

连续退火快冷出口温度对 SPCC 冷轧薄板组织和性能的影响

周博文¹, 蒋才灵², 樊 雷¹, 刘义虎¹, 陆茂森², 杨跃标¹

(1. 广西柳州钢铁集团有限公司, 广西 柳州 545000; 2. 广西钢铁集团有限公司, 广西 防城港 538000)

摘 要:研究了快冷出口温度对连续退火 SPCC 冷轧薄板组织和性能的影响。结果表明:连续退火 SPCC 产品的主要组织为等轴铁素体晶粒、晶界处块状碳化物及晶粒内部粒状碳化物,快冷出口温度主要影响着钢中碳化物的析出及分布。随着快冷出口温度的降低,晶界处碳化物数量减少,晶粒内碳化物数量增多,钢卷出现屈服平台的几率显著下降,屈服强度也明显降低。当快冷出口温度从 500 °C 降低至 430 °C 时,屈服平台比例从 55% 降低至 10%,平均屈服强度降低了 22 MPa。

关键词:SPCC 冷轧薄板;连续退火;快冷出口温度;显微组织;力学性能

中图分类号:TF76,TG156.24

文献标志码:A

文章编号:1004-7638(2024)04-0176-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.04.025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Effect of continuous annealing fast cooling outlet temprature on the microstructures and properties of SPCC cold rolled sheet

Zhou Bowen¹, Jiang Cailing², Fan Lei¹, Liu Yihu¹, Lu Maosen², Yang Yuebiao¹

(1. Guangxi Liuzhou Iron & Steel Group Co. Ltd., Liuzhou 545000, Guangxi, China; 2. Guangxi Iron & Steel Group Co. Ltd., Fangchenggang 538000, Guangxi, China)

Abstract: Effect of continuous annealing fast cooling outlet temprature on the microstructures and properties of SPCC cold rolled sheet was studied. The results show that there are equiaxed ferrite grains, massive carbides on grain boundaries and granular carbides in grains in the continuous annealed SPCC cold rolled sheet. The fast cooling outlet temprature mainly affects the precipitation and distribution of carbides in steels. With a drop of the fast cooling outlet temprature, the number of carbides on the grain boundaries decreases, and the number of carbides in grains increases. The existing proportion of yield platform in the testing coils decreases, and the yield strength also decreases obviously with the decrease of outlet tempratures. When the fast cooling outlet temprature decreases from 500 °C to 430 °C, the existing proportion of yield platform decreases from 55% to 10%, and the average yield strength decreases by about 22 MPa.

Key words: SPCC cold rolled sheet, continuous annealing, fast cooling outlet temprature, microstructure, mechanical property

收稿日期:2023-12-15

基金项目:柳州市科技重大专项《高品质冷轧热镀锌钢板开发及关键生产技术研究》(2019AC10603)。

作者简介:周博文, 1991 年出生, 男, 湖北天门人, 博士, 高级工程师, 主要从事硅钢与汽车用钢的研制与开发, E-mail: 632938590@qq.com。

0 引言

普通冷轧钢板 SPCC (Steel plate cold-rolled common) 是一种广泛用于汽车制造行业、家电行业及镀锌镀锡基板等的低碳铝镇静钢, 在当前冷轧产品市场上占有主体地位^[1-2]。生产 SPCC 产品主要有罩式退火及连续退火两种方式, 较罩式退火产品而言, 连续退火工艺生产的 SPCC 产品具有表面质量好、性能稳定均匀、成材率高、生产周期短、供货及时、环保低能耗等显著的优点; 但连续退火 SPCC 产品屈服强度较高, 不利于用户使用, 在退火后容易出现屈服平台的问题更是严重制约了产品的使用和发展^[3-5]。

大量研究表明, 晶粒尺寸较小和钢中固溶碳含量较高是导致连续退火产品屈服强度高和易出现屈服平台的主要原因, 而在炼钢阶段稳定控制碳含量和碳氮化物形成元素含量后, 主要是热轧及退火工艺参数的选择影响着产品的最终组织^[4-7]。钢中原始碳含量、碳氮化物形成元素含量、热轧卷曲温度、

退火均热温度等的影响前人已经进行了详细地研究^[1, 7-10]。关于快冷出口温度的影响前人也进行了部分探索, 但研究主要在实验室进行, 且不同研究者通过试验得出的结论也存在一定区别^[3-4], 因此, 笔者通过在生产厂开展生产试验, 全面深入分析了连续退火快冷出口温度对 SPCC 组织和性能的影响, 以期为提高 SPCC 产品的性能提供优化方向。

1 试验材料与方法

试验主要针对 0.6 mm 规格的连续退火 SPCC 产品开展。选用的冷轧基板为 L 厂生产的 3.5 mm 厚、1 250 mm 宽的 SPHC 热轧板, 试验钢主要化学成分如表 1 所示。热轧阶段采用的加热温度、精轧开轧温度、终轧温度及卷曲温度分别为 1 240、1 090、880、680 °C。热轧板经过酸洗和 5 架六辊轧机轧制后进入连续退火线进行退火, 为了探究快冷出口温度的影响, 选取了 500、470、430 °C 三个快冷出口温度进行对比研究, 每个工艺各试制 20 卷钢, 具体退火工艺如图 1 的工艺路线 1、2、3 所示。

表 1 试验钢的主要化学成分
Table 1 Main chemical composition of the tested steels

C	Si	Mn	P	Cu	Ni	Cr	Al	S	N
0.060	0.035	0.17	0.015	0.025	0.010	0.025	0.035	0.01	0.005

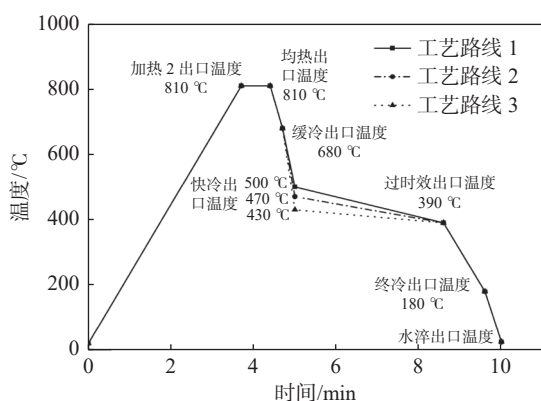


图 1 连续退火工艺路线

Fig. 1 Typical process curves of continuous annealing

试样退火完成后采用金相显微镜对其 ND×RD 截面的显微组织进行观察, 统计晶粒尺寸分布, 并使用场发射扫描电镜对截面上碳化物的析出和分布进行观察。在带钢宽度方向 1/4 处取标准 A80 拉伸试验样, 使用全自动拉伸试验机检测钢卷力学性能, 由于较罩式退火产品而言, 连续退火 SPCC 存在的主要问题是易出现屈服平台及屈服强度偏高, 因此重

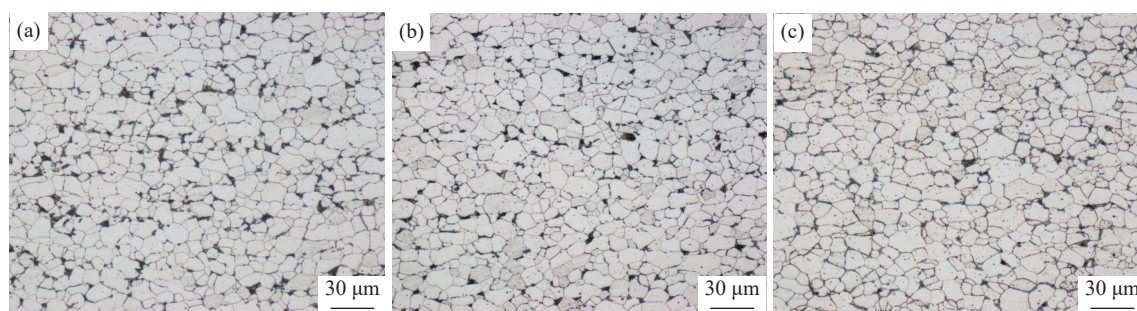
点研究了快冷出口温度对屈服强度及屈服平台比例的影响。

2 试验结果

2.1 快冷出口温度对组织的影响

图 2(a)~(c) 分别是快冷出口温度为 500、470 °C 和 430 °C 时试样的截面金相组织。由图 2 可知, 三个工艺的试样都完成了充分的再结晶, 金相组织皆由等轴的铁素体晶粒和游离的碳化物组成, 组织类型无明显区别。游离碳化物有两种存在形式, 分别位于晶界上和晶粒内部, 其中晶界处碳化物呈块状且尺寸较大, 而晶界内碳化物呈颗粒状, 尺寸很小。

为了探究快冷出口温度对晶粒尺寸的影响, 采用 photoshop 软件结合截距法测量了试样截面内平均晶粒尺寸, 结果如图 3 所示。由图 3 可知, 三个试样的平均晶粒尺寸在 9.3 ~ 9.7 μm, 随着快冷温度的变化, 晶粒尺寸无明显变化。



(a) 500 °C; (b) 470 °C; (c) 430 °C

图 2 不同快冷出口温度试样金相组织

Fig. 2 The metallographic structures of cold rolled sheets with different fast cooling outlet temperatures

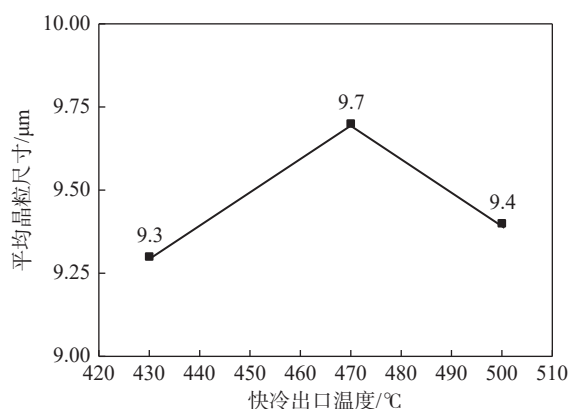
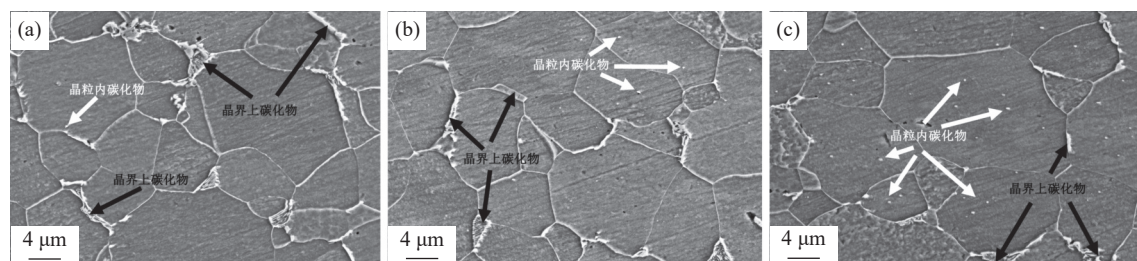


图 3 不同快冷出口温度试样晶粒尺寸

Fig. 3 The average grain sizes of cold rolled sheets with different fast cooling outlet temperatures

由图 2 可知, 尽管不同快冷温度的试样中都存在着两种类型的碳化物, 但对比三个试样中晶界处和晶粒内的碳化物可以发现它们在数量和尺寸上有着明显的不同, 高倍下快冷出口温度为 500、470 °C 和 430 °C 的试样中碳化物的析出和分布分别如图 4(a)~(c) 所示。从图 4(a) 中可以观察到快冷出口温度为 500 °C 的试样晶粒内部基本不存在碳化物, 碳化物主要沿晶界析出。对比图 4(a)~(c) 可以发现, 随着快冷温度的降低, 晶界处碳化物数量有所减少, 且尺寸有所减小; 晶粒内碳化物数量则不断增多, 尺寸有所增加; 随着快冷出口温度降低至 430 °C, 晶粒内碳化物开始占据主要地位。



(a) 500 °C; (b) 470 °C; (c) 430 °C

图 4 不同快冷出口温度试样中碳化物析出情况

Fig. 4 The precipitation of carbides in cold rolled sheets with different fast cooling outlet temperatures

2.2 快冷出口温度对性能的影响

对三种快冷出口温度生产的 20 卷钢的屈服平台比例进行了统计, 得到的结果如下: 快冷出口温度为 500 °C 的 20 卷钢中有 11 卷钢出现了屈服平台, 比例为 55%; 快冷出口温度为 470 °C 的 20 卷钢中有 8 卷钢出现了屈服平台, 比例为 40%; 快冷出口温度为 430 °C 的 20 卷钢中有 2 卷钢出现了屈服平台, 比例为 10%。从结果上看, 随着快冷温度的降低, 连续退火 SPCC 屈服平台比例呈现明显下降的趋势。当快冷温度降至 430 °C 后生产的连续退火

SPCC 仍有少量存在屈服平台, 这是由于平整机延伸率设置的偏低, 将平整延伸率从 0.8 提高至 1.2 后, 以 430 °C 的快冷出口温度生产的连续退火 SPCC 卷不再有屈服平台出现。

三种快冷出口温度生产的连续退火 SPCC 屈服强度如图 5 所示, 其中存在屈服平台的试验卷取下屈服作为屈服强度。由图 5 可以看出, 快冷出口温度为 500 °C 的试验卷屈服强度明显分布在一个更高的区间范围内, 快冷出口温度为 430 °C 的试验卷屈服强度则明显分布在一个更低的区间范围内, 随

着快冷出口温度的降低,带钢屈服强度有显著下降趋势。

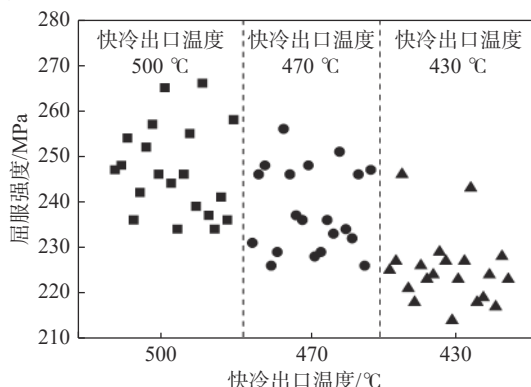


图5 不同快冷出口温度试样屈服强度分布

Fig. 5 The yield strength of cold rolled sheets with different fast cooling outlet temperatures

三种快冷出口温度生产的连续退火 SPCC 屈服强度分布如表 2 所示。从统计数据上看,快冷出口温度为 500、470、430 °C 的试验卷屈服强度分别主要分布在 230 ~ 260、220 ~ 250、210 ~ 230 MPa 区间范围内,平均屈服强度分别为 247、238、225 MPa。随着快冷出口温度从 500 °C 降低至 430 °C,试验卷平均屈服强度降低了 22 MPa。

表 2 不同快冷出口温度试样屈服强度分布

Table 2 The yield strength distribution of cold rolled sheets with different fast cooling outlet temperatures

强度范围/MPa	各强度区间占比/%		
	快冷出口 温度430 °C	快冷出口 温度470 °C	快冷出口 温度500 °C
(210, 220]	25	0	0
(220, 230]	65	25	0
(230, 240]	0	35	30
(240, 250]	10	30	35
(250, 260]	0	10	25
(260, 270]	0	0	10

3 分析与讨论

由于碳氮原子气团(柯氏气团)阻止了位错的运动。柯氏气团的“钉扎”作用在再加工变形的过程中使塑性变形不易产生,必须将应力增大到某一定值后才能使位错摆脱柯氏气团,开始滑移运动,此时对应着拉伸曲线上出现的明显的上屈服点;当位错一旦摆脱柯氏气团的束缚,应力不增加也能继续运

动,拉伸曲线上就出现了屈服平台^[5]。根据这个机理,避免带钢产生屈服平台通常有两种办法:①使钢中的固溶 C、N 元素以化合物的形式充分析出;②增大平整延伸率至超过屈服平台部分,使位错摆脱柯氏气团的钉扎。然而过大的平整延伸率会导致带钢强度较高、延伸较低,影响带钢的使用,因此,避免带钢出现屈服平台的最合理办法是采用方法①,即通过各种手段促使钢中固溶 C、N 原子充分析出。

冷轧板进行退火的目的是使其组织软化和再结晶。连续退火工艺分为加热、均热、缓冷、快冷、过时效、终冷和水淬七个部分。在退火阶段的加热、均热和缓冷过程中,主要发生的是冷轧变形组织的回复、再结晶及晶粒长大,形成对带钢成形性能很重要的组织和织构特征。而对快冷段及过时效段而言,主要作用是通过快冷段快速冷却,使得进入过时效段前钢中 C 以过饱和状态存在,并在随后的过时效段内大量细小弥散析出。由于这两段温度较低,晶粒长大动力较小,晶粒组织不会发生明显的变化,快冷出口温度对带钢晶粒尺寸无明显影响(见图 3),主要发生的是钢中固溶碳含量的降低及碳化物的析出^[11]。快冷段出口温度越低、冷却速度越大,快冷段内沿晶界析出的碳化物就越少,进入过时效段前钢中 C 的过饱和程度就越高,过时效段内碳化物析出动力越大,析出的细小晶内碳化物就会越多,最终显著降低钢中固溶碳含量,并降低屈服强度及屈服平台产生几率^[11-12]。

4 结论

1)连续退火 SPCC 金相组织由等轴的铁素体晶粒及晶界处和晶粒内的碳化物组成,快冷出口温度对晶粒尺寸影响较小,对晶界处和晶粒内碳化物的析出有明显的影。随着快冷出口温度的降低,晶界处碳化物数量减少,晶粒内碳化物数量增多。

2)降低快冷出口温度能够有效降低连续退火 SPCC 产品出现屈服平台的比例,并降低屈服强度。随着快冷出口温度从 500 °C 降低至 430 °C,屈服平台比例从 55% 降低至 10%,平均屈服强度降低了 22 MPa。

参考文献

- [1] Tang Xi, Li Tengfei, Li Tingting, *et al.* Influence factors on properties of SPCC cold rolled sheet after continuous annealing [J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(9): 60-44.

- (汤茜, 李腾飞, 李婷婷, 等. 连续退火 SPCC 冷轧薄板性能的影响因素 [J]. 金属热处理, 2013, 38(9): 60-64.)
- [2] Liu Jizhi, Feng Rui, Liu Yuai. Effect of recrystallization annealing process on microstructure and deep drawability of SPCC steel plate[J]. Shandong Metallurgy, 2018, 40(208): 39-41.
(刘吉志, 冯锐, 刘玉爱. 再结晶退火对 SPCC 钢板组织和深冲性能的影响 [J]. 山东冶金, 2018, 40(208): 39-41.)
- [3] Zhan Hua, Wu Wenlin, Wang Feisong. Effect of continuous annealing process on mechanical properties of low carbon Al-killed steel sheet[J]. Heat Treatment of Metals, 2009, 34(4): 88-90.
(詹华, 吴文林, 汪飞松. 连续退火工艺对低碳铝镇静钢性能的影响 [J]. 金属热处理, 2009, 34(4): 88-90.)
- [4] Liu Guangming, Teng Huaxiang, Liu Libin, *et al.* Effect of continuous annealing process on microstructure and properties of low carbon aluminum-killed steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2010, 35(5): 78-79.
(刘光明, 滕华湘, 刘李斌, 等. 连续退火工艺对低碳铝镇静钢组织性能的影响 [J]. 金属热处理, 2010, 35(5): 78-79.)
- [5] Zhang Hua, Jin Zili, Qi Meng, *et al.* Performance optimization for cold rolled SPCC with continuous annealing in Baotou steel[J]. Science and Technology of Baotou Steel, 2018, 44(5): 51-54.
(张华, 金自力, 齐蒙, 等. 包钢连续退火冷轧 SPCC 性能优化 [J]. 包钢科技, 2018, 44(5): 51-54.)
- [6] Sun Zhonghua, An Zhiguo, Xiong Ziliu, *et al.* Study about technology for cold rolling and continuous annealing of SPCC sheet[J]. Hebei Metallurgy, 2013(2): 1-7.
(孙中华, 安治国, 熊自柳, 等. SPCC 薄板冷轧及连续退火工艺研究 [J]. 河北冶金, 2013(2): 1-7.)
- [7] Zhang Shaohong, Zheng Zhigang, Li Xiujun. Continuous annealing process about SPCC products[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2010(2): 116-118.
(张少红, 郑志刚, 李秀军. SPCC 产品的连退工艺研究 [J]. 机械工程与自动化, 2010(2): 116-118.)
- [8] Tian Shizhang. Study on optimum proposal of continuous annealing production technology of cold rolled low carbon steel[J]. Metallurgy and Materials, 2019, 39(1): 86-87.
(田士张. 冷轧低碳钢连续退火生产工艺优化方案研究 [J]. 冶金与材料, 2019, 39(1): 86-87.)
- [9] Wang Xiaoyan, Xiao Lijun, Qiu Shengtao, *et al.* Effect of boron microalloying on mechanical properties of low carbon Al killed steel strip produced in CSP route [J]. China Metallurgy, 2006, 16(7): 27-31.
(王小燕, 肖丽俊, 仇圣桃, 等. 硼微合金化对 CSP 生产低碳铝镇静钢带性能的影响 [J]. 中国冶金, 2006, 16(7): 27-31.)
- [10] Li Guilan, Zhang Hongbo, Han Bing, *et al.* Influence of soluble Al on the microstructure and mechanical property of batch-annealed IF steel[J]. China Metallurgy, 2015, 25(11): 51-55.
(李桂兰, 张洪波, 韩冰, 等. 酸溶铝对罩退 IF 钢组织和性能的影响 [J]. 中国冶金, 2015, 25(11): 51-55.)
- [11] Chen Yinli. How many process factors affecting properties of micro-carbon aluminum-killed steel sheet[J]. Metal World, 2010(5): 16-19.
(陈银莉. 哪些因素影响了微碳铝镇静钢的性能 [J]. 金属世界, 2010(5): 16-19.)
- [12] Yang Yue, Li Ming, Zhang Longzhu, *et al.* Analysis and optimization of continuous annealing process on SPCC production[J]. Hangang Technology, 2012(1): 4-5.
(杨跃, 李明, 张龙柱, 等. SPCC 连续退火工艺的分析 and 优化 [J]. 邯钢科技, 2012(1): 4-5.)

编辑 邓淑惠