

二冷电磁搅拌工艺优化

王向松 高新军

(安阳钢铁股份有限公司 , 河南 安阳 455004)

摘要: 为解决铸坯中心偏析、疏松以及中间裂纹等缺陷, 引进开发了二冷区电磁搅拌工艺, 通过理论数据计算, 并结合现场冷却工艺参数, 确定了搅拌辊安装位置。后期使用过程, 根据不同钢种特性, 进行多组参数试验, 分析其对铸坯等轴晶率的影响, 确定中碳钢、低碳钢等系列钢种搅拌参数, 达到热连轧、中厚板产线对铸坯内部质量的轧制要求。

关键字: 中心偏析 中间裂纹 二冷电磁搅拌 等轴晶率

Process Optimization of Electromagnetic Stirring In Secondary Cooling Zone

WANG xiang-song , GAO xin-jun

(Anyang Iron & Steel Co. Anyang 455004 , China)

Abstract: In order to eliminate the defects in slab such as center segregation, porosity and intermediate crack, and so on, electromagnetic stirring technology in secondary cooling zone was introduced and developed. The installation position of stirring roll was determined by theoretical data calculation and field cooling process parameters. In the later production stage, according to the characteristics of different steel grades, a series of parameter tests were carried out to analyze the effect of parameters on equiaxed grain ratio of the slab, and the stirring parameters of medium carbon steel and low carbon steel were determined to meet the rolling requirements of hot continuous rolling and plate production line for internal quality of slab.

Keywords: center segregation, intermediate crack, electromagnetic stirring in secondary cooling zone, the ratio of equiaxed grain

前言

安钢第二炼轧厂3#双流板坯连铸机, 厚度230mm, 由于炉机不匹配引起的拉速波动较大, 且扇形段采用固定辊缝, 铸坯中心偏析、疏松较为严重, 供应轧制厚规格板材所需坯料时, 中心缺陷问题更甚。

前期做了大量的工艺优化, 例如, 采取低过热度浇注、二次冷却工艺优化、辊缝收缩优化等措施, 但低倍质量仍无法满足部分品种钢生产要求。经过多方交流、考察, 引进开发二冷电磁搅拌工艺, 通过优化电磁搅拌的各项工艺参数以达到最佳的冶金效果, 以期改善铸坯中心偏析、疏松等缺陷。

1 工艺流程及电磁搅拌设备参数

工艺流程:

王向松 (1984——), 男, 本科, 安阳钢铁股份有限公司第二炼轧厂连铸车间, 工程师, Email :

shelf90@aliyun.com

铁水预处理——150 t转炉冶炼——LF炉——（RH/VD）——双流板坯——1780 mm热连轧/中厚板轧机

电磁搅拌辊主要参数：

表 1 电磁搅拌辊主要参数

类别	参数
型号	DJST-17025SGZ
型 式	辊式行波磁场，2 根对置，每流 2 对 蝴蝶形流场
冷却方式	二冷区搅拌，辊式，克莱姆绕组 扁线绕组水外冷
额定电流	550A×2（每流）
额定电压	400V
频 率	1~16HZ 步长 0.1Hz，1 至 16Hz 连续可调 连续、间歇、正反交替输出三种选择
相 数	2 相（90 度相带）
视在功率	320KVA×2（每流）
有功功率	110KW×2（每流）
对辊中心推力	110mmFe(相距 230mm 时)

2 电磁搅拌器原理分析

对电磁推力影响最大的是电磁搅拌器的表面磁场（Bo），而 Bo 与电磁搅拌器的线圈匝数（N）和线圈电流（I）的乘积（N·I）成正比的。由于受安装空间的限制，同时也为了降低电磁功率损耗，线圈匝数(N)控制在一定数目，因此，最大限度的提高电流强度（I）为提高电磁推力的最有效途径。通常的原则：平衡考虑设备成本，适当增加电流强度，以期用最小的电磁功率达到最大的电磁推力。

增加频率（f）可增加电磁推力，但另一方面，增加频率会引起磁场衰减系数（1/ks）变大，从而又减小电磁推力，因此电磁推力随频率的变化不是单调的，而是有一个最大值。同时频率的增加，还会引起感应电压的增加，从而引起电磁功率的增加，其变化不是简单的线性关系。要精确定位非常困难，但通过理论分析及实际测试可以确定相近参数，原则是：在同等电磁功率下，尽可能达到最大的电磁推力^[1]。

从力学原理上来讲，电磁搅拌的过程，实质上就是电磁力克服钢水粘性力从而使钢液产生运动的一种过程，不同钢种，其粘性系数相差很大，因此所需电磁推力也是不同的，对碳结构钢而言，主要取决于含 C 量，含 C 量越高所需电磁推力就越大。合金元素的加入改变了凝固组织结构，不同化学成份的钢水其柱状晶发展程度也不一样，一般来讲合金元素的成份越多，其柱状晶就越发达，所需电磁力也越大，这就造成不锈钢所需电磁推力比碳钢要大 1 倍以上。

3 电磁搅拌辊安装位置

根据电磁搅拌原理，二冷区电磁搅拌要达到良好的效果，铸坯经过搅拌段必须有一定的液芯厚度，在电磁推力作用下搅动钢水、打碎枝晶，钢液进行二次结晶，从而获得高的等轴晶率。等轴晶率的提高，增加晶界结合的力度，有利于改善内裂、中心缩孔和疏松及中心偏

析等。

根据相关资料介绍，二冷电磁搅拌位置需要铸坯液芯厚度45%-60%^[2]。根据铸坯固相率配合铸机辊缝收缩较大位置确定最优拉速调控，由凝固原理： $E=Kt^{1/2}=K(H/v)^{1/2}$ ，则有 $v=H/(E/K)^2$

其中 K ——凝固系数；

V ——拉速，m/min；

H ——结晶器弯月面到铸坯一定凝固率的距离，m。

3#机拉速常规拉速 0.85-0.90m/min，铸机凝固系数 K 为 24mm/min^{1/2}，测算不同典型拉速、液芯率下铸坯距离结晶器液面的位置，如表 2 所示。

表 2 不同拉速下特定液芯率对应的距结晶器液面的距离（m）

项目	液芯率 45%	液芯率 50%	液芯率 55%	液芯率 60%
拉速 0.90 m/min	6.250879	5.166016	4.184473	3.30625
拉速 0.95 m/min	6.598150	5.453016	4.416943	3.489931

根据表2计算，结合3#铸机扇形段装配、维修情况，将电磁搅拌辊安装在1段进出口位置，与结晶器液面的距离分别为4.347823和5.983823m。利用凝固速率进行反推计算，得出典型拉速下一段进出口出铸坯液芯率如表3所示，表明电磁搅拌辊安装在一段满足其工作要求^[3]。

表 3 不同拉速下一段进出口处铸坯液芯率（%）

项目	拉速 0.90m/min	拉速 0.95 m/min
一段入口	54.13	55.35
一段出口	46.19	47.62

4电磁搅拌工艺优化

4.1 汽车大梁钢电磁搅拌参数优化

3#机生产 AG700L，成分如表 7 所示，液相线温度 1521℃，结晶器宽面水量 3600L/min；窄面水量：500L/min，断面 1510mm，二冷水表采用 7#水表，拉速 1.0m/min，比水量 0.38L/kg，浇注过程电磁搅拌参数如下设置：

表 4 汽车大梁钢 AG700L 成分控制

钢种	化学成分 (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Alt	Ti	N
AG700L	≤0.10	≤0.30	1.45-1.75	≤0.018	≤0.005	0.025-0.055	0.080-0.12	≤0.007

表 5 AG700L 钢电搅试验参数

炉序	电搅辊	电流大小（A）	频率大小（HZ）	搅拌方式	取样
1-3	一段首	390	6	连续	第二炉取低倍样
	一段末	430	5	连续	

4-6	一段首	410	6	连续	第五炉取低倍样
	一段末	450	5	连续	
7-10	一段首	420	5	连续	第八炉取低倍样
	一段末	450	4.5	连续	

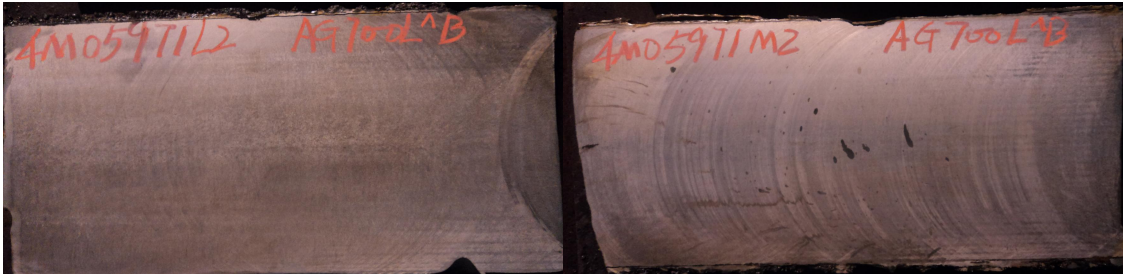


图 1 AG700L 第二炉低倍图片（左 L 流，右 M 流）

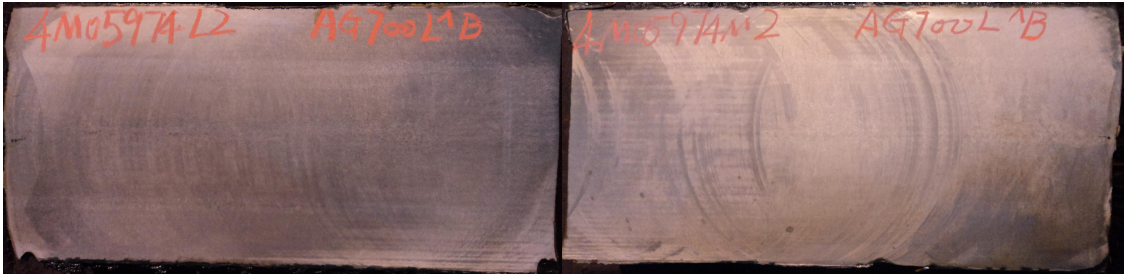


图 2 AG700L 第五炉低倍图片（左 L 流，右 M 流）

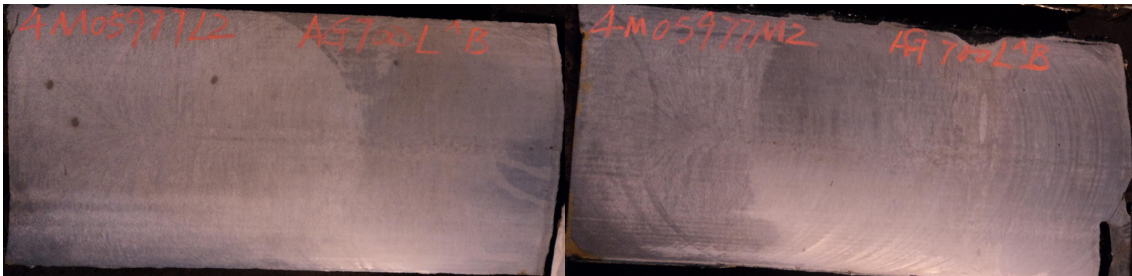


图 3 AG700L 第八炉低倍图片（左 L 流，右 M 流）

表 6 AG700L 低倍评级

炉批号	中心偏析	中心疏松	中间裂纹	三角区裂纹	判定结果
第二炉 L 流	B1	0.5	无	无	1.1
第二炉 M 流	B0.5	1	无	无	1.1
第五炉 L 流	B1	1	无	无	1.1
第五炉 M 流	B1	0.5	无	无	1.1
第八炉 L 流	B0.5	0.5	无	无	1.1
第八炉 M 流	B0.5	0.5	无	无	1.1

试验分析:汽车用高强度钢为低碳高猛、高钛钢，内部质量易于控制。通过本次电搅试验，三组参数下低倍效果均良好，特别是第三组方案，中心偏析、疏松非常良好，达到协议

要求目标值。

4.2 低合金钢 Q345B 电磁搅拌参数优化

3#机生产 Q345B,液相线温度 1512℃,结晶器宽面水量:3600L/min;窄面水量:500L/min,断面 1510mm,二冷水表采用 4#水表,拉速 0.95m/min,比水量 0.84L/kg,浇注过程电磁搅拌参数如下设置(四流第一对电缆辊故障,无法使用):

表 7 低合金钢 Q345B 成分控制

牌号	化学成分%					
	C	Si	Mn	P	S	N
Q345B^C	0.15-0.18	0.12-0.25	1.20-1.35	≤0.030	≤0.025	≤0.0110

表 8 Q345B^C 电磁搅拌参数

炉序	电缆辊	电流大小 (A)	频率大小 (HZ)	搅拌方式	取样
1-3	一段首	430	6	连续	第二炉取低倍样
	一段末	460	5	连续	
4-6	一段首	450	5	连续	第五炉取低倍样
	一段末	480	5	连续	
7-10	一段首	450	5	连续	第八炉取低倍样
	一段末	500	4.5	连续	

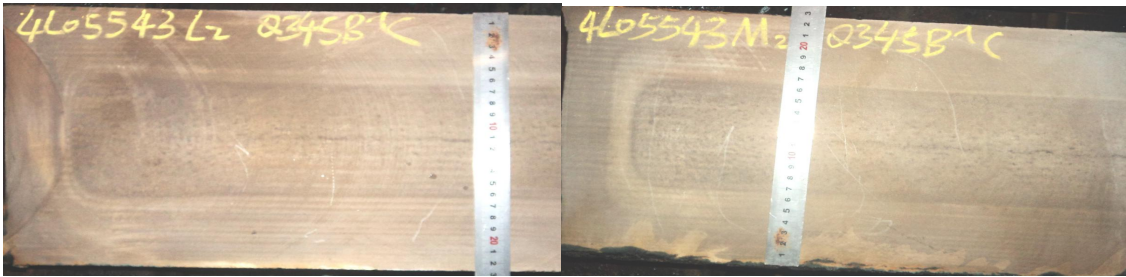


图 4 Q345B 第二炉双流低倍样(左 L 流,右 M 流)

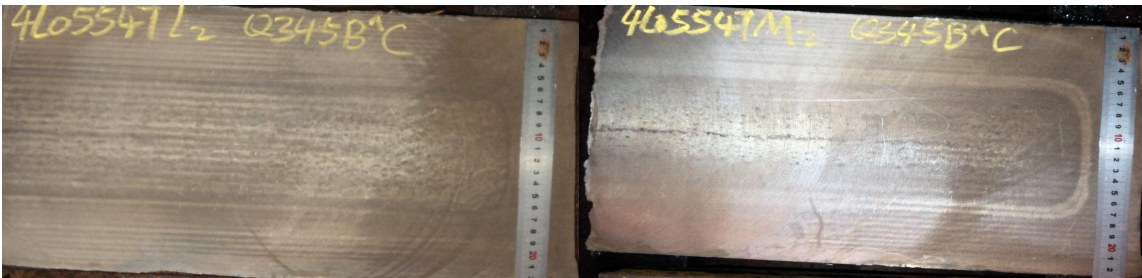


图 5 Q345B 第五炉双流低倍样(左 L 流,右 M 流)



图 6 Q345B 第八炉双流低倍样(左 L 流,右 M 流)

表 9 Q345B 低倍评级

炉批号	中心偏析	中心疏松	中间裂纹	三角区裂纹	判定结果
第二炉 L 流	B0.5	0.5	0.5	无	3.1
第二炉 M 流	B0.5	0.5	0.5	无	3.1
第五炉 L 流	B0.5	0.5	无	无	3.1
第五炉 M 流	B0.5	0.5	1.5	无	3.2
第八炉 L 流	B0.5	1	1	无	3.1
第八炉 M 流	B1	1	无	无	3.1

试验效果分析:通过对比低倍评级分析,电磁搅拌在热连轧低合金钢种上效果比较理想,中心偏析都控制在 B0.5,特别是第一组方案效果更是理想,几乎不见中心偏析,完全满足协议要求值。

4.3 高碳钢 27SiMn、45#钢电磁搅拌参数优化

3#机生产 27SiMn,成分控制如表 13 所示,液相线温度 1499℃,结晶器宽面水量:3600L/min;窄面水量:500L/min,断面 1260mm,二冷水表采用 4#水表,拉速 0.9m/min,比水量 1.04L/kg,浇注过程电磁搅拌参数如下设置:

表 10 27SiMn 成分控制

牌号	化学成分, %				
	C	Si	Mn	P	S
27SiMn^A	0.25-0.29	1.20-1.30	1.20-1.30	≤0.025	≤0.010

表 11 27SiMn^A 电搅试验参数

机流	电搅辊	电流大小 (A)	频率大小 (HZ)	搅拌方式	取样
L 流	一段首	450	6	连续	1
	一段末	480	5	连续	
M 流	一段首	电搅辊故障, 未投用		——	1
	一段末			——	

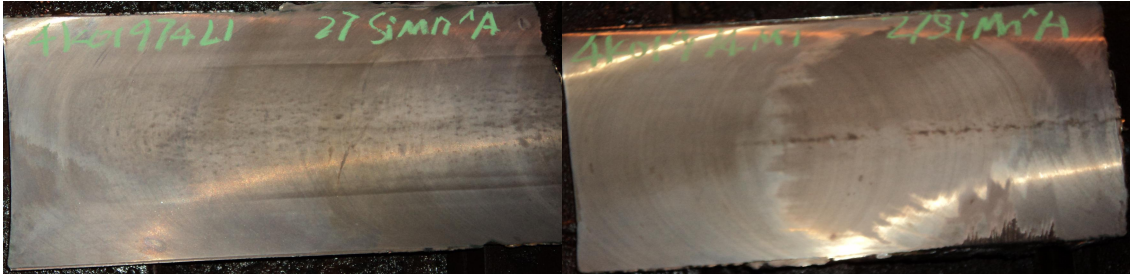


图 7 27SiMn 低倍 (左 L 流, 右 M 流)

3#机生产 45#钢,成分控制如表 15 所示,液相线温度 1487℃,结晶器宽面水量:3600L/min;窄面水量:500L/min,断面 1260mm,二冷水表采用 4#水表,拉速 0.9m/min,

比水量 1.04L/kg，浇注过程电磁搅拌参数如下设置：

表 12 45#钢成分控制

牌号	化学成分%				
	C	Si	Mn	P	S
45#	0.43-0.47	0.17-0.37	0.50-0.70	≤0.025	≤0.020

表 13 45#钢电搅试验参数

机流	电搅辊	电流大小（A）	频率大小（HZ）	搅拌方式	取样
L 流	一段首	430	6	连续	1
	一段末	460	5	连续	
M 流	一段首	450	5	连续	1
	一段末	480	5	连续	

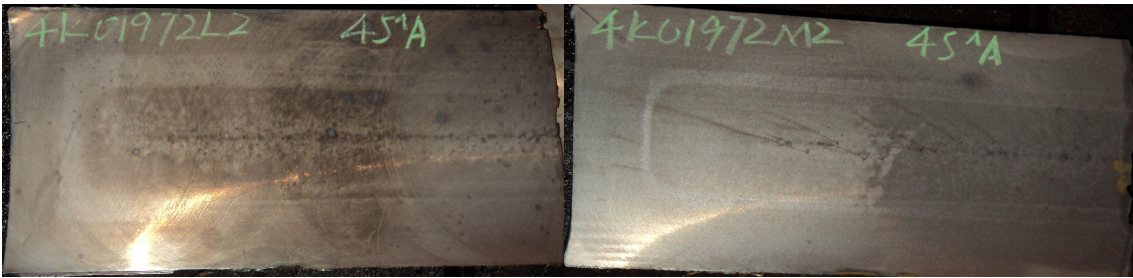


图 8 45##钢低倍效果（左 L 流，右 M 流）

表 14 27SiMn、45#钢低倍评级

钢种	中心偏析	中心疏松	中间裂纹	三角区裂纹	判定结果
27SiMn L 流	C0.5	无	无	无	2.1
27SiMn M 流	B1.5	2	无	无	不合
45# L 流	B1	1	无	无	2.2
45# M 流	B1	0.5	无	无	2.1

试验分析: 27SiMn 使用电磁搅拌得到较好的内部质量，无电磁搅拌无电磁搅拌生产的铸坯中心偏析、疏松严重；通过 45#试验得出高碳钢电磁搅拌参数适当提高，才能到达液芯，起到搅拌作用；在 450、480 电流，6、5HZ 频率下取得相对良好的低倍，达到协议验收目标值。

4. 4 无取向硅钢电磁搅拌参数优化

3#机生产 AGW600，成分如表 4 所示，液相线温度 1528℃，断面 1270mm，结晶器宽面水量：4450L/min，窄面水量：550L/min，二冷水表采用 5#水表，拉速 0.8m/min，比水量 1.0L/kg，浇注过程电磁搅拌参数如表 5 所示：

表 15 无取向硅钢 AGW600 成分控制

牌号	化学成分（%）							
	C	Si	Mn	P	S	Als	O	N

AGW600	≤0.003	0.80~1.10	0.20~0.50	≤0.025	≤0.005	0.200~0.400	≤0.0040	≤0.0050
--------	--------	-----------	-----------	--------	--------	-------------	---------	---------

表 16 AGW60 试验电教参数					
炉序	电搅辊	电流大小 (A)	频率大小 (HZ)	搅拌方式	取样位置
1	一段首	390	6	连续	第一炉第三块取低倍样
	一段末	430	5	连续	
2~3	一段首	410	6	连续	第二炉第三块取低倍样
	一段末	450	5	连续	
4~5	一段首	420	5	连续	第四炉第三块取低倍样
	一段末	450	4.5	连续	

表 17 浇注过程中包温度控制					
炉序	温度 1（℃）	温度 2（℃）	温度 3（℃）	温度 4（℃）	平均温度（℃）
1	1550	1546	1541	1554	1548
2	1554	1558	1552	1551	1554
3	1545	1545	1535	1535	1540
4	1544	1544	1543	1543	1544
5	1565	1565	1563	1564	1564



图 9 AGW600 第一炉低倍样（左 L 流，右 M 流）

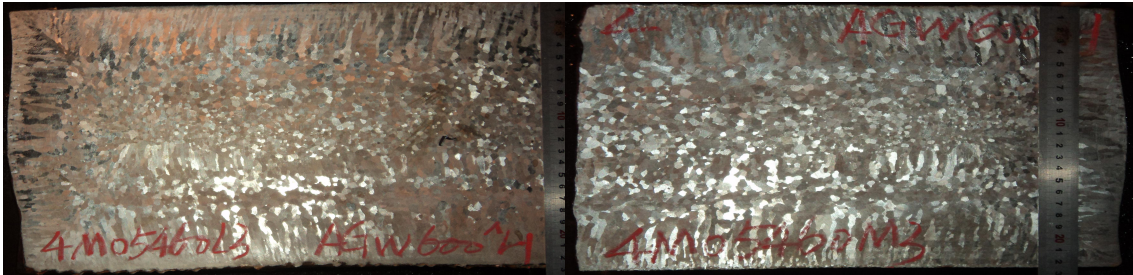


图 10 AGW600 第二炉低倍样（左 L 流，右 M 流）

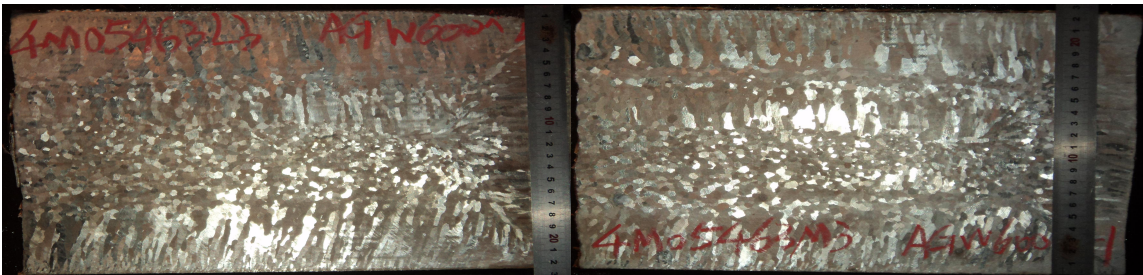


图 11 AGW600 第四炉低倍样（左 L 流，右 M 流）

通过对三组电磁搅拌方案低倍样分析：第二组方案下两流低倍等轴晶率效果浇第一、三

组方案好，等轴晶区宽140mm，铸坯厚226mm，等轴晶率达61.95%。

5结论

5.1 钢种碳含量是影响电磁搅拌参数的主要因素。碳含量越低，搅动同样状态下钢液所需的功率越小，电流设置越小，同样碳含量越高需要的电磁搅拌功率就越大。

5.2 电磁搅拌参数设置合理情况下，能达到很好的铸坯中心偏析、疏松控制效果，且碳含量越高电磁搅拌所取得效果越是明显。

6 参考文献

- [1]罗建华 板坯二冷区电磁搅拌生产工艺参数优化研究[D],辽宁鞍山: 辽宁科技大学, 2008
- [2]蔡开科等.连铸坯质量控制[M] 北京: 冶金工业出版社, 2010: 312-316
- [3]王向松, 高新军, 郭永谦, 等.低合金容器钢板中心分层缺陷研究与控制[J], 特钢技术, 2017,91(2): 15-20

作者简介: 王向松 (1984——), 男, 本科, 安阳钢铁股份有限公司第二炼轧厂连铸车间, 工程师, Email : shelf90@aliyun.com