

氧含量对硫系易切削钢 Y1215 中硫化物的影响

屠兴圻, 苏振伟, 黄云飞, 左锦中

(中天钢铁集团有限公司技术中心, 常州 213011)

摘要: 研究了 T[O] 0.007 4% ~ 0.014 5% 对 Y1215 易切削钢 (C: 0.05 ~ 0.06, Si: 0.008 ~ 0.010, Mn: 1.26 ~ 1.27, P: 0.049 ~ 0.051, S: 0.37 ~ 0.39) 160 mm × 160 mm 铸坯中硫化物夹杂的分布、尺寸、形貌的影响和轧制 Φ8.0 mm 热轧盘条中硫化物的变形情况。结果表明: 随着氧含量增加, 铸坯中硫化物夹杂的尺寸和分布无明显区别, 但复合夹杂物数量明显增多, 复合型的夹杂物有以 MnS 为核心包裹或附着 MnO-SiO₂ 和以 MnO-SiO₂-Al₂O₃ 为核心附着 MnS 夹杂物。在轧制 Φ8.0 mm 的盘条中, T[O] 为 0.007 4% 时, 盘条中硫化物变形明显, 部分硫化物由于拉伸变形严重而碎断, 硫化物的长宽比为 23.2, T[O] 为 0.014 5% 时, 盘条中硫化物沿轧制方向变形小, 主要以纺锤形为主, 硫化物的长宽比为 3.4。为获得球形或纺锤形的硫化物, 冶炼时 Y1215 钢中的 T[O] 可控制在 0.009 5% ~ 0.014 5%。

关键词: Y1215 易切削钢; 氧含量; 硫化物

Effect of Oxygen Content on Sulfide in Sulfur Free Cutting Steel Y1215

Tu Xingkuang, Su Zhenwei, Huang Yunfei, Zuo Jingzhong

(Technology Center, Zenith Steel Group Co., Ltd., Changzhou 213011)

Abstract: The effect of oxygen content T[O] on distribution, size and morphology of sulfide inclusions in 160 mm × 160 mm cast billet of Y1215 free cutting steel and the deformation status of sulfide inclusions in hot rolling to Φ8.0 mm coil are studied. The results show that with the increase of oxygen content, the size and distribution of sulfide inclusions in cast billets have no obvious difference; but the complex inclusions increase including MnS as core covered or adhered by MnO-SiO₂ and MnO-SiO₂-Al₂O₃ as core adhered by MnS. In the Φ8.0 mm rolled coil rod, rod as T[O] 0.007 4%, the sulfide deformation in the wire rod is obvious, part of the sulfide is broken because of serious tensile deformation, the length-width ratio of sulfide is 23.2, as T[O] 0.014 5%, the sulfide deformation along the rolling direction is small, mainly in the spindle shape with length-width ratio 3.4. For Y1215 free cutting steel, in order to obtain spherical or spindle sulfide inclusions, the T[O] in smelting steel can be controlled between 0.009 5% and 0.014 5%.

Key Words: Free Cutting Steel Y1215; Oxygen Content; Sulphide

易切削钢具有良好的切削加工性能, 对实现材料加工自动化、精密化、高效化具有重要的意义。含硫易切削钢问世较早, 目前应用十分广泛, 其产量分别占世界和我国易切削钢总产量的 70% 和 90% 以上^[1-2]。研究表明, 钢中的 MnS 夹杂物是影响硫系易切削钢切削性能的关键因素。在切削加工过程中, 硫化物夹杂作为应力集中源, 能割断基体的连续性而使车削易断, 同时硫化物的润滑作用可以降低刀具的磨损程度, 从而改善钢材的切削加工性能^[3-5]。

研究发现, 当硫化物形态呈纺锤形或球形时, 对提高钢的切削性能最有利^[6-8]。易切削钢中氧对硫化物分布、形态、尺寸的影响成为冶金工作者关注的

焦点。王英虎与宋令玺采用真空感应炉熔炼了氧含量为 0.006% 和 0.011% 的铸锭, 发现随着氧含量增加, 硫化物由短棒状向纺锤形或球状转变^[9]。段飞虎研究发现, 成品线材随着氧含量的增加, 对提高切削性能非常有利, 线材中的氧的含量应不低于 0.014%^[10]。刘海涛与陈伟庆等研究得出当氧含量提高时, 钢中硬质 Al₂O₃-MnO 和 MnO-SiO₂、2MnO-SiO₂ 型氧化物明显提高, 从而导致可切削性能的明显恶化, 建议钢中总氧含量不要超过 0.012%^[11]。

目前, 硫系易切削钢中氧含量多少对性能的控制最佳还没有相关标准, 而对于实际生产过程中不同氧含量下铸态及相同压缩比下轧制后的线材中的氧化物和夹杂物的研究相对较少, 本文就不同氧含

量对硫系易切削钢铸态和轧材中氧化物及硫化物的影响进行研究,以期对生产硫系易切削钢中氧含量的控制起到一定的指导作用。

1 试验与研究方法

在易切削钢 Y1215 生产过程中进行 3 炉试验,生产流程为:120 t BOF-LF 精炼-CC 方坯(160 mm × 160 mm)-高线轧制为 $\Phi 8.0$ mm 盘条。转炉出钢加入硅锰进行脱氧,加入低碳锰铁进行合金化,并加入 300 kg 石灰进行造渣。精炼进站后开始升温,采用低铝铝铁进行渣面脱氧,调整氧含量,精炼时间 25 ~ 30 min,精炼结束温度在 1 585 ~ 1 595 $^{\circ}\text{C}$,冶炼的 3 炉 160 mm × 160 mm 钢坯经过加热炉加热后轧制为线材。表 1 为冶炼的 3 炉易切削钢的化学成分。

在 3 炉钢液连铸过程中的同一流各取 1 个长 100 mm 铸坯样品,轧制为 $\Phi 8.0$ mm 盘条后各取 1 支长 150 mm 样品。铸坯样品从内弧面边缘至心部

沿横截面连续切成 4 个 20 mm × 20 mm 的样品,盘条取长 30 mm 样品沿中心线切割,铸坯样品沿横向、盘条样品沿纵向,经金相研磨、抛光后,在 Axio Imager M2m 全自动金相显微镜和 ASPEX explorer 4.0 下获得夹杂物的形貌、成分、尺寸等特征信息。

2 试验结果与讨论

2.1 铸态钢中的硫化物与氧化物

连铸坯内弧面距离边缘 2、10、20、80 mm(铸坯中心)的硫化物分布与形貌如图 1 所示。同一氧含量的铸坯中,铸坯边缘至距离边缘 20 mm 的区域内,硫化物尺寸逐渐增加,而从距离边缘 20 mm 位置到铸坯的中心,硫化物尺寸差异不大。铸坯中硫化物主要以球状或椭球状为主,部分为短棒状。T[O]为 0.007 4%、0.009 5%、0.014 5% 的铸坯中硫化物的分布与形貌无明显差异。

由于氧含量对连铸坯中硫化物的形态影响并不明显,从距离铸坯表面 20 mm 位置到铸坯中心硫化物尺寸无明显差异。为进一步分析硫化物的尺寸分布,对于 T[O]为 0.009 5% 的连铸坯距离边缘 40 mm 位置硫化物的尺寸进行统计如图 2 所示,硫化物尺寸主要分布在 5 ~ 25 μm ,采用 ASPEX 统计

表 1 Y1215 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical compositions of Y1215 steel / %

炉次	C	Si	Mn	P	S	O
1	0.06	0.009	1.26	0.050	0.38	0.007 4
2	0.05	0.010	1.27	0.049	0.37	0.009 5
3	0.06	0.008	1.27	0.051	0.39	0.014 5

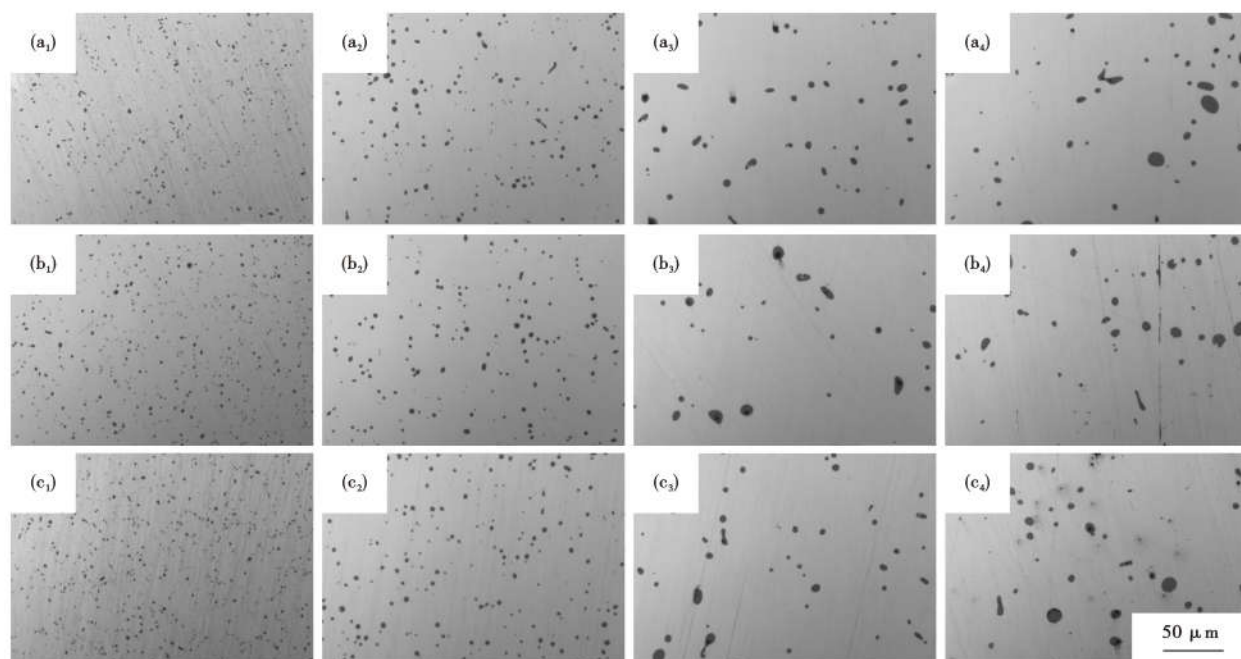


图 1 Y1215 钢 160 mm × 160 mm 连铸坯中硫化物的分布与形貌:距离边缘 2 mm (a₁) (b₁) (c₁), 10 mm (a₂) (b₂) (c₂), 20 mm (a₃) (b₃) (c₃) 和 80 mm (a₄) (b₄) (c₄); T[O] 0.007 4% (a₁) ~ (a₄), 0.009 5% (b₁) ~ (b₄), 0.014 5% (c₁) ~ (c₄)

Fig. 1 Distribution and morphology of sulfide in 160 mm × 160 mm continuous casting billet of Y1215 steel: distance from edge 2 mm (a₁) (b₁) (c₁), 10 mm (a₂) (b₂) (c₂), 20 mm (a₃) (b₃) (c₃) and 80 mm (a₄) (b₄) (c₄); T[O] 0.007 4% (a₁) ~ (a₄), 0.009 5% (b₁) ~ (b₄) and 0.014 5% (c₁) ~ (c₄)

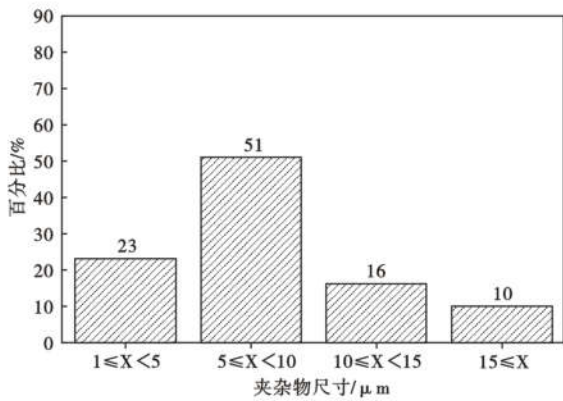


图 2 距 Y1215 钢连铸坯距边缘 40 mm 处硫化物尺寸分布, T[O] 0.009 5%

Fig. 2 Sulfide size distribution at place 40 mm from edge of continuous casting billet of Y1215 steel, T[O] 0.009 5%

尺寸 ≥ 1 μm 的硫化物, 统计面积 20.6 mm², 共检测到硫化物 598 个, 硫化物的密度为 29.4 个/mm², 硫化物尺寸在 5 ~ 10 μm 占比 51%。

连铸坯中夹杂物按形貌可分为两类, 分别以 MnS 和氧化物为主。第一类中单相 MnS 为铸坯中硫化物的主要存在形式, 如图 3(a); 另外是以 MnS 为核心, MnO-SiO₂ 在一端形成包裹或附着在外层, 如图 3(b)、图 3(c), 此类以 MnS 为核心形成的夹杂物尺寸与单相 MnS 相差不大, 但随着氧含量的增加, 数量比例逐渐增多, 分别统计了 T[O] 为 0.007 4% 和 0.014 5% 的铸坯中对应同一位置的 50 mm² 面积内的夹杂(尺寸大于 5 μm), 该类夹杂数量比例由 6.7% 增加至 14.8%。第二类以 Al₂O₃ 核心, 中间层为 MnO-SiO₂、最外层为 MnS 包裹或附着; 或存在 MnO-SiO₂-Al₂O₃ 为核心、外层 MnS 附着, 如图 4 所示。此类以氧化物为核心的夹杂物尺寸较大, 夹杂物尺寸在 15 ~ 68 μm, 数量相对较少, 分别检测 T[O] 为 0.007 4%、0.009 5%、0.014 5% 的铸坯中 500 mm² 面积内的夹杂, 随着 T[O] 由

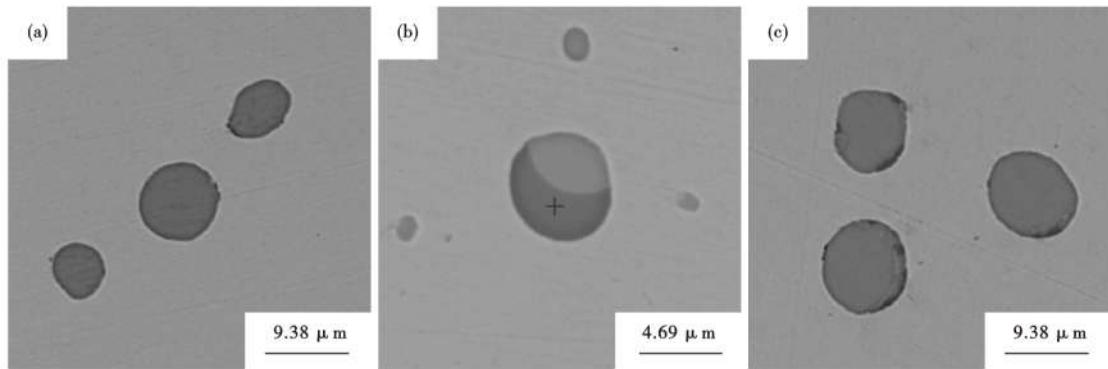


图 3 Y1215 钢连铸坯中 MnS 为主的硫化物的典型形貌: (a) 单相 MnS; (b) MnS 核心、MnO-SiO₂ 包裹; (c) MnS 核心、MnO-SiO₂ 附着

Fig. 3 Typical morphology of sulfide dominated by MnS in continuous casting billets of Y1215 steel: single-phase MnS (a); MnS core covered with MnO-SiO₂ (b); MnS core adhered by MnO-SiO₂ (c)

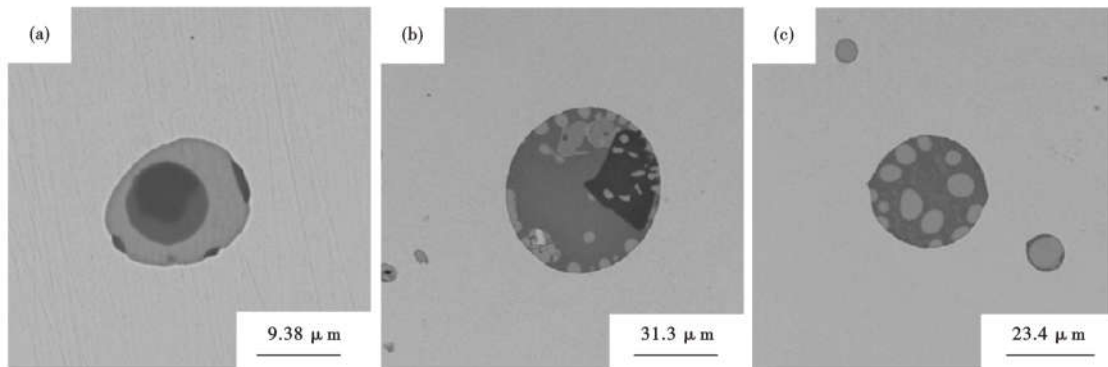


图 4 Y1215 钢连铸坯中氧化物为主复合夹杂物的典型形貌: (a) Al₂O₃ 核心、中间层 MnO-SiO₂、MnS 包裹; (b) Al₂O₃ 核心、中间层 MnO-SiO₂、MnS 附着; (c) MnO-SiO₂-Al₂O₃ 核心、MnS 附着

Fig. 4 Typical morphologies of oxide dominated composite inclusions in continuous casting billets of Y1215 steel: Al₂O₃ core, middle layer MnO-SiO₂, covered with MnS (a); Al₂O₃ core, middle layer MnO-SiO₂, adhered by MnS (b); MnO-SiO₂-Al₂O₃ core, adhered by MnS (c)

0.007 4% 增加至 0.014 5%, 大尺寸复合氧化物数量由 38 个增加至 82 个。

2.2 轧材中的硫化物

将 T[O] 为 0.007 4%、0.009 5%、0.014 5% 的连铸坯经过加热后轧制为 $\Phi 8.0$ mm 盘条, 钢中的硫化物随轧制方向的变形而被拉长, 盘条中的硫化物形貌及分布如图 5 所示。由图 5 可知, 盘条的表层

对应铸坯中边缘 20 mm 以内, 由于硫化物尺寸较小, 盘条距离表层 1 mm 的位置硫化物较 1/2R 和心部尺寸小, 但不同氧含量下盘条中硫化物的变形情况存在明显差异。T[O] 为 0.007 4% 时, 盘条中硫化物变形明显, 部分硫化物由于拉伸变形严重而碎断; 随着 T[O] 达到 0.014 5%, 盘条中硫化物沿轧制方向变形小, 主要以纺锤形为主。

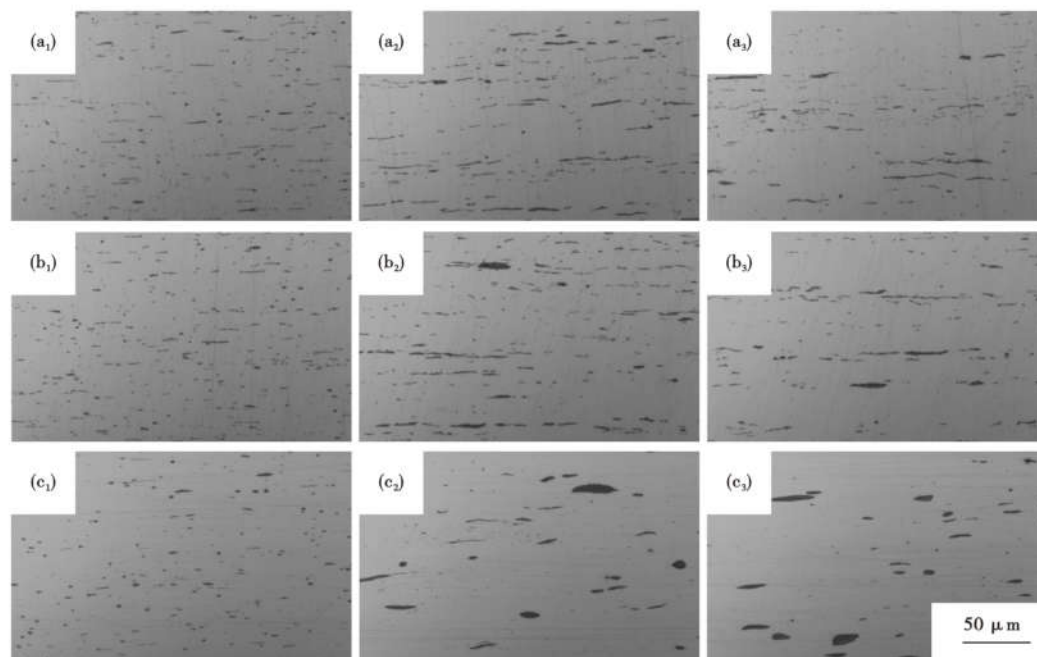


图 5 Y1215 钢 $\Phi 8.0$ mm 盘条中硫化物的分布与形貌: (a₁) ~ (a₃) T[O] 0.007 4%, (b₁) ~ (b₃) T[O] 0.009 5%, (c₁) ~ (c₃) T[O] 0.014 5%; (a₁) (b₁) (c₁) 距离边缘 1 mm, (a₂) (b₂) (c₂) 1/2R, (a₃) (b₃) (c₃) 中心

Fig. 5 Distribution and morphology of sulfide in $\Phi 8.0$ mm coil rod of Y1215 steel: (a₁) ~ (a₃) T[O] 0.007 4%, (b₁) ~ (b₃) T[O] 0.009 5%, (c₁) ~ (c₃) T[O] 0.014 5%; (a₁) (b₁) (c₁) distance form edge 1 mm, (a₂) (b₂) (c₂) 1/2R, (a₃) (b₃) (c₃) centre

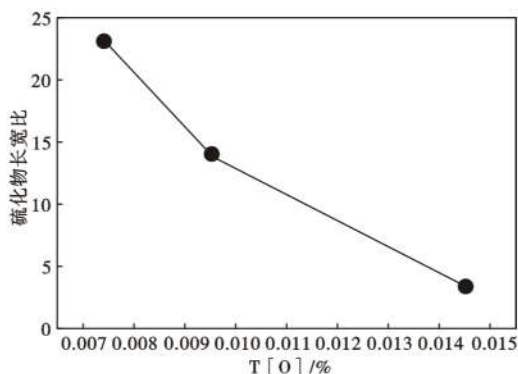


图 6 T[O] 对 Y1215 钢 $\Phi 8.0$ mm 盘条硫化物长宽比的影响
Fig. 6 Effect of T[O] on length-width ratio of sulfide in $\Phi 8.0$ mm coil of Y1215 steel

图 6 为 T[O] 0.007 4%、0.009 5%、0.014 5% 的盘条中 MnS 的长宽比, T[O] 为 0.007 4% 时, 盘

条中 MnS 长宽比为 23.2, T[O] 为 0.014 5% 时, MnS 长宽比达 3.4。

2.3 铸态中硫化物与氧化物的形成及轧制过程的变化

利用 Factage 软件计算了 Y1215 钢在凝固过程中各相的析出量及温度, 如图 7 所示, 在 T[O] 为 0.007 4% 和 0.014 5% 的钢液中, MnS 开始析出温度均为 1491 °C, 当温度低于 1400 °C 时析出量已接近最大值, 而钢水由中间包进入结晶器时, 钢水的温度高于 MnS 的析出温度, 由于钢水在结晶器内快速冷却, 导致铸坯表层至内部约 20 mm 的位置为钢水在结晶器内形成的凝固坯壳, 此时钢水温度快速降低, MnS 不能充分析出长大, 从而出现尺寸由表及里逐渐增加, 同时尺寸较小。出结晶器后, 钢水的冷却较结晶器中明显减弱, 有利于 MnS 的充分析出, 从

而形成 MnS 尺寸相差不大。从图 7 也可看出,两种氧含量最终 MnS 析出量重合,可说明铸坯中的 MnS 的析出量与氧含量无关。

铸坯中的夹杂物为单相 MnS 和 MnS 与氧化物复合夹杂物,单相的 MnS 即在凝固过程中析出,为铸坯的主要夹杂物,MnS 与氧化物复合夹杂物主要在 SLAGA 相中析出形成,SLAGA 相中各相的析出量及温度如图 8 所示。T[O]为 0.014 5% 时,SLAGA 相在 1 600 °C 以上已形成,1 211 °C 时 SLAGA 相中 MnO-SiO₂ 开始单独析出,在 Al₂O₃ 析出之前,MnO-SiO₂ 的析出以 MnS 为核心,形成复合夹杂物,如图 3 (b),或附着在 MnS 的外层如图 3 (c); 1 061 °C 时 SLAGA 相中 Al₂O₃ 开始单独析出,并与 Al₂O₃ 为核心,与析出的 MnO-SiO₂ 和 MnS 形成复合夹杂物,如图 4。T[O]为 0.007 4% 中析出规律与 0.014 5% 相同,但从析出量可知,以 MnO-SiO₂-Al₂O₃ 为主的复合夹杂物 T[O]0.014 5% 约为 0.007 4% 的两倍,与铸坯中检测到尺寸复合氧化

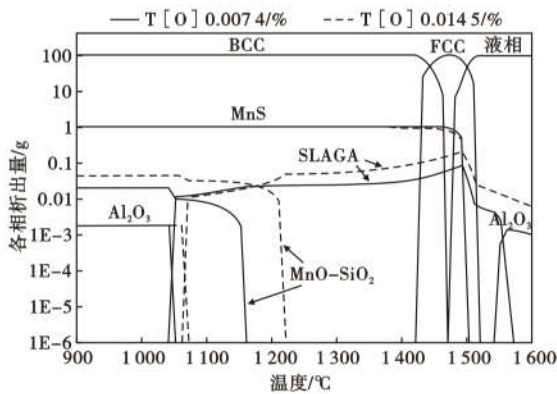


图 7 Y1215 钢凝固过程中各相的析出量及温度

Fig. 7 Precipitation amount and temperature of each phase during solidification of Y1215 steel

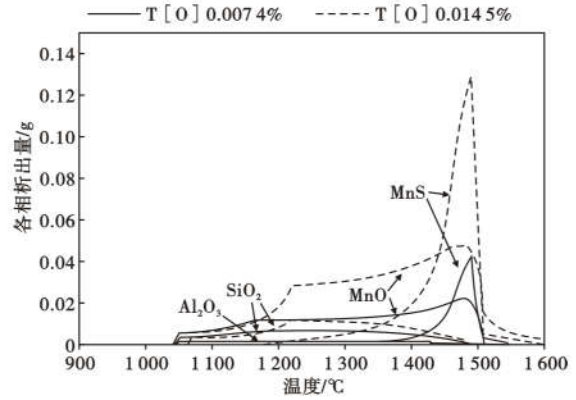


图 8 SLAGA 相的析出量及温度

Fig. 8 Precipitation amount and temperature of SLAGA phase

物结果基本相符。

在连铸坯轧制过程中,钢中的硫化物沿着轧制方向的受力产生变形,导致形貌发生改变,钢中氧含量较低时,轧制后盘条中的 MnS 沿轧制方向出现严重的变形,呈细长条状分布,如图 9 (b)。当钢中氧含量较高时,轧制后盘条中 MnS 变形小,呈椭球形或纺锤形分布,如图 9 (c)。针对于单相的 MnS 轧制后呈椭球形或纺锤形,除受轧制压缩比影响外,有研究^[12]指出,I 型硫化物(单相、球形的 MnS)在高温热轧时延伸较差,并在高温再加热时对延伸的硫化物有球化作用。但从铸坯中硫化物检测结果可知,无论是低氧或高氧含量钢液中,硫化物形貌、尺寸相差不大,在相同的压缩比及轧制工艺下单相的 MnS 变形存在明显差异,推测可能是高温轧制过程中氧含量影响 MnS 的变形,其影响的机理有待深入研究。

对于铸坯中的复合型硫化物,而无论低氧或高氧中,以 MnS 为核心,MnO-SiO₂ 外层包裹或附着的

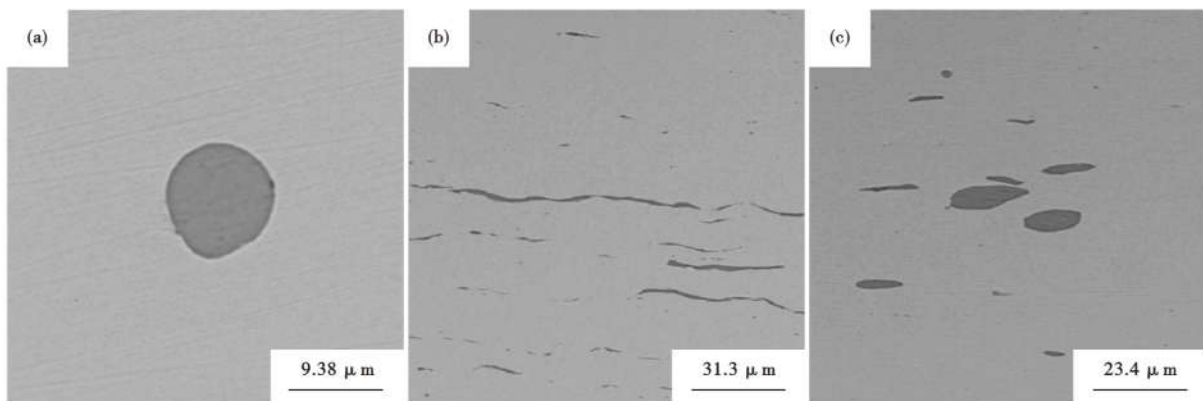


图 9 (a)铸坯中 MnS;(b)T[O]0.007 4% Φ8.0 mm 盘条中 MnS;(c)T[O]0.014 5% Φ8.0 mm 盘条中 MnS 的形貌

Fig. 9 Deformation of MnS in: (a) continuous casting billet, (b) T[O]0.007 4% in Φ8.0 mm coil rod, (c) T[O]0.014 5% in Φ8.0 mm coil rod

复合夹杂物,分布于外层的 MnO-SiO_2 在轧制过程中抑制 MnS 的变形,轧后分布于 MnS 的端部,形成纺锤形,如图 10。以 $\text{MnO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 为核心的复合夹杂物在变形中,由于 Al_2O_3 的熔点远高于热轧温度,弹性模量也高于钢基体,在热轧和拉拔过程中不能塑性变形^[13]。低熔点 MnO-SiO_2 系夹杂,其软化温度低,在热轧过程中容易发生塑性变形,轧制形成

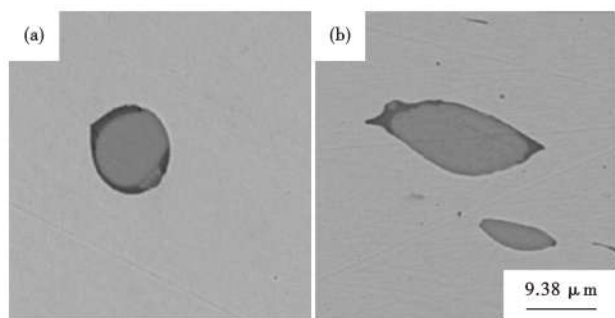


图 10 铸坯(a)到盘条(b) $\text{MnO-SiO}_2\text{-MnS}$ 复合夹杂物的变形情况

Fig. 10 Deformation status of $\text{MnO-SiO}_2\text{-MnS}$ composite inclusions from cast billet (a) to coil rod (b)

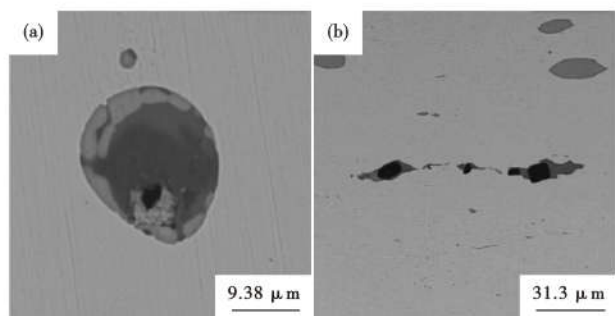


图 11 铸坯(a)到盘条(b) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MnO-SiO}_2\text{-MnS}$ 复合夹杂物的变形情况

Fig. 11 Deformation status of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MnO-SiO}_2\text{-MnS}$ composite inclusion from cast billet (a) to coil rod (b)

参考文献

- [1] 王小红,谢兵,冯仲渝. 国内外易切削钢的现状和研究进展[J]. 特殊钢, 2005, 26(4): 26-28.
- [2] 王金龙,乔爱云,张行刚. 含硫易切削钢切削性机理与硫化物控制简述[J]. 包钢科技, 2015, 41(1): 30-32.
- [3] 李联生,朱荣,郭汉杰. 以锡代铅研制环保型易切削钢[J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(4): 312-314.
- [4] Jiang L Z, Cui K, Hanniner H. Effects of the Composition, Shape, Factor and Area Fraction of Sulfide Inclusions on the Machinability of Resulfurized Free-machining Steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 58:160-165.
- [5] Bernsmann G, Bleyemehl M, Ehl R, et al. The Making of Free Cutting Steels with Additions of Lead, Bismuth, Tellurium, Selenium and Tin[J]. Stahl Eisen, 2001, 121(2): 87.
- [6] 罗刚,王辉锦. 新型易切削不锈钢 TBNS 中 MnS 夹杂相对热塑性的试验研究[J]. 特殊钢, 2016, 37(2): 1-3.
- [7] Ramalingam S, Basu K, Malkin S. Deformation Index of MnS Inclu-

长条状,如图 11。有研究^[11]指出,以氧化物为主的硬质复合型夹杂物,可加剧切削过程的刀具磨损。故在实际生产过程中,虽然增加氧含量有利于硫化物控制为椭球形或纺锤形,但同时增加了以 Si 、 Mn 、 Al 为主的大尺寸氧化物,钢中的氧含量并非越高越好,需控制在一定的范围。

3 结论

(1)在铸态 Y1215 钢中,铸坯边缘至距离边缘 20 mm 的区域内,硫化物尺寸逐渐增加,从距离边缘 20 mm 位置到铸坯的中心,硫化物尺寸差异不大,硫化物主要以球状或椭球状为主,部分为短棒状。T[O]为 0.007 4%、0.009 5%、0.014 5% 的铸坯中硫化物的分布与形貌无明显差异,硫化物尺寸主要分布在 5~25 μm ,其中在 5~10 μm 占比 51%。铸坯中的硫化物主要以单相的 MnS 为主,复合型的夹杂物有以 MnS 为核心外层包裹或附着 MnO-SiO_2 和以 $\text{MnO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 为核心外层附着 MnS 的大尺寸夹杂物,随着氧含量的增加,复合型的夹杂物明显增多。

(2)在轧制的 Y1215 盘条中,T[O]为 0.007 4% 时,盘条中硫化物变形明显,部分硫化物由于拉伸变形严重而碎断,硫化物的长宽比为 23.2。T[O]为 0.014 5%,盘条中硫化物沿轧制方向变形小,主要以纺锤形为主,硫化物的长宽比为 3.4。

(3)在一定的范围内,无论氧含量低或高, MnS 外层附着的 MnO-SiO_2 氧化物抑制 MnS 变形,但随着氧含量的增加,单相的 MnS 变形减小,同时以 $\text{MnO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 为核心的复合型夹杂物增加,因此,在 Y1215 钢中为获得以纺锤形为主的硫化物,冶炼时钢中的 T[O] 宜控制在 0.009 5%~0.014 5%。

sions in Resulfurized and Lead Steels[J]. Materials Science & Engineering, 1977, 29(2): 117-121.

- [8] 张永军,朱辰,王立峰,等. 锡对提高材料切削性能作用的研究[J]. 金属热处理, 2006, 31(1): 27-29.
- [9] 王英虎,宋令玺. 氧含量对易切削钢中硫化物形态及高温力学性能的影响[J]. 上海金属, 2021, 43(3): 47-52.
- [10] 段飞虎. 钢中氧含量对硫化物夹杂种类和形态的影响[J]. 钢铁研究, 2016, 44(4): 20-22.
- [11] 刘海涛,陈伟庆,涂生,等. 低碳高硫易切削钢中氧化物夹杂对可切削性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2012, 24(11): 15-18.
- [12] 赤泽正久. 硫磺易切削钢的制造与产品特性. 南钢科技, 2002(3): 73-80.
- [13] 王昆鹏,王郢,廖家明,等. 超深拉拔类线材夹杂物及断口分析[J]. 钢铁, 2022, 57(2): 101-108.