

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20170369

高品质特殊钢关键生产技术

刘 浏

(中国钢研科技集团有限公司钢铁研究总院, 北京 100081)

摘 要: 介绍了 21 世纪国际上以轴承钢为代表的特殊钢发展新趋势, 分析了国内外轴承钢产品质量的差距和问题, 重点介绍了近几年国内在转炉高碳脱磷低氧钢冶炼、降低还原势的炉外精炼工艺、大型夹杂物来源与控制、超低钛钢冶炼和大方坯连铸凝固末端凸辊压下等高品质特殊钢冶炼技术的发展状况和研究成果。

关键词: 转炉; 精炼; 连铸; 轴承钢; 特殊钢

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)04-0001-07

Key production-technology for high-quality special steels

LIU Liu

(Central Iron and Steel Research Institute, China Iron and Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China)

Abstract: The new developing tendency of special steels in the world during the 21st century was briefly introduced with the bearing steel as the typical example. The disparity and problems between domestic and oversea production of bearing steels were analyzed. The developing status and research achievements in steel-making technologies for high-quality special-steels were emphatically introduced, including high-carbon dephosphorization for low oxygen steel in converter, refining process with lower reduction-potential in ladle-furnace, origin and control of large-size inclusions, ultra-low-Ti steel technology and the convex-roll reduction at the solidification end of large-size bloom-casting.

Key words: converter; refining; continuous casting; bearing steel; special steel

1 国际特殊钢发展趋势

2000 年以后, 国际特殊钢出现新的发展趋势, 即在提高钢水洁净度、大幅降低钢中总氧质量分数

的基础上, 进一步要求严格控制钢中最大夹杂物尺寸和硫化物夹杂^[1]。根据钢材洁净度、夹杂物和疲劳寿命, 将特殊钢细分为商业级、高纯净级和超纯净级, 以轴承钢为例, 国际轴承钢质量分级见表 1。

表 1 国际轴承钢质量分级
Table 1 Quality grades of bearing steels in the world

级别	钢材洁净度/%			夹杂物		疲劳寿命 L_{10}
	$w(\text{TiO})$	$w(\text{S})$	$w(\text{Ti})$	总级别	最大尺寸/mm	
商业级	$\leq 0.000\ 8$	$\leq 0.006\ 0$	$\leq 0.003\ 0$	≤ 2.5	≤ 100	$> 10^6$
高纯净级	$\leq 0.000\ 6$	$\leq 0.004\ 0$	$\leq 0.001\ 5$	≤ 2.0	≤ 50	10^7
超纯净级	$\leq 0.000\ 5$	$\leq 0.002\ 0$	$\leq 0.001\ 0$	≤ 2.0	≤ 20	10^8

新的发展趋势下, 轴承钢质量与生产技术得到迅速发展, 如日本山阳钢厂采用 SNRP 工艺可稳定生产出超纯净轴承钢(简称 SP 钢), 如图 1 所示^[2], 将钢中最大夹杂物尺寸从 35 降低到 15 μm 。如图 2 所示^[2], 轴承钢疲劳寿命达到 10^8 以上, 超过采用特种冶金如电渣重熔和真空自耗(VAR)工艺生产的轴

承钢。

瑞典 SKF 公司 Ovako 厂开发的各向同性钢称为 IQ 钢, 控制夹杂物最大尺寸 d_s 不超过 20 μm , $w(\text{S})$ 不超过 0.002 0%, 使钢材的疲劳性能比传统钢提高 10 倍, 质量达到真空电弧重熔(VAR)钢的水平; 消除了钢材横、纵向疲劳性能的明显差别, 实现

基金项目: 科技部“十二五”基金资助项目(2012BAE03B00)

作者简介: 刘 浏(1951—), 男, 博士, 教授级高级工程师;

E-mail: liu2662@126.com;

收稿日期: 2017-07-19

各向同性。由于 IQ 钢具有良好的横、纵向性能,已用于风力发电透平轴承。

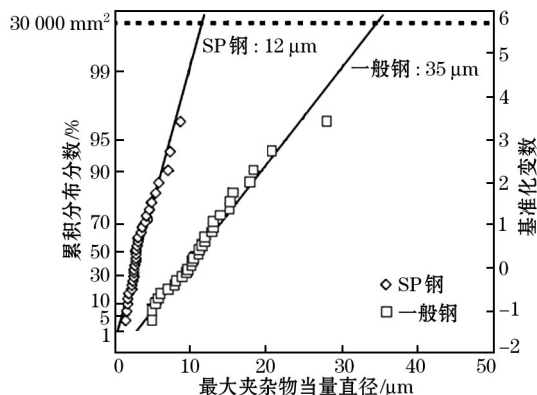


图 1 极值统计法预测夹杂物最大尺寸

Fig.1 Prediction of maximum inclusion size with extreme-value statistics

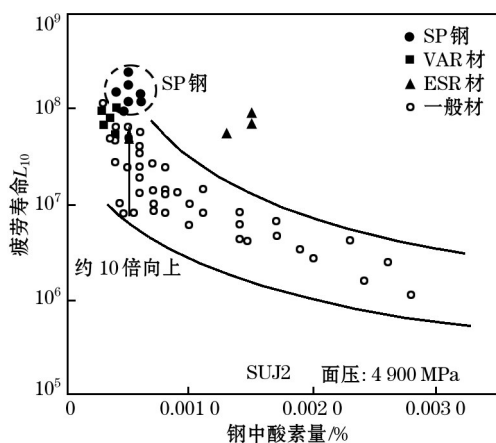


图 2 SP 钢疲劳寿命 L_{10} 的比较

Fig.2 Comparison of service-life L_{10} between SP steels

为控制钢中最大夹杂物尺寸,国外通过示踪试验等方法确定钢中最大夹杂物主要来源于渣钢反应产生的 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 或 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ 精炼内生夹杂和卷渣形成的 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaO}$ 系夹杂。为此,特殊钢生产实现以下工艺创新:

(1) 提高钢材洁净度,进一步降低钢材中磷、硫、钛等杂质质量分数;

(2) 调整 LF 炉精炼渣系,降低炉渣还原势,尽量避免产生精炼内生夹杂;

(3) 采用特殊工艺强化真空精炼,适当延长真空处理时间;

(4) 优化搅拌工艺,采用无渣浇注,严格避免或减少卷渣夹杂;

(5) 优化凝固压下工艺,抑制中心偏析和枝晶偏析,提高钢材致密度。

为了提高特殊钢产品质量,近几年国内许多学者对钢中夹杂物开展了大量研究^[3-9],针对不同钢种(高碳、中碳或低碳钢)、不同精炼和脱氧工艺(如铝脱氧或无铝脱氧钢)研究钢中各类氧化物、硫化物夹杂的来源和形成机理,提出相应解决措施。

2 国内特殊钢质量差距

近几年,国内特殊钢质量有明显进步,主要表现为钢材洁净度提高,不少钢厂对钢中总氧和硫的控制达到国际先进水平,但对钢中夹杂物特别是大型夹杂物的控制仍存在较大差距,国内、外轴承钢质量的比较见表 2。

表 2 国内、外轴承钢质量的比较

Table 2 Quality-comparison of bearing-steel between China and foreign countries

钢厂	钢材洁净度/%				夹杂物		疲劳寿命 L_{10}
	$w(\text{S})$	$w(\text{P})$	$w(\text{TiO})$	$w(\text{Ti})$	总级别	最大尺寸/mm	
日本特钢厂	$\leq 0.002\ 0$	$\leq 0.006\ 0$	$\leq 0.000\ 5$	$\leq 0.001\ 0$	≤ 2.0	12	10^8
国内 A 厂	0.002 0	0.013 0	0.0005 4	0.002 2	2.87	45	10^6
国内 B 厂	0.003 0	0.015 0	0.0005 0	0.002 9	3.08	88	10^6

从表 2 可以看出,国内特钢厂生产的轴承钢洁净度较高,硫和总氧质量分数已接近或达到日本轴承钢水平,钢中钛和磷质量分数的控制偏高。和钢材洁净度相比,夹杂物控制水平差距较大,主要表现为不能完全消除钢中 A、B 和 D 类粗系夹杂,造成钢中最大夹杂物尺寸远高于日本轴承钢,使疲劳寿命降低。与国际先进水平相比,国内轴承钢的主要差距是尚未解决大型夹杂物

的控制。

3 高品质特殊钢生产关键技术

为提高国内高品质特殊钢质量,“十二五”期间,钢铁研究总院与国内几家著名特钢厂合作,研究开发超纯净轴承钢生产技术,取得以下成果。

3.1 转炉低氧钢冶炼

转炉炼钢的主要缺点是无法实现高碳脱磷,低

碳出钢造成钢渣过氧化。生产高品质特殊钢,需要大幅度降低转炉钢水氧活度 a_o , 减少钢中夹杂物。为此开发转炉高碳脱磷新工艺,实现高碳出钢,工艺要点主要是:

- (1) 适当降低前期供氧强度,将硅锰氧化期从3延长至6 min。
- (2) 加强前期底吹搅拌,促进化渣和渣钢反应平衡。
- (3) 提高副枪定碳样(TSC)碳质量分数,保证

终点碳质量分数不低于0.2%。

(4) 优化终渣成分,适当提高终渣碱度和渣钢间磷分配比。

新工艺在国内A厂和B厂取得良好的冶金效果,具体见表3。

近几年转炉脱磷工艺脱磷效果的比较见表4。采用高碳脱磷工艺转炉终点碳和渣钢间磷分配比最高, a_o 和终点磷最低,转炉脱磷率最高。这说明高碳脱磷工艺的脱磷效果优于其他工艺。

表3 高碳脱磷的冶金效果

Table 3 Metallurgical effects of high-carbon dephosphorization

厂名	项目	终点成分				终渣状况				脱磷率/ %	备注
		$w([C])/\%$	$w([P])/\%$	$w([Mn])/\%$	$a_o/\%$	$t/^\circ\text{C}$	R	$w((\text{TFe}))/\%$	L_p		
A厂	高碳	0.21	0.013	0.100	0.013 9	1 614	3.41	16.39	87.55	89.62	复吹
B厂	脱磷	0.20	0.012	0.099	—	1 636	2.60	15.70	50.30	85.00	顶吹
	低碳脱磷	0.11	0.014	0.080	0.031 3	1 636	3.62	16.31	74.26	88.86	复吹

表4 几种脱磷工艺脱磷效果的比较

Table 4 Comparison of dephosphorization effects between several dephosphorization processes

工艺	铁水条件		脱硅脱磷期(或TSC)				脱碳期(或转炉终点)					L_p	总脱磷率 $\eta_p/\%$
	$w(\text{Si})/\%$	$w(\text{P})/\%$	$w([C])/\%$	$w([P])/\%$	$t/^\circ\text{C}$	$\eta_p/\%$	$w([C])/\%$	$w([P])/\%$	$a_o/\%$	$t/^\circ\text{C}$	$\eta_p/\%$		
传统脱磷	0.43	0.127	0.35	0.031	1 579	76.15	0.110	0.014	313	1 636	54.84	74.26	88.86
留渣-双渣	0.56	0.130	3.23	0.097	1 336	23.81	0.110	0.014	351	1 626	84.73	63.17	88.92
(日)MURC ^[10]	0.28	0.150	3.28	0.020	1 350	80.00	0.026	0.017	—	1 650	15.00	—	88.67
高碳脱磷	0.50	0.131	0.53	0.025	1 565	80.71	0.210	0.013	136	1 612	48.00	86.00	90.23

高碳脱磷工艺具有良好的经济效益:(1)钢水 a_o 降低55.6%,钢中残锰提高0.02%;(2)炉后合金收得率硅提高9.81%,铝提高7.87%,铬提高5.27%,锰提高4.95%,生产轴承钢可降低转炉合金成本53元/t;(3)钢铁料消耗降低7.6 kg/t,氧耗降低7.31 m³/t(标准态),转炉成本降低26.47元/t。

3.2 低还原势炉外精炼

近10年利用渣钢反应强化钢水铝脱氧获得了良好效果。通过渣钢反应使钢中保持微量镁、钙等元素,与铝复合脱氧生成MgO-Al₂O₃或MgO-Al₂O₃-CaO夹杂,提高了铝沉淀脱氧效率。如图3所示^[11],钢中铝脱氧能力比Rohde L E等的测定值提高1个数量级。但也带来一些危害,比如复合脱氧生成的大型内生夹杂对钢材危害较大。因此,优化炉外精炼工艺应坚持以下原则:(1)进一步降低钢水 a_o ;(2)尽量避免产生大型夹杂物。采用以下优化工艺:(1)在保证脱氧条件下降低炉渣碱度和渣中Al₂O₃质量分数,降低炉渣还原势;(2)减少精炼过程

钢水中铝,降低钢水还原势;(3)强化真空精炼,通过碳脱氧减少合金脱氧产生的夹杂物。

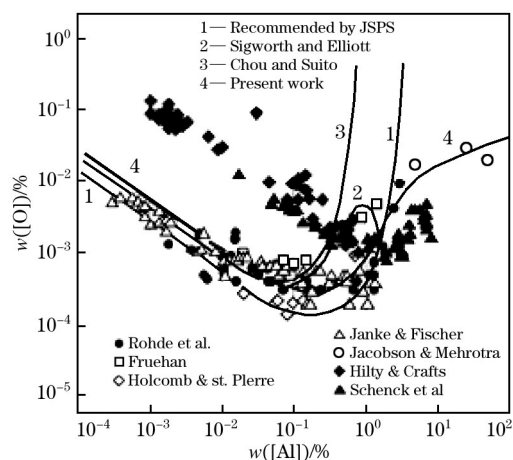


图3 1873 K时钢液中铝脱氧平衡

Fig. 3 Aluminum deoxidation balance in liquid steel at 1873 K

采用炉外精炼优化工艺获得良好的冶金效果,精炼渣系与钢材洁净度见表5。

表 5 精炼渣系与钢材洁净度

Table 5 Refining slag system and cleanliness of steel products

工艺	炉渣状况				钢材洁净度/%				RH 脱氧效率/%
	R	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	$w(\text{CaO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	L_s	$w(\text{P})$	$w(\text{S})$	$w(\text{Ti})$	$w(\text{T[O]})$	
原工艺	10.67	33.22	1.72	329.83	0.013 0	0.002 9	0.001 96	0.000 539	28.1
新工艺	6.80	28.16	2.08	266.47	0.012 0	0.002 5	0.001 55	0.000 482	64.5

新工艺比原工艺 RH 脱氧效率提高 2.3 倍,总氧质量分数平均降低 10.6%,钢中钛质量分数降低 20.9%,硫质量分数降低 13.8%。炉渣碱度降低,渣钢间硫分配比减少 19.2%。钢材夹杂物进一步降低,单位面积夹杂物个数从 6 个降到 5.4 个,其中硫化物降低 16.7%,氧化物降低 9.8%,但钛夹杂升高 8.77%。精炼中纯铝消耗从 1.54 降至 0.31 kg/t,降低 80%;铝收得率从原工艺平均 10.1%提高到 56.0%。冶炼轴承钢可降低合金成本 17.55 元/t。

3.3 大型夹杂物控制

控制钢中大型夹杂物必须掌握钢中大型夹杂物的类型及来源。日本神户钢厂试验证明,钢中含 CaO 系大型夹杂 70% 来自精炼渣^[12]。山阳公司通过示踪试验证明,MgO-Al₂O₃ 夹杂在 LF 精炼后期大量出现,RH 可抑制此类夹杂产生^[13]。国内试验也证明,随着 LF 精炼进行,含示踪剂 BaO 的夹杂物数量逐渐增多,

至 LF 结束时达到 80%,RH 后有所减少^[14]。检验轴承钢成品材发现,大型夹杂物主要是 B 类粗系(约占 82.6%)和 Ds 类夹杂。钢中大型夹杂物形貌、成分特征和形成机理见表 6。

目前,国内对大型夹杂的控制尚未取得技术突破,主要问题是在精炼全过程始终未能消除 10 μm 以上的大夹杂。图 4 所示为 EDS 检测的 LF 炉出站和钢材中大型夹杂物的变化。精炼结束至成品材,内生夹杂成分明显改变:从含 MgO 较低的 CaO-Al₂O₃ 系夹杂向 MgO-Al₂O₃ 质量分数高的右下角转移。这说明浇注中仍存在渣钢反应,将 CaO-Al₂O₃ 系夹杂变性为 MgO-Al₂O₃ 夹杂。卷渣夹杂数量明显减少,成分向富 SiO₂ 方向转移,这说明浇注中有大量低碱度中间包覆盖渣卷入钢中。同时,由于二次氧化使富 Al₂O₃ 的夹杂增多,改变了夹杂物成分。

表 6 钢中大型夹杂物的分类、成分特征和形成机理

Table 6 Classification, composition feature and forming mechanism of large-size inclusions in steel

类型	形貌	典型尺寸/ (mm×mm)	成分特征	形成机理
A 类	细纺锤形	54.6×9.2	MgO-Al ₂ O ₃ 外裹硫化物	渣钢反应生成 MgO-Al ₂ O ₃ , 凝固过程沉淀硫化物
	超宽条状	490×10.4	CaO-SiO ₂ -MgO-Al ₂ O ₃ 系	精炼卷渣形成
B 类 粗系	点链状	95.2×14.5	CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ MgO-Al ₂ O ₃ -CaO	卷渣和渣钢反应形成
	条状	207.8×17.8	MgO-Al ₂ O ₃ -CaO-SiO ₂ MgO-Al ₂ O ₃	卷渣和渣钢反应形成
	块状	21.4×17.7	MgO-Al ₂ O ₃ +Ti(C, N)	渣钢反应生成 MgO-Al ₂ O ₃ , 凝固过程沉淀 Ti(C, N)
Ds 类	不规则球形	15.0×20.0	MgO-Al ₂ O ₃ -CaO	渣钢反应生成
		25.0×30.0	MgO-Al ₂ O ₃ -CaO-SiO ₂	卷渣生成

严格控制钢中大型夹杂物应采取以下措施:(1)优化搅拌工艺,促进夹杂物聚合上浮并避免大量卷渣;(2)降低精炼过程渣钢还原势,抑制内生夹杂产生;(3)加强钢水保护,避免二次氧化使浇注过

程中夹杂物数量增加;(4)采用无渣浇注技术,避免中间包浇注过程中进一步卷渣。

3.4 超低钛钢冶炼

超纯净轴承钢总氧不超过 0.000 5%,钛对大型

夹杂物形态有明显影响。主要是凝固过程中钛生成 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$ 析出, 吸附在内生或卷渣夹杂物表面, 形成尺寸较大的不变形 Ds 类夹杂。钢中总氧质量分数越低, 钛夹杂危害越严重。

现场试验发现, 钢中钛的来源主要是转炉残钛、合金和炉渣带入的钛。钢中残钛较低时精炼以渣中还原增钛为主, 残钛较高时以钢水残钛增钛为主, 整个精炼过程是钢渣间钛逐步达到反应平衡的过程。两种工艺钛变化趋势如图 5 和图 6 所示。

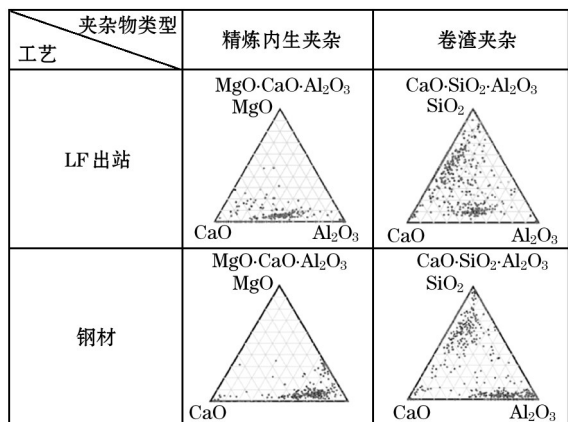


图 4 LF 出站和钢材中精炼内生和卷渣夹杂的变化
Fig. 4 Variation of refining induced inclusion and slag-involved inclusion from LF finish to steel-product

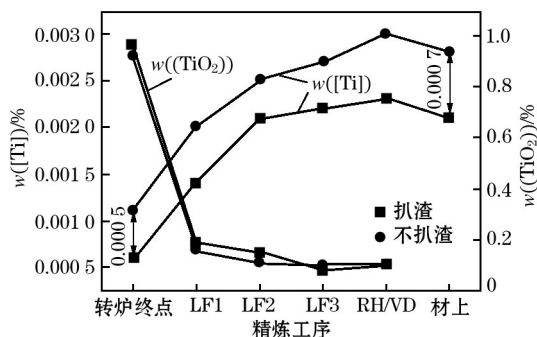


图 5 两种工艺 $w(\text{TiO}_2)$ 和 $w(\text{Ti})$ 变化趋势
Fig. 5 Variation tendency of $w(\text{TiO}_2)$ and $w(\text{Ti})$ by two different processes

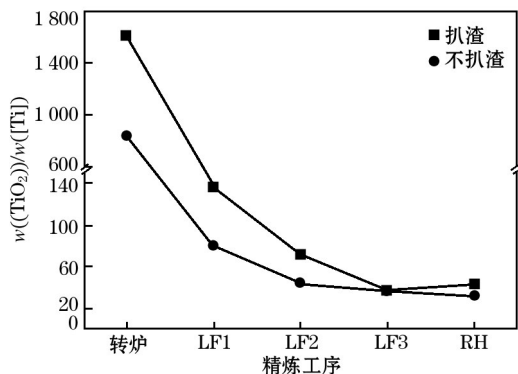


图 6 两种工艺 $w(\text{TiO}_2)/w(\text{Ti})$ 变化趋势
Fig. 6 Variation tendency of $w(\text{TiO}_2)/w(\text{Ti})$ by two different processes

图 5 所示为 LF 前期扒渣或不扒渣两种工艺及不同钢水残钛条件下钢中 $w(\text{Ti})$ 和渣中 $w(\text{TiO}_2)$ 的变化规律。精炼工艺和钢中残钛对渣钢间钛的变化规律没有明显影响, 随着精炼进行, 钢中 $w(\text{Ti})$ 增加, 渣中 $w(\text{TiO}_2)$ 降低。图 6 所示为两种精炼工艺对渣钢间钛分配比的影响。对不同精炼工艺和钢中残钛, 随着精炼进行, 渣钢间钛分配比逐渐趋于平衡, 钢中 $w(\text{Ti})$ 最终取决于 RH 精炼后渣钢间钛的平衡分配比。渣钢间钛表现平衡分配比 L'_{Ti} 取决于式(1)和式(2)。

$$\text{TiO}_2(\text{S}) = [\text{Ti}] + 2[\text{O}] \quad (1)$$

$$\Delta G^0 = 681\,600 - 228.33T$$

$$L'_{\text{Ti}} = \frac{w(\text{TiO}_2)}{w(\text{Ti})} = \frac{f_{\text{Ti}} a_0^2 K}{\gamma_{\text{TiO}_2}} \quad (2)$$

式中: f_{Ti} 为钛的活度系数。

将试验数据代入式(2), 得到渣中 TiO_2 的表观活度系数 γ_{TiO_2} 为 1.1×10^{-18} , 可计算钢水 a_0 对渣钢间钛平衡分配比的影响: (1) 转炉脱钛, 随 a_0 增加, 钛平衡分配比升高, 终点 a_0 不低于 0.013 0%, 残钛不超过 0.000 5%; (2) 精炼增钛, 随 a_0 降低, 钛平衡分配比降低, a_0 为 0.000 2% 时, L'_{Ti} 为 35~45; (3) 渣中 TiO_2 的影响, 控制 RH 终点渣中 TiO_2 质量分数不超过 0.05%, 钢中钛质量分数不超过 0.001 0%。

3.5 连铸坯质量控制

特殊钢一般为中高碳钢, 特别是轴承钢由于碳质量分数较高往往造成成分偏析、疏松和中心缩孔严重等质量缺陷, 影响钢材性能。近 20 年国际上广泛开展了凝固末端压下技术来解决高碳钢内部质量问题, 获得良好的冶金效果。如日本川崎水岛厂开发的连续锻压法, 采用 270 mm × 340 mm 断面大方坯铸机生产高碳钢线材 ($w(\text{C}) = 0.82\%$), 压下量为 80 mm 时可使中心碳偏析指数 C/C_0 降低到 0.9。消除中心偏析使钢材面缩率和伸长率提高 20%~30%, 拉拔断丝率大幅度降低^[15]。

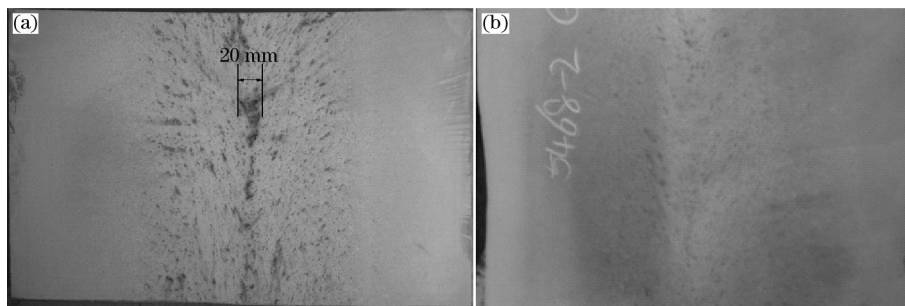
和国内 B 厂合作开发凸辊凝固末端压下技术得到良好效果。如图 7 所示, 凸辊压下轴承钢中心质量得到明显改善: 不仅消除了 V 型偏析和中心缩孔, 中心疏松大幅降低。

图 8 所示为凸辊和平辊压下对轴承钢铸坯碳偏析指数的影响。采用凸辊压下(压下量为 20 mm)可实现中心负偏析 ($C/C_0 = 0.95$), 大幅度提高中心质量。

凝固过程对铸坯进行合理压下使铸坯变形完全不同于轧制中金属变形。凝固过程中对连铸坯压下, 目的一是通过铸坯变形改变未凝固浓化钢水的流动方向, 抑制和减小中心偏析; 二是通过变形

补偿因凝固收缩造成的缩孔和疏松。由于凝固过程温度极不均匀,已凝固坯壳变形应力大,采用平辊压下时铸坯变形主要以凝固坯壳的塑性变形为主,对改变中心浓化钢水的流动不起作用,为无效

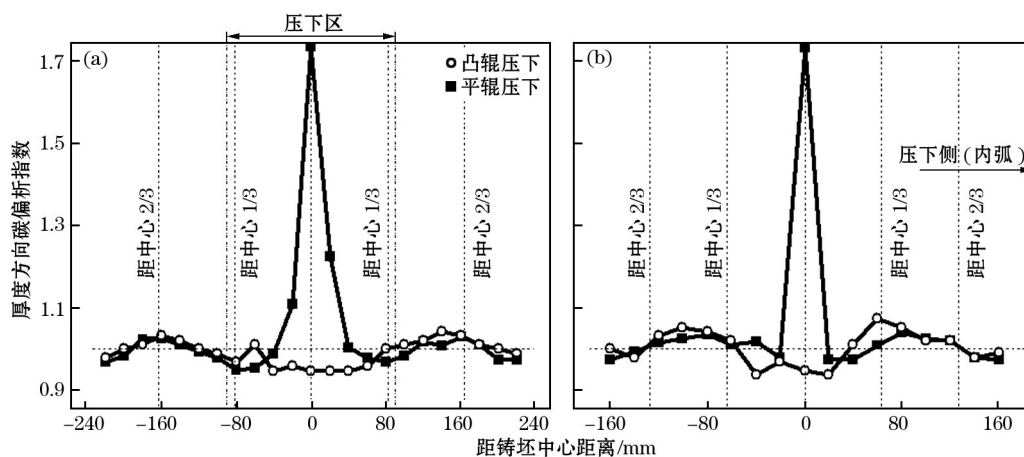
变形。凸辊压下是在未凝固区间通过铸坯变形促进未凝固钢水流动,改变浓化钢水流动方向,消除V型偏析。正是这一原理导致凸辊压下的铸坯质量明显优于平辊压下。



(a) 平辊压下; (b) 凸辊压下。

图7 不同压下工艺对轴承钢纵向低倍质量的影响

Fig.7 Effect of different reductions on longitudinal macro-checking quality of bearing steel



(a) 宽度方向; (b) 厚度方向。

图8 凸辊和平辊压下铸坯碳偏析指数分布的比较

Fig. 8 Comparison of carbon-segregation-index distribution between convex-roll and parallel-roll reduction

4 结论

(1) 新世纪国际特殊钢发展新趋势是在降低总氧质量分数的基础上进一步控制钢中最大夹杂物尺寸和硫化物,使疲劳寿命 L_{10} 从 10^7 提高到 10^8 。

(2) 国内轴承钢洁净度,特别是对总氧与硫的控制接近国际先进水平,但大型夹杂物控制有较大差距:未能完全消除B类粗系和Ds类夹杂,最大夹杂物尺寸约为国际先进水平的4倍。

(3) 生产高品质特殊钢要采用高碳出钢,降低钢水 $a_o \leq 0.015\ 0\%$;降低炉外精炼渣钢还原势,避免大量产生内生夹杂;采用各种措施避免卷渣夹杂并尽可能降低 $w(\text{Ti})$;凸辊压下实现铸坯中心负偏析,明显提高内部质量。以上工艺不仅能提高特殊钢质量,而且降低了生产成本。

参考文献:

- [1] Yoshiyuki Kato, Tsutomu Masuda, Kiyoshi Kawakami, et al. Recent improvements in cleanliness in high carbon chromium bearing steel[J]. ISIJ International, 1996, 36(s): 89.
- [2] 製品紹介. 超高清浄度鋼: SP鋼の鋼種特性と部品展開[R]. Sanyo Technical Report, 2006, 13(1): 77. (Product Description. Ultra-High Cleanliness Steel: Characteristics and Components of SP Steel Grades[R]. Sanyo Technical Report, 2006, 13(1): 77.)
- [3] 葛金朋, 李晶, 史成斌, 等. 高碱度精炼渣对GCr15轴承钢洁净度的影响[J]. 钢铁, 2016, 51(11): 30. (GE Jin-peng, LI Jing, SHI Cheng-bin, et al. Effect of high-basicity refining slag on cleanliness of bearing steel GCr15[J]. Iron and Steel, 2016, 51(11): 30.)
- [4] 杨俊, 杜江, 陈波涛, 等. 超低氧精炼时钙处理对氧化物夹杂的影响[J]. 钢铁, 2015, 50(1): 19. (YANG Jun, DU Jiang, CHEN Bo-tao, et al. Influence of calcium treatment on oxide inclusions in ultra-low oxygen refining process[J]. Iron and Steel,

- 2015, 50(1):19.)
- [5] 马焕珣,王新华,黄福祥,等.脱氧工艺对低碳铝镇静钢洁净度的影响[J].钢铁,2016,51(1):19.(MA Huan-xun,WANG Xin-hua,HUANG Fu-xiang,et al. Effect of deoxidation technology on cleanliness of low carbon aluminum killed steel[J]. Iron and Steel, 2016, 51(1):19.)
- [6] 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. Inclusion formation and deformation in Al-killed wheel steel without calcium treatment[J]. Iron and Steel,2016, 51(1):25.)
- [7] 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.)
- [8] 夏云进,郭鑫,李杰,等.锆、铝脱氧对钢中硫化物生成行为的影响[J].钢铁,2016,51(2):38.(XIA Yun-jin, GUO Xin, LI Jie, et al. Effects of Zr, Al deoxidation on formation behavior of sulfides in steel[J]. Iron and Steel,2016,51(2):38.)
- [9] 张学伟,张立峰,杨文,等.重轨钢中MnS析出热力学和动力学分析[J].钢铁,2016,51(9):30.(ZHANG Xue-wei,ZHANG Li-feng,YANG wen,et al. Thermodynamics and dynamics of MnS inclusions precipitation during solidification process in heavy rail steels[J]. Iron and Steel,2016,51(9):30.)
- [10] 小川雄司,矢野正孝,北村信也,等.転炉を用いた脱りん脱炭連続処理プロセスの開発[J].鉄と鋼,2001,87(1):22.(Ytji Ogawa,Masataka Yano,Shinya Kitamura,et al. Development of the continuous dephosphorization and decarburization process using BOF[J]. The Iron and Steel Institute of Japan, 2001,87(1):22.)
- [11] Hiroyasu Itoh,Mitsutaka Hino,Andshiro Ban-ya.Communications thermodynamics on the formation of spinel nonmetallic inclusion in liquid steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions B,1997,28:953.
- [12] 太田裕己,木村世意,三村毅,等.超清浄軸受鋼の取鍋精錬時におけるCaO含有介在物の挙動[J].神戸製鋼技報,2011,61(1):98.(Hiroki Ohta, Sei Kimura, Tsuyoshi Mimura, et al. Behavior of CaO containing inclusions during ladle refining of ultraclean bearing steel[J]. Kobe Steel Engineering Reports, 2011, 61(1):98.)
- [13] 川上潔.高纯净度鋼における介在物の生成起源[J].Sanyo Technical Report, 2007, 14(1):22.(Kiyoshi Kawakami. Generation mechanisms of non-metallic inclusions in high-cleanliness steel[J]. Sanyo Technical Report, 2007, 14(1):22.)
- [14] 刘浏,范建文,王品,等.轴承钢精炼中大型夹杂物来源的示踪[J].钢铁,2017,52(9):27.(LIU Liu,FAN Jian-wen,WANG Pin,et al. Generation mechanism of large inclusions during bearingsteels refining process by tracer method[J]. Iron and Steel, 2017, 52(9):27.)
- [15] 小島信司,今井卓雄,溝田久和,等.連続鍛圧技術による中心偏析の改善[J].鉄と鋼,1992,12:1794.(Shinji Kojima,Takuo Imai, Hisakazu Mizota, et al. Improvement of center-line segregation in continuously cast strand by continuous forging process[J]. ISIJ International, 1992, 12:1794.)

《钢铁》杂志征稿启事

《钢铁》杂志创刊于1954年,由中国科学技术协会主管,中国金属学会、钢铁研究总院和北京钢研柏苑出版有限责任公司主办,是中国冶金界历史较长的综合性科技期刊,也是反映钢铁工业科技成就的主要刊物之一。《钢铁》设有由55名国内知名学者、企业家等组成的编委会,编委会顾问徐匡迪、殷瑞钰、张寿荣、翁宇庆和编委会主任委员干勇、编委会委员毛新平、谢建新等7位均为中国工程院院士。《钢铁》办刊宗旨是面向生产、结合实际;坚持为中国钢铁工业生产建设服务,报道钢铁工业的科技成就、生产工艺的技术进步、品种质量的改善提高、新技术新产品的开发应用、企业经营管理经验和专业理论应用研究等,以提高钢铁行业科技工作者和管理人员的科技水平,促进钢铁工业的发展。

2001年10月《钢铁》入选由国家新闻出版总署创建的中国《期刊方阵》;名列双百第74名。2009年以前为EI收录期刊,自1992年开始,《钢铁》连续7次入编北大图书馆核心期刊(中文核心期刊);为中信所“中国科技核心期刊”;被国际著名检索机构Scopus收录。

《钢铁》主要栏目有:综合论述、原料与炼铁、炼钢、压力加工、钢铁材料、环保与能源、装备技术、技术交流等。《钢铁》现为月刊;大16开;页码为88页;期刊为自办发行。

1 征稿对象

从事钢铁冶金生产、管理、设计、科研、教学和钢材使用部门的科技人员、专家学者和管理人员等。

2 征稿范围

钢铁冶金领域具有创新性、高水平、有重要意义的原始性研究学术论文以及反映学科最新发展状况的文献综述和技术类文章。《钢铁》在继续报道和推广钢铁工业关键共性技术的基础上,特向作者征集涉及钢铁工业关键技术的原创文章和综合论述文章。

特别欢迎作者针对钢铁企业资源优化配置和节能减排、资源综合利用等方面撰写技术文章。

3 投稿和联系方式

请登录“钢铁期刊网”网站(<http://www.chinamet.cn>),点击“钢铁”的图标或刊名导航条,进入期刊的首页了解详情。

联系人:尚海霞,党玉华,何祺;

邮箱:IS@chinamet.cn;

电话:010-62182345;

传真:010-62185134;

通讯地址:北京市海淀区学院南路76号;

邮编:100081。