

## 100 t EAF-LF-VD-CC 流程 GCr15 轴承钢铸坯和圆钢夹杂物分析

杨光维<sup>1</sup> 王新华<sup>2</sup>

(1 宝山钢铁股份有限公司研究院, 上海 201900; 2 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

**摘要** 轴承钢 GCr15 EAF 出钢用专用精炼渣和 Al 预脱氧, 钢中 Al 含量为 0.03% ~ 0.06%, LF 精炼渣为 /% : 53 ~ 58CaO, 6 ~ 16SiO<sub>2</sub>, 15 ~ 30Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3 ~ 10MgO, ≤ 1 (FeO + MnO)。利用自动扫描电镜 ASPEX 分析了 320 mm × 480 mm 铸坯和 Φ45 mm 热轧圆钢的夹杂物。结果表明, GCr15 轴承钢铸坯和圆钢中的氧化物夹杂为镁铝尖晶石或钙铝酸盐, 铸坯和圆钢边部的氧化物夹杂数量要大于中心, 大于 10 μm 夹杂物为球状钙铝酸盐或钙铝酸盐与镁铝尖晶石复合氧化物夹杂; 铸坯和圆钢中非氧化物类夹杂主要有 MnS、TiN 和包裹型夹杂物 MnS、TiN 和 CaS 包裹镁铝尖晶石以及 CaS 包裹钙铝酸盐。利用 Factsage 计算得出, MnS 和 TiN 在凝固过程中析出, 并分别在固相率  $f_s$  为 0.9 和 0.6 之后大量形成。CaS 在炼钢温度下 (1 600 °C) 就大量存在, 在钢液冷却过程中少量析出, 极少量在之后的凝固过程中形成。

**关键词** 100 t EAF-LF-VD-CC 流程 GCr15 轴承钢 320 mm × 480 mm 铸坯 Φ45 mm 圆钢 夹杂物 ASPEX

## Analysis on Inclusions in Casting Bloom and Round Bar of Bearing Steel GCr15 by 100 t EAF-LF-VD-CC Flowsheet

Yang Guangwei<sup>1</sup> and Wang Xinhua<sup>2</sup>

(1 Research Institute, Baoshan Iron and Steel Co Ltd, Shanghai 201900;

2 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

**Abstract** The bearing steel GCr15 in EAF tapping is pre-deoxidized by specialty refining slag and Al to control the Al content 0.03% ~ 0.06% in liquid, and the ingredient of LF refining slag is (/%) 53 ~ 58CaO, 6 ~ 16SiO<sub>2</sub>, 15 ~ 30Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3 ~ 10MgO, ≤ 1 (FeO + MnO). The inclusions in 320 mm × 480 mm casting bloom and hot-rolled Φ45 mm round bar are analyzed by using auto scanning electron microscope ASPEX. Results show that the oxide inclusions in casting bloom and round bar of bearing steel GCr15 are magnesia alumina spinel or calcium aluminate, and the amount of oxide inclusions at edge of bloom and round bar is more than that at center, and the larger than 10 μm inclusions are globular calcium aluminate or calcium aluminate-magnesia alumina spinel compound inclusion; the non-oxide inclusions in bloom and round bar are mainly MnS, TiN and cladding inclusions-magnesia alumina spinel covered by MnS, TiN or CaS, and calcium aluminate covered by CaS. It is obtained by using Factsage calculation that MnS and TiN precipitate during solidification process and large amounts precipitate respectively at solid fraction  $f_s$  being more than 0.9 and 0.6; there is large amount CaS in liquid at steelmaking temperature 1 600 °C, minor precipitates during liquid cooling process and tiny minority precipitates during solidification process.

**Material Index** 100 t EAF-LF-VD-CC Flowsheet, Bearing Steel GCr15, 320 mm × 480 mm Casting Bloom, Φ45 mm Round Bar, Inclusions, ASPEX

轴承对疲劳寿命及性能可靠性要求极高, 而非金属夹杂物破坏了钢的连续性, 往往是疲劳裂纹的起源, 因此, 要严格控制钢中的非金属夹杂物。本文采用全自动扫描电镜 ASPEX 对 GCr15 轴承钢铸坯和轧后圆钢中非金属夹杂物进行了大面积细致分析。

### 1 研究方法

在钢厂对 GCr15 轴承钢进行了 3 炉工业试验, 采用的炼钢工艺主要为: 100 t EAF → LF → VD → 320 mm × 480 mm 大方坯连铸 → 直径 45 mm 的圆钢。装入料为 30% ~ 45% 废钢, 55% ~ 70% 铁水。为降低电弧炉终点自由氧含量, 终点 C 含量控制在 0.2% ~ 0.5%。出钢过程加入轴承钢专用精炼渣及

铝铁进行预脱氧, 保证钢中 Al 含量在 0.03% ~ 0.06%。LF 初期根据情况加入石灰等造渣剂, 白渣保持时间不少于 20 min, LF 透气砖压力控制在  $0.42 \times 10^{-6} \sim 0.45 \times 10^{-6}$  Pa, 底吹氩气流量控制在 300 ~ 330 L/min, 保证精炼过程钢液不裸露。VD 处理前钢中 Al 含量控制在 0.02% ~ 0.05%。VD 处理时间不低于 25 min, 真空度小于 67 Pa 保持时间不小于 12 min, 软搅拌时间不少于 15 min, 软搅拌底吹氩气流量保持在 30 ~ 50 L/min。采用氩封保护浇注, 结晶器采用轴承钢专用保护渣, 电磁搅拌采用外置式 M-EMS。钢液和精炼炉渣成分见表 1 和表 2 所示。从表 2 可以看出, 精炼炉渣采用高碱度强还原性炉渣, 利于冶炼超低氧轴承钢。

表 1 GCr15 轴承钢液化学成分/%

Table 1 Chemical composition of liquid of bearing steel GCr15 /%

| C           | Si          | Mn          | P      | S       | Cr          |
|-------------|-------------|-------------|--------|---------|-------------|
| 0.97 ~ 1.03 | 0.19 ~ 0.23 | 0.28 ~ 0.32 | ≤ 0.01 | ≤ 0.007 | 1.45 ~ 1.55 |

表 2 GCr15 轴承钢精炼炉渣成分/%

Table 2 Ingredient of refining slag for bearing steel GCr15 /%

| CaO     | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO    | FeO + MnO |
|---------|------------------|--------------------------------|--------|-----------|
| 53 ~ 58 | 6 ~ 16           | 15 ~ 30                        | 3 ~ 10 | ≤ 1.0     |

对铸坯和轧后圆钢中心及边部进行了取样分析。取样方式见图 1。

采用德国进口 Rubi 530 自动磨样机对所取钢样进行了粗磨、精磨和抛光。采用全自动扫描电镜 ASPEX PSEM EXPLORER 对钢样中的夹杂物进行大量的分析统计。铸坯和圆钢的扫描面积分别为 50 mm<sup>2</sup> 和 200 mm<sup>2</sup>。本试验只对大于 1 μm 的夹杂物进行分析统计。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 铸坯及圆钢中氧化物夹杂

三个试验炉次铸坯及圆钢中氧化物夹杂成分分布基本一致, 本文只列出其中一炉。结果见图 2 和图 3。可以看出, 铸坯边部与中心及圆钢边部和中心的氧化物夹杂成分基本一致, 都是镁铝尖晶石或钙铝酸盐。

由图 4 可以看出, 所有炉次无论铸坯还是圆钢, 边部的氧化物夹杂数量要大于中心。

由图 5 和图 6 可以看出, 铸坯和圆钢中的大型夹杂物主要有两种, 一种是钙铝酸盐, 另一种是钙铝酸盐与镁铝尖晶石复合夹杂物。表 3<sup>[1]</sup> 为钢与非金属夹杂物的硬度。可以看出, 钙铝酸盐的硬度仅次于 TiN, 比 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物还高, 是钢基体的 3 倍多。由于硬度比较大, 轧制前后夹杂物几乎没有变形, 都保持球形。这种夹杂物被定义为 D 类球状不变形夹杂物<sup>[2]</sup>。它比 A 类 MnS、B 类氧化铝和 C 类硅酸盐类夹杂

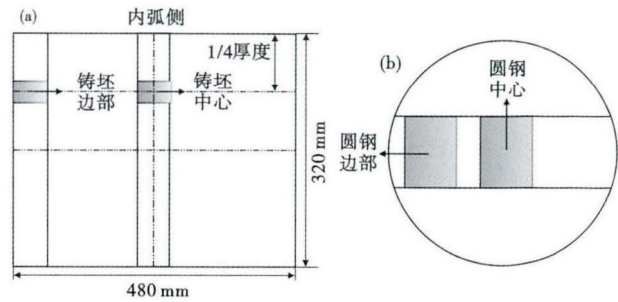


图 1 320 mm × 480 mm 铸坯(a)及 Φ45 mm 热轧圆钢(b)取样位置

Fig. 1 Sampling location at 320 mm × 480 mm casting bloom (a) and Φ45 mm hot-rolled round bar (b)

物对轴承钢的疲劳寿命危害都大。

钢中总氧含量由  $30 \times 10^{-6}$  降至  $15 \times 10^{-6}$  时, 轴承钢疲劳寿命提高 5 倍<sup>[3]</sup>。日本山阳特钢采用自己发明的 SNRP 技术可以把轴承钢中总氧含量控制到  $4.7 \times 10^{-6}$ <sup>[4]</sup>, 使用寿命与真空自耗和电渣重熔钢的疲劳寿命相当。为了实现超低氧, 现在钢铁厂的一

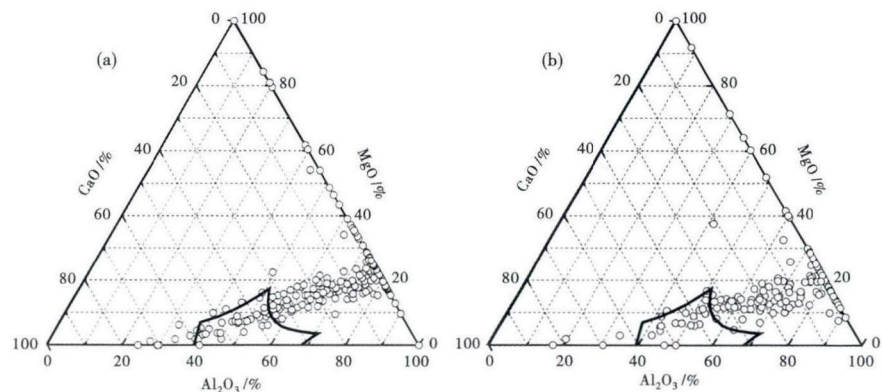


图 2 320 mm × 480 mm 铸坯边部(a)和中心(b)氧化物夹杂成分分布  
Fig. 2 Distribution of ingredient of oxide inclusions at edge (a) and center (b) of 320 mm × 480 mm casting slab

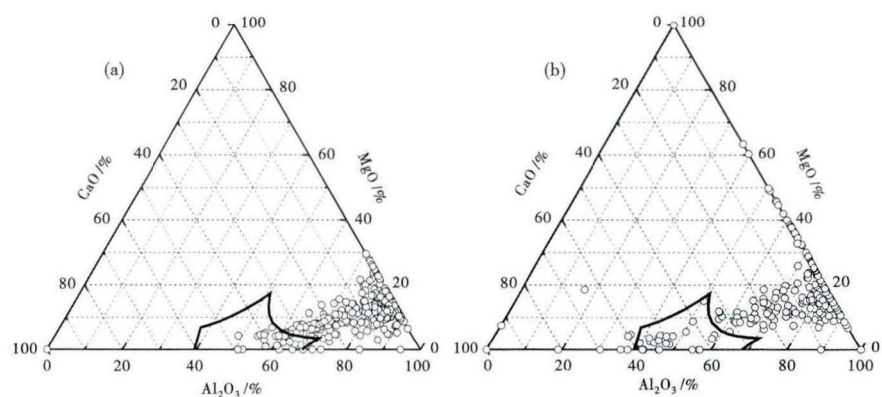


图 3 Φ45 mm 热轧圆钢边部(a)和中心(b)氧化物夹杂成分分布  
Fig. 3 Distribution of ingredient of oxide inclusions at edge (a) and center (b) of Φ45 mm hot-rolled round bar

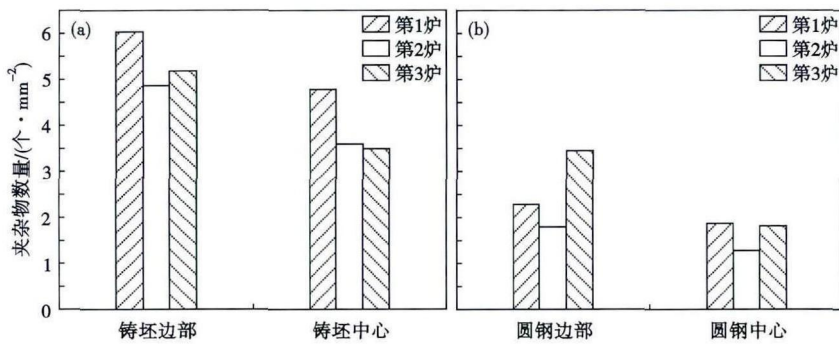
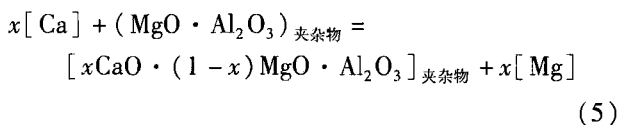
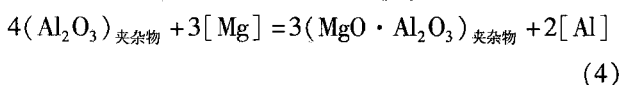
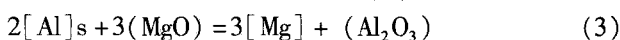
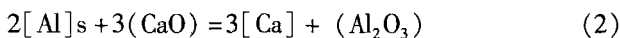


图 4 320 mm × 480 mm 铸坯(a)和 Φ45 mm 热轧圆钢(b)边部和中心氧化物夹杂数量分布  
Fig. 4 Distribution of amount of oxide inclusions at edge and center of 320 mm × 480 mm casting slab (a) and Φ45 mm hot-rolled round bar (b)

般做法是出钢加铝强脱氧,然后用高碱度强还原性炉渣进行精炼。出钢过程加入的 Al 会与钢中的溶解氧反应,生成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物(式 1)。在 LF 精炼及 VD 过程钢中的 Al 会还原渣中的 CaO 及 MgO,如式(2)和(3)。生成的 [Mg] 和 [Ca] 与钢中的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物发生反应生成镁铝尖晶石和钙铝酸盐,反应如式(4)和(5)所示。由于这些夹杂物与钢液接触角比较小<sup>[5-7]</sup>,很难从钢液中完全去除。而且直径 10 ~ 20 μm 的夹杂物由于其上浮速度远小于连铸拉坯速度,因此很容易被铸坯凝固前沿捕捉,最终留在铸坯里面<sup>[8]</sup>。关于控制钙铝酸盐的研究主要集中在降低炉渣碱度<sup>[9]</sup>、降低渣中 MgO 含量、降低钢中 [Al]<sub>s</sub><sup>[3]</sup>、控制耐火材料质量和延长真空处理时间<sup>[10]</sup>。



## 2.2 铸坯及圆钢中非氧化物类夹杂

铸坯和圆钢中的非氧化物类夹杂主要有纯 MnS、纯 TiN 和包裹型夹杂物(图 7,图 8)。包裹型夹杂物主要有 MnS、TiN 和 CaS 包裹镁铝尖晶石,还有 CaS 包裹钙铝酸盐。

(1) 纯 MnS 及 MnS 包裹镁铝尖晶石。从图 7(a,b)可以看出,320 mm × 480 mm 铸坯中的 MnS 呈长棒状或矩形状,不规则镁铝尖晶石被其完全包裹。

从表 3 可以看出,MnS 的 HV 硬度值为 150,非常软,是钢基体硬度的 1/4 ~ 1/5。轧制过程中非常容易变形,图 8(a,b)是 Φ45 mm 热轧圆钢中 MnS 和 MnS 包裹镁铝尖晶石的形貌。可以看出,经过轧制铸坯中的 MnS 变形为细长条状,长度一般小于 20 μm,有些包裹硬质夹杂物如镁铝尖晶石,减少了硬质夹杂物与钢基体的直接接触,被认为对轴承钢的疲劳性能无害甚至有益<sup>[11-12]</sup>。

(2) 纯 TiN 及 TiN 包裹镁铝尖晶石。从图 7(c,d)可以看出,铸坯中的 TiN 呈棱角状。从表 3 可以看出,TiN 的 HV 硬度值为 2 400,非常硬,比 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和钙铝酸盐都要硬,是钢基体硬度的 3 倍多。轧制过程中不变形,且呈棱角状加上热膨胀系数小于钢基体<sup>[13]</sup>,很容易在棱角处产生应力集中,萌生裂纹最终导致疲劳破坏。图 8(c,d)是 Φ45 mm 热轧圆

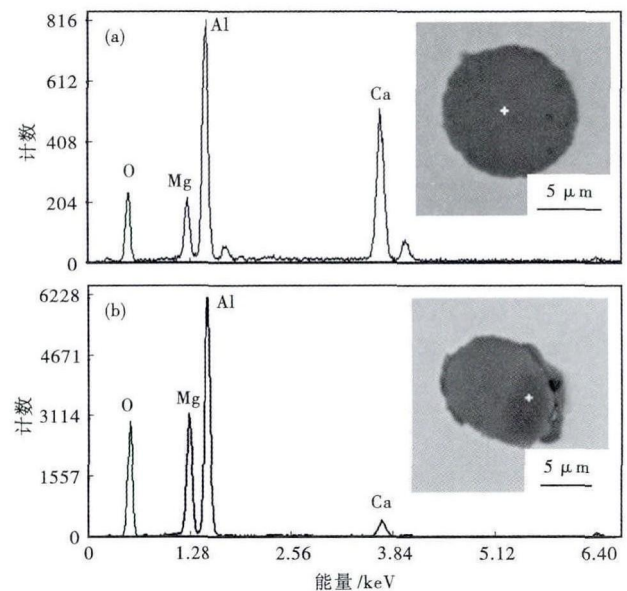


图 5 320 mm × 480 mm 铸坯中 > 10 μm 大型夹杂物的形貌及成分:(a) 钙铝酸盐;(b) 钙铝酸盐 + 镁铝尖晶石  
Fig. 5 Morphology and analysis of > 10 μm large inclusions in 320 mm × 480 mm casting bloom: (a) calcium aluminate; (b) calcium aluminate + magnesia alumina spinel

表 3 钢与非金属夹杂物的 HV 硬度值<sup>[1]</sup>  
Table 3 HV hardness value of steel matrix and nonmetallic inclusions<sup>[1]</sup>

| 基体  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiN   | CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnS |
|-----|--------------------------------|-------|------------------------------------|------------------------------------|-----|
| 700 | 1 900                          | 2 400 | 2 200                              | 2 100 ~ 2 400                      | 150 |

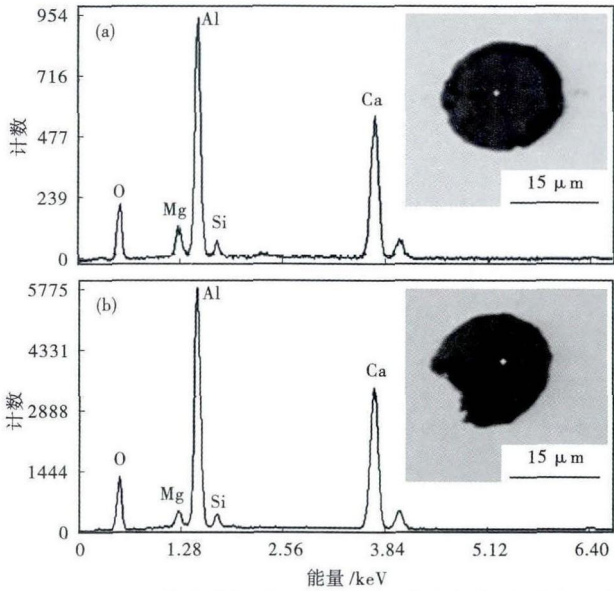


图 6 Φ45 mm 热轧圆钢中 >10 μm 大型夹杂物的形貌及成分: (a) 钙铝酸盐, (b) 钙铝酸盐 + 镁铝尖晶石  
 Fig. 6 Morphology and analysis of >10 μm large inclusions in Φ45 mm hot-rolled round bar: (a) calcium aluminate; (b) calcium aluminate + magnesia alumina spinel

钢中 TiN 和 TiN 包裹镁铝尖晶石的形貌。

日本大同特钢<sup>[14]</sup>通过使用低钛含量的废钢、铬铁合金、低 TiO<sub>2</sub> 含量的渣和耐火材料,在电弧炉出钢加铬铁合金,在 LF 造合适碱度的炉渣抑制增 Ti 等措施,可以控制钢中 Ti 含量 ≤ 5 × 10<sup>-6</sup>。而脱 N 主要在 RH 或 VD 真空过程中完成。

(3) CaS 包裹镁铝尖晶石或钙铝酸盐。铸坯中发现了 CaS 包裹镁铝尖晶石,如图 7(e) 所示。可以看出,整体夹杂物呈球状,核心镁铝尖晶石还保持棱角状。圆钢中的 CaS 包裹镁铝尖晶石如图 8(e) 所示,可以看出,经过轧制外层 CaS 有稍许变形,而且与钢基体接触的地方形成尖角状,容易引起疲劳裂纹。图 8(f) 是 Φ45 mm 热轧圆钢中 CaS 包裹钙铝酸盐夹杂物形貌。可以发现钙铝酸盐与钢基体之间形成了空隙,往往成为疲劳裂纹的起源。还有,由于外层 CaS 和核心镁铝尖晶石或钙铝酸盐硬度不同,在轧制过程中 CaS 往往脱落,沿轧制方向形成条串状,而核心保持不变或稍有变形,如图 8(g) 所示。

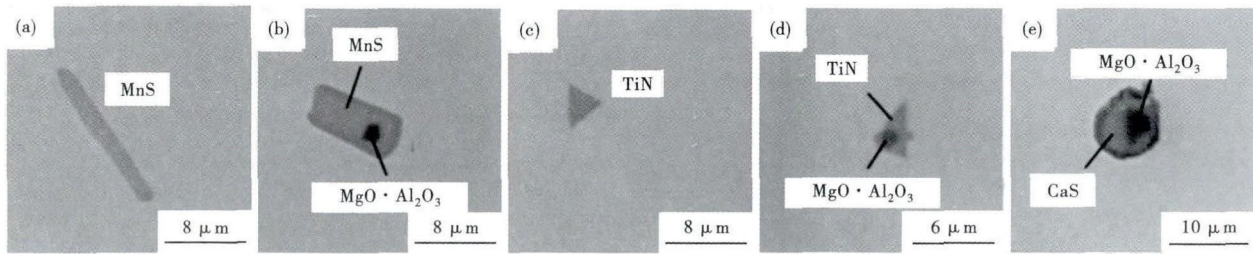


图 7 320 mm × 480 mm 铸坯中的非氧化物类夹杂形貌  
 Fig. 7 Morphology of non-oxide inclusions in 320 mm × 480 mm casting bloom

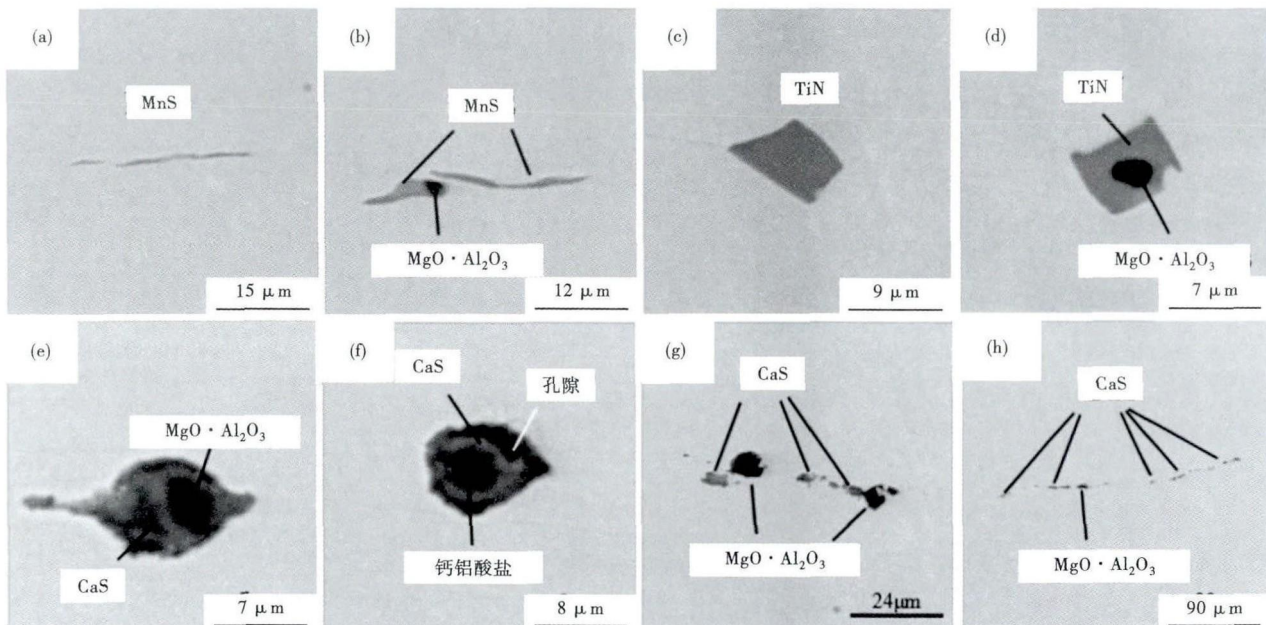


图 8 Φ45 mm 热轧圆钢中的非氧化物类夹杂形貌  
 Fig. 8 Morphology of non-oxide inclusions in Φ45 mm hot-rolled round bar

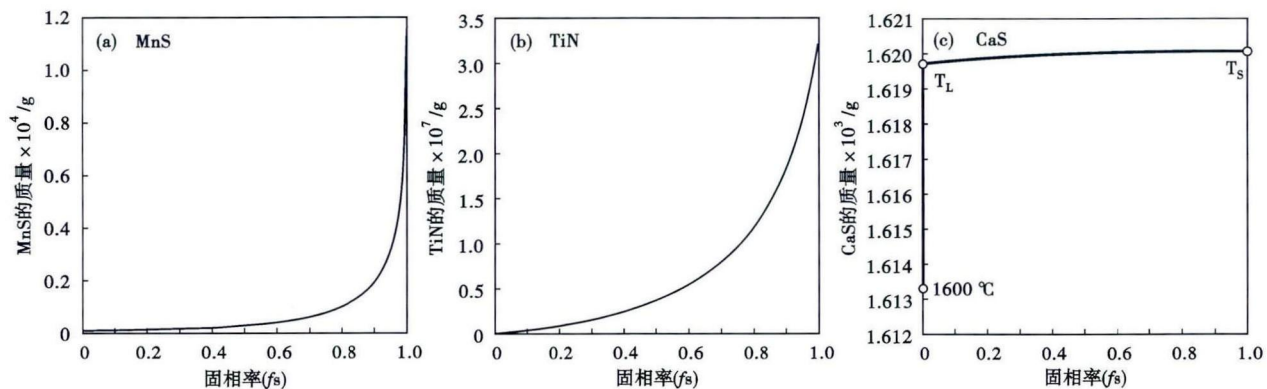


图9 钢液冷却及凝固过程夹杂物 MnS(a), TiN(b) 和 CaS(c) 的析出行为

Fig.9 Behavior of precipitating of inclusions MnS (a), TiN (b) and CaS (c) during liquid cooling and solidifying process

有时这种夹杂物长度可达两三百微米,如图 8(h) 所示,对轴承钢危害也很大。

图 9 为利用 Factsage 计算得到的钢液凝固过程 MnS、TiN、CaS 的析出行为。其中钢中 Ti、N、Mn、S 和 Ca 含量分别为  $23 \times 10^{-6}$ 、 $27 \times 10^{-6}$ 、0.32%、 $18 \times 10^{-6}$  和  $9 \times 10^{-6}$ 。通过计算得到,轴承钢液相线温度为  $1452\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,固相线温度为  $1326.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,这与实际钢液的液相线与固相线温度一致<sup>[15]</sup>。可以看出,MnS 在凝固过程中形成,并在固相率  $f_s$  为 0.9 之后大量形成。TiN 也是在凝固过程中形成的,并在固相率  $f_s$  为 0.6 之后大量形成。CaS 在炼钢温度下 ( $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 就大量存在,在钢液冷却过程中少量析出,极少量在之后的凝固过程中形成。

### 3 结论

(1)  $320\text{ mm} \times 480\text{ mm}$  铸坯边部与中心及  $\Phi 45\text{ mm}$  热轧圆钢边部和中心的氧化物夹杂成分都是镁

铝尖晶石或钙铝酸盐。铸坯和圆钢边部的氧化物夹杂数量要大于中心。铸坯和圆钢中直径大于  $10\text{ }\mu\text{m}$  的夹杂物为球状钙铝酸盐或钙铝酸盐与镁铝尖晶石复合氧化物夹杂。

(2) 铸坯和圆钢中非氧化物类夹杂物主要包括纯 MnS、纯 TiN 和包裹型夹杂物。包裹型夹杂物主要有 MnS、TiN 和 CaS 包裹镁铝尖晶石,还有 CaS 包裹钙铝酸盐。利用 Factsage 计算得出,在当前钢液成分下,MnS 在凝固过程中形成,并在固相率  $f_s$  为 0.9 之后大量形成。TiN 也是在凝固过程中形成的,并在固相率  $f_s$  为 0.6 之后大量形成。CaS 在炼钢温度下 ( $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 就大量存在,在钢液冷却过程中少量析出,极少量在之后的凝固过程中形成。

(3) 在轧制后的圆钢中发现钙铝酸盐和镁铝尖晶石与钢基体间存在空隙和应力集中点,还发现了长达两三百微米的条串状夹杂物。

### 参考文献

- [1] Fujimatsu T, Hiraoka K, Yamamoto A. Crack Initiation Behavior from Internal Defect in High Carbon-Chromium Bearing Steel Under Rolling Contact Fatigue[J]. Tetsu to Hagane, 2008, 94(1): 13-20.
- [2] 缪新德, 于春梅, 石超民, 等. 轴承钢中钙铝酸盐夹杂物的形成及控制[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(8): 771-774.
- [3] Uesugi T. Recent Development of Bearing Steel in Japan[J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1988, 28(11): 893-899.
- [4] Kawakami K, Taniguchi T, Nakashima K. Generation Mechanisms of Non-Metallic Inclusions in High-Cleanliness Steel [J]. Tetsu to Hagane, 2007, 93(12): 743-752.
- [5] Yin H, Shibata H, Emi T, et al. In-Situ Observation of Collision, Agglomeration and Cluster Formation of Alumina Inclusion Particles on Steel Melts[J]. ISIJ International, 1997, 37(10): 936-945.
- [6] Yin H, Shibata H, Emi T, et al. Characteristics of Agglomeration of Various Inclusion Particles on Molten Steel Surface[J]. ISIJ International, 1997, 37(10): 946-955.
- [7] Deng Z, Zhu M. A New Double Calcium Treatment Method for Clean Steel Refining[J]. Steel Research International, 2012, 84(6): 519-525.
- [8] 王新华, 李秀刚, 李强, 等. X80 管线钢板中条串状  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$  系非金属夹杂物控制[J]. 金属学报, 2013, 49(5): 553-561.
- [9] 王昌生, 易继松. 轴承钢非真空精炼工艺及其冶金效果[J]. 特殊钢, 1992, 13(1): 45-49.
- [10] 耿克, 吴明, 翁韶华, 等. 高纯净 GCr15 轴承钢脆性夹杂物的控制[J]. 特殊钢, 2008, 29(5): 54-55.
- [11] Tricot R, Monnot J, Lluansi M. How Microstructural Alterations Affect Fatigue Properties of 52100 Steel [J]. Metals Engineering Quarterly, 1972, 12(2): 39-47.
- [12] Enekes S. Effects of Some Metallurgical Characteristics on the Fatigue Life of Bearing Steels [J]. Production and Application of Clean Steels, 1972, 30(5): 215-220.
- [13] Brooksbank D, Andrews K W. Stress Fields Around Inclusions and Their Relation to Mechanical Properties [J]. Journal of the Iron and Steel Institute, 1972, 210(4): 246-255.
- [14] Yamaguchi T, Shinkai M, Kano T, et al. Development of a New Refining and Casting Process to Manufacture Ultra Clean Bearing Steel [J]. Denki Seiko (Electric Furnace Steel) (Japan), 2002, 73(1): 61-66.
- [15] 战东平, 姜周华, 龚伟, 等. 轴承钢中氮化钛的生成与控制 [J]. 过程工程学报, 2009, 9(s1): 238-241.

杨光维 (1986-), 男, 博士 (2015 年北京科技大学), 工程师, 2009 年北京科技大学 (本科) 毕业, 炼钢、二次精炼、夹杂物研究。E-mail: yangguangwei@baosteel.com

收稿日期: 2016-08-08