

# 矩形坯连铸生产 40MnB 钢试验研究

于广石 李本海 (首钢技术研究院钢研所, 100041)

**[摘要]** 借鉴国内钢厂生产 40MnB 钢的成功经验, 设计出首钢连铸生产 40MnB 钢的内控成分和各工序关键工艺, 利用 BOF-LF-CC 工艺批量生产汽车用优质钢 40MnB。

**关键词** 矩形坯 连铸 40MnB 淬透性 合金 试验

## 1 前言

硼钢是以 Mn、B 为基础代替 Cr、Ni 钢的一种低合金结构钢。钢中加入微量硼能显著提高淬透性, 节约大量贵重元素, 同时还可以获得优良的机械性能。我国 Cr、Ni 资源紧缺, 而硼资源丰富。因此, 发展硼钢意义重大。通常产品设计采用中碳钢或中碳合金钢, 通过调质处理后达到设计要求的力学性能指标。获得最终使用态的金相组织为回火索氏体组织。这种回火索氏体组织具有强度与塑性、韧性的良好配合。汽车的前轴、半轴、花键轴、转向节、发动机曲轴、连杆等零件及大部分紧固件常用此工艺制造。本文研究的 40MnB 钢主要用于载重汽车的轴、联轴节等受力部件, 要求材料要有足够的淬透性和较高的冲击韧性。

国外早在 70 年代就利用转炉大量生产汽车用优质钢, 日本、美国利用转炉生产的优质钢产量占需求量的一半以上, 其最大优点是单炉次批量大, 残余元素含量少且稳定, 淬透性带窄, 生产成本低。

国内攀钢在 1999 年开展了转炉冶炼 40MnB 等汽车用优质钢的研发工作。其生产工艺流程为: 全铁水 120 t LD 转炉冶炼→出钢预脱氧、合金化→钢包吹氩、喂铝线脱氧、合金化、喂复合包芯线净化钢质→模铸→初轧机开坯成 325 mm×280 mm 或 200 mm×200 mm 钢坯。

首钢于 2001 年在国内率先采用 BOF-LF-CC 工艺生产汽车用钢的研发工作。先后试制成功 20CrMn-

TiA、28MnSiBE、SAE8620、40CrA、20CrA、35CrMoA 和 42CrMoA 等优质汽车用钢。研发 40MnB 钢就是在此基础上进行的。

## 2 40MnB 钢中元素的作用及机理

### 2.1 硼

B 在钢中的淬透性效果与其它合金元素相比有其显著的特点, 其提高淬透性的能力按单位含量计算比淬透效果最强的合金元素也要高 100 倍以上。钢中 B 元素可溶于 Fe, 形成间隙式和置换式固溶体, 同时与 Fe、C、N、O 等元素形成  $Fe_3(C, B)$ 、 $Fe_{23}(C, B)_6$  等 Fe-C-B 化合物, 还能形成  $Fe+2(BO)_2$ 、 $Fe+2FeFe_{23}+BO_3$  等 Fe-O-B 型化合物。Fe-C-B 为脆性相复合化合物。上述化合物均称 B 相<sup>[1]</sup>。

钢中 B 按化学分析分类为总硼、酸溶硼和酸不溶硼。酸溶硼指固溶硼和碳硼化合物中的硼, 酸不溶硼指氧化硼和氮化硼中的硼。硼提高淬透性的效果主要是由阻止铁素体和上贝氏体相变引起的, 它降低了形核速度, 增加过冷奥氏体的稳定性, 降低了临界淬火冷却速度, 从而提高钢的淬透性。

B 相随着钢中 B 含量、奥氏体化温度和热处理工艺的变化而形态各异, 呈点、粒状、条状、网状、空心状和角状分布。B 相数量随着钢中 B 含量的提高而增加且粗化。表 1<sup>[2]</sup>说明, 40MnB 钢在相同工艺条件下, B 相随着钢中 B 含量的增加, 明显粗化。表 2<sup>[2]</sup>为 40MnB 钢不同含 B 量与奥氏体化温度及 B 相相貌的关系。

表 1 40MnB 钢中不同含 B 量与 B 相关系

B 平均含量/%	原材料(轧材)	退火态(炉冷)
0.00084	晶内、晶界 B 相呈细小点状分布	呈小条状分散分布
0.00149	晶内、晶界 B 相呈较细点状分布	呈稍长小条状分布
0.00186	晶内晶界 B 相呈较分散小点状分布	呈粗长条带状沿晶界分布
0.0062	晶内晶界 B 相呈条点断续状	呈较大粗长条带状沿晶界分布
0.0076	晶内晶界 B 相呈较大条状断续	呈较大粗长条带状沿晶界分布

表2 40MnB钢不同含B量与奥氏体化温度及B相形貌关系

淬火温度(±5℃)	含B量/%				
油冷	0.00084	0.00149	0.00186	0.0062	0.0076
800	B化物呈细点状分散分布	呈小颗粒状分布	呈小颗粒状分布于晶界	呈条\小块半网状分布于晶界	呈条\小块半网状分布于晶界
850	B化物呈较细点状分散分布	呈小颗粒状分布,数量较少	呈小颗粒状分布于晶界	呈条小块半网状分布,数量稍少	呈条\小块半网状分布于晶界
900	B化物呈更细分散点状	呈小颗粒状分布,数量更少	呈小块粒状分布于晶界,数量稍少	呈条\小块半网状分布数量稍少	呈条块状半网状分布,数量稍少
950	B化物呈弥散细点状	呈细小点状分散分布	呈细小点状和断续网状分布	呈细小点状\断续网状分布	呈细小点状和断续网状分布
1000	同上	同上	同上	同上	同上
1050	同上	同上	同上	同上	呈细小点\断续半网状分布
1100	同上	同上	同上	呈细小点状断续半网状分布	同上

随淬火温度提高,硼化物逐渐固溶于奥氏体,由粗变细,由大变小,由密集堆集状变为分散分布。但当淬火温度超过1000℃时,晶粒明显粗化。在相同奥氏体化条件下,随着钢中B含量的增加,B相变粗且较难固溶,为此,应将B在钢中的含量限制在0.001%~0.002%为宜。

金相观察发现,钢中硼超过一定量后,会形成大量粗大 $Fe_{23}(B,C)_6$ 沉淀,降低钢的淬透性。硼对40MnB钢淬透性的影响不是单调增加的,而存在一个最佳硼含量。试验数据表明<sup>[3]</sup>,硼含量在 $(10\sim20)\times10^{-6}$ 范围的40MnB钢,经850℃加热可使绝大部分 $Fe_{23}(B,C)_6$ 溶解,将这个范围硼含量的40MnB钢按正常温度淬火,可以达到消除 $Fe_{23}(B,C)_6$ 的目的,但含硼量高于 $20\times10^{-6}$ ,特别是硼含量超过 $30\times10^{-6}$ 时,在850℃奥氏体化,仍存在大量的 $Fe_{23}(B,C)_6$ 。固溶硼量减少,降低了硼对淬透性的有利作用。因此,应将40MnB的硼含量控制在 $(10\sim30)\times10^{-6}$ ,尤以 $(10\sim20)\times10^{-6}$ 最为理想。

在生产实际中利用控制酸溶硼来控制淬透性是一种可行的方法。首钢特钢实践表明<sup>[4]</sup>,满足 $J_9$ 值在42~54 HRC范围内, $B_{\text{酸}}$ 含量可确定在0.0005%~0.0025%之间。在0.001%左右为最佳,如 $B_{\text{酸}}$ 超过0.001%,淬透性略有增加的趋势,而当 $B_{\text{酸}}>0.002\%$ 时,淬透性有下降的趋势。

陕西钢厂专家<sup>[5]</sup>认为:40MnB钢,C为0.38%~0.42%,Mn为0.95%~1.30%时最佳。C含量为0.42%,必须采用880℃正火。当Mn大于1.3%时, $J_{15}$  HRC超标。

攀钢转炉冶炼控制硼含量在0.001%~0.002%之

间,从而达到了稳定控制淬透性的目的<sup>[6]</sup>。

40MnB钢中硼含量对低温冲击值也有显著的影响。研究表明<sup>[7]</sup>,对一定含硼量的40MnB钢试验钢经一定腐蚀剂腐蚀在金相显微镜下观察,均发现有晶界析出物存在,随着钢中硼量增加,析出物增多。不加硼的锰钢无这种现象。经电子显微镜放大7000倍观察,证实40MnB钢的晶界析出物为硼化物。在正常淬火温度下,析出硼化物量随硼含量增加而增加,并导致Ak值下降。为保证Ak值应控制 $B<0.003\%$ ,通过930℃预正火及调质处理可以减轻或消除已析出的硼化物,改善冲击韧性。

## 2.2 钛

钛在硼钢中并不作为合金元素考虑,主要用于固定氮,以保证硼的淬透效果得以发挥。为了控制 $B_{\text{酸}}$ ,通常加入与氧有较强亲和力的元素,如Al、Ti等。有关文献认为控制钢中 $Al_{\text{酸}}$ 为0.06%~0.08%能有效地控制 $B_{\text{酸}}$ ,其易引起水口结瘤而不具备可操作性,所以加钛固氮较可行。Al低,Ti不能充分与氮结合,不能起到保护 $B_{\text{酸}}$ 的作用。

首钢特钢对1986年生产的97炉40MnB钢中钛含量进行了统计,以0.03%~0.05%为最佳,淬透性合格率大于90%以上<sup>[4]</sup>。

## 2.3 碳

中低碳钢中,随碳量升高钢的CCT曲线右移,增大钢的淬透性。但和其它合金元素,如锰、铬、硼等元素相比,效果很小。碳主要决定着钢的淬硬性。就硼钢而言,碳含量的上升会减弱硼的淬透性效果。具体到40MnB钢,由于碳的上下限波动很小,对淬透性几乎

无影响。

## 2.4 锰

研究表明<sup>[3]</sup>, 锰量增加, 淬透性提高, 超过 9 mm 后硼的作用削弱, 锰成为影响淬透性的主要因素。选用锰含量分别为 0.9%、1.2% 和 1.39% 的 40MnB 钢作淬透性试验, 在 9 mm 处, Mn 含量为 1.39% 的 40MnB 钢硬度 54HRC, 超出  $J_{0.5}42\sim52\text{HRC}$  的范围, 而 0.95% 和 1.2%Mn 的 40MnB 钢在 9 mm 处的硬度分别为 49 和 52HRC, 处于要求范围内。在 15 mm 处, 1.39%Mn 的 40MnB 钢硬度 48HRC, 高于  $J_{0.5}45\text{HRC}$  的要求。

控制 40MnB 钢中含 1.10%~1.20% Mn 以保证淬透性要求是在钢中硼含量最佳的条件下得出的经验结论。钢中固溶硼低于  $5\times10^{-6}$ , 会造成 40MnB 钢在 9 mm 处硬度低于 42HRC, 引起大批量 40MnB 钢淬透性

不合格<sup>[3]</sup>。

## 2.5 残余元素

BOF-LF-CC 工艺生产汽车用优质钢, 一般采用全铁水炼钢, 钢中残余元素含量很低, 对 40MnB 钢性能的影响可忽略不计。

## 3 试制实践

### 3.1 40MnB 钢内控成分设计

BOF-LF-CC 工艺生产 40MnB 钢在国内属首创。钢的成分、结构和组织是决定钢性能的三个关键因素。综合考虑钢中元素对钢性能的影响, 借鉴国内电炉(转炉)-模铸工艺生产该钢的成功经验, 并结合转炉全铁水炼钢残余元素低的特点, 设计 40MnB 钢内控成分。见表 3。

表 3 首钢 40MnB 钢内控成分及标准要求

标准	成分						%
	C	Si	Mn	P	S	BT	
GB5216-85	0.37~0.44	0.17~0.37	0.95~1.40	$\leq 0.035$	$\leq 0.035$	0.0005~0.0035	
内控目标	0.38~0.42	0.20~0.30	1.10~1.30	$\leq 0.020$	$\leq 0.015$	0.0010~0.0030	

### 3.2 40MnB 钢试制流程及关键工艺设计

40MnB 试制工艺流程: 80 t LD 转炉炼钢 → LF 钢水精炼 → 矩形坯铸机全保护浇注 → 钢坯加热 → 650 半连轧 →  $\phi 110$  mm 圆钢 → 轧材空冷 → 检验 → 入库

转炉采用全铁水炼钢, 强化终点控制。试验钢由 80 t 顶吹氧气转炉冶炼。转炉采用全铁水炼钢, 可有效降低和稳定钢中残余元素 Cr、Ni、Cu 及氮和氢气体含量控制; 采用低拉增碳和双渣操作, 有效提高脱磷率<sup>[8]</sup>; 挡渣锥挡渣出钢, 严格控制转炉下渣量小于 60 mm; 借鉴中国专利<sup>[9]</sup>设计出专用复合脱氧剂预脱氧, 控制精炼到站氧活度小于  $20\times10^{-6}$ , 利于 LF 精炼快速造白渣; 出钢前加 200 kg/炉 钙系改质渣入钢包, 确保精炼到站渣中  $(\text{FeO}+\text{MnO})<3\%$ 。

LF 精炼采用加钛保硼工艺。B 在钢中的化学性质极活泼, 与钢中氮、氧的亲合力很大。要使钢中 B 既保持一定数量, 又尽可能的均匀分布, 国内外研究者作了大量试验对钢中 B 进行研究, 认为关键是 B 的加入方法。试制中借鉴电炉(转炉)-模铸工艺冶炼的成功经验, 采用在还原后的钢水中, 加铝终脱氧、加钛固定氮、再加铝深脱氧、精炼炉中加入 B 铁合金化工艺。

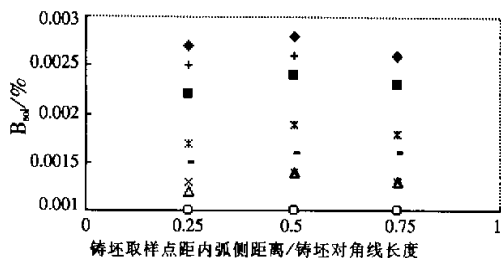
连铸采用低过热度浇钢, 矩形铸坯选择避风垛位堆垛缓冷。全自动矩形坯连铸机采用碱性中间包, 大包采用氩封长水口、中包采用浸入式水口全保护浇

注, 选用低碳碱性覆盖剂, 防止钢水二次氧化, 最大程度地降低钢中全氧含量。40MnB 钢连铸液相线温度为 1 496 ℃, 实际中包过热度控制范围 25 ℃~30 ℃; 铸坯选择避风垛位堆垛缓冷; 结晶器电磁搅拌投入率 100%; 二冷曲线、拉速及电磁搅拌参数控制等执行首钢有关优质矩形坯连铸技术规程。

160 mm×200 mm 矩形钢坯入加热炉加热、均温保温; 开轧温度: 1 100 ℃~1 200 ℃, 终轧温度 >850 ℃; 冷却方式: 空冷。

### 3.3 试制结果及分析

采用上述关键工艺试制 8 炉计 700 t, 160×200 mm 40MnB 矩形坯, 经 650 轧机半连轧制  $\phi 110$  mm 圆钢。BOF-LF-CC 工艺生产 40MnB 钢的关键在于 LF 精炼加铝、钛保硼工艺和矩形坯连铸投入电磁搅拌, 前者可实现钢中 B 的精确控制, 后者在于减轻铸坯凝固过程产生的成分偏析, 从而确保轧材获得优良的使用性能。试制实践表明, 钢中  $\text{Al}_{\text{总}}$  为 0.015%~0.035%、Ti 为 0.03%~0.05% 时, B 的收得率平均为 60%, 钢的熔炼成分  $B_{\text{总}}$  为 0.001%~0.003%。为检验钢中 B 的偏析情况, 连铸每炉浇钢中期在铸机第 4 流取铸坯样, 在矩形坯样对角线(距内弧侧)1/4、1/2 和 3/4 处利用 8 mm 钻头取样化学检验钢中 B, 结果见图 1。

图1 40MnB钢试制铸坯 $B_{sol}$ 变化情况

连铸坯低倍检验表明,铸坯表面无结疤、凹坑和气泡等缺陷,铸坯无明显成分偏析。铸坯中心疏松和缩孔皆小于2级。因采取堆垛缓冷措施,铸坯检验无高锰钢易出现的氢致白点和热应力裂纹等缺陷。

轧材的性能检验、气体含量结果见表4。轧材屈服、抗拉和冲击功有较大的余量,平均全氧 $24 \times 10^{-6}$ ,钢质纯净度较高。

表4 40MnB钢力学性能检验和 $O_2N$ 气体含量

检验项目	$\sigma_s$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta_s$ /%	$\psi$ /%	$A_k$ /J	[O] $\times 10^{-6}$	[N] $\times 10^{-6}$
GB/T3077	$\geq 785$	$\geq 980$	$\geq 10$	$\geq 45$	$\geq 47$	-	-
Min.	828	1003	16	52	82	17	55
Max.	943	1075	19	56	97	28	80
Aver.	902	1050	18	54	92	24	70

图2和图3示出了不同 $B_{sol}$ 含量对40MnB钢力学性能的影响。

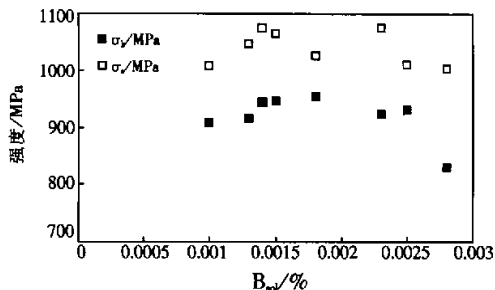
图2 钢中 $B_{sol}$ 与 $\sigma_s$ 和 $\sigma_b$ 的关系

图2和图3表明,随着钢中B量增加,大于0.002%则屈服和抗张及塑性下降。原因是当钢中 $B > 0.002\%$ 时, $B-N$ 、 $B-O$ 、 $B-Fe$ 等B相化合物数量增加,由前述易形成粗大粒状、甚至呈网状分布在晶界,成为脆性夹杂物,从而降低了钢的塑性韧性。冶炼加B的目的是提高钢的淬透性和降低变形抗力,再次证明有微量B(0.001%~0.002%)即可达到此目的。

图4示出了本次试制淬透性检验情况(正火温度 $880^\circ\text{C}$ ~ $900^\circ\text{C}$ ,端淬温度 $850^\circ\text{C}$ )。淬透性检验完全符

合国家标准要求, $J_0$ 和 $J_{15}$ 处带宽分别为6HRC和9HRC,基本实现窄带控制。

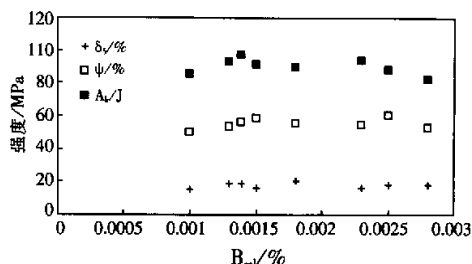
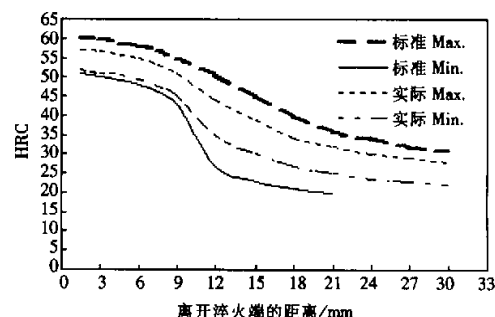
图3 钢中 $B_{sol}$ 与 $\delta_s$ 、 $\psi$ 和 $A_k$ 的关系

图4 40MnB钢淬透性曲线

#### 4 结论

试制实践表明,采用BOF-LF-CC工艺可以成功生产汽车用优质钢40MnB。转炉冶炼内控成分、LF精炼加钛保硼工艺及连铸保护浇注工艺设计合理顺行,铸坯B无明显成分偏析,轧材性能检验完全符合国家标准GB/T3077-1999的要求,屈服、抗拉和冲击韧性余量较大并基本实现淬透性窄带控制,实现了低成本、大批量生产汽车用优质钢40MnB。为稳定硼铁收得率以继续提高B的控制精度(0.001%~0.002%),计划将开展LF精炼喂硼铁合金包芯线的工艺试验。

(收稿 2003-11-5 责编 苗龙军)

#### 参考文献

- [1] 章守华.钢铁材料学.北京:冶金工业出版社,1999.80~95
- [2] 王荣滨.高强度螺栓选材与热处理工艺研究.热处理,2001(1):23~26.
- [3] 朱应波.40MnB钢淬透性的控制.本钢技术,1991(2):48~52.
- [4] 王顺和等.微量钛对稳定40MnB钢淬透性的有效作用.特殊钢,1990(2):56~57.
- [5] 彭平等.改善40MnBH淬透性的工艺研究.宝钢技术,1994(5):

## 天铁5<sup>#</sup>高炉强化冶炼实践

刘学清 (天津天铁冶金集团有限公司炼铁厂, 056404)

**【摘要】** 天铁集团对5<sup>#</sup>高炉进行了大修改造,高炉大修改造后,具备了优化操作的条件,高炉利用系数已由大修前平均2.5 t/m<sup>3</sup>·d达到3.20 t/m<sup>3</sup>·d的水平,煤比达到了150 kg/t·Fe以上,实现了强化冶炼。

**关键词** 高炉 精料 风温 透气性 强化冶炼

### 1 前言

天津铁厂5<sup>#</sup>高炉于2002年4月10日停炉大修,2002年6月9日送风投产,大修后炉容为380 m<sup>3</sup>,风口12个。采用的新技术、新设备如下:①采用可调水冷炉底,炉底炉缸为烧成微孔炭块和复合棕刚玉砌体;②风渣口采用组合砖技术;③炉前采用矮身液压泥炮和气动开口机;④炉喉钢砖下安装冷却壁;⑤串罐无钟炉顶;⑥皮带上料;⑦采用干式布袋除尘系统;⑧使用炼钢余氧富氧。设备的更新及新技术的应用,为5<sup>#</sup>高炉实现强化冶炼创造了条件。

### 2 主要强化措施

#### 2.1 精料

5<sup>#</sup>高炉炉料结构是高碱度烧结矿配加酸性烧结矿和海南矿,入炉品位较大修前提高了1%~2%,由于烧结无综合料场,致使原料品位、碱度波动很大。近两年来,烧结加强管理,原料成分波动有了一定的改善。利用大修机会对沟下设备进行彻底改造,用料槽代替原来的露天料场,解决了天气变化给炉况带来的影响;沟下设备采用筛分效果较好的悬臂筛网振动筛,减少了粉末入炉,同时根据炉料质量变化调整料流,做到彻底筛分,使入炉粉末由原来的15%以下降为4.2%,高炉透气性有了较大改善。

#### 2.2 提高操作水平发挥设备潜能

##### 2.2.1 用尽风温

用尽风温,极大发挥热风炉能力是节能降耗,活跃炉缸,促进顺行的有效手段。大修时,将热风炉的蓄

热面积增大,同时与鞍山科技大学合作对热风炉上下配气进行技术改造,将风温能力提高50℃,操作上对热风工加强管理,保证煤气的充分燃烧,考核风温1100℃以上,要求工长按要求保持全风温作业,不得长时间开大闸操作,使风温较以前提高了60℃,保证了炉缸具有足够的物理热,也为喷煤量的提高创造了有力条件。

##### 2.2.2 稳定煤量

正常生产时,要求工长用煤量调剂炉温;当原燃料发生大的变化时,允许工长调整焦炭负荷,使煤量调剂在允许范围内波动。当喷吹量超过允许范围时,工长要及时调整焦炭负荷,同时要求喷吹工掌握好喷煤量变化情况,达到变化量不大于0.5 t/h的要求。

##### 2.2.3 采用小高压操作和合理的布料制度稳定煤气流

随着冶炼强度的提高,控制稳定、合理的煤气流已成为高炉顺行的保证。为此,2002年下半年对炉顶600放散阀进行改造,提高了设备适应高顶压的能力;上部调剂坚持开放中心的原则,同时避免中心过吹,矿批由原来的11 t提高到13.3 t,炉顶压力由75 kPa提高到90 kPa,采用45°布料制度,从而煤气利用率得到了提高,降低了燃料的消耗。

##### 2.2.4 充分利用炼钢余氧

高炉富氧不仅可以增产,而且是促进煤粉燃烧的重要手段。由于氧气波动大,高炉富氧时断时续,我们要求工长、喷煤工勤看风口,保证各风口的均匀喷吹,发现堵枪、枪位不正等异常情况要及时处理,使炉缸圆

26~29.

[6] 唐历等. 攀钢汽车用优质钢的开发. 钢铁钒钛. 1999(2):46~51.

[7] 张扬等. 碳含量及其分布对40MnB钢冲击韧性的影响. 天津理工大学学报. 2000(1):23~27.

[8] 李涛,许晓东等. 转炉炼钢脱磷工艺研究. 首钢科技. 2001(4):13~16.

[9] 贾连第等. 转炉炼钢用脱氧剂. 中国专利:89105941.5.1995.2

#### 作者简介

于广石,1999年毕业于西安建筑科技大学,工程师。现在首钢技术研究院钢研所从事钢铁研究工作,曾先后在国内杂志上发表过多篇论文。