

承德新新钒钛股份有限公司炼钢厂5#连铸机
电磁搅拌效果评价

北京科技大学
国泰能源环境工程技术有限公司
2007年6月26日

目 录

1 工作概况.....	1.
1.1 研究内容和技术要求	1
1.2 研究工作进度	1
2 承钢生产45#钢工艺设备的基本情况.....	2
2.1 承钢100T转炉生产45#钢工艺情况.....	2
2.2 承钢45#钢连铸生产工艺情况.....	3
2.3 承钢5#连铸机电磁搅拌器设备情况.....	3
2.4 承钢5#连铸机试验钢的取样情况.....	4
3 承钢5#连铸机电磁搅拌试样的加工过程.....	6
4 试验试样检验分析及讨论.....	10
4.1 铸坯低倍检验分析及讨论.....	10
4.1.1 铸坯低倍检验分析结果.....	10
4.1.2 铸坯低倍检验结果讨论.....	14
4.2 铸坯成分偏析分析及讨论.....	18
4.2.1 铸坯碳成分偏析分析结果.....	18
4.2.2 铸坯碳成分偏析结果讨论.....	19
4.2.3 铸坯硫成分偏析分析结果.....	21
4.2.4 铸坯硫成分偏析结果讨论.....	22
4.3 铸坯氧氮含量检验结果及讨论.....	23
4.3.1 铸坯氧氮含量检验结果.....	23
4.3.2 铸坯氧氮含量结果讨论.....	23
4.4 铸坯金相观测结果及讨论.....	25
4.4.1 铸坯金相观测结果.....	25
4.4.2 铸坯金相观测讨论.....	26
4.5 扫描电镜观测分析及讨论.....	29
4.6 大样电解观测分析及讨论.....	39
4.6.1 大样电解观测分析结果.....	39
4.6.2 大样电解观测结果讨论.....	40
5 结论	40
6 附录	41

1 工作概况

1.1 研究内容和技术要求

2006年11月，承德新新钒钛股份有限公司（甲方）、北京科大国泰能源环境工程技术有限公司（乙方）双方签订了“承钢5#连铸机电磁搅拌效果检测评价”技术合同书。合同中对5#连铸机结晶器电磁搅拌效果检测评价的研究内容如下：

(1) 采用对比试验研究的方法，分析典型钢种结晶器采用电磁搅拌对铸坯表面质量和内部质量的影响，试验钢种选择为用于棒材厂生产圆钢的45#优质炭素结构钢作为试验研究钢种，断面为165mm×165mm，取样与试样的加工由承德新新钒钛股份有限公司技术中心委托加工单位完成。

(2) 北京科大国泰能源环境工程技术有限公司对有电磁搅拌和相应无电磁搅拌的对比分析连铸坯试样进行低倍、成份偏析、金相、气体检验、电镜扫描和大样电解检验，并对试样分析结果给予技术分析。

1.2 研究工作进度

北京科技大学国泰能源环境工程技术有限公司（以下简称科大国泰）与承德新新钒钛股份有限公司（以下简称承钢）签订技术合同后，随即展开了与试样检测有关的各项准备工作，但由于甲方在试样加工上的延误，延误的原因是承钢加工试样的单位进行设备搬迁，使得原定于2006年11月24日开始执行的合同受到影响，不得不推迟到2007年4月16日，试样的加工工作改为科大国泰完成，试样加工地点改为北京，试样的加工费用暂时由科大国泰垫付，在合同执行完成后由合同双方本着友好协商的精神加以解决。

承钢5#连铸机结晶器电磁搅拌效果检测评价主要工作如下：

(1) 承钢炼钢厂在2006年10月25日在5#连铸机上进行了电磁搅拌效果的试验钢生产，试验共进行了5炉，承钢技术中心的技术人员进行了现场跟踪并记录了生产工艺数据，合同原计划是对这5炉试验钢进行取样分析研究；在2006年11月13日承钢炼钢厂又进行了2炉试验，试验分析炉数增加为7炉。

(2) 2006年11月24日~2007年4月16日，由于承钢加工试样的单位进行设备搬迁，试样的加工工作受到延误，仅完成铸坯的电锯切割和编号，经双方协商，试样的加工工作改为科大国泰完成，试验连铸坯于2007年4月16日运至北京。

(3) 2007年4月16日~2007年6月21日，试样加工分析阶段：

2007年4月20日，完成低倍试样加工，并完成低倍检验，低倍评级。

2007年5月11日，完成钢中O、N含量的测定。

2007年5月20日，完成钢中C、S的化学成分分析。

2007年5月30日，完成大样电解观察。

2007年6月4日，完成金相试样观察。

2007年6月6日，完成试样的电镜扫描观察。

2007年6月26日，完成承钢5#连铸机电磁搅拌效果检验结果汇总第一稿。

期间，共完成低倍分析样12块、碳成分分析156份、氧氮气体成分分析12份、金相观测试样12块、夹杂物电镜扫描试样12块和大型夹杂物大样电解分析试样12块的检验分析。检验结果报告见附录。

2 承钢生产45#钢工艺设备的基本情况

2.1 承钢100T转炉生产45#钢工艺情况

承钢100吨转炉生产45#钢生产工艺路线：转炉—吹氩精炼（钢包喂线、吹氩时间 ≥ 10 分钟）—方坯连铸（保护浇注）。

原料条件：尽量组织用[S] $\leq 0.040\%$ 的铁水（半钢）冶炼，以保证转炉冶炼高拉碳，控制冷料用量。

（一）转炉冶炼过程操作要点为：

1. 吹炼前期化好渣，化透渣，避免熔池温度上升过快及炉渣“返干”现象发生。
2. 吹炼终点：尽量一次拉成，保证钢中成氩]—温度（T）协调，补吹不大于两次。终点[C]最佳控制为0.10—0.20%；[S] $\leq 0.030\%$ ，[P] $\leq 0.015\%$ 。
3. 挡渣：用挡渣塞、挡渣锥或专用挡渣设施进行挡渣操作，确保渣层厚 $\leq 50\text{mm}$ 。
4. 出钢时间：保证出钢口圆滑，出钢时间 ≥ 180 秒。
5. 脱氧剂使用CaSi、BaAlSi、其中2/3在出钢前加入，其余部分在加完合金料后加入，用FeMn+FeSi合金化。出钢成分控制见表2-1。

表 2-1. 承钢100 吨转炉冶炼45# 钢出钢成份控制表

元素	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%
范围	0.42-0.50	0.17-0.37	0.50-0.80	≤ 0.035	≤ 0.035	≤ 0.25
内控	0.42-0.48	0.20-0.34	0.50-0.70	≤ 0.030	≤ 0.030	≤ 0.20
目标	0.45	0.27	0.60	≤ 0.025	≤ 0.025	≤ 0.15

（二）精炼要求：

1. 吹氩时间 ≥ 10 分钟，前5分钟执行吹氩操作，其余执行弱吹氩操作。
2. 吹氩过程中尽量少喂或不喂Al线，若氩前a[O] $\geq 60\text{ppm}$ ，可喂10-20米Al线进行调整，氩后最佳控制a[O]在30ppm以下。

2.2 承钢45#钢连铸生产工艺情况

承钢5#连铸机设备主要参数见表2-2。

表 2-2. 承钢 5#连铸机主要设备工艺参数

名称	单位	参数
铸机机型	/	全弧型
铸机流数	流	八机八流
弧形半径	m	R12（渐进矫直）
流间距	mm	1300/1300/1300/1500/1300/1300/1300
铸坯断面	mm ²	165×165、180×180、200×200
结晶器铜管长度	mm	1000
结晶器振动频率	次/min	30~220
结晶器振幅	mm	0~±6mm
工作拉速	m/min	1.3~3.2
中间包容量	t	2×36
铸坯定尺长度	m	6-12

2.3 承钢5#连铸机电磁搅拌器设备情况

承钢5#8机8流连铸机结晶器电磁搅拌成套装置由150KVA，380V/380V主电力变压器8台、电源分配柜及冷却水控制柜2面、变频柜8面、纯水内冷结晶器外置式电磁搅拌器8台、冷却水装置1套及监控操作工控机1台构成。其主体设备结晶器电磁搅拌器设备简介如下：

型号：DJMR-540CW，

数量：8台，

主要技术参数：

结构特点：环形铁芯，克兰姆绕组形式，

适应的铸坯截面：165mm×165mm，

中心磁感应强度： $\geq 860\text{GS}$ ，

带结晶器铜管后中心磁感应强度： $\geq 50\text{M}\Omega$ ，

自重：1160Kg。

承钢5#连铸机电磁搅拌器安装位置距结晶器铜管上口350mm处，搅拌方式为：连续正搅、连续反搅、正反交替搅拌。电磁搅拌器基本参数见表3。

表 2-3. 承钢5#连铸机结晶器电磁搅拌器的设备基本参数

电磁搅拌器电气参数					搅拌器尺寸		
视在功率	电流	电压	频率	中心磁感应强度	内径	外径	高度
KVA	A	V	Hz	Gs	mm	mm	mm
260	400	380	2-8	≥ 860	510	870	505

2.4 承钢5#连铸机试验钢的取样情况

承钢炼钢厂在2006年10月25日在5#连铸机上进行了电磁搅拌效果的试验钢生产，共进行了5炉，2006年11月13日承钢炼钢厂又进行了2炉试验，试验分析炉数增加为7炉。钢种为45#，连铸坯断面为:165mm×165mm。试验方法为：在连铸机第1流使用电磁搅拌，第2流为无电磁搅拌进行对比，取样位置见图2-1。

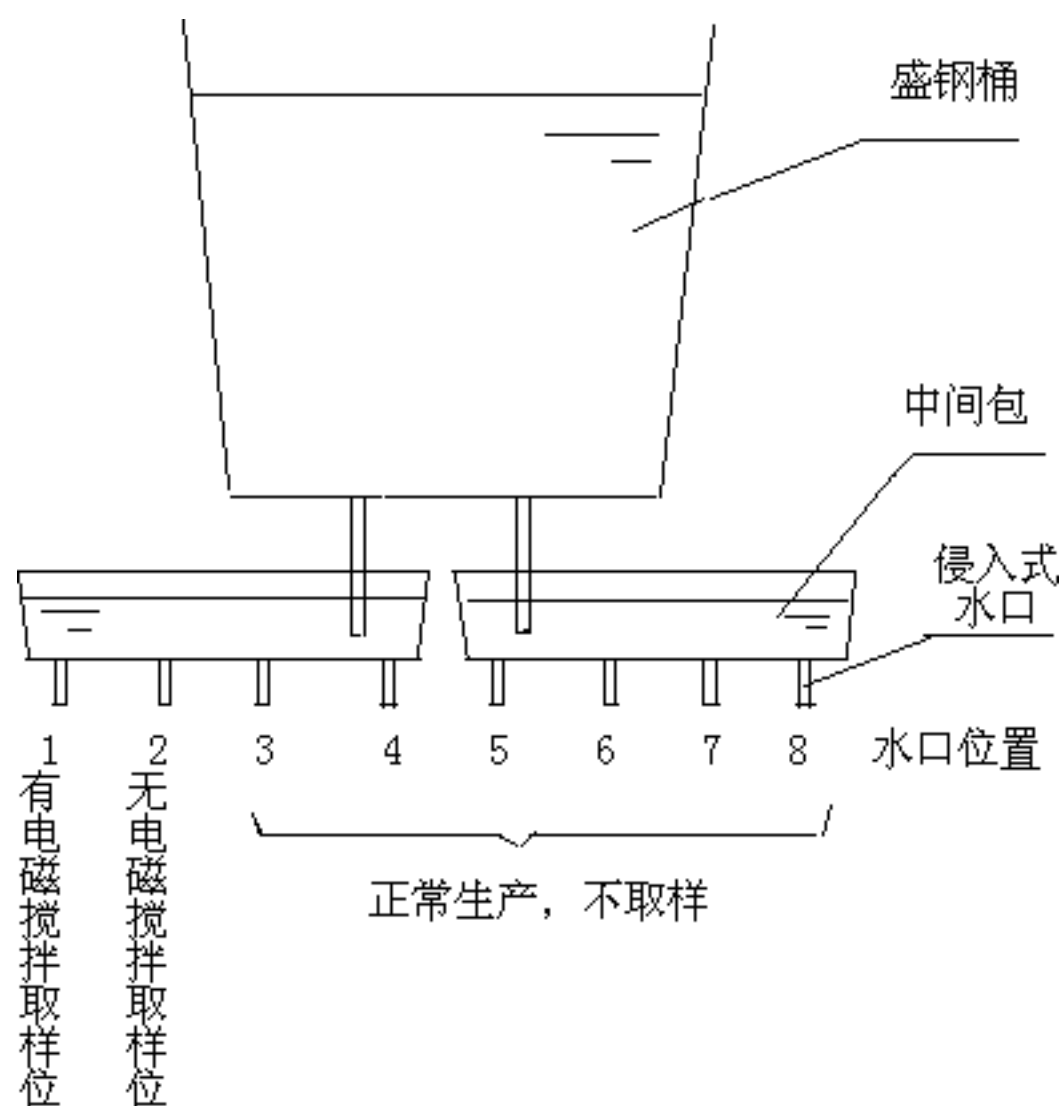


图 2-1. 试验钢取样流次示意图

试验钢的转炉主要生产工艺记录见表2-4。

表 2-4. 试验钢转炉生产主要工艺记录

序号	炉号	装入量(t)		半钢成分(%)		渣料用量(kg)				
		半钢	铁水	C	S	石灰	萤石	白云石	镁球	包渣
1	6503328	112		3.8	0.054	5700		1700	400	800
2	6503329	105	13	3.66	0.053	5800		1500	400	800
3	6503330	94	21	3.69	0.053	6300		1600	400	800
4	6503331	104	16	3.55	0.058	7400		1500	200	1300
5	6503332	100	20	3.93	0.059	6800	100	1800	200	1000
6	6503878	112		4.22	0.03	4700		2000	400	
7	6503879	114		3.94	0.04	5700	350	2000	400	
序号	炉号	终点			铁合金加入量(kg)				增碳剂	调渣剂
		温度	C	S	硅铁	锰铁	硅铝钡	CaSi	(kg)	(kg)
1	6503328	1675	0.02	0.03	359	871	50	100	460	100
2	6503329				327	836	40	100	430	100
3	6503330				378	914	40	100	420	100
4	6503331	1685	0.05	0.03	371	897	40	100	400	100
5	6503332	1682	0.07	0.03	378	880	30	100	380	100
6	6503878	1686	0.06	0.03	346	876	40	50	400	100
7	6503879	1695	0.06	0.03	345	866	40	50	400	100

45# 试验钢连铸生产主要技术工艺参数见表-5, 结晶器电磁搅拌器的生产技术工艺参数见表2-6。

表 2-5. 承钢5# 连铸机生产试验钢的技术工艺参数

编号	炉号	中包温度℃		拉速	结晶器进出水温差△℃	二次冷却各段流量/L·kg ⁻¹		
		南中包	北中包	M/min ⁻¹		一段	二段	三段
1	6503328	1517	1516	1.79	5.6	4.9	5.4	3.5
2	6503329	1518	1517	1.8	5.8	5	5.5	3.7
3	6503330	1507	1509	1.93	6.9	4.5	4.96	3.24
4	6503331	1509	1517	1.69	6.5	3.94	4.44	2.97
5	6503332	1505	1499	1.94	6.8	4.31	4.8	2.04
6	6503878	1515	1527	1.71	4.8	5	6.6	
7	6503879	1522	1528	1.74	4.8	5	6.6	

表 2-6. 承钢5#连铸机生产试验钢的结晶器电磁搅拌器生产技术工艺参数

编号	炉号	搅拌参数				搅拌器线圈冷却水		
		电流 A	电压 V	频率 Hz	方式	流量 L · kg ⁻¹	出水温度℃	电导率G
1	6503328	300		3	反搅	2.4	51.1	86.8
2	6503329	280	325	3	反搅	2.4	50.5	85
3	6503330	290	335	3	正搅	2.4	52.9	83.4
4	6503331	290	339	3	正搅	2.4	53	86.3
5	6503332	290	415	4	正搅	2.4	53.6	98.5
6	6503878	270		3	反搅	2.8	52.5	104
7	6503879	290		3	正搅	2.8	54	102

3 承钢5#连铸机电磁搅拌试样的加工过程

2007年4月16日，对运至北京的84块厚度为40mm的连铸坯样进行检查时发现，炉号为6503331编号为4-1、4-2、4-7、4-8的试样没有，其余试样多有重复编号现象，精选后采用12组试样共计36块试样进行对比检验。未检验试样存在以下问题：

- (1) 试样编号为x-8（其中：x代表1、2、„、7）编号不清，难以分辨，并且x为4的试样未发现，x为6的试样为6块。
- (2) 试样编号为x-1（其中：x代表1、2、„、7）的试样中，未发现x为4的试样。
- (3) 试样编号为x-7（其中：x代表1、2、„、7）的试样中，x为1的试样为6块。

根据以上情况，决定检验的试样中包括6个炉号，基本包括了电磁搅拌试验的工艺情况，可以说明电磁搅拌的试验效果，试样检验分析项目基本情况见表1。

表 3-1. 承钢5#连铸机电磁搅拌试验样精选结果及试验安排

编号	流次	炉号	搅拌参数				低倍/硫印	大样电解	成分/金相/氧氮
			电流	电压	频率	方式			
1-1	1	6503328	300		3	反搅	√	√	√
1-2	2	6503328					√	√	√
2-1	1	6503329	280	325	3	反搅	√	√	√
2-2	2	6503329					√	√	√
3-1	1	6503330	290	335	3	正搅	√	√	√
3-2	2	6503330					√	√	√
5-1	1	6503332	290	415	4	正搅	√	√	√
5-2	2	6503332					√	√	√
6-1	1	6503878	270		3	反搅	√	√	√
6-2	2	6503878					√	√	√
7-1	1	6503879	290		3	正搅	√	√	√
7-2	2	6503879					√	√	√

注：记号为“√”是表示需进行检验的项目。

编号中 1-1、1-2，前面的数字代表炉号，1 代表炉号为 6503328，依此类推；后面的数字代表有无电磁搅拌，1 代表有电磁搅拌，2 代表无电磁搅拌。

承钢 5# 连铸机电磁搅拌效果的检验项目包括：低倍检验、大样电解、碳硫偏析分析、氮氧含量测定、金相观察和扫描电镜能谱分析六个部分。试验铸坯已经在承钢锯切为厚度为165mm×165mm×40mm 的坯样，按表3-1 所示，每个炉号的试验坯样为6 块，3 块为有电磁搅拌的铸坯样，从一块铸坯上依次切取，3 块铸坯样组织成分变化极小，其中：一块用于加工低倍检验样，一块用于钻取成分分析样和切割出金相样、氧氮气体分析样，最后一块用于制成大样电解分析样。另外块为无电磁搅拌的对比铸坯样，加工过程与有电磁搅拌坯样的加工过程相同，试样的加工委托北京科技大学的试验工厂完成。

加工过程如下：

1. 低倍试样制备

将用于加工成低倍检验铸坯样的一个165mm×165mm 截面在立式铣床上铣光，每炉两块，分别为有电磁搅拌的和无电磁搅拌的对比样，每炉共计12 块。加工后的低倍样委托首钢总公司技术中心中心试验室进行检验，并出具检验报告。

1. 大样电解分析样的制备

将用于加工大样电解分析铸坯样的六个面在立式铣床上铣光，然后用电锯沿样品横截面内从内弧侧到外弧侧的中心线锯成相等的两半，将其中一块在外弧侧中心处加工一个M12的孔。加工后的大样电解分析样委托北京科技大学冶金与生态工程学院大样电解实验室进行检验，并出具检验报告及钢中大型氧化物夹杂照片。

2. 成分分析样、金相样和氧氮气体分析样的制备

1) 成分分析样的制备

将用于加工成分分析铸坯样的一个165mm×165mm截面放置在钻床上，沿内弧侧到外弧侧的中心线上，依次钻取13个直径为8mm的钻孔，深度>20mm，将钻出的钢屑分别装入试样袋内，编号依次为1#~13#（从内弧侧到外弧侧编号），12个样品共计156个试样，分别进行C、S成分分析，成分分析委托北京科技大学冶金与生态工程学院化实验室进行分析，并出具成分分析报告。

取样位置如图3-1所示。

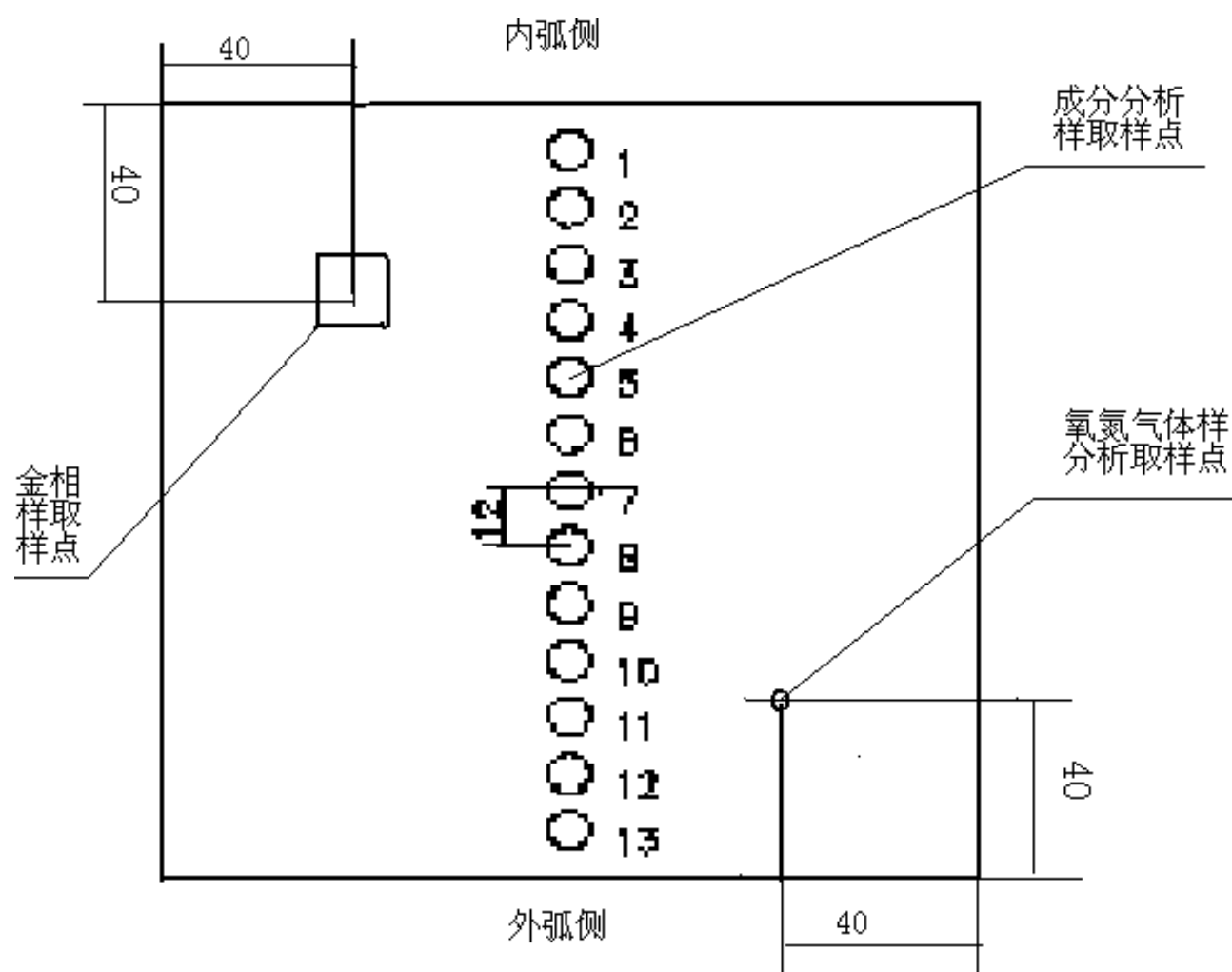


图 3-1. 取样位置示意图

2) 氧氮气体分析样的制备

将钻取完成成分分析样后的铸坯样用线切割机床沿坯样的外弧侧4处（距铸坯角部约40mm处）进行线切割，在距铸坯样边部40mm处，切割一个直径为 $\Phi 5\text{mm}$ 的圆柱样，委托国家有色金属及电子材料分析测试中心采用惰气脉冲红外导热法进行测定，并出具检测报告。

3) 显微观察试样制备

完成氧氮气体分析样的切割后，在试样内弧侧，与氮氧样取样点呈对角线方向，切取金相样，制成 $15\times 15\times 15\text{mm}$ 的正方体，并经过进一步研磨、抛光制成金相观测样。金相样的观测由北京科技大学冶金与工程学院试验室完成。

4 试验试样检验分析及讨论

4.1 铸坯低倍检验分析及讨论

4.1.1 铸坯低倍检验分析结果

试验钢铸坯低倍检验的评级结果见4-1、4-2。

表 4-1. 有电磁搅拌铸坯的低倍检验评级结果

编号	炉号	中心偏析	中心疏松	皮下气泡	非金属夹杂物	缩孔	角部裂纹	皮下裂纹	中间裂纹	中心裂纹
1-1	6503328	0	1	0.5	1	1	4	1	3	2
2-1	6503329	0	1	1	1	3	3	1	3	2
3-1	6503330	0	1	0.5	0.5	1	3	1	2	1
5-1	6503332	0	1	0.5	0.5	0.5	3	1	1	0
6-1	6503878	0	1	1	0.5	2	3.5	1	2	2
7-1	6503879	0	1	0.5	1	0.5	2	1	2	1

表 4-2. 无电磁搅拌铸坯对比样的低倍检验评级结果

编号	炉号	中心偏析	中心疏松	皮下气泡	非金属夹杂物	缩孔	角部裂纹	皮下裂纹	中间裂纹	中心裂纹
1-2	6503328	0	1	0	1	1	3.5	1	3	2
2-2	6503329	0	1	1	1	1.5	4	1	3.5	3
3-2	6503330	0	1	0.5	1	1.5	3	1	2.5	2
5-2	6503332	0	1	0.5	1	2	3	1	1	1
6-2	6503878	0	1	0.5	0.5	2	3	2	2	1
7-2	6503879	0	1	0	0.5	1.5	4	1	2	2

注：编号中 1-1、1-2，前面的数字代表炉号，1 代表炉号为 6503328，依此类推；后面的数字代表有无电磁搅拌，1 代表有电磁搅拌，2 代表无电磁搅拌。

试验钢铸坯低倍检验照片见图4-1 至4-6。

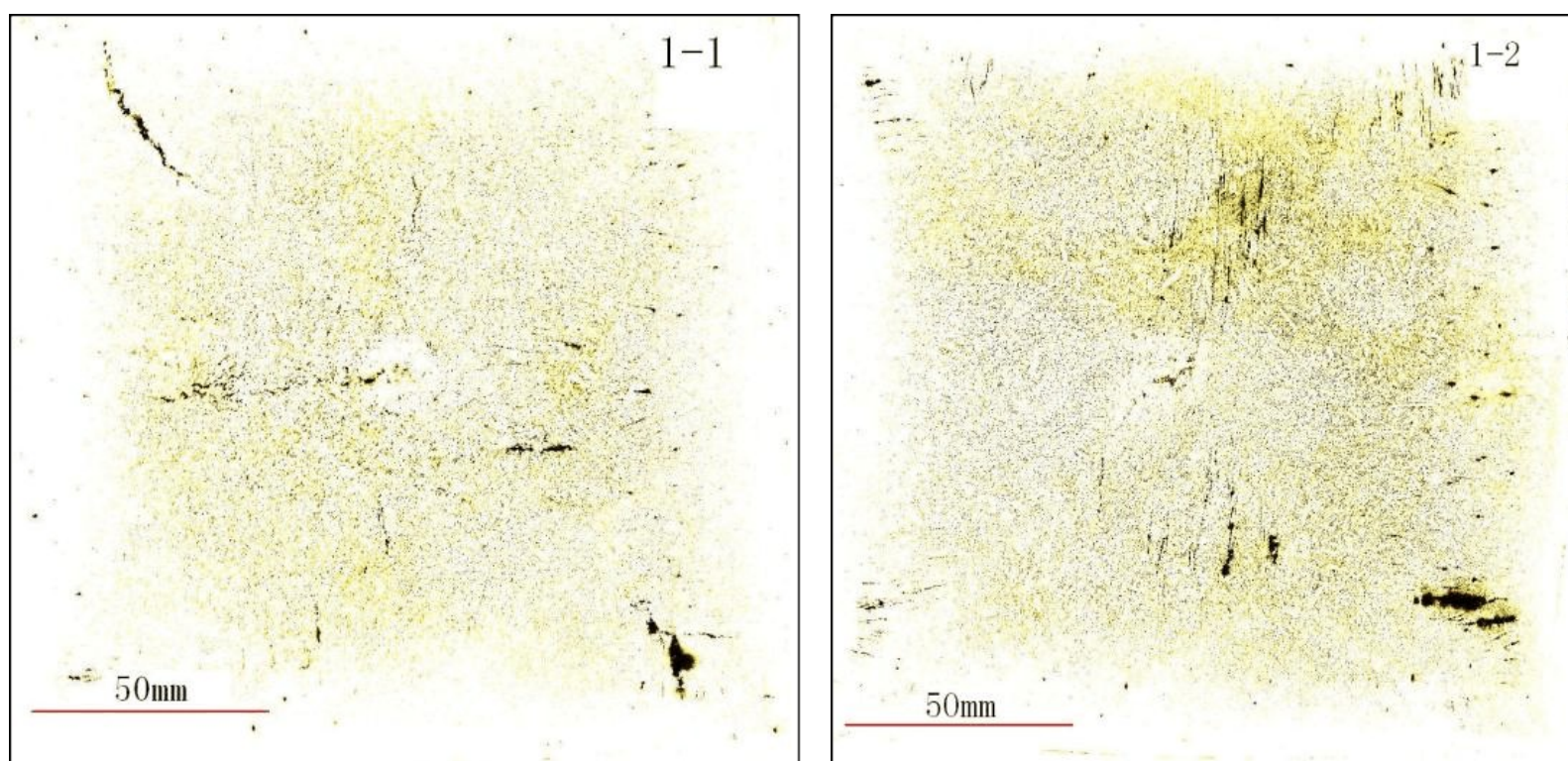


图 4-1 炉号 6503328 的铸坯低倍检验照片

(注 1-1 是有电磁搅拌的铸坯低倍照片,1-2 是无电磁搅拌铸坯对比样的低倍照片)

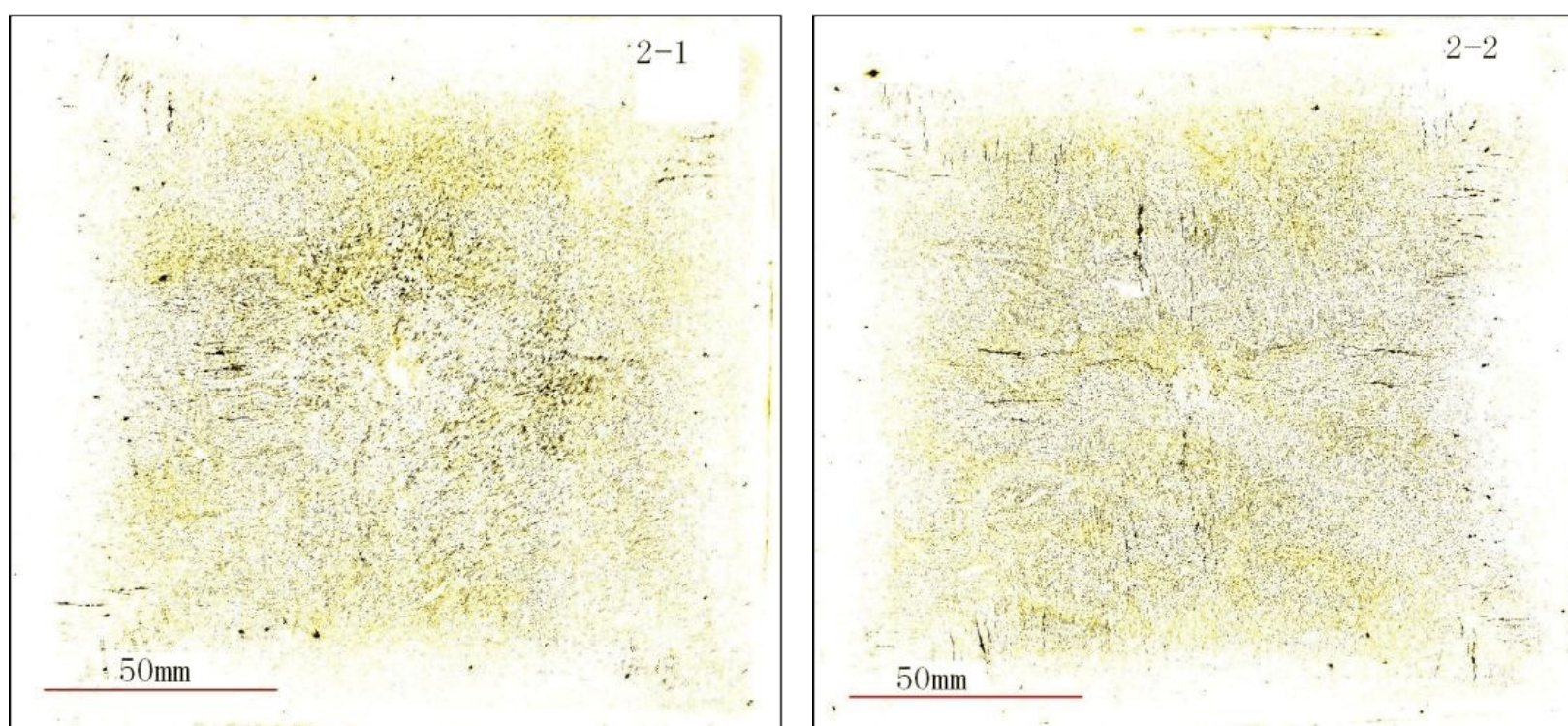


图 4-2 炉号 6503329 的铸坯低倍检验照片

(注 2-1 是有电磁搅拌的铸坯低倍照片 2-2 是无电磁搅拌铸坯对比样的低倍照片)

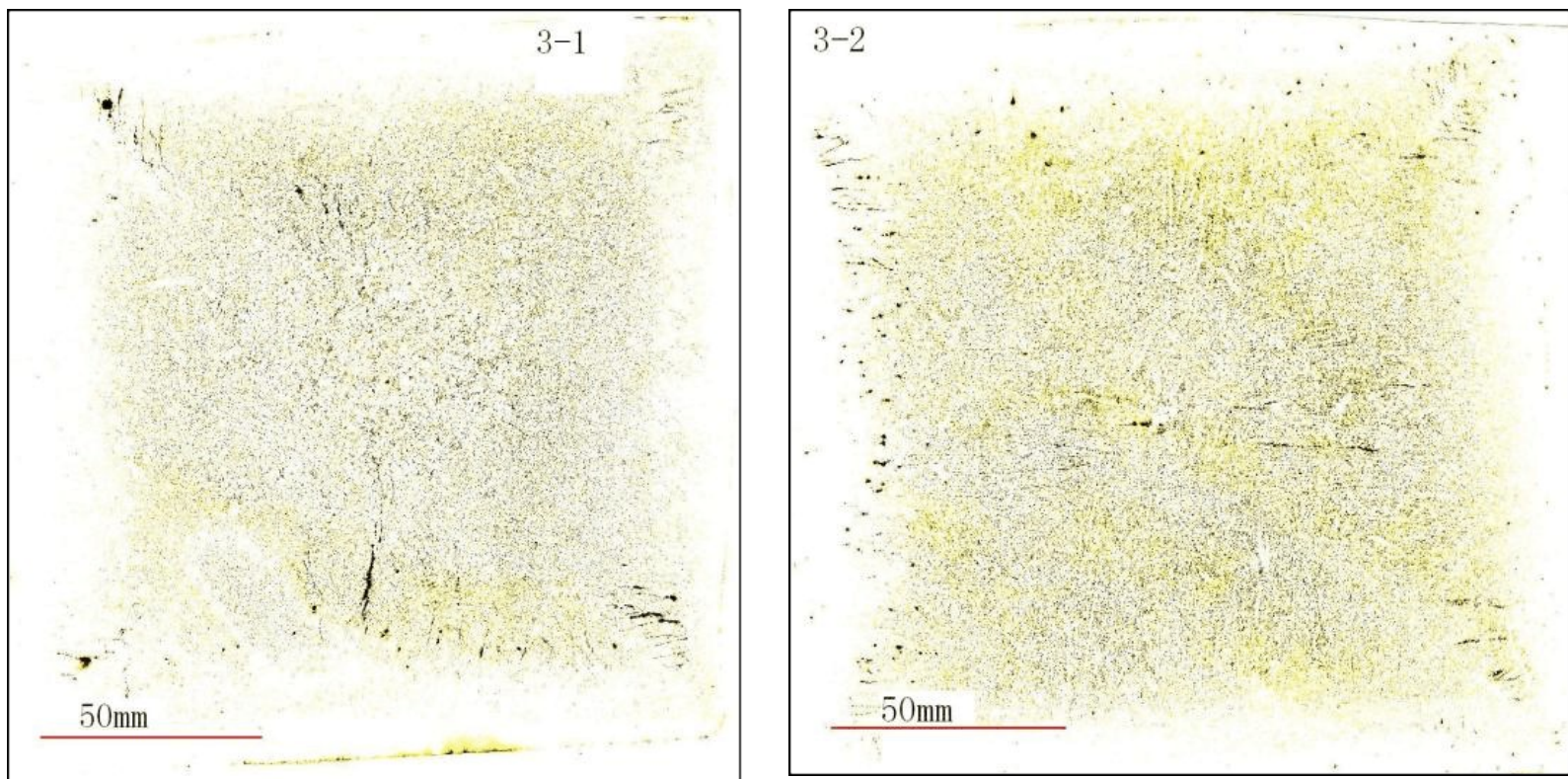


图 4-3 炉号 6503330 的铸坯低倍检验照片

(注 3-1 是有电磁搅拌的铸坯低倍照片 3-2 是无电磁搅拌铸坯对比样的低倍照片)

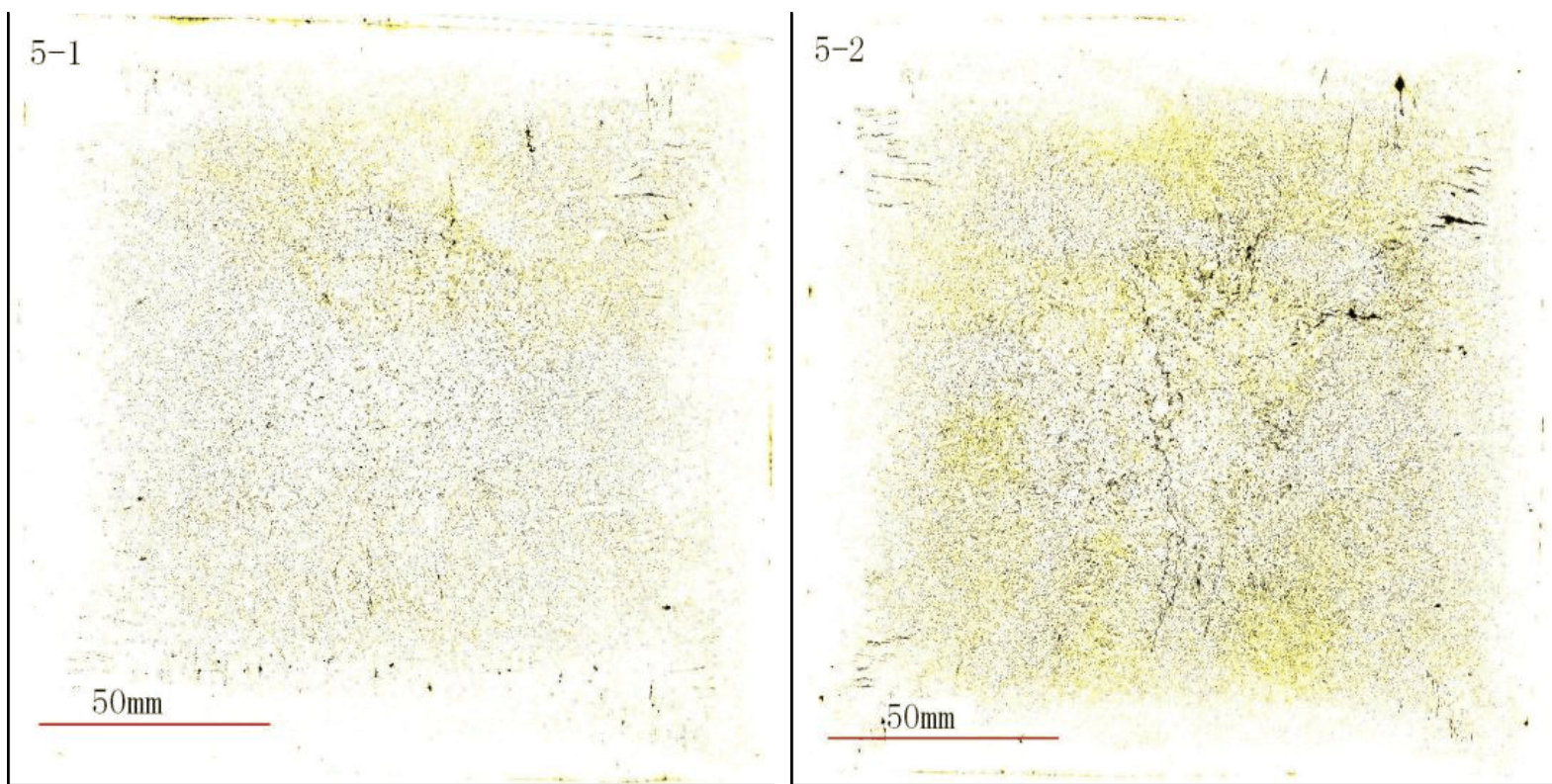


图 4-4 炉号 6503332 的铸坯低倍检验照片

(注 5-1 是有电磁搅拌的铸坯低倍照片 5-2 是无电磁搅拌铸坯对比样的低倍照片)

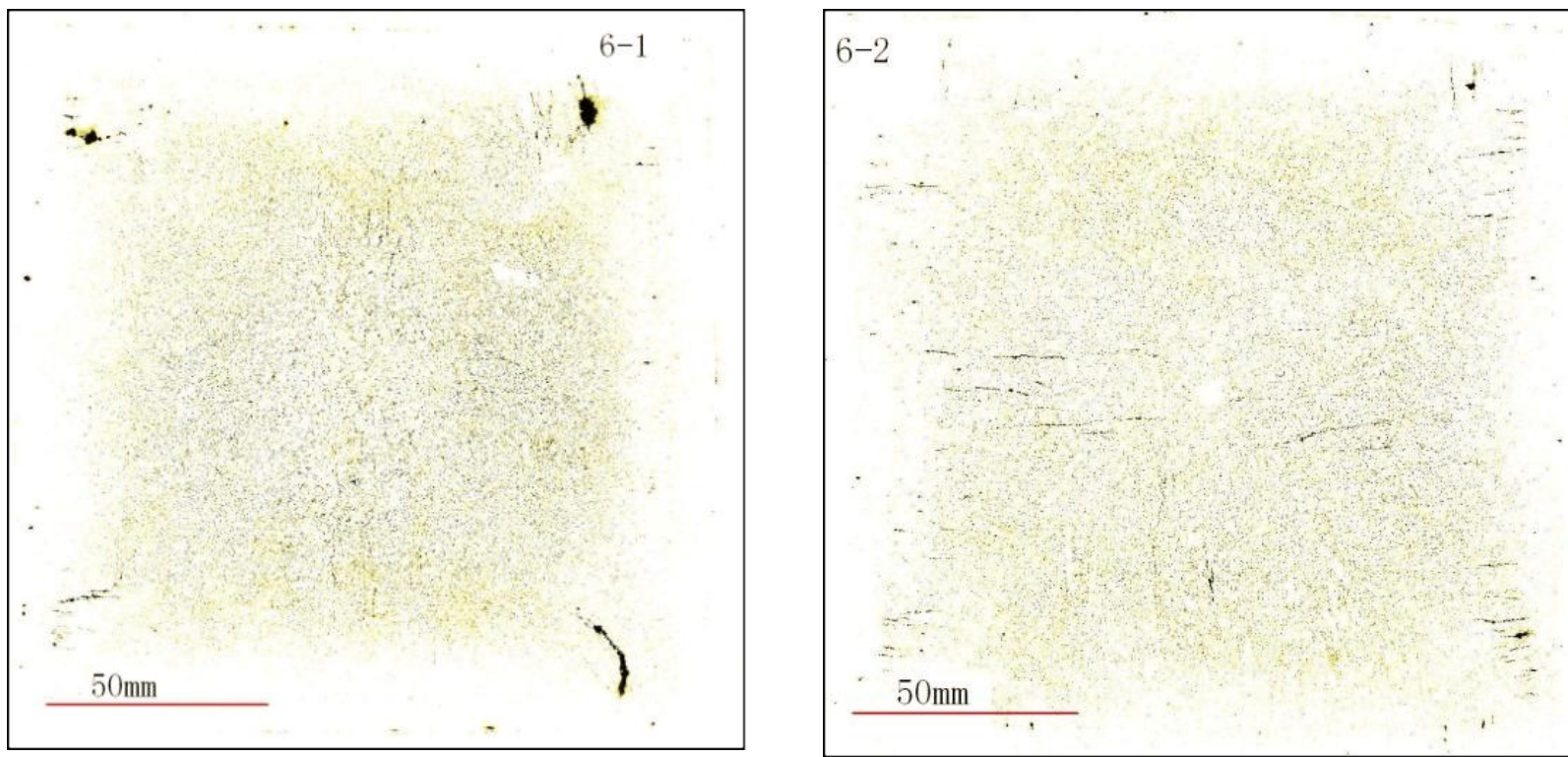


图 4-5 炉号 6503878 的铸坯低倍检验照片

(注 6-1 是有电磁搅拌的铸坯低倍照片 6-2 是无电磁搅拌铸坯对比样的低倍照片)

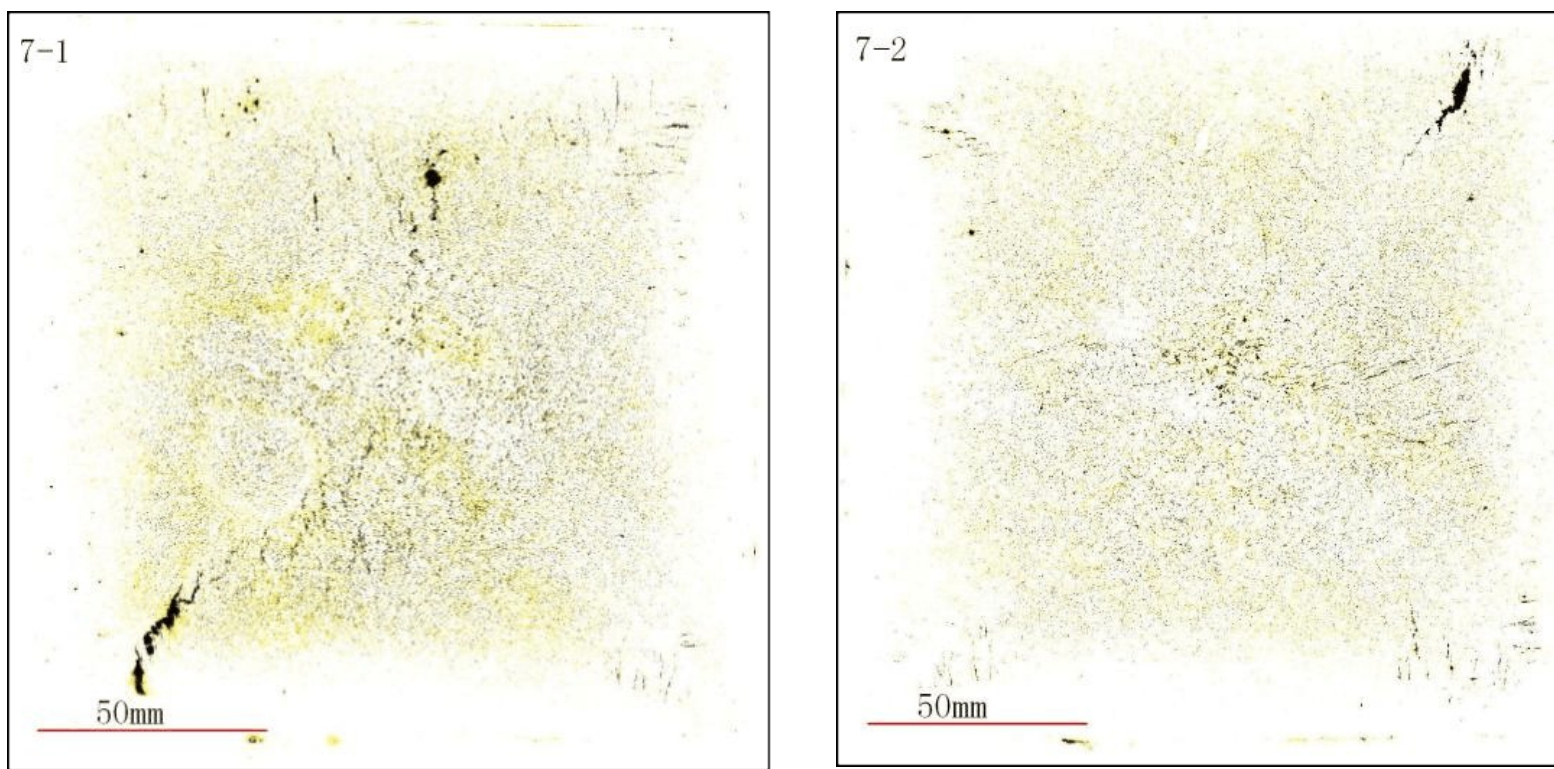


图 4-6 炉号 6503879 的铸坯低倍检验照片

(注 7-1 是有电磁搅拌的铸坯低倍照片 7-2 是无电磁搅拌铸坯对比样的低倍照片)

4.1.2 铸坯低倍检验结果讨论

通过肉眼观察试验铸坯的低倍照片，量出等轴晶区、柱状晶区和边缘激冷层的面积，从而得到等轴晶率的数值， $\text{等轴晶率} = \text{等轴晶区面积} / \text{铸坯面积} \times 100\%$ ，试验铸坯样的等轴晶区、柱状晶区和边缘激冷层的比率见表3。

表 4-3. 铸坯样的等轴晶区、柱状晶区和边缘激冷层的比率

铸坯编号	中心等轴晶区/%	柱状晶区/%	边缘激冷层/%
1-1	31.5	52.6	15.9
1-2	5.4	82.7	11.9
2-1	25.2	55.3	19.5
2-2	14.1	69.5	16.4
3-1	10	72.8	17.2
3-2	1.1	86.4	12.5
5-1	25.7	59.2	15.1
5-2	15.9	68.9	15.2
6-1	24.2	64.2	11.6
6-2	15.3	70.1	14.6
7-1	23.8	58.6	17.6
7-2	7.7	73	19.3

注：-1 表示经过电磁搅拌；-2 表示未经电磁搅拌。

根据上表的数据计算可知，有电磁搅拌铸坯样的平均中心等轴晶比率为26.1%，无电磁搅拌铸坯对比样的平均中心等轴晶比率为1.7%，有电磁搅拌铸坯样比无电磁搅拌铸坯对比样的中心等轴晶比率平均高出4.4%，试验铸坯样的等轴晶比率分布图见图4-7。

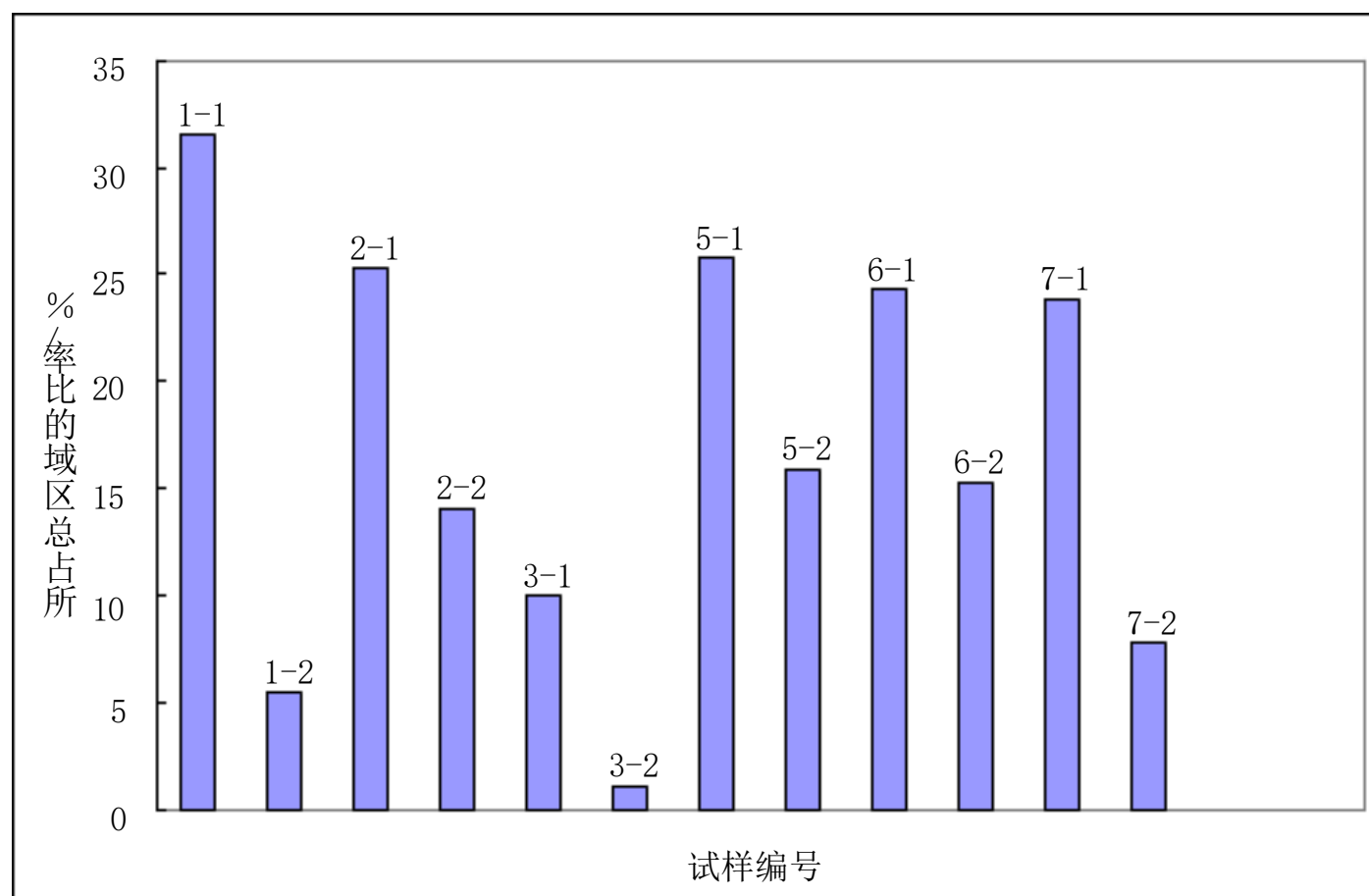


图 4-7. 试验铸坯样中心等轴晶区比率分布图

注：-1 表示经过电磁搅拌；-2 表示未经电磁搅拌。

结合表2-5 的试验钢生产工艺参数中的钢水过热度 and 表2-6 连铸结晶器电磁搅拌工艺参数中搅拌电流强度、搅拌频率的数据对铸坯中心等轴晶比率进行对比分析，结果见表4-4。

表 4-4. 不同连铸电磁搅拌条件下有无电磁搅拌铸坯中心等轴晶比率对比

电流强度	过热度	频率	中心等轴晶比率%		比率差值%
			有搅拌	无搅拌	
/A	/ $\Delta^{\circ}\text{C}$	/Hz			
270	24	3	24.2	15.3	8.9
280	27	3	25.2	14.4	10.8
290	14	4	25.7	15.9	9.8
290	34	3	23.8	7.7	16.1
300	26	3	31.5	5.4	26.1
中心等轴晶比率平均值			26.1	11.7	14.4

试验结果分析表明：使用电磁搅拌的流次，随着搅拌电流由270A 提高到300A，铸坯中心等轴晶比率由24.2%提高到31.5%。

使用电磁搅拌可以提高铸坯中心等轴晶比率，有电磁搅拌铸坯中心等轴晶率比无电磁搅拌的铸坯对比样平均提高了14.4%。

比较表4-1、4-2 中的各项低倍检验评级结果，可见：

1. 中心偏析：中心偏析是连铸坯宏观偏析缺陷，主要表现为溶质元素在铸坯中心分布的不均匀性，有电磁搅拌铸坯试样和无电磁搅拌对比样的中心偏析评级结果均为0 级。比较炉号为6503332（编号为5）的低倍照片（图4-4），有电磁搅拌铸坯试样的中心偏析程度比无电磁搅拌的对比样的偏析程度要轻。

2. 中心疏松：中心疏松是铸坯在凝固形成柱状晶组织过程中出现搭桥现象影响了钢水补缩而形成许多细小孔隙。有电磁搅拌铸坯试样和无电磁搅拌对比样的中心偏析评级结果均为1级。比较炉号6503330（编号为3）的低倍照片（图4-3），可以观察到枝晶搭桥的现象。

3. 皮下气泡：皮下气泡通常位于铸坯表皮以下，直径约1mm，长度在10mm 左右，沿柱状晶生长方向分布。表面气泡在轧制前加热过程中被氧化，轧制过程中不能焊合，产品表面形成裂纹；埋藏较深的气泡，也会使轧制后产品形成细小裂纹。有电磁搅拌铸坯的试样皮下气泡评级结果最大为1 级，最小为0.5 级，介于0.5 级和 1 级之间；无电磁搅拌铸坯对比样的皮下气泡评级结果最大为级，最小为0 级，介于 0 级和1 级之间。比较炉号为6503329（编号为2）的低倍照片（图4-2），两者皮下气泡评级结果皆为1 级，但无电磁搅拌的对比试样柱状晶发达，并有枝晶搭桥的现象。

4. 非金属夹杂物：有电磁搅拌铸坯样非金属夹杂物评级结果最大为级，最小为0.5 级，介于0.5 级和1 级之间；无电磁搅拌铸坯对比样非金属夹杂物评级结果最大为1 级，最小为0.5 级，介于0.5 级和1 级之间。比较炉号为6503330(编号为3)、6503332（编号为5）的低倍照片（图4-3、4-4），有电磁搅拌的铸坯非金属夹杂物的评级结果要优于无电磁搅拌的对比铸坯样。

5. 缩孔：有电磁搅拌铸坯样缩孔评级结果缺陷等级最大为级（炉号为6503329、照片4-2），最小为0.5 级；无电磁搅拌铸坯样缩孔评级结果最大为2 级，最小为1 级。

6. 角部裂纹：铸坯的角部为二维传热，凝固最快，收缩最早，铸坯冷却收缩后产生气隙，传热减慢，在鼓肚和菱变造成的拉应力作用下，在坯壳薄弱处产生裂纹，严重时还会产生漏钢，一般出现在方坯中，角部裂纹的形成和方坯的脱方（或称菱变）有关。有电磁搅拌铸坯样角部裂纹评级结果最大为 级（炉号为6503328、照片 4-1），最小为2 级；无电磁搅拌的铸坯对比样角部裂纹评级结果最大为 级， 最小为3 级。12 个试样的角部裂纹评级结果等级都很高存，在严重的角部裂纹缺陷。

7. 皮下裂纹：皮下裂纹一般是指分布在从表皮往里20mm左右的范围内细小裂纹，多数靠近角部，是在菱变时沿断面对角线形成的，而离开角部的起因于结晶器下部

坯壳的鼓肚。有电磁搅拌铸坯样皮下裂纹评级结果均为0级，无电磁搅拌铸坯对比样皮下裂纹评级结果最大为2级（编号为6503878、照片4-5），其余为1级。

1. 中间裂纹：中间裂纹一般位于铸坯表面20mm 以下到中心之间，是铸坯通过二冷区时产生的。它的产生原因为二冷区冷却不均匀，坯壳反复回温或者由于支撑辊对中不良使坯壳鼓肚，在凝固前沿受到张力的作用，在凝固界面出现裂纹，并沿柱状晶薄弱处继续扩展。有电磁搅拌铸坯样中间裂纹评级结果最大为0级，最小为1级，无电磁搅拌铸坯对比样中间裂纹评级结果最大为5级，最小为1级。炉号为6503328、6503329 的中间裂纹评级最高，为3级。

2. 中心裂纹：中心裂纹是在铸坯横断面中心区域出现的裂纹，在裂纹附近伴随有S、P和C元素的正偏析。它是由于柱状晶搭桥或凝固末期铸坯鼓肚而产生的。有电磁搅拌铸坯样中心裂纹评级结果最大为2级，最小为0级；无电磁搅拌铸坯对比样中心裂纹评级结果最大为3级（炉号为6503329、照片4-2），最小为1级。

从铸坯低倍分析结果可见，试验钢铸坯样和对比铸坯样普遍存在内部裂纹缺陷，其中角部裂纹和中间裂纹尤为严重，通过观察试验铸坯的外观形貌可见，实验铸坯大多存在脱方现象。

结晶器冷却不均匀是铸坯脱方形成的根源，承钢8机8流5#小方坯连铸机有2个中间包，中间包对中困难，容易产生注流偏斜现象，造成靠近水口部分钢水冲刷严重，使坯壳局部减薄，致使坯壳四面因受力不均匀而发生脱方。但由于铸坯在出结晶器前受到结晶器壁的限制，脱方不会有很大发展，而进入二次冷却区后冷却不均匀则加重了铸坯脱方的程度。另外，由于承钢采用先提钒，再用半钢炼钢，存在热量不足的特点，转炉吹炼拉碳率低，容易造成出钢温度高，钢水氧化性强，而过高的浇注过热度对结晶器水缝中水的间歇沸腾和坯壳变形起到了促进作用。同时浇注温度过高还使铸坯凝固坯壳减薄，强度下降，在不均匀力的作用下更易产生变形，引起铸坯脱方。

因此，承钢在转炉冶炼45#钢时，要强化冶炼操作，降低钢水浇注过热度，增加铸坯出结晶器后的坯壳厚度。在连铸方面，中间包要严格对中，要加强结晶器的维护和管理，定期测量结晶器倒锥度，保证结晶器内表面无损坏、无变形，结晶器水套水缝四面宽度均匀。加强二冷段的管理，确保二冷段准确对弧。进一步优化二冷配水，确保冷却水在整个二冷段上分布均匀。通过以上措施来减少铸坯脱方，从而提高铸坯的内部质量。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：
<https://d.book118.com/558026000043006052>