

洁净度和控轧控冷工艺对 SCM435 热轧盘条塑性指标的影响

沈奎¹ 麻晗¹ 王世芳¹ 陈爱荣²

(沙钢集团 1 钢铁研究院; 2 润忠高线厂, 苏州 215625)

摘要 试验结果得出中间包和结晶器卷渣形成的尺寸 50~60 μm 大型铝酸钙夹杂物和贝氏体相变时间不足形成的 8%~10% 马氏体是 SCM435 钢(∕% : 0.34~0.35C, 0.98~1.00Cr, 0.19~0.21Mo) Φ12 mm 热轧盘条塑性指标低的主要原因。通过(1)延长 LF 精炼软搅拌时间, 采用保护式浇铸和钢包下渣检测控制系统, 稳定拉速以减少卷渣和大型夹杂物;(2)改善控冷工艺, 减少了马氏体含量, 使热轧盘条的伸长率和断面收缩率分别从原先的 3.9%~10.0% 和 4.7%~39.3% 提高到 10.6%~11.0% 和 39.9%~43.6%。

关键词 冷镦钢 SCM435 热轧盘条 洁净度 马氏体 塑性

Effect of Cleanliness and Thermo-Mechanical Process on Plasticity Index of Hot Rolled Steel SCM435 Coil

Shen Kui¹, Ma Han¹, Wang Shifang¹ and Chen Airong²

(1 Research Institute of Iron and Steel; 2 Runzhong Wire and Rod Plant, Shasteel Group, Suzhou 215625)

Abstract Experimental results obtained that the main causes of low plasticity indexes of Φ12 mm hot rolled coil of steel SCM435 (∕% : 0.34~0.35C, 0.98~1.00Cr, 0.19~0.21Mo) are size 50~60 μm large calcium aluminate inclusion formed by slag entrapment in tundish and mold, and formed 8%~10% martensite due to lack of enough time for bainite phase transformation. With (a) extending LF refining soft stirring time, using shielding casting and slag detecting system, stabilizing cast speed to reduce slag entrapment and larger inclusions; and (b) improving control cooling process to reduce martensite content in structure, the elongation and reduction of area of hot rolled coil increase respectively from original 3.9%~10.0% and 4.7%~39.3% to 10.6%~11.0% and 39.9%~43.6%.

Material Index Cold Heading Steel SCM435, Hot Rolled Coil, Cleanliness, Martensite, Plasticity

SCM435 冷镦钢主要用于制造高级别的螺栓、螺母等紧固件^[1-2], 一般由热轧盘条经软化退火、一次拉拔、球化退火、二次拉拔、冷镦成形及调质处理等工艺制成, 该产品对盘条的表面质量、纯净度、化学成分等均有很高要求。在对钢厂生产的 Φ12 mm 的 SCM435 热轧盘条进行拉伸试验时, 多次发生盘条异常断裂、断面收缩率明显低于技术指标的现象。

采用 Instron Model 5585H 250KN 的拉伸试验机、岛津 PDA-7000 直读光谱仪、Zeiss 光学显微镜、FEI 公司的 Quanta 3D FEG 场发射扫描电子显微镜, 对异常拉伸断裂样品进行分析, 找出异常断裂原因, 调整生产工艺, 提高了产品塑性。

1 生产工艺及过程控制

SCM435 热轧盘条的生产工艺为: 100 t 电弧炉 (EAF)→LF 精炼→VD→6 机 6 流连铸 150 mm × 150 mm 小方坯→方坯探伤检测、全修磨→高线无扭控轧→减定径机组→延迟型斯太尔摩控制冷却。

改善前冶炼工艺: 使用普通废钢 (20%~30%), 采用热装铁水工艺; 电弧炉出钢过程中留钢

量 5% 左右, 严禁出钢下渣; 出钢过程中加 1.5 kg/t 铝锭脱氧, 精炼过程再补加 1.2~1.5 kg/t 的铝进一步脱氧。精炼终渣碱度控制在 2~3; 精炼时间 ≥ 32 min, 白渣时间 ≥ 15 min。VD 真空处理 150 Pa ≥ 12 min, 软搅拌 8~10 min。全程保护浇铸, 防止吸氮和二次氧化; 稳定拉速和过热度, 减少因液面波动而造成的卷渣; 采用高碳冷镦钢结晶器保护渣, 二冷区比水量控制在 0.9 L/kg, 调节电磁搅拌位置和电流, 减少连铸坯表面缺陷和中心偏析。

改善前轧制工艺: 精轧出口温度 ≤ 1 020 °C, 吐丝温度 (850 ± 10) °C, 风机关闭, 第 1 段和第 10 段保温罩开启, 斯太尔摩辊道速度为 0.33 m/s。

改善后冶炼工艺: 选用优质废钢 (20%~30%), 采用热装铁水工艺; 加强泡沫渣操作, 减少电弧引起的增氮; 电弧炉出钢留钢量 10%, 严禁出钢下渣; 电弧炉出钢时添加 2.4 kg/t 铝脱氧, 精炼期间补充少量铝进一步脱氧。LF 白渣时间 ≥ 25 min。VD 100 Pa ≥ 15 min; 脱气后进行钙处理, T[Ca] 和 T[Al] 比值控制在 0.10~0.14, 软搅拌 12~15 min。连铸过程全程保护浇铸, 采用灵敏度较高的全自动

钢包下渣检测控制系统;优化结晶器保护渣熔点、黏度等参数,将熔点由1 121 ℃调整为1 072 ℃,改善了结晶器与铸坯之间的润滑效果,促使了夹杂物被充分地吸附。

改善后轧制工艺:精轧出口温度 $\leq 1\ 020$ ℃,吐丝温度 (850 ± 10) ℃,根据 SCM435 的 CCT 和 TTT 曲线,结合现场条件,风机全部关闭,保温罩全部关闭,斯太尔摩辊道速度 0.20 m/s,使奥氏体有足够的时间转变为珠光体或贝氏体组织。

2 实验结果和分析讨论

2.1 工艺改善前结果分析和讨论

2.1.1 化学成分和力学性能

对塑性指标不足的盘条样品进行直读光谱化学成分分析,结果如表 1 所示,成分未出现异常,符合日本标准 JIS G4053-2003 对 SCM435 的成分要求。

4 个拉伸试样的力学性能如表 2 所示。试样 1、2 和 3 的断面收缩率和伸长率明显地低于技术要求(断面收缩率 $\geq 35\%$,伸长率 $\geq 9\%$)。试样 4 的性能指标正常。

2.1.2 拉伸断口

试样 1 断口没有明显的缩颈,无塑性区,为典型

的脆性断裂(图 1a)。由图 2(a)可知,断口起源的位置为呈鱼眼状的亮斑区,“鱼眼”的中心区是圆形凹坑,且坑内伴随着尺寸约为 60 μm 的非金属夹杂,能谱分析表明,该夹杂物主要是铝酸钙($\text{CaO} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$)和少量 MgO。同时可以看出凹坑的周围亮斑区为准解理断裂,并且存在很多拉伸裂纹,如图 2(a2)箭头所示。“鱼眼”部位外的放射线结构区呈现为解理断裂。由形貌判断,试样 1 属于典型的氢致脆化断裂^[3],大型夹杂物是断裂的源头。

试样 2 整个断面为脆性断裂,其断裂形式与试样 1 类似,断裂起源于中心大约 55 μm 的圆形非金属夹杂处,中心的白亮区域处为准解理断裂,但与试样 1“鱼眼”相比,该区域断口更加平整,并未发现拉伸裂纹,周围放射区为解理断裂。对中心圆形夹杂物的能谱分析表明,该夹杂主要是铝酸钙($\text{CaO} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$)和少量 MgO。

试样 3 断口存在一定的纤维区,中间一圈为放射区,最外圈为剪切唇,是拉伸试样典型的断口类型,如图 1(c)。断口起源于中心已脱落的夹杂物处,且为准解理断裂,中心周围存在大量的韧窝区,放射区面积较试样 2 要小很多,为解理断裂特征。

试样 4 正常拉伸断口,有明显的缩颈,为塑性断裂,如图 1(d)。断裂起源于已脱落的非金属夹杂处,且为准解理断裂,其它区域形貌为延性韧窝特征,表现出良好的塑性,如图 2(d)。

异常断裂与断口处大型夹杂物关系密切^[4]。夹杂物来源主要有:脱氧产物、渣的卷入、运输过程中的二次氧化等。但是氧化物夹杂的形成和耐火材料的关系不太大^[5]。铝酸盐夹杂被认为危害最大,其次是钙铝酸盐,这些夹杂物能反映出所采用的工艺技术,尤其是脱氧剂和结晶器保护渣。外来夹杂物大多数为复合氧化物夹杂,一般多来自钢渣界面湍流形成的卷渣,在炼钢温度下,外来夹杂物多为液态球形夹杂物,尺寸在 10~300 μm 。当浇铸之前发

表 1 异常拉伸断裂 SCM435 钢盘条的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of abnormal tensile fracture steel SCM435 coil / %

C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
0.34 ~ 0.35	0.20 ~ 0.23	0.73 ~ 0.75	0.98 ~ 1.00	0.19 ~ 0.21	≤ 0.015	≤ 0.010

表 2 异常和正常拉伸断裂 SCM435 钢盘条的力学性能
Table 2 Mechanical properties of abnormal and normal tensile fracture steel SCM435 coil

试样编号	抗拉强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%
1	1 045.6	3.9	4.7
2	1 043.3	8.4	19.0
3	1 038.7	9.0	23.8
4	977.6	10.0	39.3

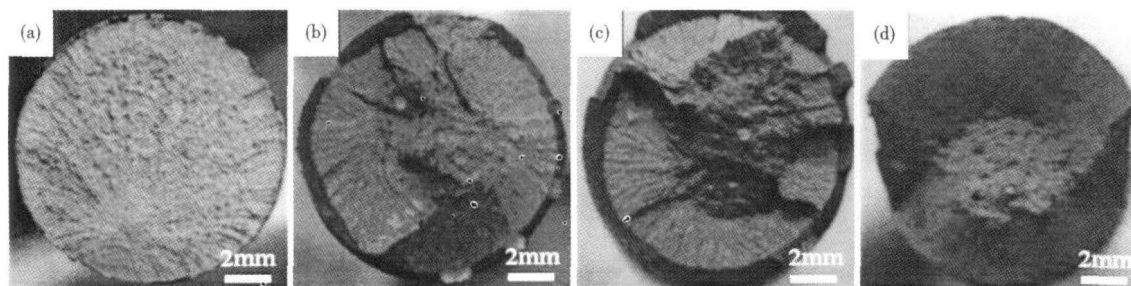


图 1 SCM435 钢盘条拉伸断口形貌:异常试样 1(a);2(b);3(c);正常试样 4(d)

Fig. 1 Morphology of tensile fracture of steel SCM435 coil; abnormal sample 1 (a); 2 (b); 3 (c) and normal sample 4 (d)

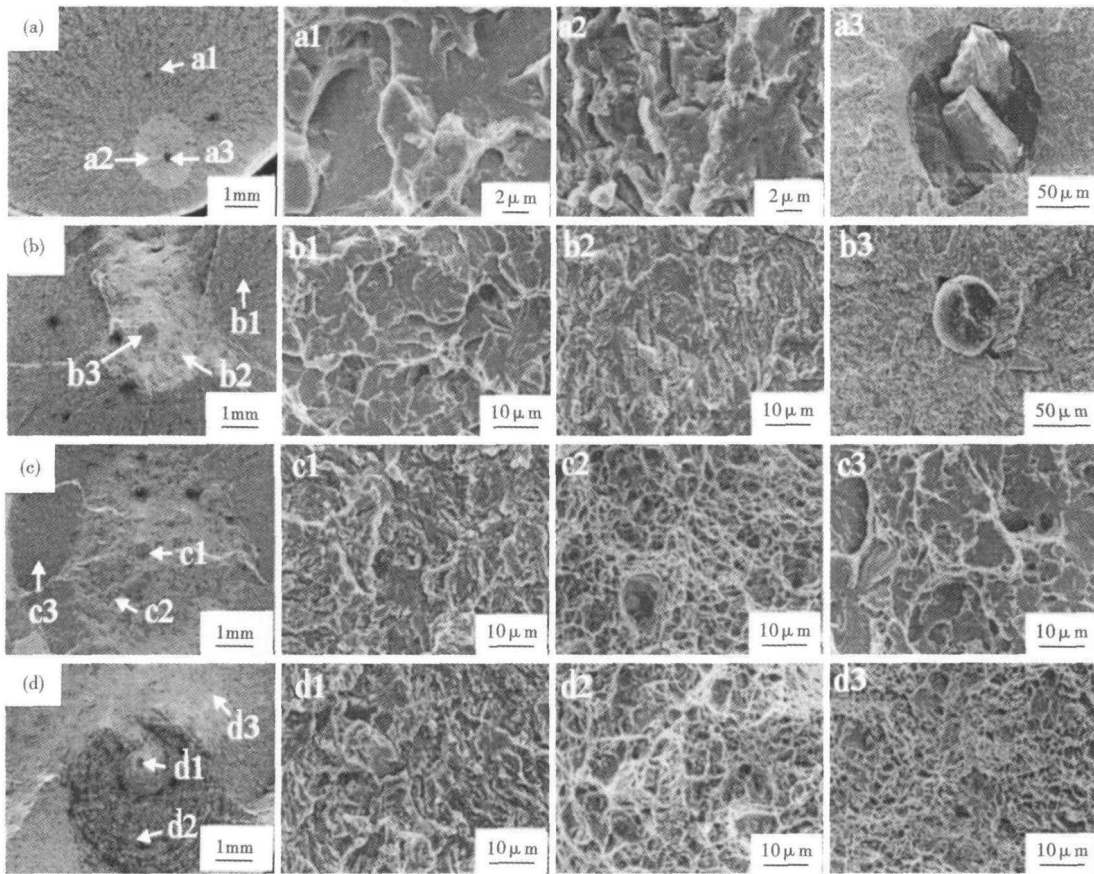


图2 SCM435 钢盘条拉伸断口的微观形貌:异常试样1(a);2(b);3(c);正常试样4(d)

Fig.2 Micro-morphology of tensile fracture of steel SCM435 coil; abnormal sample 1 (a); 2 (b); 3 (c) and normal sample 4 (d)

生卷渣时,夹杂物没有足够的时间从钢液中上浮去除,最终会在铸坯中形成大颗粒夹杂物。为了提高盘条塑性,必须提高冶炼过程钢水的纯净度,降低大型夹杂物对盘条塑性指标产生不利的影响。

2.1.3 拉伸试样的组织

图3是拉伸试样的金相组织图,发现断口处的组织为贝氏体和马氏体,其中马氏体的含量较高,试样1中马氏体的含量高达10%,试样2、3中的马氏体含量亦可达8%,与试样1、2、3相比,正常拉伸断裂试样4中的马氏体含量约3%。大量马氏体的出

现使得盘条的脆性增加,塑性降低,从而导致盘条强度的上升和断面收缩率的下降。为了消除马氏体,提高盘条的塑性,需要改进 stelmor 控冷工艺。

2.2 工艺改善后结果分析和讨论

2.2.1 盘条的力学性能

工艺改善后盘条力学性能如表3所示,检测的样品均满足技术指标要求(断面收缩率 $\geq 35\%$,伸长率 $\geq 9\%$)。

2.2.2 盘条夹杂物

图4为工艺改善前后的夹杂物分布以及利用极

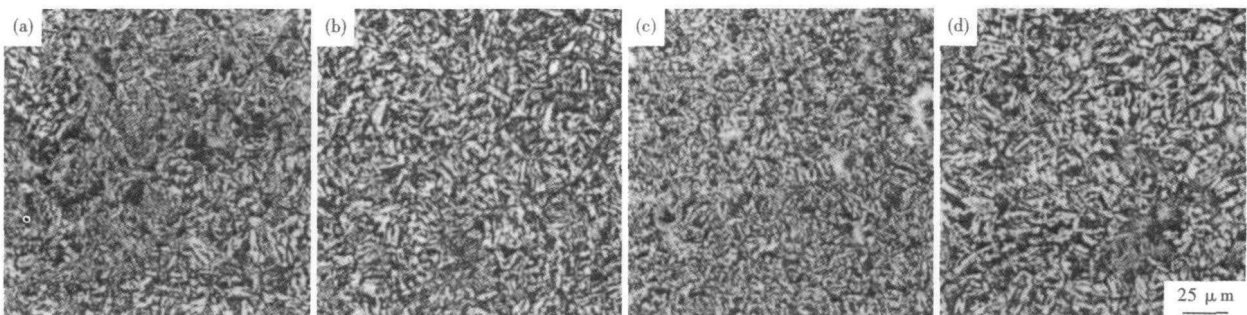


图3 SCM435 钢盘条拉伸断口的组织形貌:异常试样1(a);2(b);3(c);正常试样4(d)

Fig.3 Morphology of structure at tensile fracture of steel SCM435 coil; abnormal sample 1 (a); 2 (b); 3 (c) and normal sample 4 (d)

表 3 工艺改善后 SCM435 钢盘条的力学性能
Table 3 Mechanical properties of steel SCM435 coil produced by improved process

样品编号	抗拉强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%
I	961.2	10.6	43.6
II	982.8	11.0	39.9

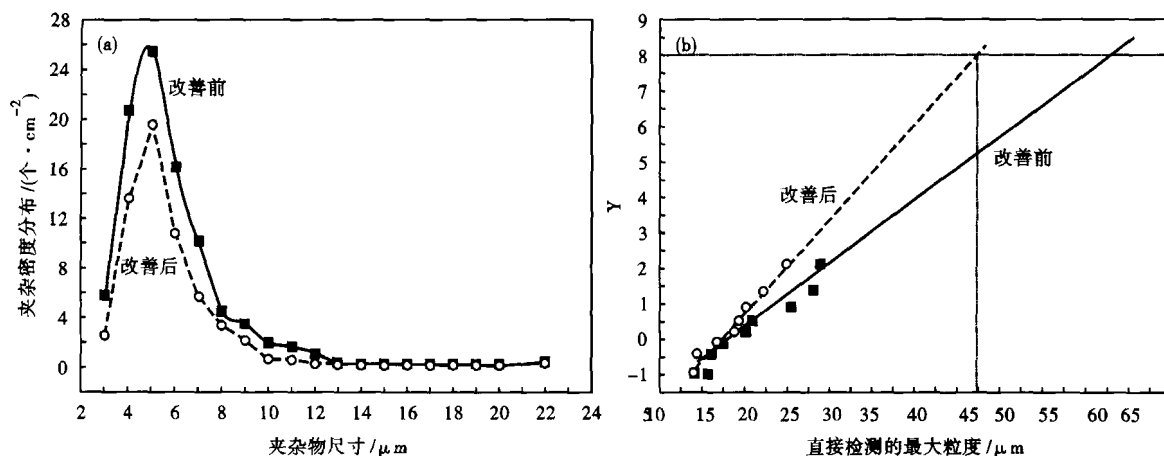


图 4 工艺改善前后钢中夹杂物分布和极值统计

Fig. 4 Distribution and statistic extreme of inclusion before and after improvement of process in steel

本思想是当采集的数据点服从某一分布时,其最大和最小值服从一个特定的分布^[6-7]。

2.2.3 盘条气体含量统计结果

统计得出工艺改善前成品中[O]和[N]分别为 $(10.7 \sim 28.4) \times 10^{-6}$ 和 $(88.7 \sim 93.97) \times 10^{-6}$,工艺改善后[O]和[N]分别为 $(7.5 \sim 14.1) \times 10^{-6}$ 和 $(44.4 \sim 59.6) \times 10^{-6}$,约为改善前的1/2左右。

2.2.4 盘条热轧组织

热轧盘条中存在大量的马氏体组织,这对SCM435的拉伸性能很不利。通过上述有效控轧控冷的措施,现场测温表明,出现异常断裂的盘条在搭接处的平均冷却速度为 $0.76 \text{ } ^\circ\text{C/s}$,改进后,搭接处的平均冷却速度降至 $0.31 \text{ } ^\circ\text{C/s}$,马氏体含量由改善前的6%下降到3%,很好地解决了塑性不足的问题,提高了产品质量。

3 结论

(1) 盘条出现异常断口的主要原因是大型外来夹杂物和马氏体组织,大型外来夹杂物是裂纹萌生的起点;大量的马氏体组织使盘条脆化,造成部分盘条的断面收缩率和伸长率不足。

(2) 通过采用钢包下渣检测控制系统、稳定拉速、全程保护浇铸及优化结晶器保护渣成分等措施,

值统计法推算的最大夹杂物尺寸分布图,由图4(a)可以看出,工艺改善后在单位面积上的夹杂物数量有所减少,夹杂物粒径主要分布在 $4.5 \sim 5.5 \text{ } \mu\text{m}$,尺寸在 $15 \text{ } \mu\text{m}$ 以上的夹杂物数量很少,图4(b)为极值统计法推测的最大夹杂物尺寸,极值统计理论的基

减少外来大型夹杂物,提高了钢的洁净度。

(3) 改进了盘条的控冷工艺,延长其在线珠光体和贝氏体相变温度区间的停留时间,使平均冷却速度由 $0.76 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ 下降至 $0.31 \text{ } ^\circ\text{C/s}$,使马氏体含量由6%下降至3%,解决了盘条塑性不足的问题。

参考文献

- 雍治文. SCM435 合金冷锻线材研制[J]. 金属制品, 2007, 33(12): 6.
- 张永军, 韩静涛, 孔俊其, 等. SCM435 高强冷锻钢热轧过程的再结晶行为[J]. 特殊钢, 2010, 31(1): 12-13.
- 庄东汉. 材料失效分析[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2009: 306-311.
- 惠卫军, 翁宇庆, 董瀚. 高强度紧固件[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 6-11.
- Stuart Millman. 洁净钢—洁净钢生产工艺技术[M]. 王新华, 等译. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- 张继明, 张建锋, 杨振国, 等. 高强度钢中最大夹杂物的尺寸估计与疲劳强度预测[J]. 金属学报, 2004, 40(8): 846.
- Atkinson H V, Shi G. Characterization of Inclusion in Clean Steel: a Review Including the Statistics of Extreme Method. Progress in Materials Science, 2003, 48: 457-520.

沈奎(1986-), 男, 硕士, 助理研究员, 北京科技大学毕业, 钢铁材料研究。

收稿日期: 2012-03-23