成氧化铁皮等缺陷,导致带钢表面出现点状麻坑缺陷^[22],同时造成炉辊寿命受损^[23]。因此,加热过程采用高露点温度和均热保温过程采用低露点温度对稳定生产有显著意义。本文采用热浸镀工艺模拟器研究了一种 C-Mn-Si-Al 体系高强钢在不同露点温度气氛中加热退火过程中的选择性氧化行为。

1 试验方法

1.1 试验材料

试验材料为商业化冷轧先进高强钢,化学成分见表 1。将厚度为 1.2 mm 的冷轧高强钢试样加工为 100 mm×200 mm 的退火试样。用 P2000 型 SiC 砂纸打磨试样表面以去除粗糙度和表面氧化铁皮的影响。为了防止在打磨过程中试样表面被二次氧化,打磨过程采用无水乙醇进行冷却。打磨后的试样在乙醇中清洗干净,然后在热风中烘干。

1.2 退火试验

退火试验在一台装备有红外加热炉和露点控制器的热浸镀工艺模拟器^[24]上进行。将烘干的试样

放入热浸镀工艺模拟器的试样仓内,将试样仓内的真空度抽到 5 Pa 以下,然后充入高纯氮气(纯度 99.99%)和高纯氢气(纯度 99.95%)的混合气体,氮气和氢气的体积分数分别为 95%和 5%。在实际生产中,为了避免高温退火时的高露点温度气氛造成炉辊结瘤等缺陷,通常将使用高露点温度气氛的温度范围控制在 750 °C 以下。为模拟真实工业状况,将试样以 4 °C/s 的速率加热到 700 °C,加热过程的气氛露点温度分别设置为 -10、-20 和 -50 °C,然后将气氛露点温度过渡到 -50 °C,同时将试样以 4 °C/s 的速率继续加热到 800 °C,保温 60 s,然后快速冷却到室温,将试样从试样仓中取出后立即保存在有硅胶的干燥器中,以防止试样在空气中结露。

表 1 C-Mn-Si-Al 高强钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of C-Mn-Si-Al steel %					
C	Si	Mn	P	S	Al
0.15	0.15	1.5	0.02	0.007	1.3

1.3 分析方法

由于试样边缘位置的温度不均匀,因此只取试样中央位置 60 mm×60 mm 的部分进行分析。使用场发射扫描电子显微镜(SEM)观察试样表面的微观形貌,设备型号为 JSM 7001F,加速电压为 15 kV,工作距离为 10 mm。使用扫描电镜附带的 X 射线能谱仪(EDS)分析试样表面的化学成分。使用辉光放电光谱仪(GDOES)分析试样浅表层的元素深度分布,设备型号为 LECO GDS850A,电压为 700 V,电流为 20 mA,阳极直径为 4 mm。

使用光电子能谱仪(XPS)分析试样表面的化合物种类,设备型号为 ESCALAB 250XI,X 射线源为 Al K_α,倾斜角度为 45°,结合能测量值精确到 ±0.1 eV。所有 XPS 谱线都用结合能为 284.8 eV 的 C 1s 峰进行荷电校正,采用 Shirley 类型背景拟合去除背景^[25]。

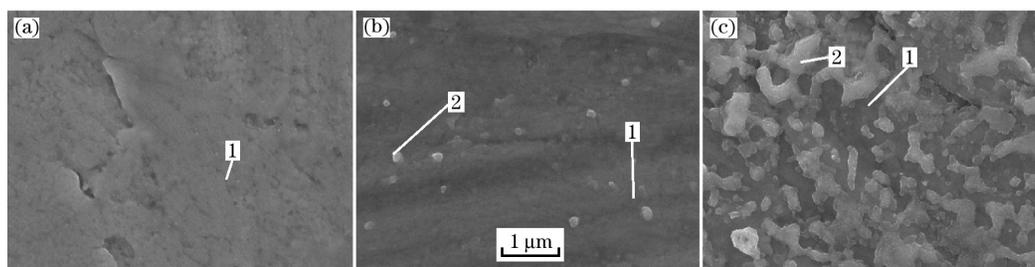
2 结果

2.1 SEM/EDS 分析结果

采用 SEM 分析了 C-Mn-Si-Al 高强钢退火后的表面形貌,结果如图 1 所示。采用 SEM 附带的 EDS 分析了试样表面不同位置的化学成分,结果见表 2。可以发现,试样的表面形貌和化成成分受加热过程的露点温度影响。当试样以 -10 °C 气氛露点温度加热时,试样外表面的氧化物颗粒极少,晶界

和表面缺陷都没有被氧化物覆盖,如图 1(a)所示。从表 2 可以看出,试样表面的化学成分与该钢种的化学成分基本相同,这也表明采用 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 气氛露点温度加热时,试样表面没有出现明显的选择性氧化。还可以发现,试样表面的硅和铝元素能谱分析结果比基板中硅和铝的质量分数稍低。当试样在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的气氛露点温度中加热时,试样表面出现了部分富含锰和硅的颗粒状物质,如图 1(b)所示。这些颗粒物彼此之间没有接触,以分散状态存在于试样表面。根据能谱分析的结果,图 1(b)中的颗粒

物(标号为 2)中含有 8.36% 的锰和 0.45% 的硅,分别是钢中锰和硅质量分数的 5 倍和 3 倍,并且含有 6.88% 的氧元素,见表 2。而图 1(b)中颗粒物之间位置(标号为 1)的化学成分则与钢中的化学成分接近,并且不含氧元素。当试样在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的气氛露点温度中加热时,试样表面出现大量网状的含有硅和锰的氧化物(标号为 2),如图 1(c)和表 2 所示。在网状氧化物的孔洞中也可以检测到大量的氧元素(标号为 1),见表 2,这意味着试样整个表面都被不同形态的氧化物覆盖。



(a) $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

图 1 C-Mn-Si-Al 高强钢在不同气氛露点温度下加热后的试样表面形貌

Fig. 1 Morphologies of C-Mn-Si-Al steel surface with different dew points during heating

表 2 C-Mn-Si-Al 高强钢表面成分(质量分数)

Table 2 Chemical compositions of C-Mn-Si-Al steel surface

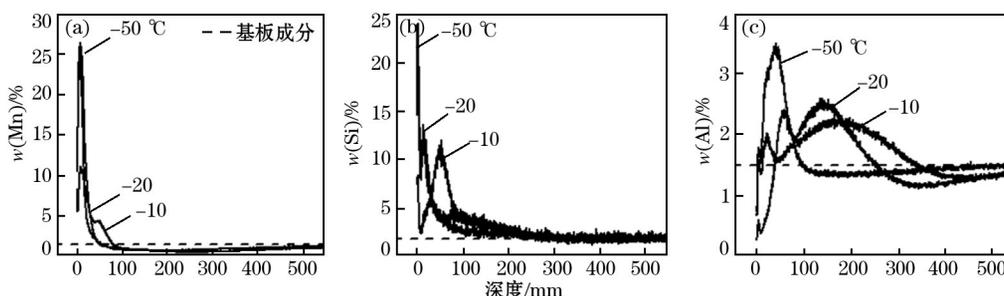
露点温度/ $^{\circ}\text{C}$	位置	Si	Mn	Al	O	Fe
-10	1	0.08	1.72	1.10	—	其余
-20	1	0.23	2.19	1.97	—	其余
-20	2	0.45	8.36	1.44	6.88	其余
-50	1	0.34	2.10	2.07	6.49	其余
-50	2	0.50	8.87	1.70	8.27	其余

2.2 GDOES 分析结果

采用 GDOES 分析了合金元素在试样表面的深度分布,结果如图 2 所示。随着加热气氛露点温度的升高,硅和锰元素在试样表面的富集峰高度不断

下降。当试样以 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 气氛露点温度加热时,在表面以下 50 nm 深度附近出现硅的富集峰,如图 2(b)所示,这意味着硅发生内氧化。对于铝元素而言,当加热时的气氛露点温度为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,铝元素在试样表面富集,而随着加热时气氛露点温度的升高,铝在试样外表面以下出现富集,富集峰的宽度和深度都不断增大,如图 2(c)所示,这意味着铝从外氧化转变为内氧化。

合金元素在试样表层的富集峰可以用富集峰的高度和富集峰的深度进行表征。其中,富集峰的高度是指富集峰极大值点的数值,表征了元素富集的程度,而富集峰的深度是指富集峰高度所在深度,表征了元素富集的位置。根据 GDOES 结果计算了锰、硅、铝 3 种合金元素的富集峰高度和富集



(a) Mn; (b) Si; (c) Al。

图 2 在不同气氛露点温度下加热后元素在试样表面的深度分布

Fig. 2 GDOES depth profiles of elements on surface of C-Si-Mn-Al steel with different dew points during heating

峰深度,结果如图 3 所示。随着加热时的气氛露点温度从 -50 提高到 -10 °C,所有合金元素的富集峰高度单调下降,如图 3(a)所示,这表示合金元素的富集程度随着加热时气氛露点温度的升高而下

降。而铝和硅的富集峰深度则随着加热时气氛露点温度的提高而上升,如图 3(b)所示,这表明随着加热段气氛露点温度的提高,铝和硅元素出现内氧化的倾向。

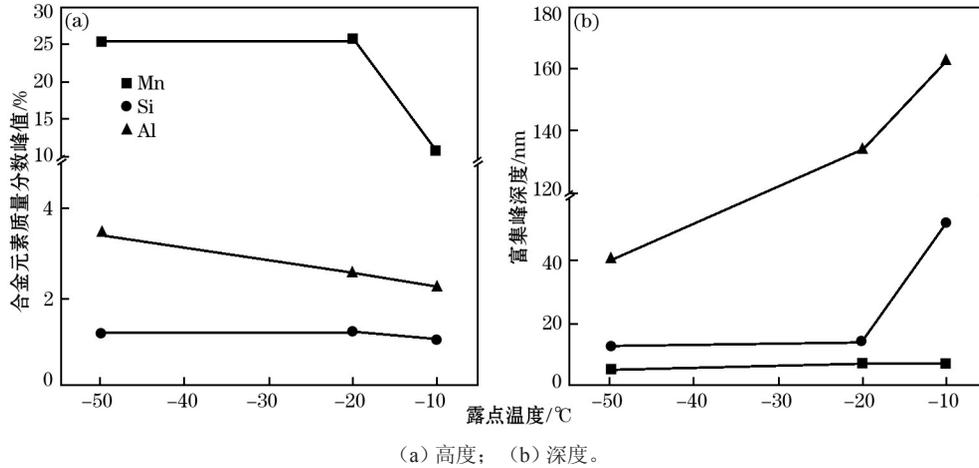


图 3 根据 GDOES 结果计算试样表面合金元素富集峰

Fig. 3 Enrichment of alloying elements on external surface of steel due to GDOES analysis results

2.3 XPS 分析结果

采用 XPS 分析了样品表面的合金元素结合能,并根据结合能数值鉴定试样表面化合物的种类,化合物的结合能采用 NIST 的数据库^[26],结果如图 4 和表 3 所示。在所有气氛露点温度条件下,试样表面均有明显的硅和锰元素结合能峰,鉴定表明硅和锰均以氧化物形式存在,但是氧化物的种类和形态不同。在较高的露点温度(-10 和 -20 °C)下加

热后,试样表面硅以无定型硅 SiO_x 的形式存在,这表明硅与氧的结合很弱,而试样表面的锰以 MnO 和 Mn₂O₃ 两种氧化物形态存在。当加热过程的露点温度降低到 -50 °C 时,试样表面硅的结合能略有升高,硅的存在形式转变为含有较多氧的 SiO_{0.93},而锰的结合能也略有升高,锰的氧化物种类转变为为 MnO 和 MnO₂。而对铝元素而言,气氛露点温度对化合物种类的影响更明显。当加热过

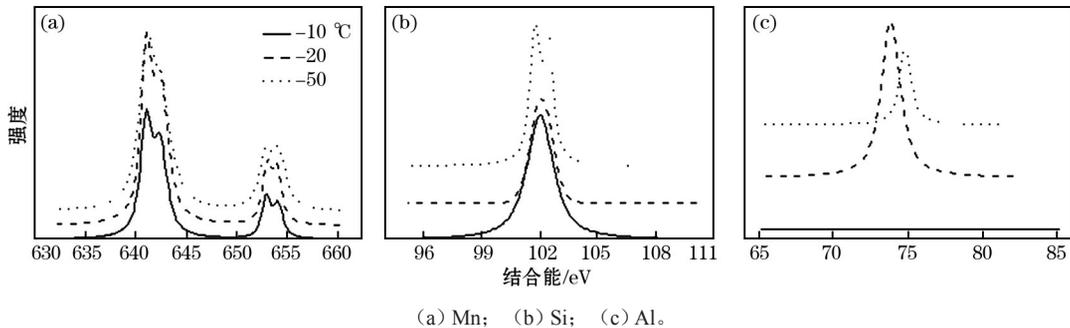


图 4 在不同气氛露点温度下加热后的试样表面的 XPS 谱线

Fig. 4 XPS spectra of on surface of C-Si-Mn-Al steel with different dew points during heating

表 3 试样表面的合金元素结合能峰及化合物

Table 3 Spectra peak of alloying elements on external surface and corresponding compounds

露点温度/°C	结合能/eV			化合物种类
	Mn 2p _{1/2}	Si 2p	Al 2p	
-10	640.4, 641.8	101.4	—	MnO、Mn ₂ O ₃ 、SiO _x
-20	640.4, 641.8	101.6	73.2	MnO、Mn ₂ O ₃ 、SiO _x 、Al ₂ O ₃ /Al
-50	640.6, 642.1	101.8	74.2	MnO、MnO ₂ 、SiO _{0.93} 、Al ₂ O ₃

程的气氛露点温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, XPS 分析结果表明试样表面没有明显的铝元素峰, 这意味着铝发生了显著的内氧化。当加热过程的气氛露点温度降低到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 试样表面出现铝元素峰, 对应的氧化物为 Al_2O_3 和铝的混合物。而当加热过程的气氛露点温度继续降低到 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 试样表面出现明显铝元素峰, 结合能升高 1 eV , 铝的氧化物转变为完全的 Al_2O_3 。

3 讨论

Gesmundo F 等^[27]研究了二元合金发生内氧化的多种形式, 并提出了发生内氧化的判据。而 Grabke H J 等^[28]针对多元铁基合金提出了一种新的内氧化判据, 见式(1)。

$$\sum_{\text{B}} \left[N_{\text{B}} (v D_{\text{B}} V_{\text{BO}_x}) \right] > \left(\frac{\pi g^* N_{\text{O}} D_{\text{O}} V_{\text{m}}}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: N_{B} 为合金元素的摩尔分数, %; N_{O} 为试样表面氧的摩尔分数, %; V_{m} 为合金的摩尔体积, m^3/mol ; V_{BO_x} 为氧化物 BO_x 的摩尔体积, m^3/mol ; v 为氧化物中氧的化学计量数; D_{B} 为合金元素 B 的扩散系数, m^2/s ; D_{O} 为氧在合金中的扩散系数, m^2/s ; g^* 为氧化物阻碍氧扩散的临界体积分数, %, 通常选为 30%^[29]。

本研究仅仅考虑 MnO 、 SiO_2 和 Al_2O_3 3 种氧化物, 计算中所用的 Si、Mn、Al、O 在铁素体和奥氏体中的扩散系数参见文献[30]。

计算 C-Mn-Si-Al 高强钢发生内氧化的临界氧分压, 并与不同露点温度对应的氧分压进行比较, 结果如图 5 所示, 其中不同露点温度对应的氧分压根据文献[31]计算得到。可以发现, 采用 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 露点温度退火时, 所有温度条件下高强钢均无法出现内氧化。随着露点温度提高, 气氛中的氧分压逐渐升高。当露点温度达到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 铁素体在 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下会出现内氧化。而当露点温度进一步升高到 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时发生内氧化的氧气分压范围进一步扩大。采用 Thermo Calc 软件计算, 该 C-Mn-Si-Al 钢种在 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时为铁素体+奥氏体两相组织, 因此可以推测采用 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 露点温度加热时会出现明显的内氧化现象, 这与试验观察的结果一致。同时可以发现, 在相同的露点温度($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)下, 当退火温度超过 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 该钢种难以发生内氧化, 这意味着在高温退火时采用较高露点温度反而难以通过外氧化向内氧化的转变而

消除表面的氧化物。

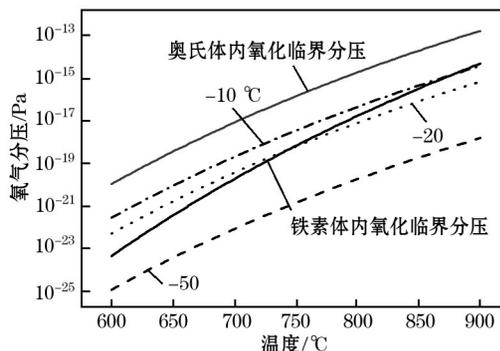


图 5 C-Mn-Si-Al 发生内氧化的临界氧分压以及气氛露点温度对应的氧分压

Fig. 5 Critical oxygen partial pressure for internal oxidation of C-Mn-Si-Al steel and oxygen partial pressure of atmosphere with different dew points

Bellhouse E M 等^[11]研究了退火过程的露点温度对 0.2% C-1.5% Mn-1.0% Si 和 0.2% C-1.5% Mn-1.5% Si-0.5% Al 两种 TRIP 钢表面选择性氧化行为的影响, 试验的加热过程和均热过程采用相同的气氛露点温度, 结果表明, 较高气氛露点温度($+5\text{ }^{\circ}\text{C}$)导致表面出现细小而密集分布的氧化物颗粒, 这与本文的研究结果不同。此外, Bellhouse E M 等^[32]研究了 0.2% C-1.5% Mn-0.5% Si-1.0% Al 成分 TRIP 钢在不同气氛露点温度下退火的表面选择性氧化行为, 试验的加热过程和均热过程采用相同的气氛露点温度, 同样认为较高的露点温度会导致表面出现显著氧化。而在本研究中, 加热过程采用较高气氛露点温度($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$)而均热时采用较低气氛露点温度($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$)能够促使合金元素(Si、Mn、Al)发生内氧化, 消除表面的氧化物颗粒。对比两种工艺的结果差异, 可以推测加热段和均热段使用不同的气氛露点温度有利于改善 C-Mn-Si-Al 高强钢的可镀性, 这可能是由于均热段较低的气氛露点温度能够消除加热过程中在表面出现的细小氧化物颗粒。后续工作将进一步研究详细的机理。

4 结论

采用热浸镀工艺模拟器研究了加热过程气氛露点温度对一种 C-Mn-Si-Al 高强钢表面选择性氧化行为的影响, 加热过程的露点温度设置为 -50 、 -20 和 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 加热段最高温度为 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, 使用扫描电镜、X 射线能谱仪和辉光放电光谱仪研究了试样表面状态以及合金元素的分布。

(1) 采用较高的气氛露点温度加热可以获得良

好的表面质量,试样表面氧化物极少,氧化物以硅和锰的氧化物为主。

(2) 当露点温度为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,试样表面出现网状氧化物,氧化物中含有较多的锰、硅、铝元素。

(3) 随着加热段气氛露点温度的提高,合金元素在试样表面的富集峰高度不断降低,富集峰深度和宽度均有所提高,表明合金元素倾向于发生内氧化。

参考文献:

- [1] Kuziak R, Kawalla R, Waengler S. Advanced high strength steels for automotive industry[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2008, 8(2): 103.
- [2] Mayyas A T, Qattawi A, Mayyas A R, et al. Life cycle assessment-based selection for a sustainable lightweight body-in-white design[J]. Energy, 2012, 39(1): 412.
- [3] 李扬,刘汉武,杜云慧,等. 汽车用先进高强钢的应用现状和发展方向[J]. 材料导报, 2011, 25(13): 101. (LI Yang, LIU Han-wu, DU Yun-hui, et al. Applications and developments of AHSS in automobile industry[J]. Materials Review, 2011, 25(13): 101.)
- [4] 康永林. 汽车轻量化先进高强钢与节能减排[J]. 钢铁, 2008, 43(6): 1. (KANG Yong-lin. Light weight vehicle, advanced high strength steel and energy-saving and emission reduction [J]. Iron and Steel, 2008, 43(6): 1.)
- [5] 王新东,李建新,齐章国,等. 河钢集团汽车板产品研发与技术创新[J]. 钢铁, 2017, 52(8): 70. (WANG Xin-dong, LI Jian-xin, LIN Zhang-guo, et al. Product development and technology innovation of automotive sheet in Hesteel Group[J]. Iron and Steel, 2017, 52(8): 70.)
- [6] Matlock D K, Bräutigam V E, Speer J G. Application of the quenching and partitioning (Q&P) process to a medium-carbon, high-Si microalloyed bar steel[C]//THERMEC 2003, Madrid: TMS, 2003: 1089.
- [7] Cooman B C D, Kwon O, Chin K G. State-of-the-knowledge on TWIP steel[J]. Materials Science and Technology, 2012, 28(5): 513.
- [8] Grässel O, Krüger L, Frommeyer G, et al. High strength Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP steels development-properties-application [J]. International Journal of Plasticity, 2000, 16(10/11): 1391.
- [9] 唐荻,米振莉,陈雨来. 国外新型汽车用钢的技术要求及研究开发现状[J]. 钢铁, 2005, 40(6): 1. (TANG Di, MI Zhen-li, CHEN YU-lai. Technology and research and development of advanced automobile steel abroad[J]. Iron and Steel, 2005, 40(6): 1.)
- [10] LIU H, LI F, SHI W, et al. Challenges in hot-dip galvanizing of high strength dual phase steel: surface selective oxidation and mechanical property degradation[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(16): 3428.
- [11] Bellhouse E M, Mcdermid J R. Selective oxidation and reactive wetting of 1.0 Pct Si-0.5 pct Al and 1.5 pct Si TRIP-assisted steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions: A, 2010, 41(6): 1539.
- [12] Khondker R, Mertens A, Mcdermid J R. Effect of annealing atmosphere on the galvanizing behavior of a dual-phase steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 463(1): 157.
- [13] Prabhudev S, Swaminathan S, Rohwerder M. Effect of oxides on the reaction kinetics during hot-dip galvanizing of high strength steels[J]. Corrosion Science, 2011, 53(7): 2413.
- [14] 蒋光锐,王海全,刘李斌. 加热工艺对含磷高强钢氧化行为的影响[J]. 钢铁, 2017, 52(10): 78. (JIANG Guang-rui, WANG Hai-quan, LIU Li-bin. Heating process on oxidation behavior of P-bearing high strength steel[J]. Iron and Steel, 2017, 52(10): 78.)
- [15] 蒋光锐,陈凌峰,王海全,等. 过时效段露点对双相钢表面色差的影响[J]. 钢铁, 2017, 52(8): 87. (JIANG Guang-rui, CHEN Ling-feng, WANG Hai-quan, et al. Influence of over-aging dew point on surface color difference of dual phase steel[J]. Iron and Steel, 2017, 52(8): 87.)
- [16] Gong Y F, Soo K H, Charles D C B. Internal oxidation during intercritical annealing of CMnSi TRIP steel[J]. ISIJ International, 2009, 49(4): 557.
- [17] Sugimoto K. Formability of C-Si-Mn-Al-Nb-Mo ultra high-strength TRIP-aided sheet steels[J]. ISIJ International, 2007, 47(9): 1357.
- [18] Meyer M D, Kestens L, Cooman B C D. Texture development in cold rolled and annealed C-Mn-Si and C-Mn-Al-Si TRIP steels[J]. Metal Science Journal, 2001, 17(11): 1353.
- [19] Angeli G. New galvanizing line[C]//Galvatech 2011. Genova: Associazione Italiana di Metallurgia, 2011: IL11.
- [20] Maki J, Mahieu J, De Cooman B C, et al. Galvanisability of silicon free CMnAl TRIP steels[J]. Materials Science and Technology, 2003, 19(1): 125.
- [21] GAO N, LIU Y H. Galvanizing advanced high-strength steels through control of critical factors[C]//103th Galvanizers Association, Pointe Clear: 103th Galvanizers Association Proceedings. USA: ThyssenKrupp Steel USA, 2011: 1.
- [22] 刘顺心,赵志坚,郝瑛,等. 冷轧连续退火带钢表面麻点缺陷形成机理及对策[J]. 金属热处理, 2014, 39(9): 147. (LIU Shun-xin, ZHAO Zhi-jian, HAO Ying, et al. Forming mechanism and counter measure of pitting on cold roller continuous annealed strip steel surface[J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(9): 147.)
- [23] Cesar M D G M M, Mantel M J. Effect of the temperature and dew point of the decarburization process on the oxide subscale of a 3% silicon steel[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2003, 254: 337.
- [24] JIANG G, TENG H, WANG H, et al. Selective oxidation in press hardening steel during annealing with different dew points [C]//Galvatech 2013. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2013: 139.