

小方坯连铸 20CrMnTiH 齿轮钢宏观偏析控制

陈 亮

(攀钢集团研究院有限公司, 四川 成都 611731)

摘 要: 针对小方坯连铸齿轮钢偏析严重的问题, 采用化学元素分析以及原位分析仪分析了断面碳元素的分布情况, 通过低过热度、拉速、电磁搅拌以及二冷水试验, 确定了最佳连铸工艺参数。工业应用试验表明, 过热度采用 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 拉速采用 1.30 m/min , 结晶器电磁搅拌和凝固末端电磁搅拌的电流强度分别采用 250 A 和 50 A , 二冷水比水量采用 0.41 L/kg 有利于偏析控制, 铸坯断面碳偏析指数控制在 $0.94 \sim 1.05$, 棒材断面硬度(HV)控制在 ± 10 以内。

关键词: 连铸; 小方坯; 宏观偏析; 过热度; 拉速; 电磁搅拌; 二冷水

中图分类号: TF777 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7638(2019)04-0110-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2019.04.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Study on Macro Segregation Control of Continuous Casting Billet in Gear Steel 20CrMnTiH

Chen Liang

(Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Chengdu 611731, Sichuan, China)

Abstract: In order to control the macro-segregation of gear steel, the chemical analysis and original position analyzer were applied on carbon distribution of billets in cross section. The superheat, casting speed, electro-magnetic stirring and flowrate of secondary cooling testes had been performed and the optimal casting parameters were determined. The test results show that superheat range should be controlled at $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and casting speed should be 1.30 m/min . The current intensity of M-EMS and F-EMS should be 250 A and 50 A respectively. The flowrate of secondary cooling should be 0.41 L/kg . These parameters were benefit to the macro segregation control. The industrial results indicated that carbon segregation indexes of billets in cross section were 0.94 to 1.05 and hardness variation of bar at cross section were at $\pm 10\text{ HV}$ range.

Key words: continuous casting, billet, macrosegregation, superheat, casting speed, EMS, flowrate of secondary cooling

0 引言

齿轮钢作为重要的机械传动材料, 对淬透性要求非常高, 一般要求同一断面上的淬透性带宽(HRC)低于5。改善齿轮钢淬透性带宽的研究较多, 莱钢通过优化电炉参数, 提高了成分均匀性^[1], 兴澄特钢通过合理地改变拉速、提高搅拌强度, 并与冷却强度、轻压下位置和压下量参数匹配, 铸坯与轧材偏析可以得到明显改善^[2], 湘潭钢铁通过提高比

水量, 降低电磁搅拌强度, 缩小齿轮钢大方坯等轴晶区, 改善了轧材偏析^[3]。从文献看, 各厂对宏观偏析的参数调整是不同的, 需要结合自身的工艺及装备条件调整连铸工艺参数。

国内某钢厂生产的齿轮钢连铸坯, 经加工后的齿轮钢棒材在同一截面淬透性带宽(HRC)最高达到9, 而棒材上同一截面各元素含量的高低主要在于连铸坯的宏观偏析控制。经过分析发现, 该厂小方坯连铸齿轮钢同一截面的碳偏析指数为 $0.88 \sim 1.12$, 为此

需要控制齿轮钢同一截面元素的均匀性。笔者针对小方坯连铸齿轮钢的宏观偏析控制进行了研究,采用化学成分分析以及原位分析仪分析了不同工艺条件下的连铸坯偏析情况。通过过热度、拉速、电磁搅拌以及二冷制度的优化对比试验,确定了小方坯连铸齿轮钢的最佳连铸工艺参数,改善了铸坯宏观偏析。

1 工艺条件与研究方法

小方坯连铸机的设备及工艺参数见表 1。20CrMnTiH 齿轮钢的工艺技术路线: 铁水预处理→120 t BOF 转炉→LF 炉精炼→RH 真空处理→软吹氩→200 mm×200 mm 方坯连铸。钢种成分见表 2。

表 1 连铸机工艺参数
Table 1 Technical parameters of caster

钢包容量/t	中间包容量/t	结晶器长度/mm	结晶器电磁搅拌	铸机基本半径/mm	流数/流	流间距/mm	铸坯规格/mm	拉速/(m·min ⁻¹)	凝固末端电磁搅拌
120	45	750	有	10 000	6	1 300	200×200	0~3.0	有

表 2 齿轮钢主要化学成分
Table 2 Main chemical composition of gear steel 20CrMnTiH

牌号	C	Si	Mn	Cr	Ti	P	S
20CrMnTiH	0.18~0.20	0.20~0.30	0.80~0.90	1.05~1.10	0.04~0.06	≤0.015	≤0.030

采用不同的连铸工艺参数进行对比试验,初始参数见表 3,通过单体试验改变表 3 中其中一个参数的范围,得到不同的连铸坯,分析各参数对宏观偏析的

影响。采用碳硫分析仪分析连铸坯断面典型位置的成分,采用原位分析仪分析连铸坯 1/4 断面的碳元素的分布情况,从而得到最佳连铸工艺参数。

表 3 试验初始工艺参数
Table 3 Initial casting parameters of tests

过热度/℃	拉速/(m·min ⁻¹)	结晶器电缆电流强度/A	凝固末端电缆参数/A	二冷比水量/(L·kg ⁻¹)
25	1.30	300	100	0.55

2 试验结果及分析

2.1 过热度对偏析的影响

过热度对偏析的影响研究较多,众多研究认为需要采用低过热度浇注^[4-6],因为过热度越低,等轴晶比例越高,有利于偏析控制,但是等轴晶生长能够抽吸到中心位置附近的高溶质液相量更大,造成中心位置的偏析程度及波动程度可能更大^[7]。过热度低时,能提供大量的等轴晶核,生成等轴晶网络,阻止凝固前期柱状晶的形成,并生成由细小等轴晶粒组成的大面积等轴晶区^[8]。齿轮钢的质量控制主要集中在边缘部位齿的加工与热处理,对于中心部位偏析稍高是可以接受的。在表 3 初始条件下,仅考察过热度对偏析的影响,试验结果见表 4。钢水过热度越高,铸坯偏析越严重;过热度越低,偏析控制越好。由于齿轮钢碳含量 0.20% 左右,按允许偏差 0.01% 考虑,则偏析指数应控制在 1.05 以内,过热度控制应不超过 25 ℃。

但该钢连铸周期约 50 min,过热度太低易造成钢包内或结晶器内钢水凝固,从而断浇,因此,过热度最理想控制为 20 ℃±5 ℃。

表 4 过热度与碳偏析指数关系
Table 4 Relationship between superheat and carbon segregation indexes

过热度/℃	连铸坯碳偏析指数
25	0.94~1.05
35	0.93~1.14
46	0.92~1.18

2.2 拉速对偏析的影响

拉速的增加使铸坯在结晶器和二冷各区的时间减少,铸坯被结晶器和二冷水带走的热量也相应减少,因此在铸机同一位置处铸坯的温度升高。这导致同一位置处铸坯局部凝固时间也相应增加,因此二次枝晶臂间距也会增加,溶质元素更易富集在枝晶间,从而造成偏析严重。当拉速过低时,铸坯激冷层增

厚,冷却变强,二冷区带走的热量增加,钢水温度梯度变小,但对于铸坯冷却来说,二冷区带走的热量是否满足低拉速条件下铸坯所增加的热量,需要通过试验验证,如果低拉速条件下二冷带走的热量不足,那会比高拉速条件下增加铸坯内部过热度,导致柱状晶发达,偏析严重。因此,在其他工艺条件相同的同一炉钢不同流次上开展了拉速对比试验,试验结果见表 5。拉速控制为 1.30 m/min 时,铸坯碳偏析指数控制为 0.92~1.08,其他情况下,碳偏析指数控制较差。

表 5 拉速与碳偏析指数的关系
Table 5 Relationship between casting speed and carbon segregation indexes

流号/流	过热度/℃	拉速/(m·min ⁻¹)	连铸坯碳偏析指数
1	30	1.20	0.90~1.07
2	30	1.30	0.92~1.08
3	30	1.40	0.88~1.12

2.3 电磁搅拌参数优化与应用

2.3.1 结晶器电磁搅拌

根据以往的研究,结晶器电磁搅拌电流强度由 0 A 提升至 650 A 时,铸坯中心等轴晶率由 18.7% 提高至 48.65%^[4]。随着结晶器电磁搅拌强度的增加,铸坯等轴晶率是不断提高的。为进一步考察结晶器电磁搅拌对铸坯偏析的影响,考察了不同电缆参数对偏析的影响,试验结果见表 6,结晶器电磁搅拌电流强度从 150 A 逐渐增加到 350 A 时,铸坯碳偏析指数从低到高,再降低。当结晶器电磁搅拌电流强度达到 300 A 后,大量柱状晶被搅动到铸坯坯壳下方聚集,形成了白亮带,而该白亮带则是负偏析。因此,结晶器电磁搅拌电流强度控制为 250 A 较为合适。

表 6 结晶器电缆参数对铸坯碳偏析指数影响
Table 6 Relationship between M-EMS and carbon segregation indexes

结晶器电磁搅拌参数/A	连铸坯碳偏析指数
150	0.88~1.13
200	0.89~1.08
250	0.96~1.03
300	0.89~1.13
350	0.91~1.07

2.3.2 凝固末端电磁搅拌

凝固末端电磁搅拌器具有长且搅拌力大的特点,可以有效改善铸坯的中心偏析问题。通过在凝固末端糊状区域的强力搅拌作用,使偏析元素分布变得更均匀。不但可以激发更多的结晶核心,还可以扩大等

轴晶区,使晶粒得到细化。此外,还可以使两相区发生向上的强迫对流而有效防止了等轴晶向下的聚合滑移,由此可形成没有形偏析的中心凝固组织。FEMS 的这种搅拌效果是结晶器电磁搅拌或二冷区电磁搅拌难以达到的^[14]。在确定结晶器电磁搅拌的基础上,开展末端电磁搅拌试验。试验结果见表 7,从表 7 可知,凝固末端电缆电流强度采用 50 A 时,碳偏析指数控制为 0.94~1.09,有利于偏析控制。

表 7 末端电磁搅拌方案
Table 7 Relationship between F-EMS and carbon segregation indexes

方案	末端电缆电流强度/A	连铸坯碳偏析指数
1	不投	0.95~1.14
2	50	0.94~1.09
3	100	0.90~1.17

对试验铸坯采用原位分析仪进行了分析,铸坯取样位置和铸坯原位分析结果分别见图 1、2。

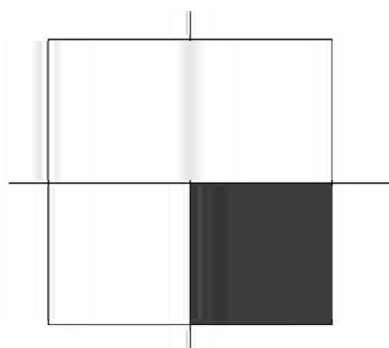


图 1 铸坯取样位置(黑色部分)
Fig.1 Sampling diagram of billets

从图 2 可以看出,铸坯断面中,不投入末搅,黑色的碳聚集点较多;凝固末端电缆电流强度采用 50 A 时,整个分布较分散,且碳往中心部位聚集较多;而凝固末端电缆电流强度采用 100 A 时,1/2 半径处偏析较大。综合看,凝固末端电缆电流强度采用 50 A 对断面偏析控制效果最好。

2.4 二冷比水量对偏析的影响

二冷强度太弱,铸坯表面温度过高,铸坯液芯加长,促进中心偏析的形成和扩展。二冷太强,容易造成中心疏松严重。各厂断面不同,采用的二冷水比水量相差较大,兴澄特钢 300 mm×340 mm 断面采用 0.35 L/kg^[4],湘潭钢铁 300 mm×430 mm 断面采用 0.27 L/kg^[4]。为探索合适的二冷水比水量,开展了二冷水对比试验,采用比水量 0.41 L/kg 和比水量 0.55 L/kg 进

行对比。试验结果表明,二冷水比水量为 0.41 L/kg 时,铸坯断面碳偏析指数为 0.94~1.06,二冷水比水量为 0.55 L/kg 时,铸坯断面碳偏析指数为 0.87~1.09。因此,二冷水比水量为 0.41 L/kg 有利于齿轮钢偏析控制。

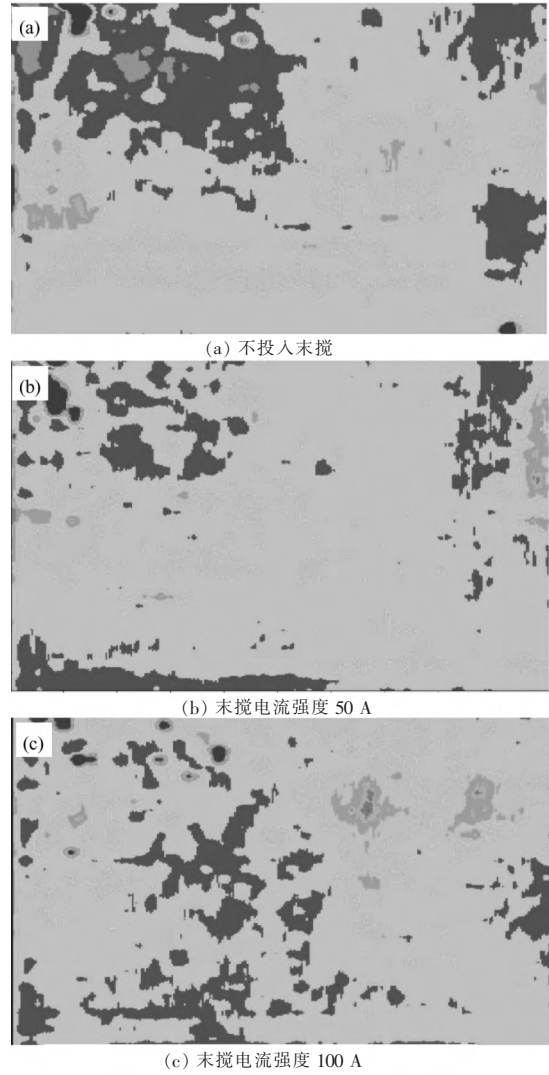


图 2 不同凝固末端电磁搅拌参数下铸坯碳分布情况
Fig.2 Carbon distribution of billets with different F-EMS

3 综合应用试验效果

通过单体试验,确定了合适的工艺制度,见表 8,采用表 8 工艺参数进行扩大试验,累计生产齿轮钢 1.58 万 t,铸坯质量良好,轧材质量稳定。

表 8 工艺参数优化前后
Table 8 Casting parameters before and after optimization

项目	过热度/ ℃	拉速/ (m·min ⁻¹)	结晶器电缆 电流强度/A	凝固末端电 流强度/A	二冷水水量/ (L·kg ⁻¹)
优化前	≤40	1.20	350	100	0.55
优化后	20±5	1.30	250	50	0.41

3.1 铸坯偏析控制情况

大生产中按上述要求执行后的连铸低倍检验结果见表 9 及图 3,中心疏松、中心偏析、中心缩孔均 ≤1.0 级,等轴晶率为 31.5%~39.3%,未发现其它缺陷。铸坯横断面上各成分分布均匀,偏析小,其中 C 的偏析指数为 0.94~1.05。

表 9 连铸坯低倍检验结果 (n=88 炉)
Table 9 Macroscopic of billets (n=88 heats)

低倍组织/级					等轴晶
中心疏松	中心偏析	中心缩孔	中心裂纹	其它缺陷	率/%
0.5~1.0	0~1.0	0~1.0	0	无	31.5~39.3

注:等轴晶检验的炉数为 18 炉。

铸坯 C 偏析情况见图 4,由图 4 可见,连铸坯碳含量分布均匀。

3.2 齿轮钢棒材断面均匀性

2017 年 4 月生产的齿轮钢任意取 4 炉 Ø55 mm 棒材样,分析了淬透性控制情况,取样示意图 5,硬度值分布较好,断面硬度(HV)控制在 ±10 以内,中心点硬度(HV)比断面平均值高约 20。由于凝固过程中心碳元素正偏析,使中心处硬度值较高,但不影响棒材使用性能,因为齿轮中心点并不机械加工。

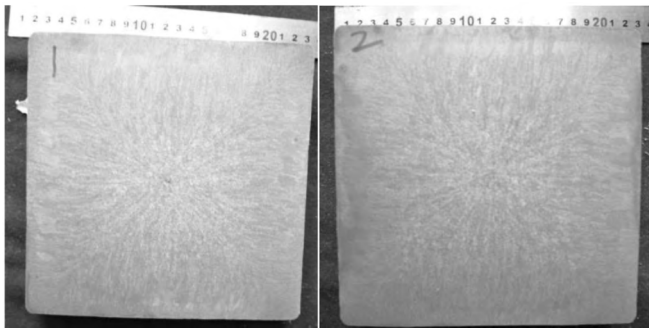


图 3 20CrMnTiH 连铸坯低倍照片
Fig.3 Macroscopic of gear steel billets

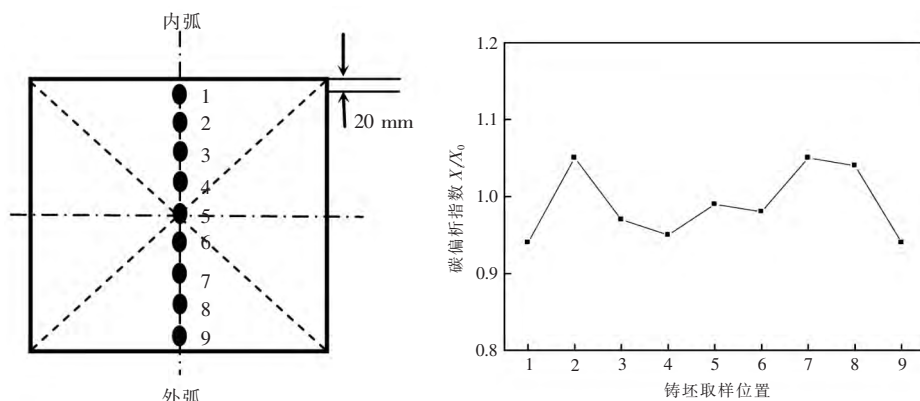


图 4 20CrMnTiH 铸坯断面碳含量取样示意图及偏析指数情况

Fig.4 Sampling diagram and carbon segregation indexes of billets

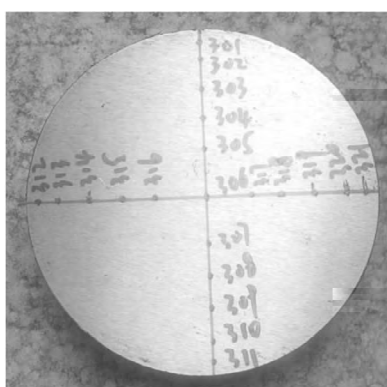


图 5 淬透性检验示意

Fig.5 Sampling diagram of bar hardness

4 结论

1) 低过热度 and 低二冷水比水量有利于偏析的改善, 齿轮钢过热度控制在 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 二冷水比水

量 0.41 L/kg 适合现工艺条件。

2) 拉速控制必须配合合适的二冷制度, 二冷制度一定的情况下, 拉速高或者拉速低都不利于偏析控制, 该工艺条件下拉速控制在 1.30 m/min 有利于偏析控制, 碳偏析指数控制在 $0.92 \sim 1.08$ 。

3) 结晶器电磁搅拌强度过高或者过低都不利于偏析控制, 搅拌强度过高容易产生白亮带负偏析, 搅拌强度过低偏析改善不明显, 因此需要结合实际生产条件选取合适的结晶器电搅强度; 凝固末端电磁搅拌有利于偏析控制, 铸坯原位分析表明, 采用合适的电搅强度可大幅降低元素聚集, 降低偏析。

4) 工业应用试验表明, 大生产中, 中心疏松、中心偏析、中心缩孔均 ≤ 1.0 级, 等轴晶率为 $31.5\% \sim 39.3\%$, 未发现其它缺陷。铸坯横断面上各成分分布均匀, 偏析小, 其中 C 的偏析指数为 $0.94 \sim 1.05$; 棒材硬度值分布较好, 断面硬度 (HV) 控制在 ± 10 以内。

参考文献

- [1] Ji Chunsheng, Wang Zhongcheng, Liu Jianhui, et al. Study of narrow hardenability bands of 20CrMnTiH [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007(S1): 85-88.
(季春生, 王忠诚, 刘剑辉. 改善 20CrMnTiH 淬透性的研究 [J]. 北京科技大学学报, 2007(S1): 85-88.)
- [2] Xu Xiaohong. Quality assurance methods of gear steel in XC special steel [J] // 2014 the First Steelmaking-continuous Casting Produce and Technology Conference Proceedings. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2014: 11.
(许晓红. 兴澄特钢齿轮钢质量保障 [J] // 2014 年全国炼钢—连铸生产技术会论文集. 北京: 中国金属学会, 2014: 11.)
- [3] Wu Qingming, Xu Weiyang, Yan Huicheng, et al. Carbon macro-segregation control of rolled bar produced from cast bloom of 20CrMnTiH steel [J]. Iron and Steel, 2012, 47(5): 23-28.
(吴清明, 许伟阳, 颜慧成, 等. 20CrMnTiH 齿轮钢大方坯轧制圆钢宏观碳偏析控制 [J]. 钢铁, 2012, 47(5): 23-28.)
- [4] Zhou Deguang, Liu Hansui. Formation mechanism of carbon segregation for bearing steel concasting billet and its influencing factors [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1999(2): 30.
(周德光, 刘汉绥. 轴承钢连铸坯碳偏析的形成机理及影响因素 [J]. 北京科技大学学报, 1999(2): 30.)

- [5] Xu Zhigang, Zhou Li, Wang Xinhua, *et al.* Effects of superheat on the center segregation in continuous casting slab of X65 steel [J]. *Steelmaking*, 2014, 30(4): 36.
(许志刚, 周力, 王新华, 等. 过热度对 X65 钢连铸板坯中心偏析的影响 [J]. *炼钢*, 2014, 30(4): 36.)
- [6] Wang Jinping, Jiang Xudong. Overheat control on hot metal in continuous casting high carbon steel [J]. *WISCO Technology*, 2007, 45(4): 4.
(王金平, 蒋旭冬. 高碳钢连铸钢液过热度的控制 [J]. *武钢技术*, 2007, 45(4): 4.)
- [7] Hu Zhiyong, Chen Xinghua, Tang Ping, *et al.* Effect of superheat on carbon segregation in continuous casting billet of cord steel [J]. *Continuous Casting*, 2017, 42(5): 12–16.
(胡志勇, 陈兴华, 唐萍, 等. 过热度对帘线钢连铸方坯碳偏析的影响 [J]. *连铸*, 2017, 42(5): 12–16.)
- [8] Qian Gang, Ruan Xiaojiao, Cai Xieao. Cause for central segregation of CC bloom from bearing steel and countermeasures [J]. *Iron and Steel*, 2002, 37(5): 16–18.
(钱刚, 阮小江, 蔡燮璠. 连铸轴承钢大方坯中心偏析的成因及对策 [J]. *钢铁*, 2002, 37(5): 16–18.)
- [9] Wang Linjing, Bao Yanping, An Hanghang, *et al.* Effect of M-EMS on quality of 55CrSi spring steel billet [J]. *Continuous Casting*, 2015, 40(5): 62–66.
(王林静, 包燕平, 安航航, 等. 结晶器电磁搅拌对 55CrSi 弹簧钢铸坯质量的影响 [J]. *连铸*, 2015, 40(5): 62–66.)
- [10] Wang Bo, Chen Lie, Zhang Xu, *et al.* Study and application of the F-EMS position for the special steel bloom continuous casting [J]. *Continuous Casting*, 2016, 41(5): 17–20.
(王波, 陈列, 张旭, 等. 特殊钢连铸大方坯末端电磁搅拌位置研究与应用 [J]. *连铸*, 2016, 41(5): 17–20.)

编辑 邓淑惠

(上接第 109 页)

- [4] Chakraborty D, Ranganathan S, Sinha S N. Investigations on the carbothermic reduction of chromite ores [J]. *Metallurgical & Materials Transactions B*, 2005, 36(4): 437–444.
- [5] Guo Yufeng, Sui Yulei, Jiang Tao, *et al.* Research on leaching vanadium from vanadium and titanium-bearing tailings produced in reduction, grinding and separation of vanadium-bearing titaniferous magnetite [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2014, 35(2): 9–14.
(郭宇峰, 隋裕雷, 姜涛, 等. 钒钛磁铁矿还原磨选法含钒钛尾渣提钒研究 [J]. *钢铁钒钛*, 2014, 35(2): 9–14.)
- [6] Moon J, Sahajwalla V. Kinetic model for the uniform conversion of self reducing iron oxide and carbon briquettes [J]. *ISIJ International*, 2003, 43(8): 1136–1142.
- [7] Lun Zhigang, Hu Tu, Lv Xuwei. Direct reduction behavior of multi-layer pellets with carbon-containing in rotary hearth furnace [J]. *Iron and Steel*, 2013, 48(1): 15–19.
(伦志刚, 胡途, 吕学伟. 多层含碳球团转底炉内直接还原行为 [J]. *钢铁*, 2013, 48(1): 15–19.)
- [8] Jiang Tao, Xu Jing, Guan Shanfei, *et al.* Study on coal-based direct reduction of high-chromium vanadium-titanium magnetite [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2015, 36(1): 77–80.
(姜涛, 徐静, 关山飞, 等. 高铬型钒钛磁铁矿煤基直接还原研究 [J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2015, 36(1): 77–80.)
- [9] Halder S, Fruehan R J. Reduction of iron-oxide-carbon composites: part I. Estimation of the rate constants [J]. *Metallurgical & Materials Transactions B*, 2008, 39(6): 784–795.
- [10] Halder S, Fruehan R J. Reduction of iron-oxide-carbon composites: part II. Rates of reduction of composite pellets in a rotary hearth furnace simulator [J]. *Metallurgical & Materials Transactions B*, 2008, 39(6): 796–808.

编辑 杨冬梅