

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4069

轴承钢中夹杂物调控的冶金技术现状及智能化展望

宗男夫^{1,2,3}, 费 鹏², 刘鸿智², 荆 涛³

(1. 本钢集团有限公司技术中心 数智化研究所, 辽宁 本溪 117000; 2. 本钢集团有限公司, 辽宁 本溪 117000; 3. 清华大学 材料学院, 北京 100084)

摘 要:随着我国高铁、航空航天、风电等重大装备的应用与建设,对轴承钢提出了高品质、长寿命和高可靠性的要求。通过介绍国内外高性能轴承钢中夹杂物调控现状,分析国内特殊钢企业在夹杂物调控领域的水平与差距,提出高性能轴承钢中夹杂物智能化调控的技术展望。通过非铝脱氧钢中夹杂物调控、低氧稀土钢中夹杂物调控、镁对钢中夹杂物调控和热处理对钢中夹杂物调控生产出高性能轴承钢,为国内相关特殊钢企业提供研发思路和参考。

关键词:轴承钢;夹杂物;稳定化调控;智能化

中图分类号: TG142.1+3

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2024)06-0514-09

Current Status and Intelligent Prospects of Metallurgical Techniques for the Control of Inclusions in Bearing Steels

ZONG Nanfu^{1,2,3}, FEI Peng², LIU Hongzhi², JING Tao³

(1. Digital Intelligence Research Institute, Technology Center of Ben Gang Group Corporation, Benxi 117000, China; 2. Ben Gang Group Corporation, Benxi 117000, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: With the application and construction of major equipment, such as China's high-speed rail, aerospace, and wind power, high-quality, long-life, and high-reliability requirements have been put forward for bearing steels. By introducing the current situation of inclusion control in high-performance bearing steel at home and abroad, the level and gap of domestic special steel enterprises in the field of inclusion control are analysed, and the technical prospects for the intelligent control of inclusions in high-performance bearing steel are proposed. High-performance bearing steel can be produced through the control of inclusions in non-Al-deoxidized steel and low-oxygen rare earth steel, magnesium control of inclusions in steel, and heat treatment control of inclusions in steel, providing research and development ideas and references for domestic special steel enterprises.

Key words: bearing steel; inclusions; stable regulation; intelligent

轴承钢疲劳性能是评判轴承钢质量的重要指标之一,近年来高端主机厂对轴承服役时间要求逐渐苛刻,学者们的研究热点开始聚焦在超高周疲劳范围的轴承钢疲劳性能和断裂机理^[1-2]。轴承钢疲劳失效的根源主要为钢中非金属夹杂物^[3-5],调控钢中夹杂物成为制造全流程的重点控制对象。

经过多年的装备升级和技术沉淀,我国特殊钢企业已拥有世界先进的冶炼和轧制生产设备,同时

具有相对成熟的稳定化生产工艺。目前,轴承钢实物质量已接近世界级高性能轴承钢水平,但国产轴承钢在夹杂物稳定性控制方面,与瑞典、日本等轴承钢强国相比仍存在较大差距^[6-11]。在钢中夹杂物调控方面,日本山阳特钢通过控制钢中氧含量来调控钢中夹杂物数量,而瑞典 Ovako 特钢的攻关方向则是调控钢中夹杂物的分布和形态。为在此基础上研发高生产效率和低成本的高性能轴承钢生产线,本文对

收稿日期: 2024-03-30

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2017YFB1103700); 国家自然科学基金面上项目(52074162)

作者简介: 费 鹏, 1972 年生, 博士, 高级工程师。主要从事高性能钢铁材料研究方面的工作。Email: Edisonlove123456@163.com

通讯作者: 宗男夫, 1986 年生, 博士后, 高级工程师。主要从事钢铁材料质量提升的智能模型研究方面的工作。

Email: zongnan512712_2005@163.com

引用格式: 费鹏, 宗男夫, 刘鸿智, 荆涛. 轴承钢中夹杂物调控的冶金技术现状及智能化展望[J]. 铸造技术, 2024, 45(6): 514-522.

FEI P, ZONG N F, LIU H Z, JING T. Current status and intelligent prospects of metallurgical techniques for the control of inclusions in bearing steels[J]. Foundry Technology, 2024, 45(6): 514-522.

高性能轴承钢中夹杂物调控的关键冶金技术的研究进展进行综述。通过非铝脱氧钢中夹杂物控制、低氧稀土钢中夹杂物改性、镁改性钢中夹杂物和热处理工艺调控钢中夹杂物等一系列技术,能够稳定生产高性能轴承钢,并提供轴承钢中夹杂物高效稳定调控的研发思路和主攻方向。

1 高性能轴承钢中夹杂物调控现状

国内外特殊钢厂高性能轴承钢中夹杂物控制现状如表1所示^[12-34]。通过选用优质合金,严格控制冶炼过程中的杂质含量,以减少夹杂物生成的可能性。轴承钢生产采用铝为强脱氧剂,高碱度渣进行精炼脱氧,控制钢中氧化物夹杂含量。耐火材料对钢液质量的影响主要表现在其化学稳定性、导热性能以及与钢液相互作用方面。耐火材料在高温下可能会与钢液发生化学反应,引入不希望含有的元素或生成有害的化合物,影响钢的纯净度。选用高质量耐火材料,降低其对钢液质量的影响。在轴承钢冶炼过程中,钢液中的合金元素如铝、硅、锰等会与夹杂物发

生作用,影响夹杂物的尺寸、分布、成分和形态。这些合金元素可以作为脱氧剂或净化剂,与氧化物夹杂反应,生成更具熔点较低的夹杂物,从而易于去除。

目前国内外特殊钢企业使用的钢液洁净度普遍较高,但连铸过程涉及卷渣、耐材侵蚀、二次氧化、内生夹杂等复杂物理化学现象。铸坯初始凝固坯壳易捕捉到钢液中气泡和夹杂物,导致铸坯中夹杂物分布不均匀。连铸凝固过程轴承钢中氮化钛、硫化锰和复合夹杂物的析出速率不同,进一步恶化铸坯中夹杂物的均匀性。热处理工艺对夹杂物的影响主要表现在其能改变夹杂物的分布和稳定性。通过热处理可以促进有害夹杂物的溶解,或使有益夹杂物析出并均匀分布,从而提高轴承钢的性能^[36]。

2 轴承钢中夹杂物成因及其对疲劳寿命的危害

2.1 轴承钢中夹杂物的来源与典型特征

轴承钢中Ds类夹杂物主要来源于钢液精炼工序形成的 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 或 $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂。钢

表1 国内外特殊钢厂高性能轴承钢中夹杂物控制现状

Tab.1 Current status of inclusion control in high performance bearing steel from special steel companies at home and abroad

Country	Special steel plant	Quality standard/10 ⁻⁶					Inclusion condition	
		[O] _T	[Ti]	[N]	[Ca]	[Als]		
Japan	Sanyo ^[12]	≤5	10	45	-	100	Inclusion diameter<11 μm, Class B level 0.06, Class D level 0.06	
	Daido ^[13]	≤5	≤5	≤30	-	-	Al ₂ O ₃ inclusions with a diameter ≥7.5 μm and CaO-Al ₂ O ₃ system inclusions are very rare	
	KOBELCO ^[14-15]	4	7	-	-	-	23 μm <inclusion diameter <27 μm, with titanium inclusions being scarce and fine	
	Aichi ^[16]	6	11	-	-	130	Inclusions with a diameter <15 μm account for 80%	
Sweden	Ovako ^[17-18]	5	8~12	58	1	280	The standard deviation of oxygen content is 0.5, and the diameter of inclusions is <5 μm	
China	Xingcheng ^[19]	4.6	8.5	-	2	>100	Class A 0 to 1.5 levels, Class B 0 to 0.5 levels, Class C 0 level, Class D≤0.5 levels	
	CITIC Special Steel	Daye ^[20-22]	4.4	≤15	20~30	3	100~120	Class A 0.5 to 1.5 levels, Class B 0 to 1.0 levels, Class C 0 level, Class D 0.5 to 1.0 levels
		Nanjing ^[23-25]	≤5	15	42	-	120	Control CaO-Al ₂ O ₃ -MgO, calcium aluminate, and D-class large particle inclusions. The CaO mass fraction of product inclusions is below 5%
		Zhongtian ^[26-27]	≤6	≤10	27.5	≤5	130	Calcium aluminate inclusions with a diameter ≤20 μm
		Beiman ^[28-29]	5~12	≤30	68	10	≤400	The diameter of inclusions per unit area in the wire is less than 13 μm, with a density of 2.7 inclusions/mm ²
		Juneng ^[30-32]	5~9	-	54	-	200	All types of inclusions in the steel are ≤0.5 level
		Jiyuan ^[33-34]	≤10	≤25	≤80	≤8	≤200	The inclusions have low content and small dimensions

液凝固过程中形成氮化钛夹杂,冶炼过程中卷渣形成钢中硅酸盐夹杂。轴承钢主要包含钙铝酸盐、尖晶石和硅酸盐 3 类氧化物夹杂,其典型形貌如图 1 所示^[35]。随着冶炼水平的大幅提升,钢中氧化物夹杂得到有效控制,氮化钛、钙铝酸盐夹杂开始成为裂纹起源。钢中非金属夹杂物的存在对钢的性能有重要影响,如影响钢的强度、韧性、疲劳寿命和腐蚀性能等。因此,在钢的生产和加工过程中,应采取相应的去除或控制措施,以提高钢的质量和性能。

2.2 轴承钢中夹杂物对疲劳寿命的影响

轴承钢中夹杂物的机械性能,如表 2 所示。钢中微小尺寸 TiN 夹杂与大尺寸 Al_2O_3 夹杂具有相同的危害,严重损害轴承钢的滚动接触疲劳寿命^[36-39]。图 2 为轴承钢疲劳裂纹源处夹杂物形貌^[40-41],在轧制过程中钢基体和夹杂物界面间形成应力集中。尖晶石夹杂是一种硬度较高的矿物,当材料受到循环载荷作用时,尖晶石夹杂会阻碍位错的运动,增大

局部应力,促进裂纹萌生和扩展。硅酸盐夹杂物通常尺寸较大,较粗的硅酸盐夹杂可能会成为裂纹优先扩展的路径。钙铝酸盐夹杂是一种常见的陶瓷相,在金属基复合材料中作为增强相存在,它们的尺寸、形状和分布对疲劳性能有重要影响。细小的钙铝酸盐颗粒可以阻碍裂纹的扩展,从而提高材料的疲劳强度。但如果颗粒较大或形状不规则,则可能会引起应力集中,成为裂纹萌生的源头。氮化钛夹杂在疲劳载荷作用下,如果氮化钛颗粒的界面与基体金属结合不良,或者颗粒尺寸不均,导致应力集中和裂纹的萌生。

引起轴承钢疲劳断裂的氧化物夹杂为大颗粒球状钙铝酸盐和多面体状尖晶石,轴承钢中夹杂物和疲劳裂纹萌生夹杂比例分数如图 3 所示^[42],图 4 为按裂纹萌生源分类的疲劳试验 S-N 曲线^[43]。轴承钢的超声疲劳结果表明,在裂纹萌生处夹杂物为尖晶石、钙铝酸盐和氮化钛,其中钙铝酸盐对裂纹萌生所起到的贡献最大,严重危害高性能轴承钢的服役寿

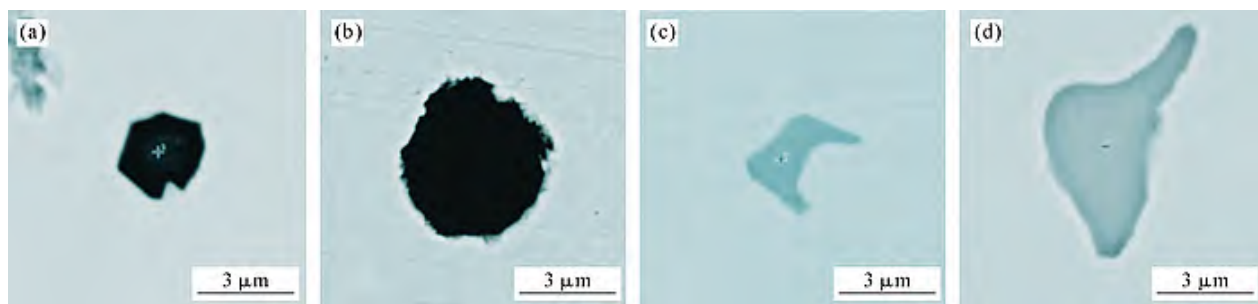


图 1 轴承钢中典型夹杂物 SEM 图:(a) 尖晶石夹杂;(b) 钙铝酸盐夹杂;(c) 氮化钛夹杂;(d) 硫化锰夹杂^[35]
Fig.1 SEM images of typical inclusions in the bearing steel: (a) Mg-Al-O; (b) Al-Ca-O-S; (c) TiN; (d) MnS^[35]

表 2 轴承钢中夹杂物的机械性能^[36]

Tab.2 The mechanical properties of inclusions in bearing steel^[36]

Type	Shape	Hardness(HV ₃₀)	Thermal expansion coefficient/(10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Young's modulus/GPa	Poisson's ratio
52100	Matrix	750	12.5	210	0.30
Al_2O_3	Clustered	≈ 2 200	8.0	387	0.23
TiN	Rectangular cube	≈ 2 500	9.4	320	0.19
TiC	Rectangular cube	≈ 3 000	9.4	320	0.19
Ti(C, N)	Rectangular cube	≈ 3 000	9.4	320	0.19
Mg-Al-O	Polyhedron	≈ 2 200	8.4	271	0.26
Al-Ca-O-S	Large particle spherical	≈ 2 200	5.0	113	0.23
MnS	Strip-like	100	14.8	103	0.30

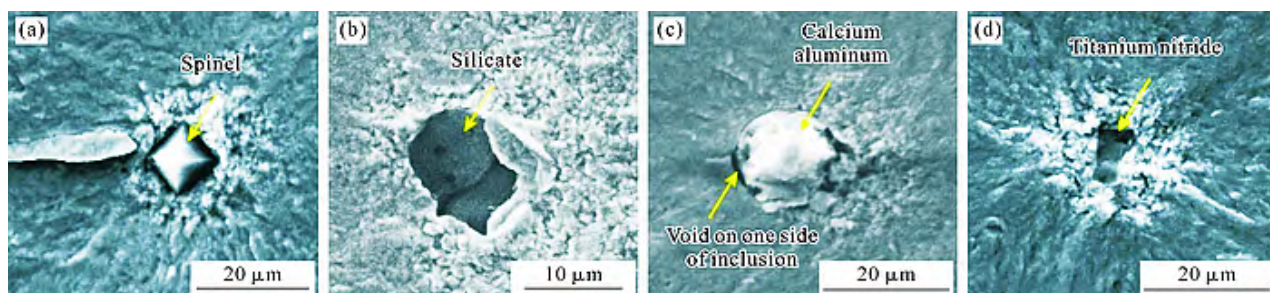
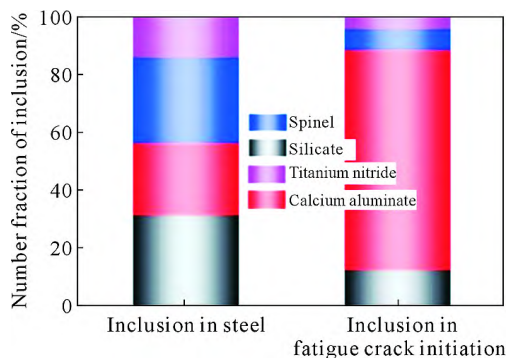


图 2 轴承钢疲劳裂纹源处夹杂物形貌:(a) 尖晶石夹杂;(b) 硅酸盐夹杂;(c) 钙铝酸盐夹杂;(d) 氮化钛夹杂^[41]

Fig.2 Morphologies of the fatigue fracture surfaces with inclusions: (a) spinel; (b) silicate; (c) calcium aluminum; (d) titanium nitride^[41]

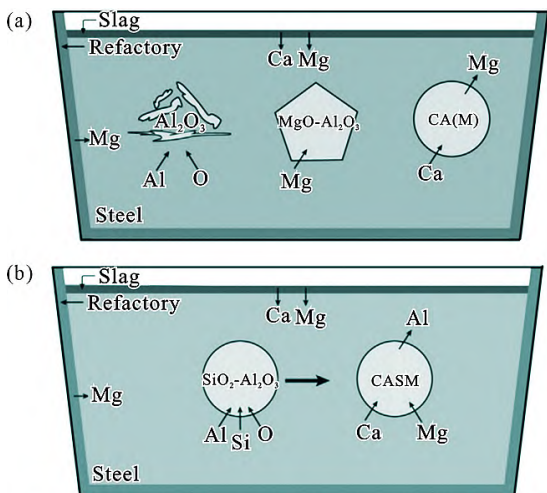
图3 轴承钢中夹杂物和疲劳裂纹萌生夹杂比例分数^[42]Fig.3 Number fraction of inclusions in bearing steel and fatigue crack initiation sites of the steel^[42]

命。学者发现通过降低钢中全氧含量能够减少氧化物夹杂诱导的疲劳断裂比例,但当钢中全氧含量从 8×10^{-6} 下降至 6×10^{-6} 时,轴承钢的疲劳性能没有明显提升^[44],因此需要探索新的轴承钢中夹杂物调控的研发方向。

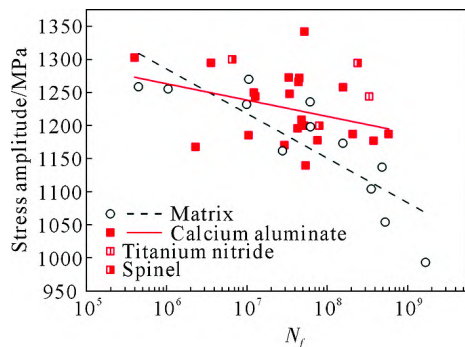
3 高性能轴承钢中夹杂物调控的最新技术现状

3.1 非铝脱氧的钢中夹杂物调控

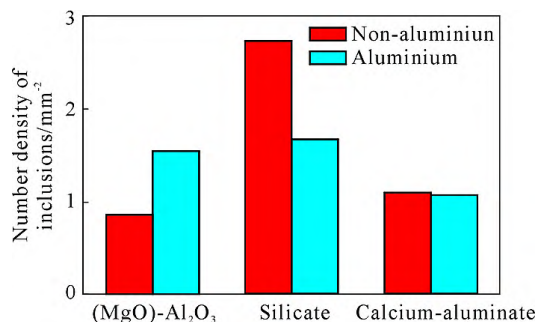
轴承钢在非铝脱氧与铝脱氧流程中夹杂物演变如图5所示。精炼前期非铝脱氧下钢中夹杂物主要为 SiO_2 和 Al_2O_3 ,随后 Al_2O_3 含量减少, CaO 含量增加。铝脱氧工艺能将钢中全氧控制在 5×10^{-6} 以内,但仍发现Ds类夹杂诱导的疲劳失效现象,同时铝脱氧工艺存在水口堵塞结瘤和超低氧控制不稳定的问题。因此提出非铝脱氧生产轴承钢的工艺思路,采用硅锰合金预脱氧、扩散和真空脱氧控制钢中氧含量^[45-47]。非铝脱氧改变钢中的夹杂物类型,有



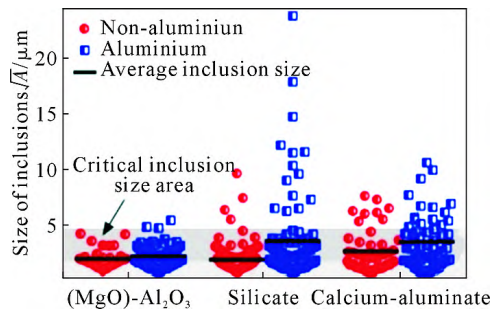
CA(M): $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-(MgO)}$ CASM: $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$

图5 轴承钢在非铝脱氧与铝脱氧流程中夹杂物演变:(a) 铝脱氧;(b) 非铝脱氧^[47]Fig.5 Evolution mechanism of inclusions in bearing steel during: (a) Al deoxidation; (b) non-Al deoxidation^[47]图4 按裂纹萌生源分类的疲劳试验 S-N 曲线^[43]Fig.4 S-N curves of the fatigue experiments sorted by the crack initiation sources^[43]

效缓水口堵塞的问题,形成低熔点塑性夹杂物。轴承钢在非铝脱氧与铝脱氧下夹杂物个数密度分布,如图6所示,非铝脱氧工艺下钢中氧化物主要为塑性优异的硅酸盐类夹杂物,并有效降低Ds类大颗粒和铝系夹杂物含量。

图6 轴承钢在非铝脱氧与铝脱氧下夹杂物数密度分布^[47]Fig.6 Comparison of the number density of inclusions in bearing steel under Al deoxidation and non-Al deoxidation processes^[47]

轴承钢在非铝脱氧与铝脱氧下氧化物夹杂物尺寸分布,如图7所示。非铝脱氧工艺钢中钙铝酸盐夹杂物平均尺寸与铝脱氧工艺相比较小,能够有效控制大颗粒Ds类夹杂物尺寸。

图7 轴承钢在非铝脱氧与铝脱氧下氧化物夹杂物尺寸分布^[47]Fig.7 Comparison of the size distribution of inclusions in bearing steel under Al deoxidation and non-Al deoxidation processes^[47]

3.2 低氧稀土轴承钢中夹杂物调控

稀土调控钢中夹杂物有助于改善钢中Ds大颗粒夹杂物的形态,降低其对疲劳性能的危害。研究

人员开发低氧稀土金属和氧钢液的夹杂物改性技术^[48-50]。

图8为未添加稀土的轴承钢、低氧稀土轴承钢和添加商业稀土的轴承钢的疲劳寿命。与未添加稀土轴承钢相比,添加稀土的高纯净的轴承钢拉压疲劳寿命提升40倍,滚动接触疲劳寿命提升40%。图9为进口轴承钢和低氧稀土轴承钢中夹杂物形貌,发现进口轴承钢中夹杂物主要为大尺寸硫化锰和氧化铝(图9a),而低氧稀土轴承钢中夹杂物以细小均匀的球状稀土氧硫化物为主(图9b)。疲劳加载下,与典型的氧化铝相比,轴承钢中细小稀土氧硫夹杂

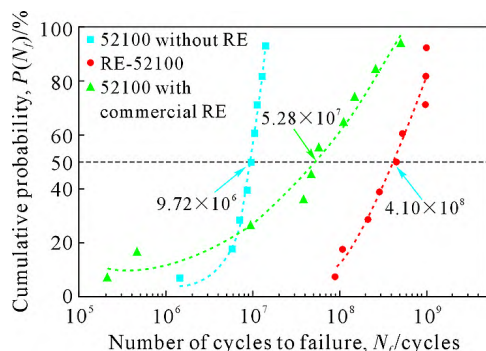


图8 未添加稀土的轴承钢、低氧稀土轴承钢和添加商业稀土的轴承钢的疲劳寿命^[48]

Fig.8 Fatigue life of bearing steel without rare earths added, low-oxygen rare earth bearing steel, and bearing steel with commercial rare earths added^[48]

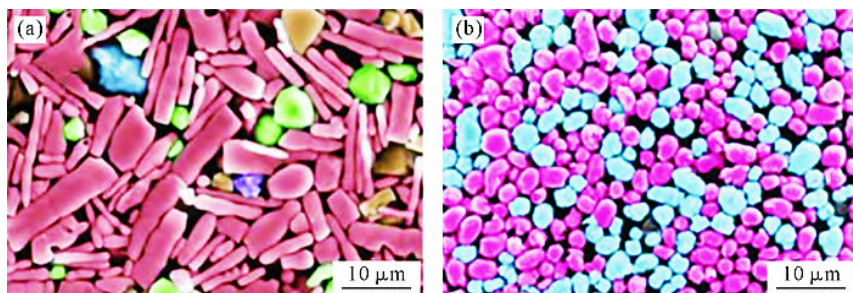


图9 轴承钢中夹杂物:(a)进口轴承钢;(b)低氧稀土轴承钢^[48]

Fig.9 Inclusions in bearing steel: (a) imported bearing steel; (b) low-oxygen rare earth bearing steel^[48]

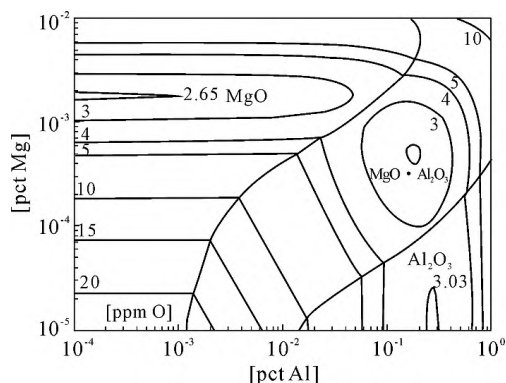


图10 1600 °C下铁液中Al₂O₃、MgO和MgO·Al₂O₃的形成稳定性^[52]

Fig.10 Stability diagrams of the formation of Al₂O₃, MgO, and MgO·Al₂O₃ in steel at 1600 °C^[52]

能够显著减小夹杂物和基体界面处的应力集中,有效延缓夹杂物引发的疲劳裂纹萌生^[48]。通过调控钢中稀土和夹杂物的固溶,研发出性能优越的低氧稀土钢,在不改变传统冶金工艺的基本上,轴承钢的综合性能得到大幅度提升。学者们发现钢中稀土的固溶能够显著限制碳在钢中的扩散行为,稀土元素能够与碳形成稳定的碳化物,从而在钢的微观结构中形成“钉扎”作用,阻碍了碳原子的扩散,因此调控钢中碳扩散和夹杂物能实现同时调优钢的基体组织和夹杂物特征的目的^[49]。

3.3 镁对轴承钢中夹杂物的调控

采用含镁合金对钢液进行脱氧处理,随镁加入量的增加,形成的初始细小MgO·Al₂O₃被逐渐调控为MgO,在钢中均匀弥散分布^[51]。图10为1600 °C下镁铝复合脱氧形成的钢中夹杂物,并给出氧化铝、氧化镁和尖晶石稳定存在区^[52]。镁和氧具有强亲和力,镁脱氧不仅有助于生成钢中小尺寸夹杂物,还有助于进一步稳定控制钢中氧含量^[53],将氧含量控制在一定范围内。与铝脱氧轴承钢相比,采用镁和镁铝复合脱氧的钢中夹杂物由大尺寸、形状多变团簇状Al₂O₃和钙铝酸盐夹杂物转变为细小球状的MgOAl₂O₃夹杂物,达到改善夹杂物形状和尺寸的效果。当镁含量达到3.8×10⁻⁵时,MgO·Al₂O₃夹杂物改性为MgO,夹杂物数密度为17.59个/mm²,夹杂物平均尺寸达到2.02 μm。

3.4 热处理对夹杂物特征的调控

采用热处理能使钢中夹杂物发生球化,细化夹杂物尺寸^[54]。轴承钢中Al₂O₃-MnS和MnS的长宽比随热处理时间延长而不断减小,宏观形状逐渐趋于球化。

稀土和铝脱氧轴承钢中夹杂物特征随热处理时间变化,如图11所示^[55]。随热处理时间延长,钢中的夹杂物长宽比均呈现出不断下降的趋势,且稀土轴承钢中夹杂物的长宽比铝脱氧轴承钢更低,表明其更易球化。钢中的夹杂物平均直径呈现出不断下降的趋势,当热处理时间小于200 min时,铝脱氧轴承钢中夹杂物的平均直径小于稀土轴承钢。继续延长

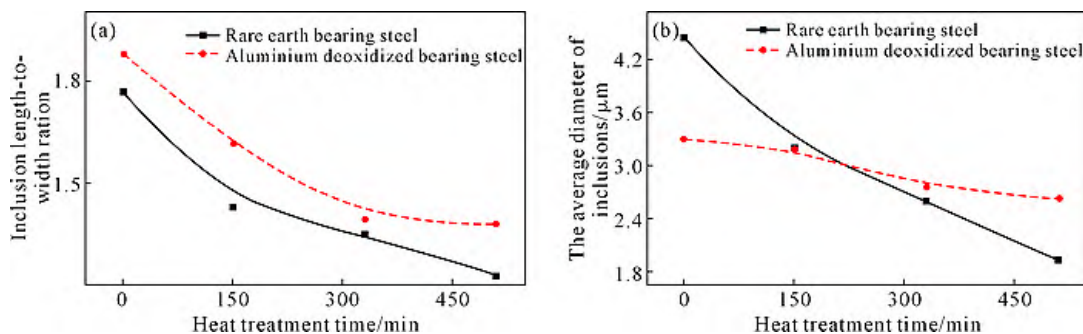


图 11 稀土和铝脱氧轴承钢中夹杂物特征随热处理时间变化:(a) 夹杂物长宽比;(b) 夹杂物平均直径^[55]

Fig.11 Changes in inclusion characteristics of rare earth bearing steel and aluminum deoxidized bearing steels with heat treatment time: (a) length-width ratio; (b) average diameter^[55]

热处理时间,稀土轴承钢的平均直径继续降低,逐渐低于铝脱氧轴承钢。热处理能无害化调控轴承钢中长条状硫化物,降低诱导裂纹萌生趋势。对于大尺寸的钙铝酸盐类夹杂物进行控制。在非铝脱氧的钢中进行夹杂物的调整,以形成性质优良的硅酸盐类夹杂物,这样能有效减少Ds类大尺寸夹杂物和铝系夹杂物的含量。通过稀土元素来调整钢中的夹杂物,能够帮助改善Ds类大尺寸夹杂物的形态。镁元素的加入有助于生成较小尺寸的钢中夹杂物。通过热处理,可以使钢中的夹杂物发生球化转变,从而进一步细化其尺寸。

4 高性能轴承钢中夹杂物的智能化调控展望

国内高端特殊钢企业生成的轴承钢实物质量已与国外高性能轴承钢相近,对钢中夹杂物的调控思路与国外企业类似,但轴承钢全流程冶金关键控制要点繁多,导致国内轴承钢产品质量的稳定性较差。因此需将轴承钢制造大数据与智能技术结合,挖掘过程大数据、设备状态与轴承钢质量间的多维耦合关系,实现高性能轴承钢的多目标优化及高效稳定生产。将高性能计算、人工智能、设备感知、与仿真模型结合,开发高精度数字化模型。综上所述,提出几个高性能轴承钢中夹杂物智能化调控的发展趋势。

(1)轴承钢铸坯中夹杂物的智能预报 建造具有自主决策和判断的智能化连铸机,实现轴承钢铸坯中夹杂物尺寸、数量和分布的全流程全尺度空间的定量预报。准确预报轴承钢铸坯中夹杂物分布,模型应考虑钢中酸溶铝、镁、氧、钙和硫等溶质元素的扩散和偏析。耦合传热、凝固、夹杂物转变动力学和夹杂物形成热力学。分析不同脱氧和冶金工况下,钢中总氧、总铝、总钛和总钙含量下轴承钢铸坯中夹杂物的演变规律。

(2)冶金反应器中夹杂物的去除率预报 轴承钢质量与钢中夹杂物的去除率密切相关。耦合人工

智能和设备感知,开发高精度数字化仿真模型,开发钢液中夹杂物聚集和凝固前沿动态捕获的离散相模型。包括反应器的类型、尺寸、以及内部的流动和传热情况等。这些参数会影响夹杂物在反应器中的行为和去除效果。包括冶炼过程中的温度、压力、以及反应器的操作方式等。这些操作条件会影响夹杂物在反应器中的去除效果。

(3)轴承钢轧材中夹杂物的智能预报 通过建立数学模型和仿真,结合现场实际数据和检测结果,对轴承钢轧材中的夹杂物进行预测和预报。包括轧制温度、轧制速度、以及轧制过程中的冷却等。这些工艺参数会影响轴承钢轧材中夹杂物的大小、形状和分布。智能预报方法可以提前发现潜在的夹杂物问题,为生产提供有益的参考和指导。

5 结语

通过介绍国内外高性能轴承钢中夹杂物稳定调控现状,并分析轴承钢中夹杂物成因及其危害,提出未来高性能轴承钢中夹杂物调控的重点研发方向。

(1)大颗粒钙铝酸盐类夹杂物调控 采用非铝脱氧的钢中夹杂物调控,形成塑性优异的硅酸盐类夹杂物,有效降低Ds类大颗粒和铝系夹杂物含量;稀土调控钢中夹杂物,有助于改善钢中Ds大颗粒夹杂物的形态;镁有助于生成钢中小尺寸夹杂物;热处理使钢中夹杂物发生球化,进一步细化夹杂物尺寸。

(2)轴承钢中夹杂物的稳定化调控 将轴承钢制造大数据与智能技术结合,研发轴承钢铸坯中夹杂物的智能预报、冶金反应器中夹杂物的去除率预报和轴承钢轧材中夹杂物的智能预报模型,实现高性能轴承钢的多目标优化及高效稳定生产。

通过以上高性能轴承钢中夹杂物调控技术,国内特殊钢企业可以稳定高效生产高性能轴承钢产品。

参考文献:

[1] 何加群. 中国工业强国战略和轴承产业[J]. 轴承, 2015(1): 55-63.

- HE J Q. China's industrial power strategy and bearing industry[J]. Bearing, 2015(1): 55-63.
- [2] 杨晓蔚. 高铁轴承钢的技术质量特性识别及重点研制方向[J]. 轴承, 2024(4): 1-6, 17.
- YANG X W. Technical quality characteristic identification and key research direction of steels for high-speed railway bearings[J]. Bearing, 2024(4): 1-6, 17.
- [3] 罗敏, 汪久根, 冯毅雄, 冯照和. 含夹杂物轴承钢中裂纹的萌生与扩展[J]. 轴承, 2022(2): 11-16, 22.
- LUO M, WANG J G, FENG Y X, FENG Z H. Crack initiation and propagation in bearing steel containing inclusions[J]. Bearing, 2022(2): 11-16, 22.
- [4] 徐鹤琴, 汪久根, 王庆九. 滚动轴承疲劳寿命的影响因素[J]. 轴承, 2016(5): 58-64.
- XU H Q, WANG J G, WANG Q J. Influencing factors of fatigue life for rolling bearings[J]. Bearing, 2016(5): 58-64.
- [5] 孙飞龙, 耿克, 俞峰, 罗海文. 超洁净轴承钢中夹杂物与滚动接触疲劳寿命的关系[J]. 金属学报, 2020, 56(5): 693-703.
- SUN F L, GENG K, YU F, LUO H W. Relationship of inclusions and rolling contact fatigue life for ultra-clean bearing steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(5): 693-703.
- [6] 宗男夫, 黄健, 刘军, 逯志方, 荆涛. 轴承钢质量提升的关键冶金技术现状 & 展望[J]. 轴承, 2020(12): 60-66.
- ZONG N F, HUANG J, LIU J, LU Z F, JING T. Present situation and prospect of key metallurgical technologies for improving quality of bearing steel[J]. Bearing, 2020(12): 60-66.
- [7] 刘耀中, 侯万果, 王玉良, 钞仲凯. 滚动轴承材料及热处理进展与展望[J]. 轴承, 2020(1): 55-63.
- LIU Y Z, HOU W G, WANG Y N, CHAO Z K. Progress and prospect on materials and heat treatment for rolling bearings[J]. Bearing, 2020(1): 55-63.
- [8] 刘耀中, 侯万果, 王玉良, 钞仲凯. 滚动轴承材料及热处理进展与展望(续完)[J]. 轴承, 2020(2): 54-61.
- LIU Y Z, HOU W G, WANG Y L, CHAO Z K. Progress and prospect on materials and heat treatment for rolling bearings(continuation)[J]. Bearing, 2020(2): 54-61.
- [9] 宗男夫, 张慧, 刘洋, 王明林. 连铸轴承钢压下技术的研究与应用进展[J]. 轴承, 2018(1): 58-64.
- ZONG N F, ZHANG H, LIU Y, WANG M L. Research and application progress of reduction technology for continuous casting of bearing steel[J]. Bearing, 2018(1): 58-64.
- [10] 宗男夫, 张慧, 刘洋, 李鹏飞, 王明林. 连铸轴承钢偏析和凝固组织缺陷的成因及其危害[J]. 轴承, 2018(6): 62-67.
- ZONG N F, ZHANG H, LIU Y, LI P F, WANG M L. Causes and harms of defects in solidification structure and segregation of continuous casting bearing steel[J]. Bearing, 2018(6): 62-67.
- [11] 宗男夫, 张慧, 王明林. 连铸轴承钢盘条腐蚀孔洞及其冶金工艺改善措施[J]. 轴承, 2018(12): 59-65.
- ZONG N F, ZHANG H, WANG M L. Corrosion holes defects on wire rod of continuous casted bearing steel and its improvement measures by metallurgical process[J]. Bearing, 2018(12): 59-65.
- [12] 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.
- [13] YAMAGUCHI T, SHINKAI M, KANO T, KISHI M. Development of a new refining and casting process to manufacture ultra clean bearing steel[J]. Denki-Seiko, 2002, 73(1): 61-66.
- [14] NORIYUKI I. Technological trends of railway rolling stock bearings[J]. NSK Technical Journal, 2009(683): 2-7.
- [15] DOI K, ORIHASHI H, MATSUSHIMA Y, YASUKI S, FUKUZAKI Y, NAKAJIMA S. Development of long fatigue-life steel for bearings[J]. Kobe Steel Engineering Reports, 2000, 50(1): 49-52.
- [16] KUMAGAI K, TAKATA Y, YAMADA T, et al. Fatigue life of high-carbon chromium ball bearing steel produced by electric furnace-vacuum slag cleaner-ladle furnace-RH degassing-curved continuous caster[M]//HOO J J C. Effect of steel manufacturing processes on the quality of bearing steels. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1988: 348-359.
- [17] JOHANSSON T I, LUND T B, ÖLUND P L J. A review of Swedish bearing steel manufacturing and quality assurance of steel products[J]. Journal of ASTM International, 2006, 3(10): 1-13.
- [18] LUND T, LANE S. Determination of oxygen and oxidic non-metallic inclusion contents in rolling bearing steels[J]. Ball Bearing Journal, 1987, 231: 36-47.
- [19] 刘兴洪, 缪新德, 蔡燮鳌. 兴澄 GCr15 钢生产过程质量控制探讨[J]. 中国冶金, 2009, 19(1): 31-35.
- LIU X H, MIAO X D, CAI X A. Discussion on quality control for GCr15 steel production process in Xingcheng[J]. China Metallurgy, 2009, 19(1): 31-35.
- [20] SYCHKOV A B, ZHIGAREV M A, ZHUKOVA S Y, PERCHATKIN A V, PEREGUDOV A V. Effect of dendritic segregation in the continuous-cast semifinished product on the formation of the structure of high-carbon-steel wire rod [J]. Metallurgist, 2008, 52: 275-282.
- [21] QIAN G, LI G Z, XU X H, MUNTHER H Å. Steelmaking technologies and with focus on micro inclusion development for 700ktons production of state-of the Art 1C-1.5Cr bearing steel[M]//BESWICK J M. Bearing Steel Technologies: 10th Volume, Advances in Steel Technologies for Rolling Bearings. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015: 1-27.
- [22] 宗男夫, 张慧, 张兴中. 国内外高品质轴承钢净化与均质化控制技术的进展[J]. 轴承, 2017(1): 48-53.
- ZONG N F, ZHANG H, ZHANG X Z. Advances in control technologies for cleanliness and homogeneity of high-quality bearing steel at home and abroad[J]. Bearing, 2017(1): 48-53.
- [23] 刘立, 赵俊学, 崔雅茹, 李凯, 马征宇. 南钢 100 t UHP EAF-LF (VD)-CC 生产 GCr15 轴承钢的工艺实践[J]. 特殊钢, 2008, 29(6): 39-40.
- LIU L, ZHAO J X, CUI Y R, LI K, MA Z Y. Practice of process for bearing steel GCr15 produced by 100 t UHP EAF-LF(VD)-CC flow sheet at nanjing steel[J]. Special Steel, 2008, 29(6): 39-40.
- [24] 赵海洋, 陶涛. 轴承钢高温热塑性研究[J]. 冶金与材料, 2022, 42(1): 1-2.
- ZHAO H Y, TAO B. Research on high-temperature hot plasticity of bearing steel[J]. Metallurgy and Materials, 2022, 42(1): 1-2.
- [25] 李明, 王新成, 段加恒, 杨文, 成功, 王磊, 杨利伟, 张立峰. 轴承钢中 D 类夹杂物的形成与控制[J]. 工程科学学报, 2018, 40(S1): 31-35.

- LI M, WANG X C, DUAN J H, YANG W, CHENG G, WANG L, YANG L W, ZHANG L F. Formation and controlling of Type-D inclusions in bearing steel[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(S1): 31-35.
- [26] 王昆鹏,王海洋,徐建飞,赵阳,林俊,万文华,王郢. 120 t BOF-LF-RH-CC 流程 GCr15 轴承钢洁净度研究[J]. 特殊钢, 2021, 42(2): 14-17.
- WANG K P, WANG H Y, XU J F, ZHAO Y, LIN J, WAN W H, WANG Y. Investigation of cleanliness of GCr15 bearing steel produced by 120 t BOF-LF-RH-CC process [J]. Special Steel, 2021, 42(2): 14-17.
- [27] 杜佳美,邓向阳,沈艳. 高标准轴承钢线材 GCr15 -Y 钢水纯净度改善[J]. 金属制品, 2016, 42(4): 41-44.
- DU J M, DENG X Y, SHEN Y H. Improvement of high standard bearing steel wire rod GCr15-Y molten steel purity[J]. Metal Products, 2016, 42(4): 41-44.
- [28] 蒋晨旭,岳峰,刘建,李瑛,李彬,马忠存. 90 t BOF-LF-VD 工艺冶炼 GCr15 轴承钢的氧化物夹杂变化行为[J]. 特殊钢, 2016, 37(1): 5-8.
- JIANG C X, YUE F, LIU J, LI Y, LI B, MA Z C. Behavior of variation of oxide inclusions in bearing steel GCr15 steelmaking by 90 t BOF-LF-VD process[J]. Special Steel, 2016, 37(1): 5-8.
- [29] 李颇,范宇静,张程,申祖峰. 拉速波动对 GCr15 轴承钢 250 mm×280 mm 连铸坯内部质量的影响[J]. 特殊钢, 2017, 38(5): 22-26.
- LI P, FAN Y J, ZHANG C, SHEN Z F. Effect of fluctuation of casting rate on internal quality of 250 mm×280 mm Bloom of bearing steel GCr15[J]. Special Steel, 2017, 38(5): 22-26.
- [30] 赵新凯,田凤喜,高文娟,张迎涛,毛福来,张炯明. 轴承钢连铸过程中非金属夹杂物群迁移行为的分析[J]. 连铸, 2022(5): 50-61.
- ZHAO X K, TIAN F X, GAO W J, ZHANG Y T, MAO F L, ZHANG J M. Behavior analysis of non-metallic inclusion groups in bearing steel during bloom casting[J]. Continuous Casting, 2022(5): 50-61.
- [31] 赵新凯,石永生,刘世义,王德龙,张炯明. GCr15 轴承钢精炼渣对夹杂物去除行为的研究[J]. 特殊钢, 2022, 43(3): 14-20.
- ZHAO X K, SHI Y S, LIU S Y, WANG D L, ZHANG J M. Study on behavior of inclusions removal from GCr15 bearing steel by refining slag[J]. Special Steel, 2022, 43(3): 14-20.
- [32] 刘发友,徐志刚,尚明. 高品质 GCr15 轴承钢 80 t 转炉-钢包炉精炼渣的研究[J]. 特殊钢, 2013, 34(1): 25-27.
- LIU F Y, XU Z G, SHANG M. A study on 80 t converter-ladle furnace refining slag for high quality GCr15 bearing steel steelmaking [J]. Special Steel, 2013, 34(1): 25-27.
- [33] 王文虎,李冰,郑高立,许军民,姚书芳. 60 t BOF-LF(VD)-150 mm×150 mm 连铸生产 GCr15 轴承钢的工艺实践[J]. 特殊钢, 2011, 32(5): 38-40.
- WANG W H, LI B, ZHENG G L, XU J M, YAO S F. Process practice for bearing steel GCr15 produced by 60 t BOF-LF(VD)-150 mm×150 mm casting flow sheet [J]. Special Steel, 2011, 32(5): 38-40.
- [34] 卢彩玲,李继文,黎才庆. LD-LF-RH 工艺冶炼 GCr15 轴承钢调铝工艺对钢中氧含量与夹杂物的影响[J]. 铸造, 2017, 66(3): 277-281.
- LU C L, LI J W, LI C Q. Effect of the adjusting aluminum technology on the oxygen content and inclusion in GCr15 bearing steel steelmaking by LD-LF-RH process[J]. Foundry, 2017, 66(3): 277-281.
- [35] GU C, LIAN J H, BAO Y P, XIAO W, MÜNSTERMANN S. Numerical study of the effect of inclusions on the residual stress distribution in high-strength martensitic steels during cooling[J]. Applied Science, 2019, 9(3): 455.
- [36] BHADESHIA H K D H. Steels for bearings[J]. Progress in Materials Science, 2012, 57(2): 268-435.
- [37] 马跃,潘涛,江波,崔银会,苏航,彭云. S 含量对高速车轮钢断裂韧性影响的研究[J]. 金属学报, 2011, 47(8): 978-983.
- MA Y, PAN T, JIANG B, CUI Y H, SU H, PENG Y. Study of the effect of sulfur contents on fracture toughness of railway wheel steels for high speed train[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(8): 978-983.
- [38] BROOKSBANK D, ANDREWS K. Thermal expansion of some inclusions found in steels and relation to tessellated stresses [J]. Journal of the Iron and Steel Institute, 1968, 206(6): 595-599.
- [39] BROOKSBANK D. Thermal expansion of calcium aluminate inclusions and relation to tessellated stresses[J]. Journal of the Iron and Steel Institute, 1970, 208(5): 495-499.
- [40] GU C, LIAN J H, BAO Y P, XIE Q G, MÜNSTERMANN S. Microstructure-based fatigue modelling with residual stresses: Prediction of the Fatigue life for various inclusion sizes[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 129: 105158.
- [41] GU C, WANG M, BAO Y P, WANG F M, LIAN J H. Quantitative analysis of inclusion engineering on the fatigue property improvement of bearing steel[J]. Metals, 2019, 9(4): 476.
- [42] GU C, LIU W Q, LIAN J H, BAO Y P. In-depth analysis of the fatigue mechanism induced by inclusions for high-strength bearing steels[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2021, 28: 826-834.
- [43] GU C, LIAN J H, BAO Y P, MÜNSTERMANN S. Microstructure-based fatigue modelling with residual stresses: Prediction of the microcrack initiation around inclusions[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 751: 133-141.
- [44] 顾超,王仲亮,肖微,王敏,刘宇,黄永生,包燕平. 高疲劳寿命轴承钢洁净度现状及研究进展[J]. 工程科学学报, 2021, 43(3): 299-310.
- GU C, WANG Z L, XIAO W, WANG M, LIU Y, HUANG Y S, BAO Y P. Research status and progress on cleanliness of high-fatigue-life bearing steels[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(3): 299-310.
- [45] 王仲亮,包燕平,顾超,肖微,刘宇,黄永生. 基于非铝脱氧工艺的高品质轴承钢关键冶金技术研究[J]. 工程科学学报, 2022, 44(9): 1607-1619.
- WANG Z L, BAO Y P, GU C, XIAO W, LIU Y, HUANG Y S. Key metallurgical technology for high-quality bearing steel production based on the nonaluminum deoxidation process[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(9): 1607-1619.
- [46] 肖微,包燕平,王敏,刘宇,黄永生,孙光涛. 非铝脱氧 GCr15 轴承钢的夹杂物演变和控制[J]. 钢铁, 2021, 56(1): 37-42.
- XIAO W, BAO Y P, WANG M, LIU Y, HUANG Y S, SUN G T. Inclusions evolution and control of non-aluminum deoxidized

- GCr15 bearing steel[J]. *Iron & Steel*, 2021, 56(1): 37-42.
- [47] GU C, BAO Y P, GAN P, LIANG J H, SEBASTIAN M. An experimental study on the impact of deoxidation methods on the fatigue properties of bearing steels[J]. *Steel Research International*, 2018, 89(9): 1800129.
- [48] LI D Z, WANG P, CHEN X Q, FU P X, LUAN Y K, HU X Q, LIU H W, SUN M Y, CHEN Y, CAO Y F, ZHENG L G, GAO J Z, ZHOU Y T, ZHANG L, MA X L, DAI C L, YANG C Y, JIANG Z H, LIU Y, LI Y Y. Low-oxygen rare earth steels[J]. *Nature Materials*, 2022, 21: 1137-1143.
- [49] 杨超云, 栾义坤, 李殿中, 李依依. 稀土元素对高洁净度轴承钢中夹杂物的影响研究[J]. *炼钢*, 2016, 32(4): 54-59, 72.
YANG C Y, LUAN Y K, LI D Z, LI Y Y. Effect of RE on inclusions in highly clean bearing steel[J]. *Steelmaking*, 2016, 32(4): 54-59, 72.
- [50] WANG L M, LIN Q, JI J W, LAN D N. New study concerning development of application of rare earth metals in steels[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, 408-412: 384-386.
- [51] ZHANG T S, WANG D Y, JIANG M F. Effect of magnesium on evolution of oxide and sulphide in liquid iron at 1873 K[J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2014, 21(12): 1073-1080.
- [52] ZHANG L F, REN Y, DUAN H J, YANG W, SUN L Y. Stability diagram of Mg-Al-O system inclusions in molten steel[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2015, 46: 1809-1825.
- [53] 尉政, 任英, 任强, 张立峰. 镁对 GCr15 轴承钢中夹杂物及奥氏体晶粒的影响[J]. *炼钢*, 2023, 58(7): 133-143.
YU Z, REN Y, REN Q, ZHANG L F. Effect of magnesium on inclusions and austenite Grain in a GCr15 bearing steel[J]. *Steelmaking*, 2023, 58(7): 133-143.
- [54] 战东平, 杨永坤, 姜周华, 雷洪. 加热过程钢中夹杂物演变的研究进展[J]. *钢铁*, 2021, 56(10): 16-27, 35.
ZHAN D P, YANG Y K, JIANG Z H, LEI H. A review of research on inclusions evolution in steel during heating process[J]. *Iron & Steel*, 2021, 56(10): 16-27, 35.
- [55] 张惠荣, 郑万, 刘鹏, 张文文, 李光强. 稀土及热处理对 GCr15 轴承钢中夹杂物特征的影响[J]. *炼钢*, 2023, 39(6): 74-83.
ZHANG H R, ZHENG W, LIU P, ZHANG W W, LI G Q. Effect of rare earth and heat treatment on the characteristics of inclusions in GCr15 bearing steel[J]. *Steelmaking*, 2023, 39(6): 74-83.