

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180415

冷轧硅脱氧 304 不锈钢中氧化物夹杂的演变行为

高锦国¹, 张雪良², 杨树峰², 李京社², 翟俊³, 郝卫星²

(1. 新兴铸管股份有限公司国际部, 北京 100020; 2. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083;
3. 山西太钢不锈钢股份有限公司技术中心, 山西 太原 030003)

摘要: 为实现固态钢基体内夹杂物在冷轧过程中的控制, 将硅脱氧 304 不锈钢热轧板经多道次冷轧至不同的厚度, 利用扫描电子显微镜对试样内夹杂物在冷轧过程中的演变行为进行了研究。结果表明, 硅脱氧 304 不锈钢内夹杂物的类型主要为低熔点 $\text{SiO}_2\text{-CaO-MnO-Al}_2\text{O}_3$, 其在热轧板内的形貌为大尺寸长条状。冷轧时, 这些长度为 $2.0\sim 23.0\ \mu\text{m}$ 的长条状氧化物夹杂发生断裂, 形成多个 $1.0\sim 3.0\ \mu\text{m}$ 小尺寸夹杂物。随着冷轧压下量的增加, 断裂后形成的夹杂物尺寸逐渐减小。但当夹杂物尺寸降低至约 $0.5\ \mu\text{m}$ 时, 夹杂物不再发生断裂。同时, 断裂后形成的小尺寸夹杂物之间的距离与夹杂物的初始尺寸无关, 由冷轧板的伸长率决定。

关键词: 304 不锈钢; 氧化物夹杂; 变形行为; 冷轧

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2019)02-0053-07

Evolution of oxide inclusions in Si-killed 304 stainless steel during cold rolling

GAO Jin-guo¹, ZHANG Xue-liang², YANG Shu-feng², LI Jing-she²,
ZHAI Jun³, HAO Wei-xing²

(1. International Department, Xinxing Ductile Iron Pipes Co., Ltd., Beijing 100020, China; 2. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
3. Technology Center, Shanxi Taigang Stainless Steel Co., Ltd., Taiyuan 030003, Shanxi, China)

Abstract: In order to achieve effective control of inclusions in solid-state steel during cold rolling, the hot rolled plates of 304 stainless steel deoxidized by Si were cold rolled into different thicknesses through multi-pass rolling process, and the deformation of oxide inclusions during cold rolling was investigated by a scanning electron microscope. The experimental results show that the inclusions in Si-killed 304 stainless steel were mainly low melting point $\text{SiO}_2\text{-CaO-MnO-Al}_2\text{O}_3$. The morphology of these inclusions in hot rolled plates were mainly long-strip. During cold rolling process, the long-stripe oxide inclusions with $3.0\text{ to }23.0\ \mu\text{m}$ in length were fractured and changed into finer inclusions with $0.5\text{ to }3.0\ \mu\text{m}$ in size. The size of the small fractured particles gradually decreased with increasing cold rolling reduction. When the size of the fractured particles was reduced to about $0.5\ \mu\text{m}$, the particles were not fractured anymore. The distances among the fractured particles were not concerned with original length of the inclusions, which were determined by the elongation of cold rolled plates.

Key words: 304 stainless steel; oxide inclusion; deformation behavior; cold rolling

非金属夹杂物作为钢中不可避免的物质, 能显著降低不锈钢的强度、疲劳性能、耐腐蚀性以及表面质量等^[1-5]。为提高钢的洁净度, 夹杂物在液态钢水和凝固过程中的行为(包括夹杂物的形成、去除和改性)已经被广泛地研究^[6-15]。然而, 为获得最终产品, 后续还需要对铸坯进行各种机械处理和热处理,

如热轧、冷轧等。轧制不仅能改变铸坯的尺寸和形状, 通常也会对铸坯中夹杂物特性, 如形貌、尺寸、数量等造成影响^[16-20]。

关于轧制过程中夹杂物演变行为的研究很多^[21-29]。Kimura S^[21]等通过工业试验研究了 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 和 SiO_2 夹杂物在热轧和冷拔过程的变化。研究发现,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574020, 51674023)

作者简介: 高锦国(1980—), 男, 硕士, 工程师; **E-mail:** gao2672@126.com; **收稿日期:** 2018-11-02

通讯作者: 杨树峰(1981—), 男, 博士, 副教授; **E-mail:** yangshufeng@ustb.edu.cn

Al₂O₃、ZrO₂和SiO₂夹杂物在热轧过程中均会发生断裂,导致夹杂物数量的增加和尺寸的减小。而在冷拔过程中,Al₂O₃夹杂物则比ZrO₂和SiO₂更难发生断裂,这可能是由于Al₂O₃夹杂物具有更大的抗压强度。XU G等^[23]研究了铝脱氧低合金钢中CaS-CaO-Al₂O₃夹杂物在热轧过程的变形行为。CaS-CaO-Al₂O₃夹杂物中CaS的质量分数对夹杂物变形行为有显著影响。随着CaS质量分数的增加,夹杂物逐渐失去变形能力。YANG W等^[24]通过研究硅锰脱氧钢中氧化物夹杂在热轧过程中的演变发现,随着压下量的增加,夹杂物的变形指数会逐渐降低,且不同类型夹杂物变形指数间的区别逐渐减小。以往的研究大多集中于热轧过程中夹杂物演变行为的研究,而对冷轧过程夹杂物演变行为的关注很少。对带钢而言,冷轧板中夹杂物的尺寸、数量和分布等特性对最终产品的表面质量具有重要影响。研究冷轧过程中夹杂物的演变规律,对实现夹杂物特性的有效控制和提高带钢表面质量具有重要意义。

本文以硅脱氧304不锈钢热轧板为研究对象,首先对其进行不同压下量的冷轧,然后利用扫描电镜对冷轧过程中氧化物夹杂形貌、尺寸、数量和分布等的变化进行分析。

1 试验方法

1.1 试验过程

本文中试验原材料取自某钢厂生产的304不锈钢热轧卷板。试验用304不锈钢的化学成分见表1。试验用304不锈钢铸坯的生产工艺流程为:电弧炉→氩氧脱碳精炼→钢包精炼→连铸(EAF+AOD+LF+CC)。其中,在AOD精炼阶段,首先通过吹氧对钢水脱碳脱硅。然后,加入硅铁、石灰和萤石进行脱氧、脱硫和造还原渣,炉渣碱度控制在1.7~2.1。在进入LF前,进行扒渣操作。在LF精炼阶段,加入石灰和萤石,调整炉渣碱度为2.5~3.0,并吹氩弱搅拌。连铸坯(宽为1 250 mm,厚为200 mm)在1 200 °C均热后,经多道次连续热轧至2 mm厚。热轧终点温度约为1 000 °C。

表1 试验用304不锈钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 304 stainless steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
≤0.07	0.30~0.70	1.00~1.25	≤0.04	≤0.01	18.00~18.60	8.00~8.50	0.02~0.06

在热轧板中部沿轧制方向取样(长420 mm,宽150 mm,厚2 mm),然后,在冷轧机上对热轧卷板进行不同压下量的非展宽轧制,具体冷轧试验方案见表2。其中,各道次试样的累积压下率分别为:25%、40%、44%、51%、51%(5道次);19%、29%、38%、47%、53%、58%、62%、66%、70%、73%、75%、75%(12道次)。

表2 冷轧试验方案

Table 2 Scheme of cold rolling process

项目	C-1	C-2	C-3
厚度/mm	1.5	1.0	0.5
道次	5	5	12

定义本文中试样的压下率为

$$R = \frac{H_0 - H_c}{H_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:R为轧制压下率,%;H₀为轧制前试样的厚度,mm;H_c为轧制后试样的厚度,mm。

1.2 检测分析

将轧制后的试样切割成规则状(长为15 mm,宽

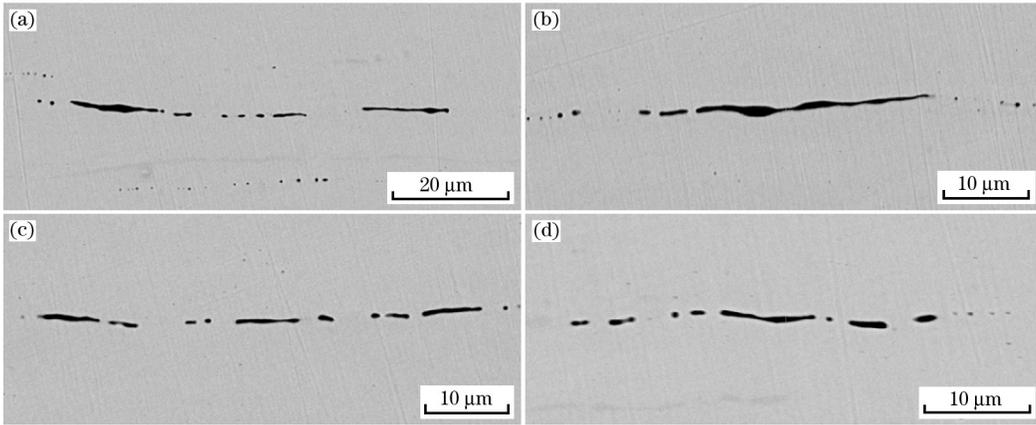
为10 mm),并镶嵌在环氧树脂内,使用SiC砂纸和金刚石抛光膏将试样纵截面磨抛光至0.25 μm。最后,利用扫描电子显微镜(SEM, Phenom-Prox)和X射线能谱仪(EDS, Phenom-Prox)对试样纵截面上的夹杂物形貌、成分、尺寸和数量等进行分析。

2 结果和讨论

2.1 热轧板内夹杂物特点

热轧板内典型的夹杂物形貌如图1所示。热轧后,夹杂物沿轧制方向发生变形。虽然一些夹杂物在热轧过程中被轧断,但热轧板内仍存在较大尺寸长条状夹杂物。热轧板内典型夹杂物的SEM扫描结果如图2所示。可以看出,夹杂物的成分比较均匀,长条状夹杂物的成分主要为均匀的SiO₂-CaO-MnO-Al₂O₃。

将热轧板内CaO-MnO-Al₂O₃-SiO₂夹杂物体系投影到SiO₂质量分数为43%的CaO-MnO-Al₂O₃伪三元相图中,结果如图3所示。可以看出,热轧板内夹杂物成分主要分布在1 300 °C以下的低熔点区域。



(a)、(b) 较大尺寸长条状夹杂物(大于 20 μm); (c)、(d)较小长条状夹杂物(小于 20 μm)。

图 1 热轧板内典型夹杂物形貌

Fig. 1 Typical morphology of inclusions in hot rolling plates

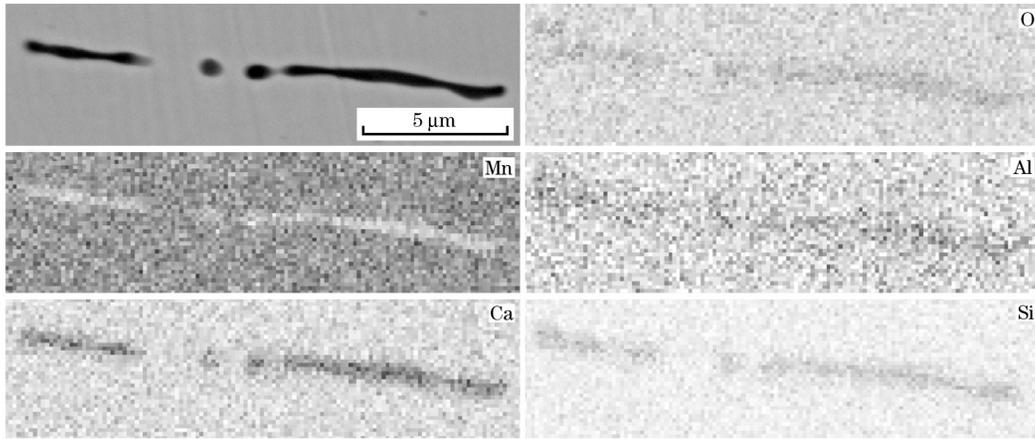


图 2 热轧板内典型夹杂物的SEM扫描结果

Fig. 2 SEM results of typical inclusions in hot rolling process

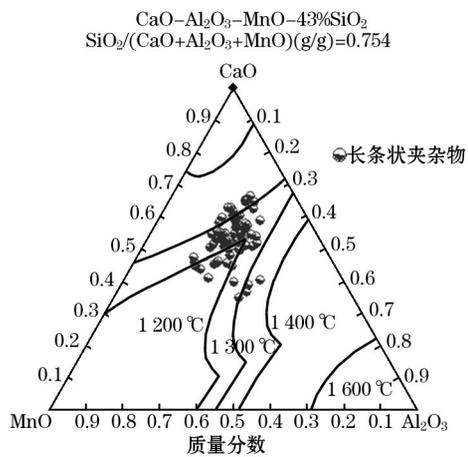


图 3 硅脱氧 304 不锈钢热轧板内夹杂物成分分布

Fig. 3 Composition distribution of inclusions in hot rolling process

2.2 冷轧过程夹杂物变化

冷轧后试样内的典型夹杂物形貌如图 4 所示。

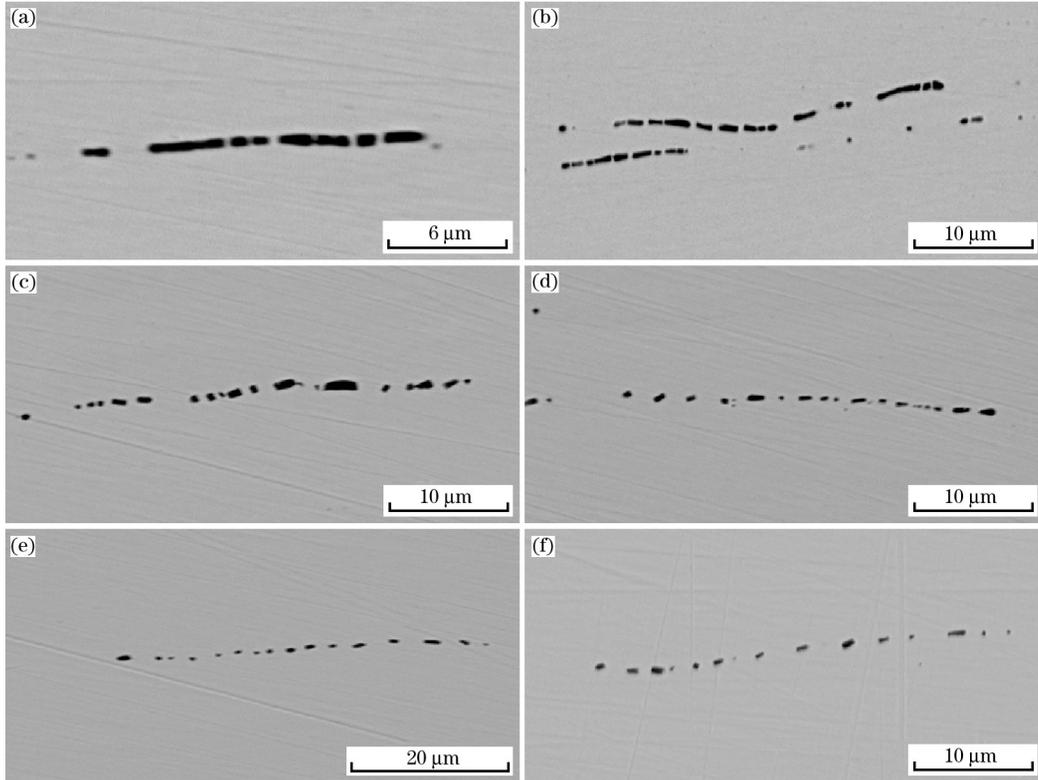
大尺寸长条状夹杂物在冷轧过程中被轧断, 形成多个棱角状的小尺寸夹杂物。随着冷轧压下量的增加, 断裂后的夹杂物尺寸逐渐降低, 而断裂的小尺寸夹杂物之间的距离则逐渐增加。

冷轧过程试样内夹杂物长宽比的变化情况如图 5 所示。冷轧前, 试样内长宽比为 1~3 的夹杂物数量较多, 其数量密度约为 200 个/mm²。这可能是由于连铸坯热轧变形量大, 导致一些夹杂物在热轧过程中被轧碎, 形成多个小尺寸夹杂物。同时也可以看出, 冷轧前试样内也存在较多长宽比大于 3 的大尺寸长条状夹杂物, 其数量密度约为 150 个/mm²。冷轧过程中, 随着冷轧压下量的增加, 大尺寸长条状夹杂物发生断裂, 导致长宽比大于 3 的夹杂物的数量密度逐渐降低至约 50 个/mm², 而长宽比为 1~3 的夹杂物数量密度则增加至约 490 个/mm²。

将冷轧过程长条状夹杂物断裂后形成的小尺寸夹杂物的长度之和定义为该夹杂物断裂前的初

始长度。冷轧过程中夹杂物断裂后形成的小尺寸夹杂物个数和夹杂物初始长度的关系如图 6 所示。冷轧过程中,随着夹杂物初始长度的增加,断

裂形成的小尺寸夹杂物个数增加。同时,随着冷轧压下量的增加,夹杂物被轧断的个数也发生轻微增加。



(a)、(b) C-1; (c)、(d) C-2; (e)、(f) C-3。

图 4 冷轧试样内的典型夹杂物形貌

Fig. 4 Typical morphology of inclusions in cold rolling plates

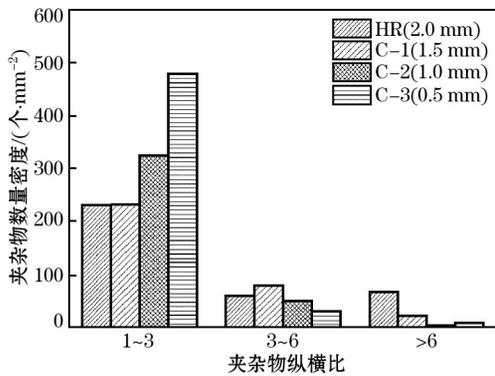


图 5 冷轧过程试样内夹杂物的长宽比变化情况

Fig. 5 Change of aspect ratio of inclusions during cold rolling process

断裂形成的小尺寸夹杂物平均尺寸和夹杂物初始长度关系如图 7 所示。当冷轧压下量较小时(在 C-1 中),断裂形成的小尺寸夹杂物的尺寸随夹杂物初始长度的增加而增加。随着冷轧压下量的增加,断裂形成的小尺寸夹杂物的尺寸不再受夹杂

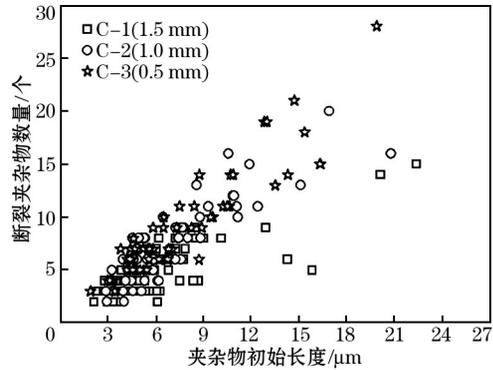


图 6 夹杂物断裂的数量和夹杂物初始长度的关系
Fig. 6 Number of fractured particles with different original lengths

物初始尺寸的影响。试样由 1.5 冷轧至 1.0 mm,断裂形成的小尺寸夹杂物尺寸降低,最小的夹杂物尺寸约为 0.5 μm。而将试样由 1.0 冷轧至 0.5 mm,断裂形成的夹杂物尺寸仅发生轻微降低,断裂夹杂物的最小尺寸仍约为 0.5 μm。因此,推测冷轧过程中夹杂物不再发生断裂的临界尺寸约为 0.5 μm。

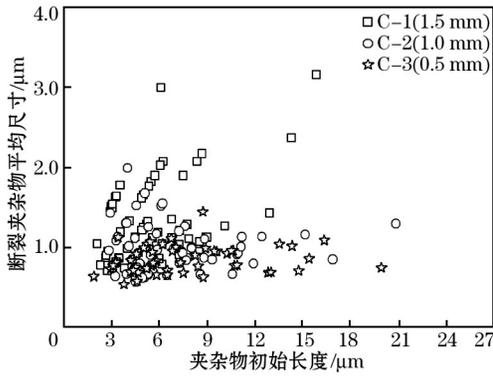


图 7 断裂夹杂物的平均尺寸和夹杂物初始长度的关系
 Fig. 7 Average size of fractured particles with different original lengths

冷轧过程试样内长条状夹杂物平均尺寸随压下率的变化情况如图 8 所示。大尺寸的长条状夹杂物在冷轧开始时被轧断, 导致夹杂物的平均尺寸急剧减小。随着冷轧压下量的增加, 断裂形成的夹杂物平均尺寸逐渐减小。同时, 夹杂物的平均尺寸变化范围也呈缩小趋势, 这说明冷轧过程试样内断裂形成的小夹杂物尺寸趋于一致。对冷轧过程断裂形成的夹杂物尺寸和冷轧压下率关系进行线性拟合, 可以得到图 8 中的数学表达式。利用该公式, 可以粗略预测大尺寸长条状夹杂物在实际冷轧过程中的尺寸变化情况。断裂夹杂物间平均间距与冷轧压下率的关系如图 9 所示。可以看出, 随着冷轧压下率的增加, 断裂夹杂物间的平均间距增加。但两者并不是线性关系。在冷轧压下率由 25% 增加至 50% 时, 断裂夹杂物间的平均间距仅由 0.38 轻微增加至 0.55 μm , 而在冷轧压下率由 50% 增加至 75% 时, 断裂夹杂物间的平均间距显著增加至 1.5 μm , 这说明冷轧压下率不是断裂夹杂物间距离的决定性因素。

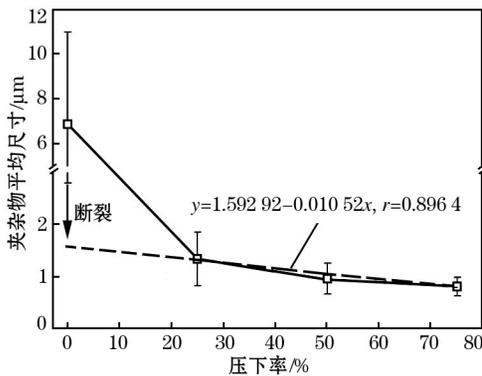


图 8 长条状夹杂物平均尺寸与冷轧压下率的关系
 Fig. 8 Change in size of long-strip inclusions during cold rolling

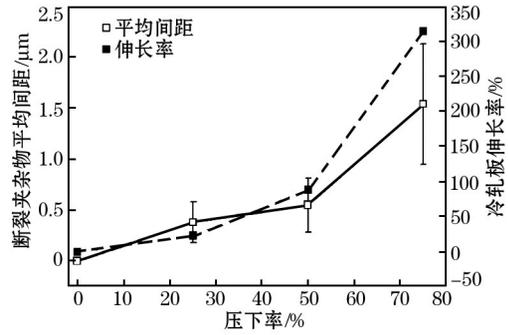


图 9 断裂夹杂物间平均间距与冷轧压下率的关系
 Fig. 9 Change in average distance among fractured particles and elongation of cold rolled plates

冷轧过程中, 试样会沿轧制方向延伸。如图 9 所示, 随着压下率的增加, 试样的伸长率增加。当压下率由 25% 增加至 50% 时, 试样的伸长率由 23% 增加至 88%。然而, 当压下率增加至 75% 时, 试样的伸长率显著增加至 314%。可以看出, 试样的伸长率与断裂夹杂物间平均距离的变化趋势一致。

2.3 氧化物夹杂变形机理

由图 3 可知, 热轧板内夹杂物成分主要分布在 1 300 $^{\circ}\text{C}$ 的低熔点区。在炼钢温度 (1 600 $^{\circ}\text{C}$) 下, 夹杂物在钢液中应该呈液相且铸坯中夹杂物应为球形。夹杂物的变形能力与夹杂物的熔点紧密相关^[29-30]。一般来说, 低熔点夹杂物的变形能力更强, 其在铸坯后续的机械处理过程中对钢材质量的危害也更小。

由图 1 可知, 在热轧板内观察到许多长条状的大尺寸夹杂物。低熔点的 $\text{SiO}_2\text{-CaO-MnO-Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物在热轧过程中表现出良好的变形能力。一些长条状的夹杂物在热轧过程中发生了断裂, 这可能是由于热轧的变形率较大 (达到了 99%) 造成的。轧制过程中, 随着变形量的增加, 夹杂物的变形能力会逐渐降低^[29, 31]。当变形量超过夹杂物的变形极限时, 夹杂物会发生断裂。

对于硅酸盐夹杂物而言, 在轧制过程中存在变形/不变形转变温度^[25-27, 32]。当轧制温度高于变形/不变形转变温度时, 夹杂物为塑性夹杂物。当轧制温度低于转变温度时, 夹杂物表现为脆性或不变形。因此, 在热轧内观察到许多长条状的低熔点 $\text{SiO}_2\text{-CaO-MnO-Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物 (图 1)。在冷轧过程中, 这些硅酸盐夹杂物发生脆性断裂 (图 4)。冷轧后, 轧板内长条状的大尺寸夹杂物变为细小的夹杂物, 有利于提高不锈钢带的质量。

轧制过程中, 夹杂物的变形与夹杂物和钢基体间的摩擦力有关^[33]。与球形夹杂物相比, 长条状夹

杂物的表面积/体积增大,夹杂物与钢基体间的接触面积更大且夹杂物间的连接更弱,冷轧时夹杂物会承受更大的应力,从而使夹杂物更容易发生断裂。随着夹杂物尺寸的降低,夹杂物/钢基体间界面能对夹杂物变形的影响将更加显著,夹杂物的变形能减

小,夹杂物的变形受到限制^[32]。如图 8 所示,随着冷轧压下量的增加,断裂夹杂物的尺寸逐渐减小,且当夹杂物尺寸减小到约 0.5 μm 时,夹杂物不再发生断裂。长条状硅酸盐夹杂物在冷轧过程中的演变过程如图 10 所示。

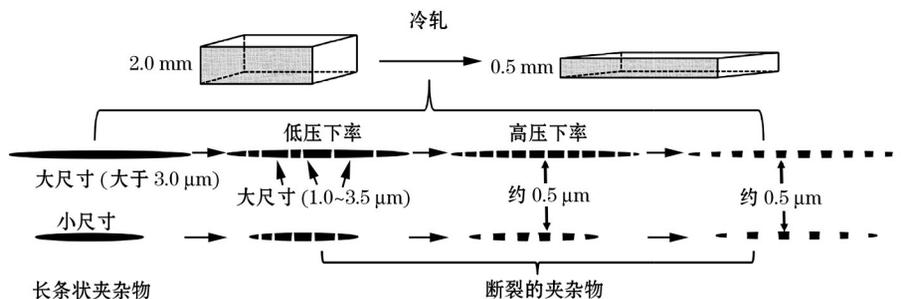


图 10 冷轧过程中长条状硅酸盐夹杂物演变

Fig. 10 Evolution of large-sized elongated silicate inclusions during cold rolling

3 结论

(1) 硅脱氧 304 不锈钢热轧板内的夹杂物类型主要为低熔点的大尺寸长条状 $\text{SiO}_2\text{-CaO-MnO-Al}_2\text{O}_3$, 其在冷轧过程中发生断裂, 形成多个 1.0~3.0 μm 的小尺寸夹杂物。随着冷轧压下量的增加, 断裂后形成的夹杂物尺寸逐渐降低至 0.5~1.5 μm 。

(2) 当冷轧变形量较小时, 断裂形成的夹杂物的尺寸与夹杂物的初始长度有关。夹杂物的初始长度越大, 断裂后形成的夹杂物尺寸越大。随着冷轧压下量的增加, 断裂后形成的夹杂物的尺寸逐渐减小且不再受夹杂物初始长度的影响。冷轧时, 夹杂物不再发生断裂的临界尺寸约为 0.5 μm 。

(3) 冷轧过程断裂形成的夹杂物之间的距离与夹杂物的初始尺寸无关, 主要由冷轧板的伸长率决定。随着冷轧板伸长率的增加, 断裂后形成的小尺寸夹杂物之间的平均距离增加至 1.5 μm 。

参考文献:

[1] Park J H, Todoroki H. Control of $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ spinel inclusions in stainless steels[J]. ISIJ International, 2010, 50(10): 1333.
 [2] Zhang L, Thomas B G. State of the art in evaluation and control of steel cleanliness[J]. ISIJ International, 2003, 43(3): 271.
 [3] ZHOU Y T, ZHENG S J, ZHANG B, et al. Atomic scale understanding of the interaction between alloying copper and MnS inclusions in stainless steels in NaCl electrolyte[J]. Corrosion Science, 2016, 111: 414.
 [4] Tsutsumi Y, Nishikata A, Tsuru T. Pitting corrosion mechanism of Type 304 stainless steel under a droplet of chloride solutions [J]. Corrosion Science, 2007, 49(3): 1394.
 [5] 张欣杰, 张欢欢, 崔利民. 奥氏体不锈钢夹杂物控制工艺

技术探讨[J]. 中国冶金, 2018, 28(1): 45. (ZHANG Xin-jie, ZHANG Huan-huan, CUI Li-min. Discussion of austenitic stainless steel inclusion control technology[J]. China Metallurgy, 2018, 28(1): 45.)

[6] Sakata K. Technology for production of austenite type clean stainless steel[J]. ISIJ International, 2006, 46(12): 1795.
 [7] Okuyama G, Yamaguchi K, Takeuchi S, et al. Effect of slag composition on the kinetics of formation of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ inclusions in aluminum killed ferritic stainless steel[J]. ISIJ International, 2000, 40(2): 121.
 [8] Suzuki M, Yamaguchi R, Murakami K, et al. Inclusion particle growth during solidification of stainless steel[J]. ISIJ International, 2001, 41(3): 247.
 [9] Hojo M, Nakao R, Umezaki T, et al. Oxide inclusion control in ladle and tundish for producing clean stainless steel[J]. ISIJ International, 1996, 36(S): 128.
 [10] Todoroki H, Mizuno K. Effect of silica in slag on inclusion compositions in 304 stainless steel deoxidized with aluminum [J]. ISIJ International, 2004, 44(8): 1350.
 [11] REN Y, ZHANG L, FANG W, et al. Effect of slag composition on inclusions in Si-deoxidized 18Cr-8Ni stainless steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(2): 1024.
 [12] WANG Q, WANG L, ZHAI J, et al. Evolution of inclusions in Fe-13Cr treated by $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ -based top slag[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 48(1): 564.
 [13] Cha W Y, Kim D S, Lee Y D, et al. A thermodynamic study on the inclusion formation in ferritic stainless steel melt[J]. ISIJ International, 2004, 44(7): 1134.
 [14] 喻大刚, 陈兴润, 程云霞, 等. 钙处理对 430 不锈钢板坯夹杂物的影响[J]. 中国冶金, 2017, 27(10): 15. (YU Da-gang, CHEN Xing-run, CHENG Yun-xia, et al. Effect of calcium treatment on inclusions in 430 stainless steel slabs[J]. China Metallurgy, 2017, 27(10): 15.)
 [15] 陈兴润, 胡桓彰. 中间包覆盖剂对 430 不锈钢水洁净度的

- 影响[J]. 中国冶金, 2017, 27(8): 36. (CHEN Xing-run, HU Huan-zhang. Effect of tundish fluxes on cleanliness of 430 stainless steel[J]. China Metallurgy, 2017, 27(8): 36.)
- [16] 王昆鹏,姜敏,赵昊乾,等. 切割丝用盘条非金属夹杂物对比分析[J]. 钢铁, 2016, 51(1): 33. (WANG Kun-peng, JIANG Min, ZHAO Hao-qian, et al. Contrast on non-metallic inclusions control in wire rods for saw wire[J]. Iron and Steel, 2016, 51(1): 33.)
- [17] 赵东伟,李海波,高攀,等. 非钙处理铝脱氧车轮钢夹杂物形成及变形行为[J]. 钢铁, 2016, 51(1): 25. (ZHAO Dong-wei, LI Hai-bo, GAO Pan, et al. Inclusions formation and deformation in Al-killed wheel steel without calcium treatment[J]. Iron and Steel, 2016, 51(1): 25.)
- [18] 续飞飞,程树森. 冷轧过程轧板内圆形夹杂物变形[J]. 中国冶金, 2014, 24(7): 36. (XU Fei-fei, CHENG Shu-sen. Deformation of spherical inclusions in steel sheet during cold rolling process[J]. China Metallurgy, 2014, 24(7): 36.)
- [19] 陈方,刘建华,王振,等. 高级别船板钢轧制过程夹杂物的行为研究[J]. 钢铁研究学报, 2013, 25(7): 42. (CHEN Fang, LIU Jian-hua, WANG Zhen, et al. Investigation on inclusions behavior of high grade ship plate steel during rolling process [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2013, 25(7): 42.)
- [20] 李璟宇,成国光,钱国余,等. 304 不锈钢热(冷)轧板表面线缺陷[J]. 中国冶金, 2017, 27(1): 29. (LI Jing-yu, CHENG Guo-guang, QIAN Guo-yu, et al. Line defect on surface of hot(cold)-rolled 304 stainless steel sheet[J]. China Metallurgy, 2017, 27(1): 29.)
- [21] Kimura S, Hoshikawa I, Ibaraki N, et al. Fracture behavior of oxide inclusions during rolling and drawing[J]. Tetsu-to-Hagane, 2002, 88(11): 755.
- [22] Yamamoto K, Yamamura H, Suwa Y. Behavior of non-metallic inclusions in steel during hot deformation and the effects of deformed inclusions on local ductility[J]. ISIJ International, 2011, 51(12): 1987.
- [23] XU G, JIANG Z, LI Y. Formation mechanism of CaS-bearing inclusions and the rolling deformation in Al-killed, low-alloy steel with Ca treatment[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(4): 2411.
- [24] YANG W, GUO C, ZHANG L, et al. Evolution of oxide inclusions in Si-Mn killed steels during hot-rolling process[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 48(5): 2717.
- [25] Pickering F B J, Met A. Some influence of mechanical working on the deformation of non-metallic inclusions[J]. J Iron Steel Inst, 1958, 178(3): 148.
- [26] Maunder P J H, Charles J A. Behavior of non-metallic inclusions in a 0.2 percent carbon steel ingot during hot rolling[J]. J Iron Steel Inst, 1968, 206(7): 705.
- [27] Charles J A, Uchiyama I. Behavior of silicate inclusions in iron during hot rolling [J]. J Iron Steel Inst, 1969, 207(7): 979.
- [28] Ekerot S. Behaviour of silicate inclusions in steel during hot working[J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 1974, 3(1): 21.
- [29] Malkiewicz T, Rudnik S. Deformation of non-metallic inclusions during rolling of steel[J]. Journal of the Iron and Steel Institute, 1963, 201(1): 33.
- [30] Kawahara J, Tanabe K, Banno T, et al. Advance of valve spring steel[J]. Wire Journal International(USA), 1992, 25(11): 55.
- [31] Luo C, Ståhlberg U. An alternative way for evaluating the deformation of MnS inclusions in hot rolling of steel[J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2002, 31(3): 184.
- [32] Wardle G, Billington J C. Influence of composition and temperature upon relative plasticity index of silicate inclusions in steel [J]. Metals Technology, 1983, 10(1): 393.
- [33] Rudnik S. Discontinuities in hot-rolled steel caused by non-metallic inclusions[J]. J Iron Steel Inst, 1966, 204(4): 374.