

· 工艺技术 ·

改善低碳高硫易切削钢切削性能的工艺实践

曹理强 贺莹莹 李鸿友 麻 晗
(江苏省(沙钢)钢铁研究院, 张家港 215625)

摘 要 在分析影响易切削钢 AISI 1215 切削性能因素的基础上, 通过将钢中的碳含量从 0.094% 降至 0.072%, LF 精炼用硅锰脱氧, 控制 LF 终点游离 [O] $60 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$, 140 mm × 140 mm 坯结晶器水流量从 1 900 ~ 2 050 L/min 降至 1 700 ~ 1 850 L/min, 二冷区比水量由 1.15 L/kg 降至 0.90 L/kg, 优化轧制工艺使硫化物平均直径由原来的 2.09 μm 增加至 3.11 μm 等工艺措施, 使低碳高硫 (0.072% C, 0.365% S) 易切削钢盘条的切削性能明显提高, 零件表面粗糙度为 2 μm 左右, 满足用户要求。

关键词 低碳高硫易切削钢 轧制工艺 切削性能

Process Practice of Improvement on Cutting Quality of Low-Carbon High-Sulphur Free-Cutting Steel

Cao Liqiang, He Yingying, Li Hongyou and Ma Han
(Institute of Research of Iron & Steel, Sha Steel, Jiangsu Province, Zhangjiagang 215625)

Abstract Based on analysis of factors on cutting quality of free-cutting steel AISI 1215, with using the process measures including decreasing carbon content in steel from 0.094% to 0.072%, during LF refining using silicon-manganese deoxidizing addition and controlling LF refining end active oxygen content $60 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$, decreasing 140 mm × 140 mm billet mold water rate from 1 900 ~ 2 050 L/min to 1 700 ~ 1 850 L/min, decreasing secondary cooling water ratio from 1.15 L/kg to 0.90 L/kg and optimizing rolling process to increase the average diameter of sulphide in steel from original 2.09 μm to 3.11 μm , the cutting quality of coil of low-carbon high-sulphur (0.072% C, 0.365% S) free-cutting steel increases markedly and the surface roughness of parts is about 2 μm to meet the requirement of user.

Material Index Low-Carbon High-Sulphur Free-Cutting Steel, Rolling Process, Cutting Quality

钢厂生产易切削钢 AISI 1215 的工艺流程为: 100 t 电弧炉 → 100 t LF 精炼 → 140 mm × 140 mm 小方坯连铸 → 高线无扭轧制 → 斯太尔摩控冷 → 集卷 → 取样检验 → 包装入库。该钢厂试生产的易切削钢 AISI 1215 经客户使用后主要存在切削较硬、刀具磨损严重、加工成的零件表面粗糙等问题。本文针对影响易切削钢 AISI 1215 的切削性能的因素, 对生产工艺进行优化以提升产品质量。

1 切削性能影响因素

易切削钢中硫化物的尺寸、形态及分布影响其切削性能, 其中球形或纺锤形的硫化物在切削加工时沿着塑性流动层延伸成薄面, 起到润滑效果, 并且使塑性流动层容易发生剪断而利于切削, 而线状硫化物对切削性能的改善作用较小^[1-2]。为了使钢材具有更好的切削性能, 应使钢中硫化物呈球形或纺锤形。

另外, 易切削钢的硬度对切削性能有着重要影响: 硬度过高会使材料加工不动或产生让刀, 加快刀具的磨损速度; 硬度过低会造成粘刀, 加工过程中材

料自身易在切削力的作用下产生变形, 导致成品表面光洁度低。

2 冶炼工艺优化

2.1 碳含量范围控制

碳含量过高时, 易切削钢中珠光体含量增加, 导致刀具磨损严重; 碳含量过低时, 易切削钢中珠光体含量减少, 切削力降低, 但切削时容易粘刀、断屑困难, 刀具热磨损严重。为了获得良好的切削性能, 易切削钢成品碳含量控制在 0.06% ~ 0.08% 较合适。

试生产易切削钢时电弧炉终点碳含量控制在 0.05% ~ 0.07%, 由于脱氧工艺不当、精炼时间较长, 精炼过程中增碳严重, 成品碳含量达到 0.08% ~ 0.10%。为了保证成品碳含量在 0.06% ~ 0.08%, 将电弧炉终点碳含量控制在 0.03% ~ 0.05%, 精炼过程中不采用电石脱氧, 并控制精炼时间不超过 40 min。优化冶炼工艺后冶炼 5 炉易切削钢, 其碳含量变化如图 1 所示, 成品碳含量均在 0.06% ~ 0.08%。

2.2 LF 脱氧工艺

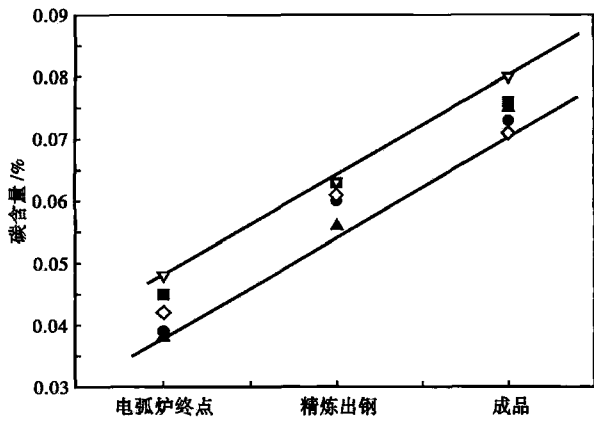


图 1 电弧炉终点、精炼出钢和成品钢中碳含量变化图
Fig. 1 Diagram of change of carbon content in steel from EAF end, LF tapping to products

根据 SIMS 分类^[3-4], 钢中硫化物可分为 3 类: I 类为球形, 无规则分布, 通常为多相, 常与氧化物结合, 对切削性能有利; II 类为微小条形, 沿晶界析出, 对切削性能有一定的改善作用; III 类为块状无规则分布, 呈单相、易变形, 对切削性能不利。为了充分发挥硫化物的作用, 必须保证钢中硫化物为 I 类。氧含量对硫化物的形态、大小及变形能力有着至关重要的影响。研究表明, 当氧含量较高时, 在早期凝固过程中, 钢中形成了大量的 Mn-Fe-O 系氧化物颗粒, 这些氧化物构成硫化物结晶的异质核心, 促进硫化物在高温时析出, 有利于形成 I 类硫化物^[5-6]。

为了得到合适的氧含量范围, 对比了不同脱氧工艺下铸坯中硫化物的形态。当全氧含量在 $120 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$, 铸坯中均形成了 I 类硫化物。运用图像分析软件 ImageJ 统计硫化物的当量直径, 结果如图 2(a) 所示。当氧含量从 120×10^{-6} 增加到 150×10^{-6} 时, 硫化物尺寸明显增大, 距铸坯边缘 45 mm 处当量直径由 $4.08 \mu\text{m}$ 增加至 $4.66 \mu\text{m}$ 。继续增大氧含量至 200×10^{-6} 时, 硫化物尺寸变化不明显。可以看出, 增加全氧含量有利于得到大尺寸的 I 类硫化物。但是, 氧含量过高时会增加连铸过程的难度, 造成铸坯表面出现皮下气泡和针孔, 降低铸坯表面质量。由上述分析可知, 钢中全氧含量控制在 150×10^{-6} 左右较合适。

为此, 对易切削钢 AISI 1215 的脱氧工艺进行优化: 严禁使用 Al 脱氧, 采用硅锰合金进行脱

氧, LF 出钢前游离氧含量控制在 $60 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$ 。

2.3 连铸冷却工艺

钢液冷却速度对硫化物尺寸有很大的影响, 随着冷却速度增大, 硫化物的尺寸减小, 分布也有所改善^[7]。I 类和 II 类硫化物的平均直径与冷却速度的关系如下^[8]:

$$d_I = 1.39 \nu^{-30} \quad (1)$$

$$d_{II} = 2.9 \nu^{-22} \quad (2)$$

式中: ν - 冷却速度; d_I - I 类硫化物平均直径; d_{II} - II 类硫化物的平均直径。可以看出, 硫化物尺寸与冷却速度呈反比, 随着冷却速度增加, 硫化物颗粒长大时间减少。另外, 过低的温度将导致 Mn、S 扩散系数降低, 不利于硫化物长大。

通过优化连铸冷却工艺, 降低冷却强度, 可以有效提高铸坯中硫化物尺寸, 同时使铸坯在通过拉矫区时避开热脆区, 降低铸坯表面裂纹的产生。将结晶器水流量由 $1900 \sim 2050 \text{ L/min}$ 降低至 $1700 \sim 1850 \text{ L/min}$, 减缓结晶器传热, 铸坯激冷层厚度明显减少, 表层极细小的硫化物所占比例明显降低。将二冷区比水量由 1.15 L/kg 降低至 0.90 L/kg , 减缓铸坯冷却, 铸坯中硫化物尺寸明显增大, 距铸坯边缘 45 mm 处当量直径由 $4.6 \mu\text{m}$ 增加至 $5.5 \mu\text{m}$, 如图 2(b) 所示。

3 轧制工艺优化

当铸坯在高温下加热时, 钢中 FeS 会向 MnS 转变, 并且随着加热温度和保温时间增加, FeS 向 MnS 转变越充分, 有利于提高硫化物的熔点, 降低钢的热脆性。但是, 在高温下轧制时硫化锰极易变形, 沿着轧制方向伸长, 使钢的横向力学性能明显降低, 并对

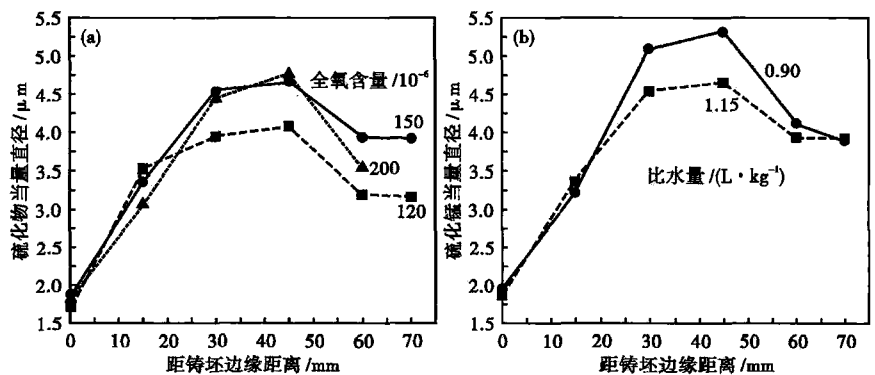


图 2 全氧含量 (a) 和二冷区比水量 (b) 对低碳高硫易切削钢铸坯硫化物尺寸的影响
Fig. 2 Effect of total oxygen content (a) and secondary cooling water ratio (b) on sulfide size in cast billet of low-carbon high-sulphur free-cutting steel

表1 优化前后低碳高硫易切削钢的轧制工艺

Table 1 Rolling process of low-carbon high-sulphur free-cutting steel before and after process optimization

工艺	均热段温度/℃	保温时间/h	开轧温度/℃	终轧温度/℃	吐丝温度/℃
优化前	1 170 ~ 1 210	0.5	1 080 ~ 1 130	1 020 ~ 1 130	880 ± 10
优化后	1 190 ~ 1 230	≥1	1 130 ~ 1 170	1 050 ~ 1 150	880 ± 10

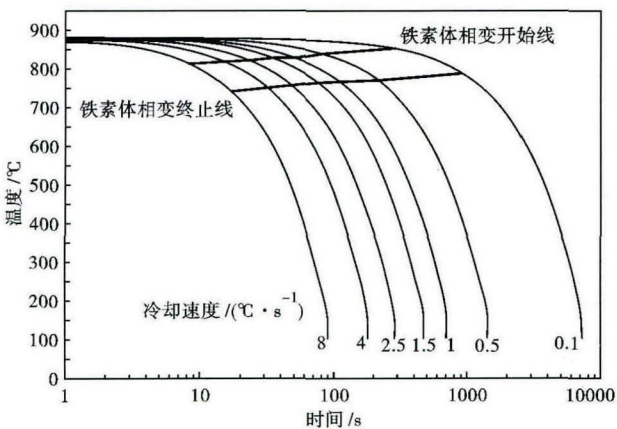


图3 低碳高硫(0.06%~0.08% C-0.36%~0.38% S)易切削钢的连续冷却转变(CCT)曲线

Fig. 3 Continuous cooling transformation (CCT) curves of low-carbon high-sulphur (0.06% ~ 0.08% C-0.36% ~ 0.38% S) free-cutting steel

切削性能不利。在1 000~1 150℃时 MnS 的相对塑性较低,在轧制过程中变形较小,有利于使盘条中 MnS 呈纺锤形^[9]。综合以上两方面因素,对易切削钢 AISI 1215 的轧制工艺进行优化,其参数如表 1 所述。

斯太尔摩线冷却速度过快,易切削钢中可能会产生马氏体组织,导致硬度过高;而冷却速度过慢会引起晶粒粗大,导致硬度过低。为了获得良好的切削性能,要求易切削钢 AISI 1215 的组织为铁素体+珠光体,硬度为 120~130 HV。为探讨冷却速度对易切削钢组织的影响,开展了 Gleeble 试验测定其 CCT 曲线,结果如图 3 所示。试样从 880℃ 以 0.1~8℃/s 冷却时均为铁素体+珠光体组织,这是由于钢中大量 Mn 与 S 相结合形成 MnS,固溶在基体中的 Mn 较少,导致其淬透性很低。因此,将斯太尔摩线冷却速度由 0.5℃/s 增加至 0.7℃/s,适当提高易切削钢 AISI 1215 的硬度。

4 效果

通过对易切削钢冶炼工艺进行合理优化,其成分得到合理控制,碳含量由 0.094% 降低至 0.072%,全氧含量由 0.012% 增加至 0.015%,优化前后的成分如表 2 所示。

工艺优化前后易切削钢均为铁素体+球光体组织(图 4),晶粒度均为 9~10 级,优化后珠光体含量由 7% 以上降低至 6% 左右。

由图 5 可以看出,优化前盘条中弥散分布着大量的条状硫化物,且硫化物尺寸较小,而优化后盘条中硫化物的尺寸、分布及形态均得到明显改善。对硫化物尺寸进行统计,结果如表 3 所示,优化后的硫化物平均直径由 2.09 μm 增加至 3.11 μm,长宽比 ≤6 的硫化物所占比例由 26% 增加至 42%。

通过精确控制钢中碳含量以及优化轧制工艺,易切削钢盘条的硬度为 120~130 HV,经拉拔后硬度为 190~200 HV,与优化前相比加工硬化率明显降低,其力学性能如表 4 所示。

表2 优化前后低碳高硫易切削钢的分析成分/%

Table 2 Analysis of low-carbon high-sulphur free-cutting steel before and after process optimization / %

工艺	C	Si	Mn	P	S	T[O]
优化前	0.094	0.014	1.26	0.045	0.376	0.012
优化后	0.072	0.006	1.29	0.053	0.365	0.015

表3 优化前后 AISI 1215 盘条中硫化物尺寸统计

Table 3 Statistics of size of sulfides in AISI 1215 coil before and after process optimization

工艺	平均直径/ μm	硫化物个数/ (个·mm ⁻²)	面积占比/ %	长宽比≤6 的 硫化物占比/%
优化前	2.09	2 455	1.30	26
优化后	3.11	1 122	1.42	42

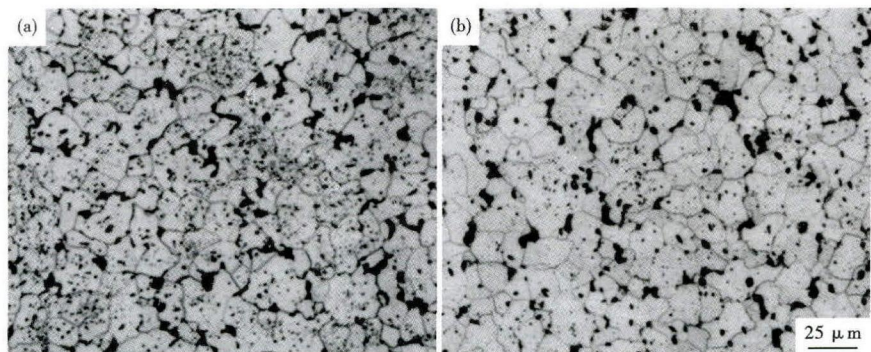


图4 优化前(a)(0.094% C, 0.376% S, 0.0120% T[O])和优化后(b)(0.072% C, 0.365% S, 0.0150% T[O])低碳高硫易切削钢的组织形貌

Fig. 4 Morphology of structure in low-carbon high-sulphur free-cutting steel before process optimization (a) (0.094% C, 0.376% S, 0.0120% T. O) and after process optimization (b) (0.072% C, 0.365% S, 0.0150% T. O)

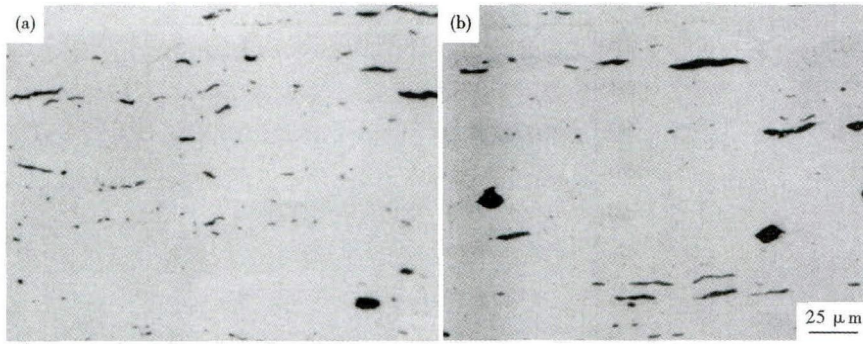


图 5 优化前(a)和优化后(b)低碳高硫易切削钢 Φ7 mm 盘条中硫化物形貌
Fig. 5 Morphology of sulphide in Φ7 mm coil of low-carbon high-sulphur free-cutting steel before process optimization (a) and after process optimization (b)

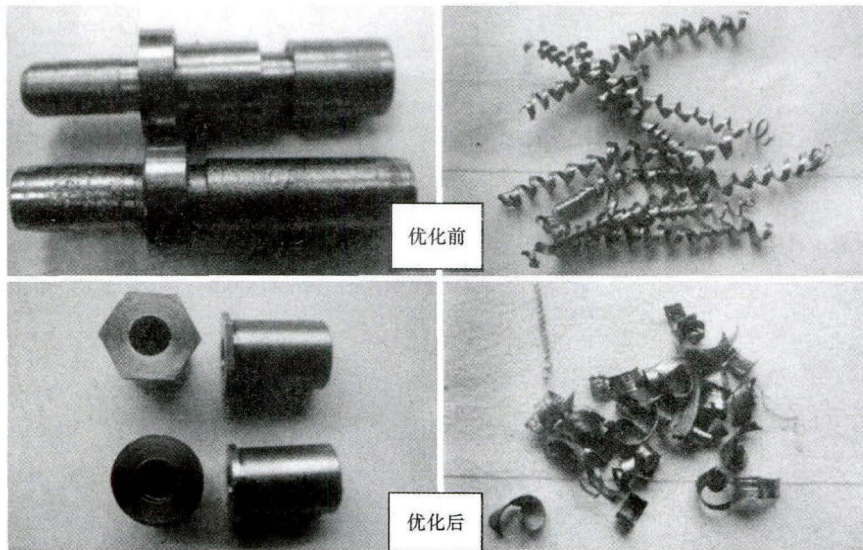


图 6 优化前(上)和优化后(下)低碳高硫易切削钢零件和切削形貌
Fig. 6 Morphology of parts and cutting scraps of low-carbon high-sulphur free-cutting steel before process optimization (upper) and after process optimization (lower)

表 4 优化前后低碳高硫易切削钢 Φ8 mm 盘条的力学性能和冷拔至 Φ7 mm 盘条的 HV 值

Table 4 Mechanical properties of Φ8 mm coil and HV value of cold-drawn Φ7 mm coil of low-carbon high-sulphur free-cutting steel before and after process optimization

工艺	抗拉强度/ MPa	断面收缩率/ %	硬度/ HV	拉拔至 Φ7 mm 硬度/HV
优化前	436	58	127	212
优化后	431	60	123	197

图 6 为加工成的零件及车屑对比,工艺优化前零件表面粗糙,很难断屑。工艺优化后的易切削钢由于硫化物形貌得到明显改善,钢材的切削性能得到较大提高,切削加工时断屑容易、排屑流畅,零件表面粗糙度 R_a 为 2 μm 左右,满足客户的使用要求。

5 结论

(1) 易切削钢 AISI 1215 中碳含量控制在

0.06% ~ 0.08%, 钢中组织为铁素体 + 珠光体, 珠光体含量为 6% 左右, 成品盘条的硬度为 120 ~ 130 HV。

(2) 控制精炼过程中游离氧在 $60 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$, 降低连铸过程中冷却强度, 铸坯中硫化物尺寸明显增大。

(3) 热轧时采用均热段温度 1 190 ~ 1 230 $^{\circ}\text{C}$, 开轧温度 1 130 ~ 1 170 $^{\circ}\text{C}$, 终轧温度 1 050 ~ 1 150 $^{\circ}\text{C}$, 斯太尔摩线采用 0.7 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的冷却速度, 成品盘条中的硫化物呈纺锤形, 切削性能得到明显改善。

参考文献

- [1] Van Vlack L. H. Correlation of Machinability with Inclusion Characteristic in Resulfurized Bessemer Steels [J]. Transaction ASM, 1953, 45: 741-746.
- [2] 王宏斌, 林腾昌, 段飞虎, 等. 低碳高硫易切削钢的切削性能研究[J]. 钢铁, 2011, 46(11): 82-85.
- [3] Sims C. E. The Nonmetallic Constituents of Steel [J]. Transactions AIME, 1959, 215(3): 367-393.
- [4] Matsui N, Hasegawa T, Fujiwara J. Effect of Sulfide Inclusion Morphology on Machinability and Tool Wear Mechanism in Low Carbon Free Cutting Steel [J]. Journal of the Japan Society of Precision Engineering, 2011, 77(3): 322-326.
- [5] 段飞虎, 朱荣, 林腾昌. 硫系易切削钢中氧含量对硫化物形成的影响[J]. 钢铁研究学报, 2012, 24(1): 36-43.
- [6] 夏云进, 王福明, 王金龙, 等. 氧含量对易切削钢中硫化物生成行为的影响[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(10): 1271-1276.
- [7] Mohla P, Beech J. Effect of Cooling Rate on the Morphology of Sulphide Inclusions [J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1969, 207: 177-184.
- [8] Takada H, Bessho I. Effect of Sulfur Content and Solidification Variables on Morphology and Distribution of Sulfide in Steel Ingots [J]. Transaction of Iron Steel Institute, 1978, 18(10): 564-573.
- [9] 娄德春, 崔昆, 吴晓春. 轧制工艺参数对硫化锰夹杂物相对塑性的影响[J]. 钢铁研究, 1996, 92(5): 26-28.

曹理强 (1988-), 男, 硕士 (华中科技大学), 助理研究员, 2010 年华中科技大学 (本科) 毕业, 棒线材新品种开发。
E-mail: cliqian881024@126.com

收稿日期: 2014-07-20