

· 工艺材料进展 ·

钢帘线和切割丝用钢夹杂物控制技术的进展

王昆鹏¹ 姜敏¹ 王新华¹ 王郅² 赵昊乾²

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2 邢台钢铁有限责任公司, 邢台 054027)

摘要 综述了钢帘线和切割丝用钢“BOF-LF 精炼-连续浇铸”工艺过程中夹杂物的控制技术。冶炼过程中通常采用 Si-Mn 脱氧, 严格控制钢液中的 Als 及低碱度 ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 \leq 1.0$) 渣系精炼等措施实现钢中夹杂物塑性化。生产实践表明, 夹杂物塑性化并不完全等于低熔点化, 一些厂家切割丝用盘条中 $\text{MnO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 系夹杂并未控制在低熔点区域, 但轧制过程变形良好; 生产过程中应避免由耐火材料引起的硬质外来夹杂; 浇铸所涉及的 Al_2O_3 质耐火材料改用非 Al_2O_3 质材料可有效降低盘条拉拔过程中的断丝率。

关键词 BOF-LF-CC 流程 钢帘线和切割丝 夹杂物 Si-Mn 脱氧 Als 顶渣精炼 耐火材料

Progress of Control Technology of Inclusions in Steel for Tyre Cord and Saw Wire

Wang Kunpeng¹, Jiang Min¹, Wang Xinhua¹, Wang Ying² and Zhao Haoqian²

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;
2 Xingtai Iron and Steel Corp Ltd, Xingtai 054027)

Abstract The control technology of inclusions in steel for tyre cord and saw wire in “BOF-LF refining-Bloom CC” process is summarily reviewed. The plasticization of inclusions in steel is realized by using the measures including using Si-Mn deoxidation, strictly controlling Als content in liquid and refining with low basicity ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 \leq 1.0$) slag. Production practice shows that the plasticization of inclusions in steel is not fully equal to controlling inclusion in low-melting point region, at some steelworks the $\text{MnO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ series inclusions in coil for saw wire are not controlled in low-melting point region but these inclusions are nicely deformable during rolling process. The exogenous inclusions caused by refractories should be avoided in production process and the frequency of wire breakage could be remarkably reduced by changing the Al_2O_3 based refractories used in casting process into non- Al_2O_3 based refractory materials.

Material Index BOF-LF-CC Flowsheet, Tyre Cord and Saw Wire, Inclusions, Si-Mn Deoxidation, Als, Top Slag Refining, Refractories

钢帘线是 $\Phi 0.15 \sim \Phi 0.38$ mm 的细钢丝合股而成的钢丝绳, 主要用于制造轮胎子午线。国内高速发展的汽车工业和轮胎工业推动了子午线用钢帘线需求的快速增长。切割丝是 $\Phi 0.08 \sim \Phi 0.20$ mm 的细钢丝, 其直径比子午线用钢帘线更细, 强度亦更高, 主要用于太阳能级硅的切割。为了减少切割时的硅损, 切割丝朝着直径更细和强度更高的方向发展。目前常用的切割丝规格为 $\Phi 0.08$ mm, 其生产难度比轮胎子午线用钢帘线更大。近年来, 随着太阳能光伏产业的发展, 切割丝需求大增, 前景广阔。

在轮胎子午线用钢帘线的基础上开发切割丝用钢成为科研院校和钢铁企业研究的热点。但是, 目前国内钢铁企业很难供应质量稳定的切割丝用盘条。断丝是子午线用钢帘线和切割丝生产或使用过程中的一大难题。钢中大尺寸不变形夹杂、偏析以及盘条表面质量等是导致断丝的主要原因。国内外围绕如何降低盘条拉拔过程的断丝率做了大量研究^[1-30]。研究表明^[1-3], 合理控制钢中夹杂物能有效

降低断丝率。本文对钢帘线和切割丝用钢中夹杂物的控制技术进行梳理归纳, 重点介绍国外的研究成果, 以期对国内的生产有所启发和借鉴。

1 钢帘线和切割丝用钢中夹杂物控制理念

1.1 钢帘线和切割丝对夹杂物的要求

表 1 为神户制钢不同级别的钢帘线用盘条的化学成分^[15]。轮胎子午线用钢帘线的一般生产过程为热轧所得 $\Phi 5.5$ mm 盘条经干拉 (包括大拉和中拉)、退火、镀铜及湿拉后得到 $\Phi 0.15 \sim \Phi 0.38$ mm 的钢丝, 极细的钢丝最终合股成钢帘线^[16]。

与钢帘线不同, 切割丝不需合股, 最终拉拔为 $\Phi 0.08 \sim \Phi 0.20$ mm 的钢丝。

钢丝在拉拔和合股过程将分别受强烈的拉应力和扭转应力, 若钢丝中存在大尺寸不变形硬质夹杂 (如 Al_2O_3 , $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 等), 将引起应力集中, 导致生产过程中断丝的发生。因此, 钢帘线和切割丝用盘条中应避免大尺寸不变形硬质夹杂。

表 1 不同级别钢帘线的主要化学成分/%

Table 1 Main Chemical composition of various grade steel for tyre cord / %

钢帘线等级	C	Si	Mn	P	S	Cr
KSC72	0.70 ~ 0.75	0.15 ~ 0.30	0.40 ~ 0.60	< 0.020	< 0.020	< 0.05
KSC82	0.80 ~ 0.85	0.15 ~ 0.30	0.40 ~ 0.60	< 0.020	< 0.020	< 0.05
KSC90	0.88 ~ 0.93	0.15 ~ 0.30	0.40 ~ 0.60	< 0.020	< 0.020	< 0.05
KSC92-E	0.90 ~ 0.95	0.10 ~ 0.25	0.30 ~ 0.50	< 0.020	< 0.020	0.10 ~ 0.30
KSC105-E	1.02 ~ 1.07	0.15 ~ 0.30	0.20 ~ 0.40	< 0.020	< 0.020	0.10 ~ 0.30

1.2 夹杂物塑性化

如上所述,钢帘线和切割丝用盘条冶炼过程应尽可能避免大尺寸不变形硬质夹杂(如 Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$ 等)。因此,冶炼时不宜采用 Al 脱氧,通常采用 Si-Mn 脱氧。实际生产过程钢中夹杂物完全去除几乎是不可能实现的,将残留在钢中的夹杂物塑性化,使其在热轧或拉拔过程变形或破碎,减小夹杂物的尺寸,从而实现钢中夹杂物无害化是目前钢帘线和切割丝用钢中夹杂物控制的基本思路。

研究表明,氧化物的塑性与其熔点之间存在一定关系,熔点越低,轧制过程氧化物夹杂越容易变形,相反,熔点越高,越难变形^[17-18]。 $MnO-SiO_2-Al_2O_3$ 和 $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ 体系引起了研究者的关注,图 1 为 Factsage6.4 软件计算得到的 $MnO-SiO_2-Al_2O_3$ 和 $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ 体系的三元相图,其中,图 1 (a) 中锰铝榴石 ($Mn_3Al_2Si_3O_{12}$) 初晶区附近为 $MnO-SiO_2-Al_2O_3$ 系 1 473 K (1 200 °C) 低熔点区,如图 1 (a)

阴影部分所示。图 1 (b) 中钙长石 ($CaAl_2Si_2O_8$) 和假钙硅石 ($CaSiO_3$) 的共晶线附近为 $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ 系 1 673 K (1 400 °C) 低熔点区,如图 1 (b) 阴影部分所示。若将夹杂物控制在图 1 所示的低熔点区域,那么即可实现夹杂物的塑性化和无害化。夹杂物低熔点化的观点被广泛接受和认可,图 1 所示的低熔点区被认为是钢帘线和切割丝用钢夹杂物控制的目标区域,塑性化也往往被理解成低熔点化。

2 夹杂物塑性化的措施

为实现钢中夹杂物的塑性化,生产过程常采取严格控制钢中 Als 及顶渣精炼等措施,本部分将讨论钢中 Als 对夹杂物塑性的影响及如何确定精炼渣成分。

2.1 钢中酸溶铝(Als)的控制

神户制钢^[19]研究了钢帘线铸坯中夹杂物在轧制过程的变形性与夹杂物中 Al_2O_3 含量的关系,结果表明,当 Al_2O_3 为 20% 时,夹杂物变形性最好。 Al_2O_3 含量过高,夹杂物中将会析出 Al_2O_3 , Al_2O_3 过低则会有 SiO_2 析出。Kang^[20]通过热力学计算软件 Factsage 研究了 $MnO-SiO_2-Al_2O_3$ 系夹杂物的熔点与 Al_2O_3 的关系,计算结果表明,夹杂物中 Al_2O_3 含量为 20% 时,夹杂物熔点最低,塑性最好,结论与神户实验结果一致。

夹杂物中 Al_2O_3 的含量主要受钢中 Als 的影响。研究表明^[15],钢中 Als 含量控制在 4×10^{-6} ,热力学平衡时夹杂物中 Al_2O_3 含量为 20%,此时夹杂物塑性最佳。由于钢帘线中 Als 需控制在极低的水

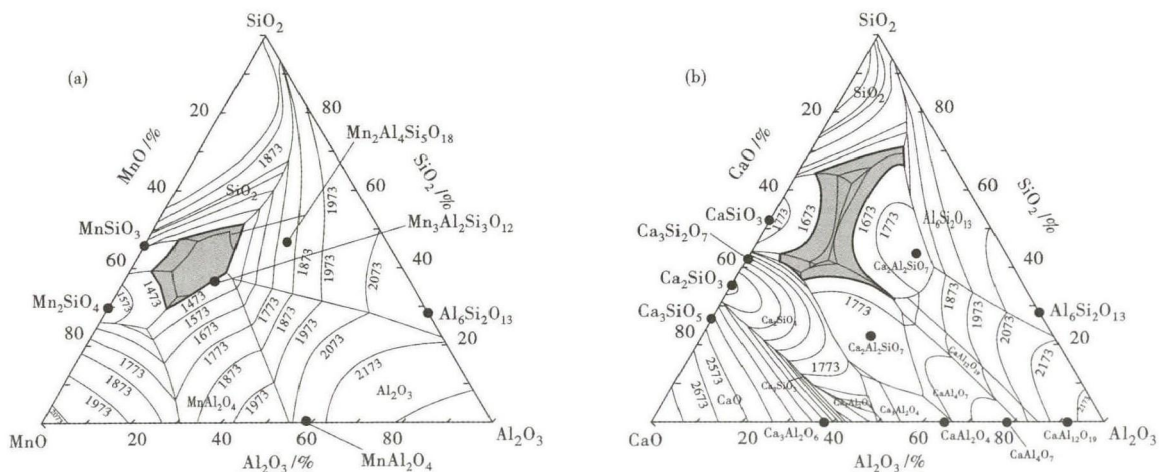
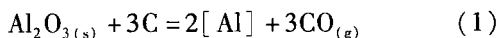


图 1 钢帘线和切割丝用钢中夹杂物控制目标区域阴影部分:(a) $MnO-SiO_2-Al_2O_3$ 系 1 200 °C 低熔点区;(b) $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ 系 1 400 °C 低熔点区

Fig. 1 Aim area for control of inclusions in steel for tyre cord and saw wire: dashed area- (a) $MnO-SiO_2-Al_2O_3$ series 1 200 °C low-melting point region and (b) $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ series 1 400 °C low-melting point region

平($\sim 4 \times 10^{-6}$)才能实现夹杂物塑性化,因此,钢帘线冶炼过程中需对 Als 进行严格控制,避免冶炼过程中的钢液增 Als。

Shinsho^[21]通过实验室实验研究了真空度为 267 Pa 的条件下,钢液中 C 与 Al_2O_3 质坩埚之间的反应。发现随着实验的进行,钢液中的全铝 Al_{Total} 不断增加,真空度 = 267 Pa 时,钢液中的 C 能还原 Al_2O_3 坩埚,如方程式(1)所示。另外,1 600 °C 条件下钢中 Al_{Total} 增速快于 1500 °C,说明相同真空度的条件下,温度升高会促进 C 与 Al_2O_3 质耐火材料的反应。



因此,钢帘线冶炼过程需严格控制合金等辅料中 Al 含量,一般采用非 Al_2O_3 质钢包且不做真空处理,以达到将钢液中 Als 控制在极低水平的目的。

2.2 顶渣精炼

钢帘线精炼一般采用 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 渣系,精炼渣的成分对钢中夹杂物的控制起重要作用^[22]。钢中 Als 含量可由 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 渣系和钢液之间的热力学平衡计算得到。Maeda^[19]根据 Si-O 和 Al-O 之间的平衡,如式(2)和(3),分别计算了 1 560 °C 时不同碱度的精炼渣中 Al_2O_3 含量对钢中 Als 的影响,其中 SiO_2 和 Al_2O_3 的活度 a_{SiO_2} 和 $a_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 值取自文献报道^[23-24]。

$$[\text{Si}] + 2[\text{O}] = (\text{SiO}_2)$$

$$\log \frac{a_{\text{SiO}_2}}{a_{\text{Si}} \cdot a_{\text{O}}^2} = \frac{30\,110}{T} - 11.40^{[25]} \quad (2)$$

$$2[\text{Al}] + 3[\text{O}] = (\text{Al}_2\text{O}_3)$$

$$\log \frac{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{a_{\text{Al}}^2 \cdot a_{\text{O}}^3} = \frac{64\,000}{T} - 20.57^{[25]} \quad (3)$$

计算结果表明,精炼渣中相同 Al_2O_3 含量的条件下,钢液中 Als 含量随精炼渣碱度增高而增高;相同碱度的条件下,钢液中 Als 含量随精炼渣中 Al_2O_3 含量增加而增加^[19]。当精炼渣的碱度为 1.0 时,钢液中 Als 随渣中 Al_2O_3 增加亦呈增加趋势,但是 Als 增量有限,即便渣中 Al_2O_3 含量达到 20% 时,钢液中由渣-钢间反应造成的 Als 增量也仅为 1.0×10^{-6} 。Shinsho^[21]同样指出,使用成分为 45% SiO_2 -45% CaO -10% Al_2O_3 精炼渣系时,由渣钢反应造成的 Als 增量不会超过 0.5×10^{-6} 。

在实际冶炼过程中,精炼渣进入钢液是不可能完全避免的,精炼渣进入钢液后将形成 CaO-SiO_2 基

夹杂,当 $\text{CaO/SiO}_2 \leq 1$ 时,此部分由精炼渣引起的夹杂在轧制时更易变形。因此,从减少由渣钢反应造成的钢中增 Als 和降低由精炼渣引起的夹杂物危害性的角度考虑,精炼渣的碱度应满足 $\text{CaO/SiO}_2 \leq 1$ 。

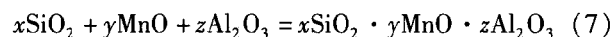
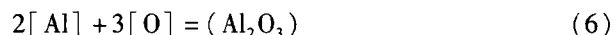
当精炼渣碱度 $\text{CaO/SiO}_2 = 1$ 时,欲使夹杂物中 Al_2O_3 达 20%,精炼渣中 Al_2O_3 需控制在 8% 左右^[19]。但是需要指出的是,此精炼渣成分并不适用于所有钢厂。实际生产过程中,精炼渣的最佳成分还应根据精炼过程的渣钢比,所使用合金条件等进行优化。

3 国外钢帘线和切割丝生产实践

从上述分析可以看出,塑性化是钢帘线和切割丝用钢夹杂物控制的关键,而实现塑性化的途径是夹杂物低熔点化。长期以来,很多研究者将夹杂物塑性化等同于低熔点化,实际生产过程则采用多种措施获得低熔点夹杂,并将夹杂物是否处于低熔点区作为评价钢帘线和切割丝用钢质量的一项重要指标。本部分将结合国外生产实践重新思考夹杂物低熔点与塑性的关系,并就耐火材料对断丝率的影响进行讨论。

3.1 钢帘线和切割丝中夹杂物特征

目前钢帘线和切割丝用钢的冶炼一般采用“BOF-LF 精炼-连铸”的工艺路线。图 2 为神户所产钢帘线铸坯中夹杂物的成分特征^[19]。铸坯中存在两类夹杂,一类为 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系夹杂,见图 2(a),另一类为 $\text{MnO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系夹杂,见图 2(b)。 $\text{MnO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 夹杂的形成机理已经十分明确,为 Si-Mn 脱氧产物与钢液中 Als 作用的结果,如公式(4)~(7)所示。



$\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系夹杂的形成机理目前尚未形成统一的认识,部分学者^[19]认为其来源于精炼渣,部分学者^[20]认为此类夹杂为钢液与精炼渣作用的结果。笔者认为更合理的解释为:此类夹杂物是 CaO-SiO_2 系精炼渣乳化后进入钢液,并在 LF 精炼过程与钢液发生反应,最终形成 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系夹杂。

由图 2 可以看出,神户铸坯中 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系夹杂基本处于低熔点区域,而 $\text{MnO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系夹杂并没有控制在低熔点区,而是处于 SiO_2 初晶面

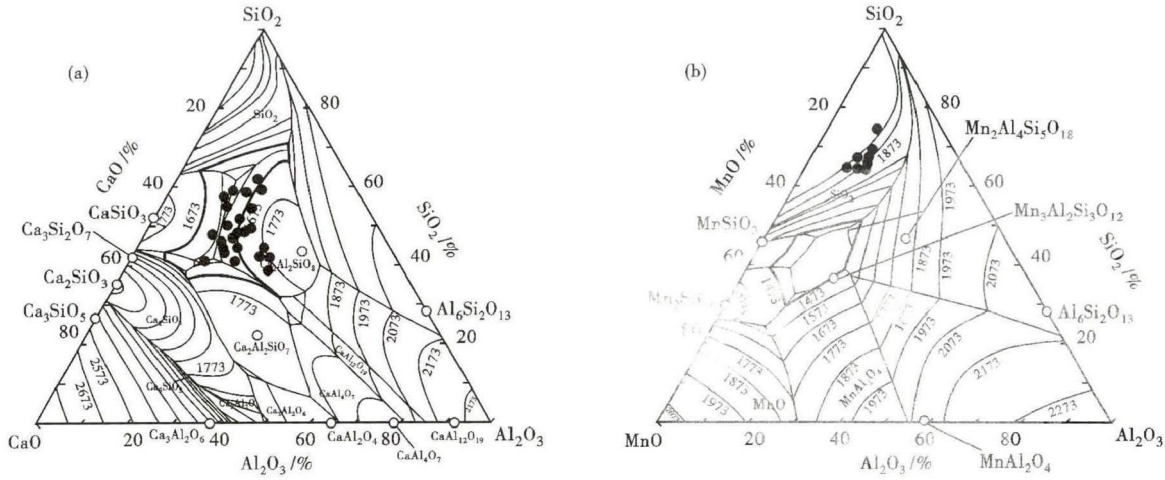


图2 钢帘线铸坯中夹杂物成分分布^[19]: (a) CaO-SiO₂-Al₂O₃ 系夹杂; (b) MnO-SiO₂-Al₂O₃ 系夹杂

Fig.2 Distribution of ingredient of inclusions in casting bloom of steel for tyre cord^[19]: (a) CaO-SiO₂-Al₂O₃ series inclusions and (b) MnO-SiO₂-Al₂O₃ series inclusions

上。笔者^[26]通过生产实践数据并结合热力学模拟解释了钢帘线铸坯中高 SiO₂ 夹杂产生的机理,认为由于采用 Si-Mn 脱氧,钢液中存在相对较高 [O], 浇铸过程中随着温度的降低,钢中 [O] 的溶解度降低, MnO-SiO₂-Al₂O₃ 系液态夹杂将与钢中 [O] 以及合金元素 (Si, Mn 及 Al 等) 发生化学作用,从而形成成分处于 SiO₂ 初晶面的夹杂。

意大利著名轮胎生产商 Pirelli 使用扫描电镜和能谱仪 (SEM + EDS) 研究了 a, b, c 三家不同供应商所生产钢帘线盘条中夹杂物成分并统计了各批次盘条在拉拔过程中由夹杂物引起的断丝情况^[27], 结果如图 3 所示。

从夹杂物的成分看,图 3(a) 所示的 a 盘条中夹杂物远远偏离了低熔点区,大部分处于莫来石的初晶区,图 3(b) 所示的 b 盘条中夹杂物为处于低熔点区的 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 系夹杂,图 3(c) 所示的 c 盘条

中夹杂物为 MnO-SiO₂-Al₂O₃ 系夹杂且大部分偏离了低熔点区,处于 SiO₂ 初晶面。从拉拔断丝率看, a 和 b 盘条中由夹杂物引起的断丝率接近,分别为 24 Km 和 28 Km 断丝 1 次, c 盘条的夹杂物断丝率最低,拉拔 756 Km 仅断丝 1 次,断丝率远远低于 a 和 b。值得注意的是,夹杂物控制在低熔点区的 b 盘条断丝率并不是最低的,相反,夹杂物成分远远偏离低熔点区,而处于 SiO₂ 初晶面的 c 盘条断丝率最低,每 756 Km 由夹杂物引起的断丝仅发生 1 次。

国内研究者^[10-12]对国外钢帘线和切割丝盘条用钢中夹杂物控制水平做了对比分析。笔者使用 Aspex Explorer 对神户切割丝用盘条多批次、大面积检测分析。检测结果同样表明,神户盘条中存在两类夹杂,一类为处于低熔点区的 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 系夹杂,另一类为处于 SiO₂ 初晶面的 MnO-SiO₂-Al₂O₃ 系夹杂,甚至存在 SiO₂ 含量在 90% 以上的高 SiO₂

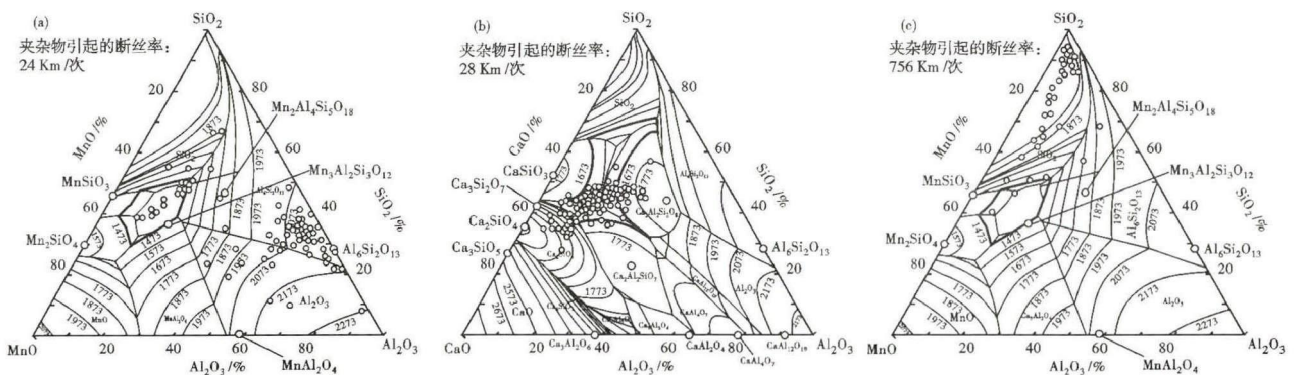


图3 钢帘线盘中夹杂物成分对拉拔过程由夹杂物引起的断丝频率的影响^[27], 断丝频率/(Km·次⁻¹): (a)24; (b)28; (c)756
Fig.3 Effect of ingredient of inclusions in coil of steel for tyre cord on frequencies of wire breakage caused by inclusions in drawing process^[27], frequencies of wire breakage/(Km·time⁻¹): (a) 24; (b) 28 and (c) 756

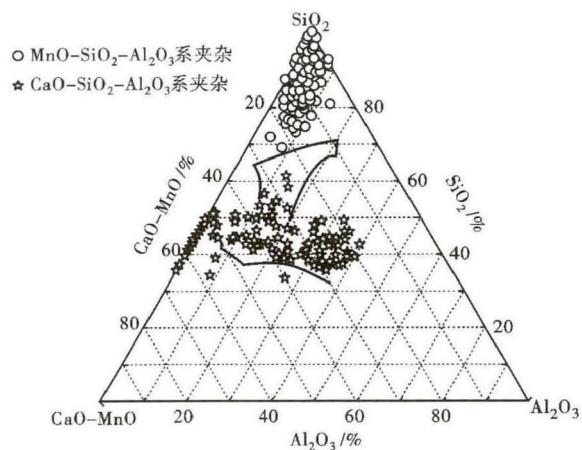


图 4 试验切割丝用盘条中夹杂物成分分布

Fig. 4 Distribution of ingredient of inclusions in test steel coil for saw wire

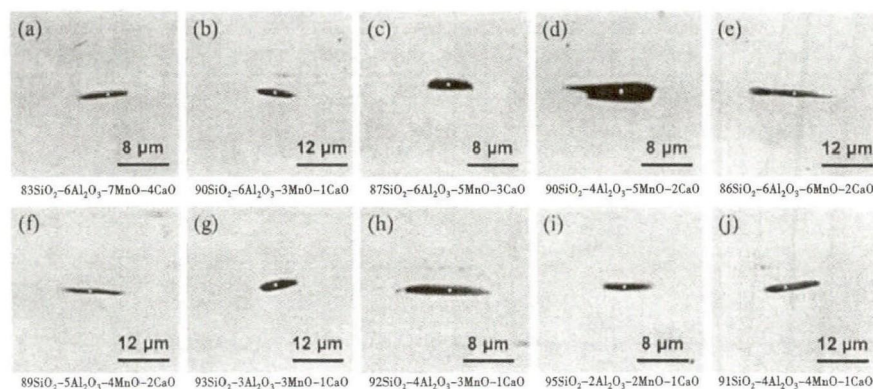


图 5 检验的切割丝用盘条中高 SiO₂ 夹杂沿轧制方向的形态

Fig. 5 Morphology of high SiO₂ inclusions along rolling direction in examined steel coil for saw wire

夹杂,如图 4 所示,但这部分偏离低熔点区的高 SiO₂ 夹杂在轧制过程仍能塑性变形,沿轧制方向呈长条状,见图 5。由此可以看出,塑性化并不完全等同于低熔点化,偏离低熔点区的夹杂物也可以是塑性夹杂,这部分夹杂物有可能为玻璃态。

3.2 耐火材料对断丝率的影响

住友金属^[28-29]的生产数据表明,仅采用顶渣精炼以及严格控制钢液中的 Als 是不够的,盘条在拉拔过程中仍然会发生频繁的断丝。断口处夹杂物多为 Al-O 系夹杂,同时也存在少量 Al-Si-O 系和 Al-Si-Ca-O 系夹杂,并且断口处绝大部分夹杂物尺寸在 10 μm 以上。住友金属从夹杂物的尺寸和成分上推测,此类夹杂是由耐火材料引起的外来夹杂。

为了减少此类 Al₂O₃ 夹杂,住友金属尝试了不同材质的耐火材料,包括锆质和镁质等,最后选择了抗散裂且抗侵蚀性能优异的锆质耐火材料。使用锆

质耐火材料后,所得盘条中发现了锆质夹杂,但是锆质夹杂的尺寸很小,另外,断口处并未检测到由锆质夹杂引起的断丝。因此,认为采用锆质无铝耐火材料可以有效减少由 Al₂O₃ 夹杂造成的断丝,且引入的锆质夹杂不会引起断丝。

住友金属生产钢帘线 82A 的改进工艺与原工艺断丝频率的对比结果^[28-29],表明,采用无铝锆质水口后,盘条拉拔过程的断丝率明显下降,且产品质量更加稳定。

韩国浦项^[30]亦认为加强外来夹杂的管控在实际生产过程中十分重要。为生产性能优异且质量稳定的切割丝用钢,浦项将钢包和连铸三大件替换为非 Al₂O₃ 质耐火材料。结果表明,更换耐火材料后,大尺寸 Al₂O₃ 夹杂引起的断丝率由吨钢断丝 5 ~ 6

次减少至吨钢不超过 1 次,并且韩国浦项在子午钢帘线的基础上成功开发了 Φ = 0.12 mm 的切割丝用钢。试验结果间接说明引起钢帘线断丝的大尺寸 Al₂O₃ 夹杂与连铸过程使用的耐火材料存在联系。原因可能是与钢液接触的 Al₂O₃ 颗粒在炼钢过程将被钢液侵蚀进入钢液,从而形成外来夹杂。总之,使用 Al₂O₃ 质耐火材料存在引入大尺寸外来 Al₂O₃ 夹杂的潜在可能。

4 总结

(1) 大尺寸不变形硬质夹杂是导致钢帘线和切割丝用盘条拉拔过程断丝的主要原因,夹杂物塑性化可显著降低断丝的发生率。

(2) 采用 Si-Mn 脱氧,严格控制钢中 Als 以及低碱度渣精炼可实现钢帘线中夹杂塑性化,但是塑性化并完全等同于低熔点化。生产数据表明,偏离低熔点区的 MnO-SiO₂-Al₂O₃ 系夹杂,甚至 SiO₂ 含量高于 80% 的高 SiO₂ 夹杂,仍为塑性夹杂,在轧制过程能发生塑性变形,沿轧向呈长条状,这一结果对国内钢帘线和切割丝用钢生产企业有启发和借鉴意义。

(3) 仅采用 Si-Mn 脱氧,严格控制钢中 Als 以及低碱度精炼等措施,钢中仍存在大尺寸不变形硬质高铝夹杂。通过尝试将连铸过程涉及的耐火材料更换为非 Al₂O₃ 质后,盘条在拉拔过程的断丝率显著降低,说明加强浇铸过程耐火材料的管控对提升产

品质量具有重要意义。

国家自然科学基金项目资助(51304013)

参考文献

- [1] Peeters L. Wire Breaks during Steel Cord Stranding[J]. *Wire Journal International*, 1980, 13(5): 96-99.
- [2] Demeye E G. Influence of Non-Metallic Inclusions in High- and Low-Carbon Wire Rod on Workability during Wire Drawing and on Mechanical Properties of Product[J]. *Wire Journal International*, 1981, 14(2): 72-77.
- [3] Barous M, Mangel G. New Steelmaking Practices and Quality Improvements of Tire Cord Wire Rod[J]. *Wire Journal International*, 1984, 17(4): 66-71.
- [4] 王立峰, 卓晓军, 张炯明, 等. 冶金过程中钢帘线夹杂物成分控制[J]. *北京科技大学学报*, 2003, 25(4): 308-311.
- [5] 王立峰, 张炯明, 王新华, 等. 低碱度顶渣控制钢帘线中 CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO 类夹杂物成分的实验研究[J]. *北京科技大学学报*, 2004, 26(1): 26-29.
- [6] Chen S H, Jiang M, He X F, et al. Top Slag Refining for Inclusion Composition Transform Control in Tire Cord Steel[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2012, 19(6): 490-498.
- [7] 崔怀周, 陈伟庆, 毛卫民, 等. 轧制工艺对钢帘线盘条结构的影响[J]. *北京科技大学学报*, 2011, 33(8): 947-951.
- [8] 赵昊乾, 陈伟庆. 坩埚材质及顶渣成分对钢帘线夹杂物成分的影响[J]. *钢铁研究学报*, 2012, 24(3): 12-16.
- [9] 何肖飞, 王新华, 陈书浩, 等. 低碱度低氧化铝精炼渣对钢帘线夹杂物控制[J]. *钢铁*, 2014, 49(6): 30-36.
- [10] 徐涛, 孙彦辉, 许中波, 等. 钢帘线盘条中夹杂物形态和成分的调查[J]. *炼钢*, 2009, 25(2): 52-55.
- [11] 常桂华, 郭大勇, 高航, 等. 钢帘线用盘条夹杂物成分控制技术对比[J]. *金属制品*, 2010, 36(2): 59-62.
- [12] 王昆鹏, 姜敏, 王新华, 等. 切割丝用盘条非金属夹杂物对比分析[J]. *钢铁*, 2016, 51(1): 33-39.
- [13] He X F, Wang X H, Chen S H, et al. Inclusion Composition Control in Tyre Cord Steel by Top Slag Refining[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2014, 41(9): 676-684.
- [14] Guo C B, Ling H T, Zhang L F, et al. Steel Cleanliness of Tire Cord Steels[C]. 6th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking, Beijing, China, 2015: 817-820.
- [15] Karihara K. Production Technology of Wire Rod for High Tensile Strength Steel Cord[J]. *Kobelco Technology Review*, 2011, 30: 62-65.
- [16] Minamida T, Hiraga N, Shibata T. Developments in Steel Cord Wire Rods[J]. *Research & Development Kobe Steel Engineering Reports*, 2000, 50(3): 31-35.
- [17] Gatellier C, Gaye H, Lehman J, et al. Inclusion Control in Low-Aluminum Steel[J]. *La Revue de Metallurgie-CIT*, 1992, 89(4): 361-369.
- [18] Bernard G, Ribound P V, Urbain G. Oxide Inclusion Plasticity[J]. *La Revue de Metallurgie-CIT*, 1981, 78(5): 421-433.
- [19] Maede S, Soejima T, Saito T, et al. Shape Control of Inclusions in Wire Rods for High Tensile Tire Cord by Refining With Synthetic Slag[C]. *Steelmaking Conference Proceedings*, Warrendale: Iron and Steel Society of USA, 1989, 77: 379-385.
- [20] Kang Y B, Lee H G. Inclusions Chemistry for Mn/Si Deoxidized Steels: Thermodynamic Predictions and Experimental Confirmations[J]. *ISIJ International*, 2004, 44(6): 1006-1015.
- [21] Shinsho Y, Nozaki T, Sorimachi K, et al. Influence of Secondary Steelmaking on Occurrence of Non-Metallic Inclusions in High-Carbon Steel for Tire Cord[J]. *Wire Journal International*, 1988, 21(9): 145-153.
- [22] Fauling G M. Inclusion Modification in Semi-Killed Steels[J]. *Iron & Steelmaker*, 1999, 26(7): 29-36.
- [23] Chipman J. *Physical Chemistry of Process Metallurgy* [M]. New York: Interscience Publishers, 1961: 27.
- [24] Kay D A R, Taylor J. Activities of Silica in the Lime-Alumina-Silica System[J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1960, 56: 1372-1386.
- [25] 19th Committee of JSPS. Recommended Equilibrium Values for Steelmaking Reactions[M]. New York: Gordon and Breach Science Publisher, 1988: 124.
- [26] Wang K P, Jiang M, Wang X H, et al. Formation Mechanism of SiO₂-Type Inclusions in Si-Mn-Killed Steel Wires Containing Limited Aluminum Content[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2015, 46(5): 2198-2207.
- [27] Stampa E, Cipparrone M. Detection of Harmful Inclusions in Steels for Tire Cord[J]. *Wire Journal International*, 1987, 20(3): 44-55.
- [28] Iemura K, Ichihashi H, Kawami A, et al. Steelmaking Process for High-Carbon Tyre Cord Steel[C]. *Clean Steel 3*, 1986: 160-167.
- [29] Ueno A, Kimura K, Kawami A, et al. Improvement in Steelmaking Process for Clean Steel of Wire Rods[C]. *Steelmaking Conference Proceedings*, 1987: 389-395.
- [30] Seo J K, Kim Y T, Kim D H. Nonmetallic Inclusion Control of Steel for Tyre Cord and Saw Wire[C]. 5th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking, Dresden: ICS 2012 Organisers, 2012: 1250-1254.

王昆鹏(1988-),男,博士生(北京科技大学),2010年昆明理工大学(本科)毕业,特殊钢夹杂物控制技术研究。

E-mail: kunpengwang@foxmail.com

收稿日期:2015-11-19