

· 工艺材料进展 ·

## 高品质轴承钢超低氧含量和非金属夹杂物控制的进展

杨虎林<sup>1</sup> 何平<sup>1</sup> 翟玉春<sup>2</sup>

(1 钢铁研究总院冶金工艺研究所, 北京 100081; 2 东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004)

**摘要** 超低氧含量和低夹杂物级别是高品质轴承钢的重要指标。分析了高品质轴承钢中超低氧含量和非金属夹杂物控制的影响因素, 如出钢除渣、铝脱氧、高碱度精炼渣、真空或非真空条件下的长时间搅拌和合理的生产工艺流程等。得出生产  $5 \times 10^{-6}$  [O]、 $\leq 1 \times 10^{-6}$  [H] 和  $\leq 12 \times 10^{-6}$  [Ti] 的超纯净高品质轴承钢的关键是对各冶炼工序的严格控制。文中分析了国内轴承钢的质量并提出了研究方向。

**关键词** 高品质轴承钢 超低氧 非金属夹杂 冶炼工艺

## Progress on Control of Ultra-Low-Oxygen Content and Non-Metallic Inclusions in High Quality Bearing Steel

Yang Hulin<sup>1</sup>, He Ping<sup>1</sup> and Zhai Yuchun<sup>2</sup>

(1 Institute for Metallurgical Process, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081;  
2 School of materials and Metallurgy, northeastern University, Shenyang 110004)

**Abstract** The ultra-low-oxygen content and low rating of inclusions are key indexes for high quality bearing steel. The influence factors on control of ultra-low-oxygen content and nonmetallic inclusions in high quality bearing steel are analyzed including removal of slag during tapping, deoxidation with aluminium, high basicity refining slag, stirring for long time at vacuum or atmosphere, and available process flow sheet. It is obtained that the key factor to produce ultra-clean high quality bearing steel with  $5 \times 10^{-6}$  [O],  $\leq 1 \times 10^{-6}$  [H] and  $\leq 12 \times 10^{-6}$  [Ti] is strict control of each steelmaking procedure. The quality of bearing steel produced at home is analyzed and the research orientation for high-quality bearing steel is put forward.

**Material Index** High-Quality Bearing Steel, Ultra-Low Oxygen, Nonmetallic Inclusion, Steelmaking Process

随着社会进步和科学技术的发展, 尽管较多轴承钢厂的钢中全氧已控制在  $10 \times 10^{-6}$  以下<sup>[1]</sup>, 但仍把钢中氧含量控制在超低水平作为改善钢性能的重要手段之一。国外钢铁企业如瑞典 SKF<sup>[2,4]</sup> 以及日本山阳特殊钢<sup>[1,5-7]</sup>、大同特殊钢<sup>[8]</sup> 等都有比较成熟的控制钢中全氧和非金属夹杂物的工艺技术。

### 1 国内外高品质轴承钢中全氧和夹杂物控制水平

表 1 列出了国内外先进轴承钢公司生产的高品质轴承钢中全氧和非金属夹杂物的控制水平。瑞典 SKF 公司 OVAKO 厂生产的高品质轴承钢中氧含量为  $5 \times 10^{-6}$ , 夹杂物含量达到极低的程度<sup>[2,4]</sup>。日本神户钢铁公司和大同特殊钢公司的全氧 T. O 分别达到了  $4 \times 10^{-6}$ <sup>[9]</sup>、 $\leq 5 \times 10^{-6}$ <sup>[8]</sup>, 日本山阳特殊钢厂轴承钢氧含量

的变化如图 1 所示, 氧含量已经可以控制在  $5 \times 10^{-6}$  以下, 氧化物夹杂可控制在  $11 \mu\text{m}$  以内, 其接触疲劳寿命比普通轴承钢的寿命大幅度提高<sup>[1,5]</sup>。国内大冶特钢和兴澄特钢公司生产的高品质轴承钢氧含量分别达到  $6.5 \sim 6.7) \times 10^{-6}$ <sup>[10]</sup>、 $(7 \sim 9) \times$

表 1 国内外高品质轴承钢中全氧和夹杂物控制现状

Table 1 Present status of total oxygen content and nonmetallic inclusions control levels for high quality bearing steel produced at home and abroad

特殊钢厂	全氧 T. O/ $10^{-6}$	[Ti]/ $10^{-6}$	[H]或[N]/ $10^{-6}$	夹杂物控制水平
瑞典 SKF	$5^{[2,4]}$	$8 \sim 12^{[4]}$	$[H] \leq 1^{[4]}$	夹杂物含量达到极低的程度 <sup>[2,4]</sup>
日本神户	$4^{[9]}$	$7^{[9]}$	-	$23 \sim 27 \mu\text{m}$ , 夹杂物个数少, 最大夹杂物粒径也小 <sup>[9]</sup>
日本山阳	$\leq 5^{[1,5]}$	-	-	$\leq 11 \mu\text{m}^{[1]}$
日本大同	$\leq 5^{[8]}$	$\leq 5^{[8]}$	$[N] \leq 30^{[8]}$	极细小的氧化物夹杂和 Ti 夹杂 <sup>[8]</sup>
德国蒂森	$12^{[12-13]}$	-	-	B 细 1 ~ 1.5 级, B 粗 0 ~ 0.2 级, D 细 0.7 ~ 1.2 级, D 粗 0 ~ 0.5 级 <sup>[12-13]</sup>
中国大冶特钢	$6.5 \sim 6.7^{[10]}$	$17 \sim 19^{[10]}$	-	A 类 0.5 ~ 1.5 级, B 类 0 ~ 1.0 级, C 类 0 级, D 类 0.5 ~ 1.0 级 <sup>[10]</sup>
中国兴澄特钢	$7 \sim 10^{[11]}$	-	$[H] \leq 1.5^{[11]}$	A 类 0 ~ 1.5 级, B 类 0 ~ 0.5 级, C 类 0 级, D 类 $\leq 0.5$ 级 <sup>[11]</sup>
中国北满特钢	$7.5^{[14]}$	$25^{[14]}$	-	A 类 0 ~ 0.5 级, B 类 0 ~ 0.15 级 <sup>[14]</sup>

注:“-”表示无相关信息。

$10^{-6}$ [11]。

我国轴承钢氧含量的波动偏差多在  $2 \times 10^{-6}$  以上,而瑞典 SKF 轴承钢的氧含量波动偏差为  $0.6 \times 10^{-6}$ [1]。Bhadeshia 等<sup>[15]</sup>认为现在的高品质轴承钢中全氧含量需控制在  $10 \times 10^{-6}$ [16-17] 以下,实际生产中的波动控制在  $(\pm 1.5) \times 10^{-6}$ [18];铸锭中的平均全氧含量应控制在  $(2 \sim 5) \times 10^{-6}$ [19]。近 40 年来,日本山阳特殊钢厂轴承钢中氧含量的变化见图 1<sup>[20]</sup>。

## 2 国内外高品质轴承钢生产工艺流程

国内外几家主要轴承钢生产厂家所采用的工艺流程如表 2 所示。

瑞典 SKF 公司开发出 SKF-MR(熔炼+精炼)工艺,该工艺流程是:双壳炉熔炼(C、P含量调整到允许值)→除渣→感应搅拌→加热→脱氧→合金化→脱硫→真空脱气→模铸 3.4 t 钢锭<sup>[1,3]</sup>。在该工艺中,钢包炉可以加热,利用铝沉淀脱氧,配以强烈的电磁搅拌,使脱氧产物有充分的时间分离,可以把氧含量和夹杂物含量控制在极低的程度。

日本山阳特殊钢公司近几年来开发的 SNRP(Sanyo New Refining Process)超纯净轴承钢的生产工艺,即:90 t UHP 电弧炉炼钢→偏心炉底出钢→LF→RH→完全垂直连铸,生产出氧含量为  $5 \times 10^{-6}$ ,夹杂物尺寸  $\leq 11 \mu\text{m}$  的轴承钢<sup>[1,5-6]</sup>。大同特殊钢公司最近开发的 MRAC-SSS(Multi-function Refining & Advanced Casting-Special Solution & Soaking),工艺流程为 EAF→除渣→LF→RH→CC(370 mm×470 mm),可以生产出氧含量  $\leq 5 \times 10^{-6}$ ,氧化物夹杂极细小的轴承钢<sup>[8]</sup>。

中国大冶特钢通过铁水+废钢→60 t 电弧炉→LF→RH→5 t 锭模铸→热轧/热锻工艺,可生产出氧含量  $(6.5 \sim 6.7) \times 10^{-6}$ ,B类和D类夹杂级别小于 1 的轴承钢<sup>[10]</sup>。目前国内北满特钢、兴澄特钢等企

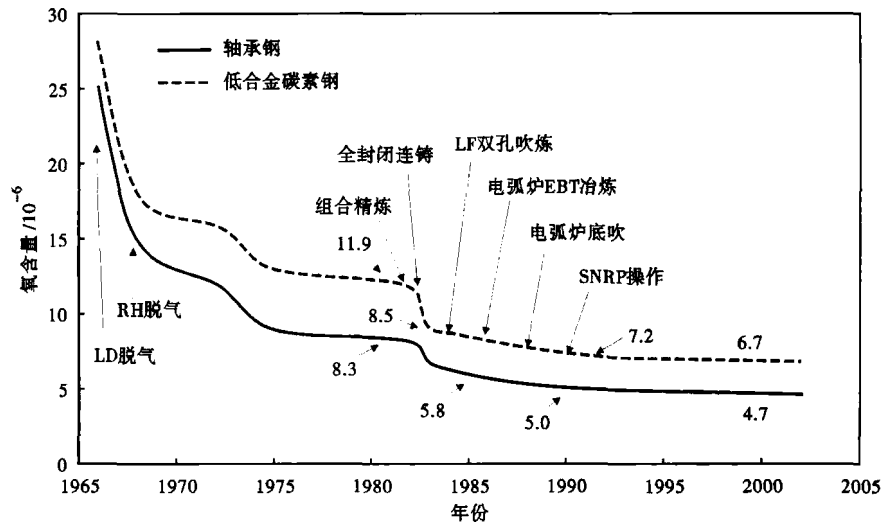


图 1 日本山阳特殊钢厂轴承钢中氧含量变化

Fig. 1 Change of oxygen content in bearing steel at Sanyo's special works, Japan

表 2 国内外高品质轴承钢的生产工艺

Table 2 Production process for high quality bearing steel at home and abroad

特殊钢厂	生产工艺流程
瑞典 SKF <sup>[1,3]</sup>	双炉壳熔炼→除渣→ASEA→SKF→IC(或CC)
日本神户 <sup>[1,9]</sup>	高炉→铁水预处理→BOF→排渣→钢包精炼(电磁搅拌,真空脱气)→二流连铸
日本山阳 <sup>[1,5-6]</sup>	90 t UHP 电弧炉炼钢→偏心炉底出钢→LF→RH→完全垂直连铸
日本大同 <sup>[1,8]</sup>	EAF→除渣→LF→RH→CC(370 mm×470 mm)
日本新日铁 <sup>[21]</sup>	铁水预处理→LD转炉→LF→RH→CC
德国蒂森集团杜伊斯堡厂 <sup>[12-13]</sup>	BOF(140 t)→TBM→LF→CC(6流 265 mm×385 mm)
德国蒂森集团维藤厂 <sup>[12-13]</sup>	EAF(110 t, EBT)→LF→VD→CC(2流 265 mm×385 mm)
中国大冶特钢 <sup>[10]</sup>	60 t EAF→LF→RH→IC(或CC)
中国兴澄特钢 <sup>[11]</sup>	EAF→LF→VD→CC(或CC)
中国北满特钢 <sup>[14]</sup>	90 t EBT 电弧炉→LF→VD→CC(或IC)(240 mm×240 mm)

业多采用 EAF→LF→VD→CC 生产高品质轴承钢<sup>[11,4]</sup>。

钢液中全氧在小于  $10 \times 10^{-6}$  时,钢液中主要以细小夹杂物形式存在。细小夹杂物有硅酸盐和硅铝酸盐、镁铝尖晶石、含钙夹杂物、氧化铝等,主要来源包括:脱氧去夹杂后的残留、二次氧化、钢渣反应、喂线处理、钢与耐火材料、浇钢过程、连铸中耐火材料影响、凝固过程等<sup>[5,22]</sup>。

## 3 高品质轴承钢中超低氧含量和夹杂物控制工艺

### 3.1 出钢除渣

国内外采用无渣出钢(如 EBT)、钢包扒渣、真空吸渣和换钢包除渣等技术,将氧化渣彻底排除,以减少氧化渣对钢液总氧含量的影响。如瑞典 SKF 在双炉壳熔炼出钢后,将对钢水进行除渣处理<sup>[3]</sup>。日本神户在转炉出钢后将对钢水进行排渣处理<sup>[9]</sup>,

日本山阳特殊钢采用 EBT 出钢<sup>[5-6]</sup>。蒂森维藤厂也采用电弧炉 EBT 出钢,控制氧化渣对钢水总氧的影响<sup>[12-13]</sup>。

### 3.2 Al 脱氧

在精炼过程中,真空下碳脱氧速度很慢,并且效果差,如果只采用真空碳脱氧工艺,钢中氧含量可高达 0.002% 以上<sup>[12]</sup>。因此,为了提高钢的洁净度,必须在精炼前预先采用铝沉淀脱氧,使钢中氧主要以夹杂物形式存在,通过搅拌去除。

Al 脱氧工艺可实现轴承钢的超低氧含量控制,使钢中全氧降到  $10 \times 10^{-6}$  以下,但难点是钢中  $Al_2O_3$ 、高熔点  $CaO-Al_2O_3$  系不变形夹杂物 (ASTM “B 类”或“D 类”) 的控制<sup>[23]</sup>。日本大同特殊钢公司开发的 MRAC-SSS 高洁净钢生产工艺,工艺要点之一是在电炉出钢时对钢液铝强脱氧,初步实现低氧化,在此基础上再通过渣-钢精炼、RH 真空处理、连铸等,去除钢液中的非金属夹杂物,全氧最终可控制在  $\leq 5 \times 10^{-6}$ ,实现了全部夹杂小于  $7.5 \mu m$ ,并均匀分布<sup>[8]</sup>。瑞典 SKF 在除渣和感应搅拌后也采用铝脱氧,将钢液中的总氧含量控制在极低的水平<sup>[1,3]</sup>。国内兴澄特钢公司采用铝脱氧和高碱度精炼,延长 VD 吹氩搅拌时间,控制耐火材料质量,使钢中总氧含量  $\leq 8 \times 10^{-6}$ ,脆性夹杂物得到了有效的控制,达到高纯净度技术要求<sup>[24]</sup>。

### 3.3 高碱度精炼渣

采用高碱度精炼渣系是日本钢铁厂高品质轴承钢生产的另一重要技术。日本山阳特殊钢<sup>[5]</sup>对采用其常规高碱度 ( $CaO/SiO_2 = 10.3$ ) 和较低碱度渣系 ( $CaO/SiO_2 = 2.98$ ) 生产的轴承钢的总氧含量及非金属夹杂物进行了比较 (表 3),发现总氧含量差别不大 (仅低  $1 \times 10^{-6}$ ),但采用较低碱度生产的轴承钢中大型夹杂物 ( $\geq 23 \mu m$ ) 数量显著多于高碱度渣系生产的轴承钢。此外,为了保证炉渣具备高的碱度,高品质轴承钢二次精炼所用包衬也应采用  $SiO_2$  含量低的  $MgO$  质或  $Al_2O_3$  质耐火材料。

表 3 常规高碱度精炼渣与试验采用的较低碱度渣系成分 / %  
Table 3 Ingredient of conventional high basicity refining slag series and low basicity refining slag series for test / %

渣系	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	T. Fe	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
常规高碱度渣系	62.17	6.08	25.09	3.53	0.47	0.10	痕量
较低碱度渣系	62.53	20.95	10.30	5.51	0.16	0.14	0.03

采用  $MoSi_2$  电阻炉在  $MgO$  质坩埚内进行了精

炼渣成分对 GCr15 (0.95% C-1.50% Cr) 轴承钢中氧含量和夹杂物的影响的实验研究发现,随精炼渣碱度  $CaO/SiO_2$  由 2 增加至 4.5,钢液中的终点全氧含量由  $20 \times 10^{-6}$  降至  $11 \times 10^{-6}$ ,夹杂物的总数量、总面积和平均半径减小<sup>[25]</sup>。

除采用高碱度精炼渣之外,日本的许多特殊钢厂甚至能够将精炼渣中的 T. Fe + MnO 含量降低至 0.5% 以下<sup>[26]</sup>。

### 3.4 真空或非真空条件下长时间搅拌

铝脱氧钢中的氧绝大部分是以夹杂物 (主要是  $Al_2O_3$ ) 的形式存在,钢中的溶解氧很低,只有  $(1 \sim 2) \times 10^{-6}$ ,因此,要降低钢中氧含量,只有通过长时间搅拌 (包括吹氩搅拌、电磁搅拌、RH 循环搅拌) 促使夹杂物充分上浮。如果要生产氧含量小于  $10 \times 10^{-6}$  的轴承钢,至少应搅拌 30 min 以上<sup>[1]</sup>。如日本山阳特殊钢公司开发的 SNRP 工艺,LF 精炼时间大于 45 min, RH 真空脱气时间大于 40 min<sup>[5,6]</sup>。

### 3.5 生产工艺对高品质轴承钢中全氧和夹杂物的影响

高品质轴承钢的典型工艺流程是采用超高功率电弧炉 (或 BOF) 作初炼炉,出钢时用铝脱氧、除渣、钢包合成渣精炼和 RH 处理,最后连铸保护浇铸。钢包炉精炼渣为高碱度合成渣<sup>[5]</sup>,  $CaO/SiO_2 = 4 \sim 6$ ,渣中 ( $\% MnO + \% FeO$ ) 应低于 1.0%,  $SiO_2$  含量低于 10%。钢包炉精炼可以达到钢水升温、促进脱氧剂脱氧、吹氩搅拌促进夹杂物上浮和避免钢水二次氧化的目的;RH 处理主要是进一步促进夹杂物聚集和上浮、去氢和去氮。目前这种工艺流程已用来生产高品质弹簧钢和轴承钢等,山阳特殊钢<sup>[5]</sup>、大同特殊钢<sup>[8]</sup> 等日本钢厂大多采用该工艺流程,全氧 T. O 可降低至  $(5 \sim 8) \times 10^{-6}$ ,“B 类”和“D 类”夹杂物显著减少,钢的抗疲劳性显著改善<sup>[8]</sup>。

目前国内特殊钢企业多采用 UHP (或 BOF) → LF → VD → CC 生产高品质轴承钢。北满特钢用 90 t EBT 电弧炉-LF (VD)-240 mm × 240 mm 方坯连铸生产 GCr15 轴承钢钢包精炼时采用碱度为 4.46 的高碱度渣系,用含 32.8% Al 的脱氧剂,进行 25 min VD 真空处理,保持  $[Al]_s \leq 0.030\%$ ,统计结果表明 GCr15 轴承钢的平均氧含量  $7.5 \times 10^{-6}$ <sup>[14]</sup>。

另外,国外在生产高品质轴承钢时,废钢进行精选;入炉铁水均进行了脱硫、脱磷处理;连铸坯断面尺寸普遍大于国内特钢厂,采用多级电磁搅拌;采用轻压下和连续锻压等液相穴压下技术减少偏析;在精整热处理方面,具有完善的精整热处理装备和质

量保护体系<sup>[1]</sup>。

#### 4 国内轴承钢的研究方向

国内轴承钢生产厂家的硬件已得到很大的改进和提高,相信我国在轴承钢生产的软件和管理方面必将得到进一步的提高,生产超纯净轴承钢。

轴承钢的研究方向为:

(1)国内轴承钢在努力降低钢中氧含量的同时,要在钢中夹杂物特别是氧化物夹杂的颗粒较为细小,分布较为均匀等方面进行深入的研究,从而提高钢材冶金质量的均匀性和稳定性。

(2)复合脱氧对轴承钢中全氧和非金属夹杂物含量的影响。

(3)低氧情况下轴承钢中硫的行为。

(4)微量镁对轴承钢碳化物的影响。

(5)改善连铸轴承钢的碳偏析以及碳偏析对轴承钢的疲劳性能的影响。

#### 参考文献

- [1] 魏果能,许达,俞峰. 高质量轴承钢的需求、生产和发展[C] // 中国特殊钢年会 2005 论文集. 北京, 2005: 106-112.
- [2] Johansson TI, Lund TB. A Review of Swedish Bearing Steel Manufacturing and Quality Assurance of Steel Products[J]. Journal of ASTM International, 2006, 3(10): 3-15.
- [3] Ovako Steel AB. Steels for Bearing Production From Ovako[R]. Hofors Sweden; Ovako Steel AB, 2006: 53-78.
- [4] Lund T, Ölund P. Development of Clean Steels-Advantages in Ladle Metallurgy and Testing Technology[J]. Ovako Steel, Hofors, SE, 2000: 1-11.
- [5] 川上潔,谷口剛. 高纯净度鋼における介在物の生成起源[J]. 鉄と鋼, 2007, 93(12): 741-752.
- [6] Yoshiyuki K, Tsutomu M, Kiyoshi K, et al. Recent Improvements in Cleanliness in High Carbon Chromium Bearing Steel[J]. ISIJ International, 1996, 36: S89-S92.
- [7] Toshikazu U. Recent Development of Bearing Steel in Japan[J]. ISIJ International, 1988: 1889-1894.
- [8] 山口智則,新貝元,狩野隆. 超纯净軸受鋼製造プロセスの開発[J]. 電気製鋼, 2002, 73(1): 61-66.
- [9] 土井健司,折橋英行,松島義武,等. 長寿命軸受鋼の開発[J]. 神戸製鋼技報, 2000, 50(1): 49-52.
- [10] 汪质刚,肖爱平,潘明旭,等. 高品质大规格 GCr18Mo 轴承钢的试制[J]. 特殊钢, 2008, 29(3): 55-56.
- [11] 彭继承,张国伟,张旭东,等. 高质量齿轮钢 SAE8620H(Z) 精炼新工艺实践[J]. 现代冶金, 2010, 38(3): 64-66.
- [12] 周德光,傅杰,王平,等. 高质量轴承钢的生产技术[J]. 中国冶金, 2002(6): 14-17.
- [13] 冶金部特殊钢信息网编著. 国外特殊钢生产技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 1-39.
- [14] 庞洪亮,边延君. 90 t LF(VD) 精炼工艺对 GCr15 轴承钢氧含量的影响[J]. 特殊钢, 2006, 27(1): 57-58.
- [15] Bhadeshia H K D H. Steels for Bearings[J]. Progress in Materials Science, 2012, 57: 268-435.
- [16] Furumura K, Murakami Y, Abe T. Development of Long Life Bearing Steel for Full Film Lubrication and for Poor and Contaminated Lubrication[J]. Motion Control, 1996(1): 30-36.
- [17] Zhang L, Thomas B G. Inclusions in Continuous Casting of Steel [C] // XXIV National Steelmaking Symposium. Morelia, Mexico, 2003: 138-183.
- [18] Lund T, Lane S. Determination of Oxygen and Oxidic Non-metallic Inclusion Contents in Rolling Bearing Steels. Ball Bear[J], 1987, 231: 36-47.
- [19] Lund T, Kesson A. Oxygen Content, Oxidic Microinclusions, and Fatigue Properties of Rolling Bearing Steel[C] // Hoo JJC, editor. Effect of Steel Manufacturing Process on the Quality of Bearing Steels. Philadelphia(USA): ASTM; 1988: 308-330.
- [20] 川上潔. 軸受鋼の清净化[C] // 第 182, 183 回西山記念技術講座. 東京, 2004: 159-163.
- [21] Matsuoka K. Improvement of Quality of Steel for Bearing at JFE West Japan Works[C] // 4th International Congress on Steelmaking. Gifu, 2008: 456-471.
- [22] 李志强,于景坤. 钢中显微夹杂物研究现状与进展[J]. 材料与冶金学报, 2011, 10(3): 159-163.
- [23] 王新华. 超低氧含量特殊钢的脱氧、精炼与非金属夹杂物控制[C] // 2010 年全国炼钢—连铸生产会议文集. 迁安, 2010: 11-21.
- [24] 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.
- [25] 阮小江,姜周华,龚伟,等. 精炼渣对轴承钢中氧含量和夹杂物的影响[J]. 特殊钢, 2008, 29(5): 1-3.
- [26] Eguchi J, Fukunaga M, Sugimoto T, et al. Manufacture of High Quality Case-hardening Low Alloy Steel for Automobile Use[J]. ISIJ International, 1990: 644-650.

#### 5 结论

(1)国外钢铁企业经过多年研制开发,形成了比较成熟的高品质轴承钢超低氧和非金属夹杂物的控制技术,各项技术指标已经达到很高的水平。与国外相比,近年来国内高品质轴承钢生产技术水平提高较快,但许多特殊钢厂在超低氧控制和夹杂物控制方面仍存在氧含量波动大、氧化物夹杂尺寸及分布不均等问题。

(2)出钢除渣、铝脱氧、高碱度精炼渣、真空或非真空条件下的长时间搅拌和合理的生产工艺流程等是高品质轴承钢中超低氧含量和夹杂物控制的有效措施。

(3)为缩小与国外高品质轴承钢的差距,国内特殊钢厂需进一步降低高品质钢中氧含量,缩小其波动范围,并在降低夹杂物的含量,减小夹杂物特别是氧化物夹杂的颗粒的尺寸及分布的均匀性等方面进行深入研究。

杨虎林(1986-),男,钢铁研究总院冶金工艺所博士研究生,精炼理论和工艺技术研究。  
E-mail: yanghulin2612261@163.com

收稿日期: 2012-09-10