

· 工艺技术 ·

## 70 t BOF-LF-VD-CC-HR 流程试制磨球钢 80MnCr 棒材的开发

刘发友<sup>1,2</sup> 王国承<sup>1</sup> 汪琦<sup>1</sup> 田钱仁<sup>1</sup> 毛福来<sup>2</sup>

(1 辽宁科技大学材料与冶金学院, 鞍山 114051; 2 山东寿光巨能特钢有限责任公司, 寿光 262700)

**摘要** 试制的 80MnCr 钢( /% : 0.79 ~ 0.81C, 0.92 ~ 0.97Mn, 0.26 ~ 0.32Si, 0.009 ~ 0.017P, ≤ 0.005S, 0.92 ~ 0.97Cr, 0.06Mo, 0.03 ~ 0.05Ti, 0.027 ~ 0.032Al, 0.0004 ~ 0.0012O) 的生产流程为 BF-70 t BOF-LF-VD-Φ450 mm 圆坯连铸-Φ90 mm 棒材轧制。通过控制 BOF 终点 [P] ≤ 0.015%, 终点 [C] ≥ 0.12%, 出钢用 1.5 kg/t<sub>钢</sub> 芯铝预脱氧, LF 喂铝线脱氧, 精炼渣碱度 ≥ 4, VD 后喂钙线, 连铸结晶器和末端电磁搅拌等工艺措施, 钢中非金属夹杂物级别为: 粗系 0、细系 ≤ 0.5; 低倍组织级别为: 中心疏松 ≤ 1.5、一般疏松 ≤ 0.5、中心偏析 ≤ 0.5、锭型偏析 0; 钢材经超声波无损探伤检测, 合格率达 93.07%。

**关键词** 80MnCr 磨球钢 70 t BOF-LF-VD-CC 流程 低倍组织 非金属夹杂 超声波探伤

## Development of 80MnCr Steel Bar for Grinding Ball by 70 t-BOF-LF-VD-CC-HR Flowsheet

Liu Fayou<sup>1,2</sup>, Wang Guocheng<sup>1</sup>, Wang Qi<sup>1</sup>, Tian Qianren<sup>1</sup> and Mao Fulai<sup>2</sup>

(1 School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051;

2 Shandong Shouguang Juneng Special Steel Co Ltd, Shouguang 262700)

**Abstract** The production flowsheet of pilot-produced steel 80MnCr ( /% : 0.79 ~ 0.81C, 0.92 ~ 0.97Mn, 0.26 ~ 0.32Si, 0.009 ~ 0.017P, ≤ 0.005S, 0.92 ~ 0.97Cr, 0.06Mo, 0.03 ~ 0.05Ti, 0.027 ~ 0.032Al, 0.0004 ~ 0.0012O) is BF-70 t BOF-LF-VD-Φ450 mm Round bloom casting-rolling to Φ90 mm bar. With the process measures including controlling BOF end [P] ≤ 0.015% and end [C] ≥ 0.12%, pre-deoxidizing with 1.5 kg/t steel cored aluminium at tapping, deoxidation by feeding aluminium wire in LF, refining slag basicity ≥ 4, after VD feeding calcium wire, mold-EMS and end-EMS in casting, the rating units of inclusions in steel are heavy series 0 and thin series ≤ 0.5, the rating of macrostructure are central porosity ≤ 1.5, general porosity ≤ 0.5, central segregation ≤ 0.5 and ingot square-segregation zone 0; and the qualified rate of steel products by ultrasonic nondestructive measuring is up to 93.07%.

**Material Index** 80MnCr Steel for Grinding Ball, 70 t BOF-LF-VD-CC Flowsheet, Macrostructure, Nonmetallic Inclusions, Ultrasonic Detection

磨球钢主要用于制造矿山、冶金和水泥等行业使用的耐磨钢球,对钢材质量要求严格<sup>[1]</sup>。磨球钢可以采用废钢经电弧炉冶炼或铁水经转炉冶炼、二次精炼、连铸和热轧工艺流程生产。例如,国内本钢采用 EBT→LF→VD→CC 工艺生产 BMQ80MnCr 磨球钢<sup>[2]</sup>,石钢分别采用电弧炉流程和转炉流程生产 400B 磨球钢<sup>[3]</sup>。山东寿光巨能特钢有限公司(巨能特钢)采用 BF→70 t BOF→LF→VD→CC 工艺对 80MnCr 磨球钢铸坯(巨能特钢内部牌号 JNR45090)进行了试制生产,获得连铸坯经热送至加热炉,采用 Φ1350 mm×1+Φ900 mm×4+Φ700 mm×5 多辊径多道次工艺轧制,轧材经探伤合格入库。根据 80MnCr 磨球钢的化学成分、低倍组织、非金属夹杂物和超声波探伤等方面的质量要求,本文分析了巨能特钢试制 80MnCr 磨球钢的关键技术控制条件。

### 1 钢种质量要求及成分设计

C 含量过高降低钢的韧性,同时考虑耐磨性能要求,确定 C 含量控制在 0.80%,同时,为了提高钢的淬透性以及发挥固溶强化作用,Mn 控制在 1% 左右。考虑到不同矿物和磨矿条件,为了提高钢的耐酸、碱腐蚀性能、抗氧化以及低温性能,添加一定量的 Cr 和少量的 Ni,同时保证一定的强韧性和硬度<sup>[4-5]</sup>。另外,添加少量 Mo 以抑制 Mn、Cr 的回火脆性倾向,减轻晶界处网状碳化物的形成<sup>[6]</sup>,同时,保证钢中含 0.030% 左右的 Al 以细化晶粒<sup>[7-8]</sup>。为保证钢的纯净度,减少作为疲劳源的夹杂物,钢中 O 含量要求控制在 0.002% 以下, H 含量控制在 0.00015% 以下, P 和 S 含量不超过 0.030%。

考虑上述要求以及国内外高碳锰铬类磨球钢的质量标准,确定的 80MnCr 磨球钢的成分标准如表 1 所示。由表 1 可见,在化学成分波动方面,内控标准

表 1 80MnCr 钢标准和内控化学成分/%  
Table 1 Standard and inner control chemical composition of steel 80MnCr / %

项目	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ti	Al	P	S	Cu	Ni	H	O
标准	0.77 ~ 0.83	0.90 ~ 1.00	0.20 ~ 0.35	0.90 ~ 1.00	0.04 ~ 0.08	0.01 ~ 0.05	0.02 ~ 0.04	≤0.030	≤0.030	≤0.3	≤0.15	≤ 0.000 15	-
内控	0.79 ~ 0.81	0.92 ~ 0.97	0.25 ~ 0.32	0.92 ~ 0.97	0.06 ~ 0.07	0.03 ~ 0.05	0.025 ~ 0.035	≤0.020	≤0.010	≤0.2	≤0.10	≤ 0.000 12	≤ 0.002 0

提出了窄范围控制要求,其中,C含量的波动为 $\pm 0.02\%$ ,Mn和Cr含量的波动为 $\pm 0.05\%$ 。

在低倍组织方面,要求轧材横截面的酸浸低倍组织试片上不得有目视可见的缩孔、气泡、裂纹、夹杂、翻皮和白点等缺陷,中心疏松、一般疏松和锭型偏析合格级别均为 $\leq 2.5$ 级。要求A类、B类、C类和D类夹杂物中的粗系和细系级别均不超过2.5级。钢材的超声波探伤执行采用欧洲标准EN10308:2002-标准3级。

## 2 试制工艺及过程控制

### 2.1 转炉冶炼

高炉铁水采用70 t顶底复吹转炉进行吹炼,转炉底吹气强度为 $0.03 \sim 0.12 \text{ m}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$ 。依据操作实践和80MnCr钢种的终点成分及温度的要求,确定入炉铁水的成分和温度条件为 $[P] \leq 0.125\%$ 、 $[Si] = 0.20\% \sim 0.50\%$ ,温度 $\geq 1250 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在满足脱磷的前提下,为了提高终点钢水C含量以降低钢水过氧化程度,转炉吹炼采用高拉碳操作,通过高拉补吹控制终点。根据巨能特钢的具体工艺条件,经过多炉次的试制摸索,冶炼80MnCr钢时,转炉出钢应满足 $[P] \leq 0.015\%$ 、 $[C] \geq 0.12\%$ 以及钢水温度 $1640 \sim 1670 \text{ }^\circ\text{C}$ 的条件。

通过对终点钢水的定氧试验,测量得到该70 t转炉的终点碳氧积为 $m = [C] \cdot [O] = 0.00249 \sim 0.00288$ ,当碳含量小于0.10%,钢水氧含量随着终点钢水碳含量的增加呈现快速降低趋势;当碳含量控制在0.10%左右时,钢水氧含量基本上可以稳定在0.03%以下;若终点碳含量控制在0.15%左右,终点钢水的氧含量基本上可以稳定在0.02%以下,有利于提供钢水洁净度以及精炼过程对夹杂物进行控制<sup>[9]</sup>。采用挡渣棒进行挡渣出钢,尽可能减少下渣。出钢过程或出钢后采用钢芯铝进行预脱氧,钢芯铝的加入量约为 $1.5 \text{ kg/t}_{\text{钢}}$ 。出钢后继续添加预熔渣300 kg、石灰300 kg和萤石100 kg,构成钢包精炼的初始顶渣。

### 2.2 精炼

采用LF和VD联合精炼。钢包到达LF后,喂

入铝线 $1.5 \text{ m/t}_{\text{钢}}$ 对钢水进行深脱氧。LF送电后,首先补加300~400 kg石灰和适量的萤石,以获得合适的顶渣碱度和黏度,通常顶渣碱度控制在 $R \geq 4$ ,以保证精炼渣具有较好的脱硫和吸收氧化物夹杂的能力;然后,分别往顶渣中添加25 kg的电石和碳化硅粉,以进一步提高炉渣的还原性,形成良好白渣,保证扩散脱氧的效果。在精炼后期,取过程的钢水样品进行全分析,实时调整钢水成分。

LF精炼结束后,采用VD进行真空精炼。由于80MnCr磨球钢对H含量有严格的要求,在真空精炼过程中要求真空度在100 Pa以下的保持时间应大于20 min,同时,控制氩气的搅拌强度,以保证脱氢效果,同时尽可能的少混渣。破真空后,为了进一步去除和变质硬脆性的氧化物夹杂,对钢水进行喂钙线处理,钙线喂入量为 $0.5 \sim 1.0 \text{ m/t}_{\text{钢}}$ 。钙处理后加入钢包覆盖剂,继续弱吹氩搅拌约30 min后进入浇铸。

### 2.3 连铸

连铸采用R17大圆坯连铸机断面 $\Phi 450 \text{ mm}$ ,其主要工艺为低拉速弱冷工艺,具体参数为中间包钢水过热度控制在 $20 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 波动,拉速相应为 $0.40 \sim 0.60 \text{ m/min}$ 调整。结晶器冷却水量设定为 $240 \text{ m}^3/\text{h}$ ,二次冷却采取弱冷模式。在开浇之前,首先对中间包进行充氩排空处理,尽可能避免钢水发生二次氧化;同时,保证钢包、中间包、结晶器以及水口等链接处的严格保护浇铸。为了防止连铸过程增碳,对中间包钢水采用低碳覆盖剂。考虑高碳合金钢的凝固的裂纹敏感性,结晶器保护渣采用高碳钢专用保护渣。

由于低拉速及高含量合金的选分结晶行为,为减轻80MnCr连铸坯在凝固过程中C、Mn和Cr等元素的严重偏析,连铸过程分别对结晶器和凝固末端施加电磁搅拌。经过优化确定的结晶器电磁搅拌频率/电流为 $2 \text{ Hz}/300 \text{ A}$ ,凝固末端电磁搅拌频率/电流为 $4.5 \text{ Hz}/450 \text{ A}$ 。凝固末端采用间歇模式搅拌,搅拌周期模式为正转15 s-停3 s-反转15 s-停3 s。

### 2.4 轧制

表2 试制 80MnCr 钢的化学成分 / %  
Table 2 Chemical composition of pilot-produced steel 80MnCr / %

C	Mn	Si	Cr	Mo	Ti	Al	P	S	Cu	Ni	H	O
0.79 ~ 0.81	0.92 ~ 0.97	0.26 ~ 0.32	0.92 ~ 0.97	0.060 ~ 0.063	0.03 ~ 0.05	0.027 ~ 0.032	0.009 ~ 0.017	0.005	0.01 ~ 0.03	0.01 ~ 0.02	0.000 10 ~ 0.000 12	0.000 45 ~ 0.001 15

连铸坯采用温装入炉,铸坯进入加热炉时的温度为 500 ~ 600 °C。加热炉内各段控温设置为加热 I 段 1 组的温度控制在 (800 ± 50) °C,加热 I 段 2 组的温度控制在 (975 ± 25) °C;加热 II 段的温度控制在 (1 190 ± 20) °C,其中,II 段 1 组按温度范围的中下限进行控制,2 组按温度范围的中上限控制;均热段温度控制 (1 180 ± 20) °C。轧制过程的开轧温度为 1 050 ~ 1 150 °C,经两辊可逆 11 道次轧制 180 mm × 220 mm 中间坯,再经 Φ900 mm × 4 + Φ700 mm × 5 不同辊径和道次轧制成 Φ90 mm 的规格材,轧材入冷床(坑)缓冷 48 h 以上。

### 3 试验钢的质量检测

#### 3.1 化学成分、低倍组织和夹杂物

在 80MnCr 试制钢棒材上取 5 个样品进行化学成分全分析,测得钢中各元素的含量如表 2 所示。由表 2 可见,试验钢样品的化学成分均达到表 1 所设定的内控成分标准,其中,总氧含量的平均值达到了 0.000 73%,反映出钢材具有较高的纯净度。每炉随机取 2 块试样进行酸浸试验观察低倍组织,表 3 为低倍组织级别分析结果,同时表 3 中还列出了样品中 A 类、B 类、C 类和 D 类夹杂物的检测结果。由表 3 可见,试验炉次钢的中心疏松最高为 1.5 级,中心偏析最高为 0.5 级,达到了低倍组织标准的要求;A 类、B 类、C 类和 D 类夹杂物的粗系级别均为 0,细系级别达到标准要求。

#### 3.2 超声波探伤

表3 试制 80MnCr 钢中的夹杂物和低倍组织评级  
Table 3 Rating of inclusions and macrostructure of pilot-produced steel 80MnCr

分项	高倍组织/级				低倍组织/级							
	A		B		C		D		一般疏松	中心疏松	锭型偏析	中心偏析
	粗	细	粗	细	粗	细	粗	细				
最高	0	0.5	0	0	0	0.5	0	0.5	0.5	1.5	0	0.5
最低	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表4 80MnCr 钢材探伤检测结果  
Table 4 Ultrasonic detection results of products of steel 80MnCr

执行标准	规格/mm	检测量/支	合格/支	合格率/%
EN10308 标准 3 级	Φ90	1 904	1 772	93.07

超声波通过材料表面、底面或缺陷时,部分的超声波反射的返回时间不同,分别将表面、底面和缺陷处反射的脉冲称为始脉冲、底脉冲和伤脉冲,各脉冲之间的间距比值与钢材中表面、缺陷、底面的间距比值相同,依此判断缺陷位置<sup>[10-11]</sup>。试验钢样品的超声波探伤结果如表 4 所示,探伤合格率达到 93.07%。

图 1 为某一存在缺陷样品的超声波探伤脉冲波形,主要出现 3 种脉冲波形。图 1 中波形 A 和波形 B 分别对应的区域为棒材的近表面和钢材探伤的始端横剖面的低倍组织处的脉冲波形,未发现明显异常。波形 A、B 横剖缺陷低倍酸浸组织均未发现异常,且波形 A 呈现不规则形状,出现率较低,判断应为大颗粒的夹杂物;波形 B,规律性明显,降低探伤速度后出现率明显降低,判断为设备误报。经控制探伤过程的震动幅度和探伤速度等,可有效降低误

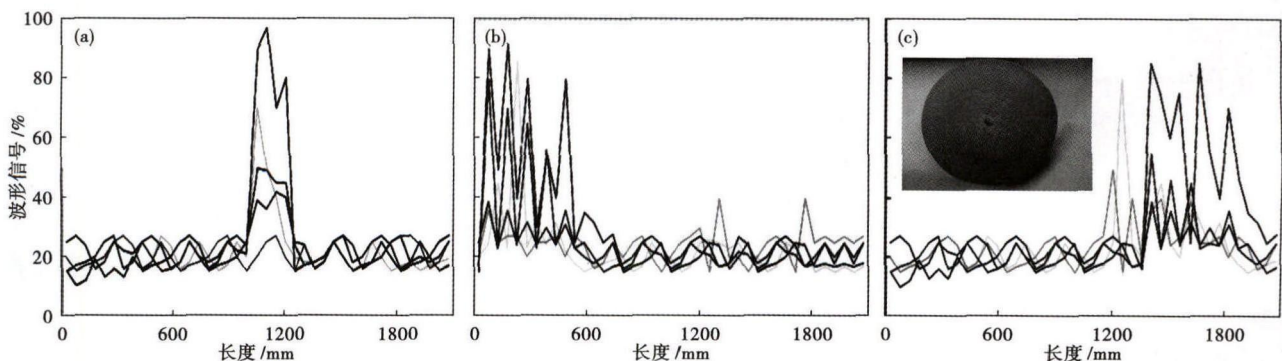


图1 80MnCr 钢棒材的超声波探伤脉冲波形:(a)波形 A,(b)波形 B 和(c)波形 C 及低倍形貌

Fig. 1 Pulse wave form of ultrasonic detection on bar of steel 80MnCr: (a) waveform A, (b) waveform B and (c) waveform C with morphology of macrostructure

报率。钢材中心部位的孔洞缺陷的波形如图 1(c) 所示。波形 C 对应的区域为棒材的中心区域, 呈现报警波较多, 且波底呈现齐整尖锐的特点, 同时, 钢材的横剖低倍酸浸组织发现存在一定量的缩孔, 但该缺陷的出现率低。根据 A、C 类波形所反映出的缺陷特点, 两类缺陷可能是在连铸工序发生。研究表明, 恒拉速连铸可减轻连铸坯卷渣发生<sup>[12]</sup>, 从而减少大颗粒夹杂物; 同时, 拉速增加导致二冷水量增大, 容易促进柱状晶生长, 易导致中心缩孔发生<sup>[13]</sup>。根据巨能特钢的生产工艺条件, 确定的连铸工艺参数为: 中间包钢水过热度最佳控制在 20 ~ 30 ℃, 要降低连浇炉次温度波动, 杜绝高温和低温钢水情况; 目标拉速为 0.45 m/min, 波动范围不超过 0.05 m/min; 加强设备点检维护, 保证液面自动控制等关

键设备正常运行。

#### 4 结论

采用 BF→BOF→LF→VD→CC 流程试生产合格的 80MnCr 磨球钢铸坯。转炉终点温度控制 1 640 ~ 1 670 ℃, [C] ≥ 0.12%、[P] ≤ 0.015%。LF 精炼渣 R ≥ 4, 具有良好脱硫和吸收氧化铝夹杂的能力, 同时保证精炼渣良好的还原性以提高扩散脱氧效果。通过生产试制, 80MnCr 磨球钢化学成分达到设计要求, 低倍组织中心疏松、一般疏松、中心偏析最高级别分别达到 1.5 级、0.5 级、0.5 级, 非金属夹杂物 A 类、C 类细系最高级别为 0.5 级, 超声波探伤合格率达到 93.07%, 为批量生产磨球钢奠定了基础。

#### 参考文献

[1] 徐佩芬, 吴海平. 耐磨球段的市场需求及应用[J]. 铸造技术, 2012, 33(2): 200-202.

[2] 赵千水, 张群. BMQ80MnCr 锻造耐磨钢球的研制[J]. 金属世界, 2014(6): 26-29.

[3] 梁立军, 杨建维, 马桂旺. 400B 磨球钢的开发[J]. 河北冶金, 2011(5): 19-22.

[4] 秦秀丽, 孙玉福, 肖志云. 低合金钢表面铸渗层的组织及性能研究[J]. 铸造, 2011, 60(7): 680-689.

[5] 张文凤. 超高硬度韧性耐磨铸钢的研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2010.

[6] 谭淳礼, 白秉哲, 方鸿生. Mo 在新型空冷低碳 Mn-Si-Cr 系贝氏体钢中的作用[J]. 金属热处理, 2007, 32(9): 48-51.

[7] 戚文军, 王顺成, 陈学敏. Al-5Ti-1B 合金的有效形核相与晶粒细化机制[J]. 稀有金属, 2013, 37(2): 179-185.

[8] 姜文辉, 韩行霖. Al-Ti-C 中间合金晶粒细化剂的合成及其细化晶粒作用[J]. 中国有色金属学报, 1998, 8(2): 268-271.

[9] 刘发友, 王国承, 孙长余, 等. 80 t BOF-LF-VD-CC 流程生产 GCr15 轴承钢控氧的工艺实践[J]. 特殊钢, 2016, 37(5): 36-39.

[10] 袁海军. 焊缝内部缺陷的超声波探伤钢结构工程的质量检测讲座三(下)[J]. 工程质量, 2004(4): 51-54.

[11] 王槐祥. 热轧棒材自动超声探伤工艺的研究[J]. 特殊钢, 1989, 10(3): 44-48.

[12] 马栓, 袁守谦. 恒拉速连铸生产技术的进展[J]. 连铸, 2005(3): 14-17.

[13] 张克强, 齐振亚, 王长栓. 高碳钢方坯连铸中心缩孔去除[J]. 钢铁, 2004, 39(1): 27-29.

刘发友(1970-), 男, 博士生, 1993 年山东大学(本科)毕业, 特殊钢冶金研究. E-mail: wang\_guocheng@163.com

收稿日期: 2016-12-17

### 下 期 要 目

精炼渣组成对 31CrMoV9 钢夹杂物的影响 .....	徐泽宇等
低合金超高强度钢 32CrNiMoNb 的控轧控冷工艺的试验研究 .....	苏春霞等
120 t 钢包底吹氩工艺优化水模型研究 .....	张真铭等
150 t 顶底复吹转炉少渣冶炼工艺实践 .....	姚娜等
82B 高强度钢盘条冷拔断裂的分析和工艺控制 .....	李玮等
镜面塑料模具钢 P80R 热轧扁材表面裂纹分析和工艺改进 .....	吕学飞等
锰含量对中碳冷锻钢组织和性能的影响 .....	阮士朋等
新型环保纸模制品用不锈钢模具材料的开发 .....	覃秀凤
退火温度和再结晶比例对 0.58Si 无取向硅钢 0.50 mm 冷轧板性能的影响 .....	林媛等