

· 工艺技术 ·

## 超声波探伤不合格 T91 钢棒材的分析和工艺改进

邢国成 刘桂江 李涛 程丽杰 孙大利  
(抚顺特殊钢股份有限公司技术处,抚顺 113001)

**摘要** 试验 T91 钢(1/100: 0.10C, 0.30Si, 0.45Mn, 0.012P, 0.005S, 8.90Cr, 0.95Mo, 0.08Nb, 0.22V) 的生产流程为 60 t UHP EAF-AOD-LF-VD-240 mm × 240 mm 坯连铸-加热-连轧。对超声波探伤不合格的 T91 钢 Φ90 mm 材低倍检验结果表明,钢材存在中心裂纹和孔洞;通过金相分析得出,缺陷出现三种特征:(1) 过烧型孔洞和裂纹;(2) 连铸坯带来的轴心晶间裂纹;(3) 铸坯的缩孔。通过连铸 I、II 和 III 区二冷水量分别由原 28、31 和 17 L/min 优化成 15、18 和 10 L/min,并通过控制连铸坯加热温度,使连铸坯中心的等轴晶比率由原 14% 提高至 25% 以上,铸坯的中心裂纹级别由 2.0 降至 0.5 以下,T91 钢材的超声波探伤不合格率由 5% 降至 0.2% 以下。

**关键词** T91 钢 60 t UHP EAF-AOD-LF-VD-CC 流程 超声波探伤 中心裂纹 轴心晶间裂纹 二冷水

## An Analysis on Unqualified T91 Steel Bar by Ultrasonic Flaw Detection and Process Improvement

Xing Guocheng, Liu Guijiang, Li Tao, Cheng Lijie and sun Dalì  
(Technology Department, Fushun Special Steel Co Ltd, Fushun 113001)

**Abstract** The production flowsheet of test steel T91 (1/100: 0.10C, 0.30Si, 0.45Mn, 0.012P, 0.005S, 8.90Cr, 0.95Mo, 0.08Nb, 0.22V) is 60 t UHP EAF-AOD-LF-VD-240 mm × 240 mm bloom casting- heating and continuous rolling. The examination results of macrostructure of unqualified steel T91 Φ90 mm products by ultrasonic flaw detection show that there are center cracks and hole in bar, by metallographic analysis it is obtained that the defects have three characteristics: (1) overheating hole and cracks; (2) axial intercrystalline cracks its source at casting bloom and (3) shrinkage cavity. With the technology measures including optimizing the casting I、II and III zone secondary cooling water amount respectively from original 28、31 and 17 L/min to 15、18 and 10 L/min, and controlling the casting bloom heating temperature, the equiaxial crystal ratio in casting bloom center increases from original 14% to more than 25%, the rating of central cracks decreases from original 2.0 to less than 0.5, and the unqualified ratio of steel T91 products by ultrasonic flaw detection decreases from original 5% to less than 0.2%.

**Material Index** Steel T91, 60 t UHP EAF-AOD-LF-VD-CC Flowsheet, Ultrasonic Flaw Detection, Center Cracks, Axial Intercrystalline Cracks, Secondary Cooling Water

10Cr9Mo1VNbN 钢是美国 1980 年在 9Cr1Mo 钢种基础上开发出来的用于高压锅炉的主要材料(管材),简称 91 钢,前冠 T 表示用于锅炉管。

T91 钢种广泛应用于制造电厂锅炉的过热器、再热器等。为满足市场需求,降低成本,抚顺特钢公司采用连铸连轧工艺路线生产了 ASME SA213/SA213M T91 高压锅炉管坯材。在研发、试制、生产过程经常出现探伤不合格,针对探伤不合格材,取定性试片进行了检验和分析,并在实际生产中应用优化工艺,使探伤合格率得到稳定提高。

### 1 生产工艺流程及设备参数

T91 钢生产工艺流程为:60 t UHP EAF→60 t AOD→60 t LF→60 t VD→四机四流 240 mm × 240 mm 连铸机→铸坯红送/缓冷→连轧机→退火→精整→RD 探伤→检验→入库。设备参数如表 1。

### 2 质量问题与缺陷描述

为确保钢材质量,增大钢材加工比,选用断面 240 mm × 240 mm 连铸坯进行生产,化学成分见表 2。成材后对每支钢材在线进行相控阵超声波探伤,探伤批次不合格率最高时可达 5%,脉冲波超出质量要求的标准值,而且是连续性分布;探伤合格的则有较低的脉冲波,远远低于质量要求的要求值。对探伤不合格的成品材,标定缺陷部位,取低倍试样对探伤缺陷进行取样,并解剖进行高低倍检验分析。

240 mm × 240 mm 连铸坯轧制 Φ90 mm 钢材,并进行超声波探伤,对探伤缺陷进行取样,加工试样横截面经 1:1 的盐酸水溶液加热腐蚀,低倍组织存在三种缺陷:轴心晶间裂纹、黑心和孔洞,三者形状不同。第一种出现以试片的几何中心为中心点,裂纹向四周射散,形成星形的裂纹形貌,有时伴随有孔

表1 冶炼-连铸-轧制设备参数

Table 1 Equipment parameters of steelmaking-casting-rolling process

项目	参数
电弧炉公称	50t UHP EAF 60t FUCHS
钢包容量/t	65
出钢量/t	60
连铸机型	Danieli 四机四流大方坯 合金钢弧形连铸机
连铸机弧形半径/m	30/16.5/12
拉速/ $m \cdot min^{-1}$	0.25~4
连铸坯规格/mm	200×200 240×240 280×320
二次冷却方式	气雾冷却
连轧机加热炉	步进梁式
连轧机组	24架 Pomini

表2 T91 钢化学成分/%

Table 2 Chemical composition of steel T91 /%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Nb	Mo	V
0.10	0.30	0.45	0.012	0.005	8.90	0.08	0.95	0.22

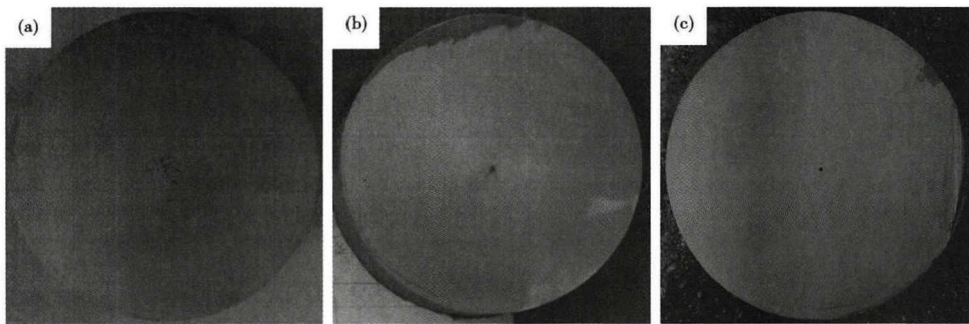


图1 T91 钢 Φ90 mm 材轴心晶间裂纹(a),黑心(b)和中心缩孔(c)形貌

Fig.1 Morphology of steel T91 Φ90 mm product axial intercrystalline cracks (a), black core (b) and center shrinkage cavity (c)

洞,符合轴心晶间裂纹特征,简称轴裂,见图1(a);第二种是在试样的几何中心附近,以黑点形貌出现,形似黑心,裂纹相对第一种较轻,不向四周发散,简称黑心,见图1(b)。第三种是孔洞,在低倍试样的中心也呈现“黑点”形貌,见图1(c)。

在低倍检验中,可以发现轴裂与黑心的形貌相差较大,见图1(a)和图1(b)。在金相显微镜500X倍下观察,轴裂与黑心的金相形貌相差更大,轴裂形貌见图2(a),在轴心位置沿晶界开裂,呈放射状,高倍下可见裂纹附近有氧化质点。黑心形貌见图2(b),在低倍试样的中心区域显现为海绵状黑色质点,放大为孔洞和沿晶界氧化开裂,集中在一处,显现为一个黑点,仅靠低倍检验是不能区分开。在高倍下可见晶界内填满了氧化物,腐蚀前后均能看到沿晶界氧化开裂。缩孔类中心孔洞为中空小眼,无氧化物,腐蚀后晶界也无氧化质点,也没有向四周延

伸的裂纹,虽然低倍形貌与黑心相似,但高倍下观察不同于黑心缺陷,系连铸坯本身带来的,见图2(c)。

对黑心部位进行扫描电镜能谱分析,晶界内氧化物的成分为氧化铁,含少量的铬、锰和钒,是钢的高温氧化产物,符合过烧特征,见图3(扫描电镜下分析的数据和照片)。

### 3 机理分析与研究

通过上述检验,可以得出系三种缺陷导致成品材探伤不合格。针对不同类型的缺陷,其形成机理也不同,应分别进行分析和研究。

#### 3.1 轴心晶间裂纹及缩孔形成机理

对于轴心晶间裂纹,通常认为是铸坯在结晶时,在是内应力作用下形成的。因此,检验连铸坯的低倍质量,见图4。

抽检铸坯低倍,发现铸坯的低倍确实存在星状的中心裂纹,并伴有缩孔。连铸坯凝固理论认为,在铸坯液相穴凝固末端,中心液体呈糊状,体积结晶释放凝固潜热,使外面已凝固坯壳受热而膨胀,而液芯受到拉伸应力作用。同时,中心液体集体凝固收缩,而周围的固相又阻碍其收缩而产生了拉应力。在两者的综合作用下,高温下钢的强度不足以抵抗这种应力

时,中心区产生放射状裂纹。如果没有液态钢水进行及时补缩,会有缩孔伴随产生。在凝固时,柱状晶发达及局部柱状晶“搭桥”,中心最后凝固部分集中收缩而得不到钢液补充,也会产生缩孔<sup>[1-4]</sup>。

参照 YB/T153-2015、YB/T4002-2013 的评级方法及中心裂纹图片,图4这种2.0级以上的裂纹,在轧制过程中无法完全焊合,导致在成品材上出现轴裂探伤不合格。

通过上述分析可以得出,铸坯低倍质量对成品材是有遗传性的。铸坯1.0级以下的中心裂纹,在加工比足够的情况下,能够完全焊合,探伤是合格的。因此必须调整生产工艺,消除或降低铸坯中心裂纹和缩孔级别。

#### 3.2 过烧型中心裂纹形成机理

通常认为这种类型的裂纹产生机理是铸坯加热

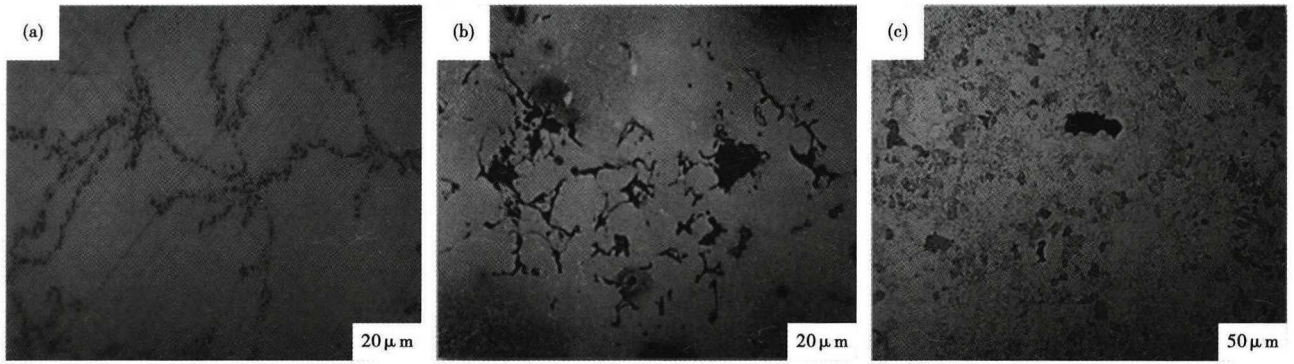
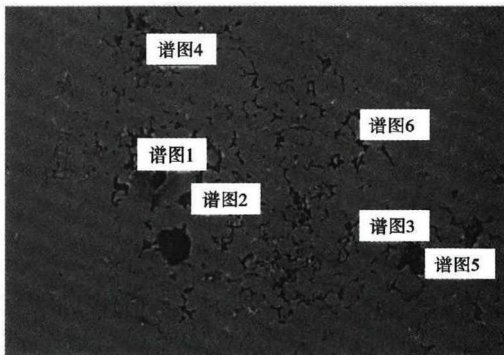


图 2 T91 钢 Φ90 mm 材轴心晶间裂纹 (a), 中心裂纹 (b) 和中心孔洞 (c) 金相形貌

Fig. 2 Metallographic morphology of steel T91 Φ90 mm product axial intercrystalline cracks (a), center cracks (b) and center hole (c)



谱图	C	O	S	Cl	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Nb
1	17.01	23.65	0.91	-	-	-	7.13	-	49.16	2.14	-	-
2	6.85	43.72	-	-	-	-	2.49	-	46.95	-	-	-
3	7.94	37.57	0.6	0.46	-	-	2.76	1.12	49.55	-	-	-
4	22.11	5.40	-	-	0.53	5.91	3.82	-	5.31	-	1.27	56.65
5	13.99	33.31	0.64	-	-	-	2.95	-	48.04	1.08	-	-
6	8.28	40.26	0.46	-	-	-	1.55	-	49.45	-	-	-

图 3 T91 钢 Φ90 mm 材中心裂纹黑色部位形貌和分析, SEM

Fig. 3 Morphology and analysis of steel T91 Φ90 mm products center cracks dark parts, SEM

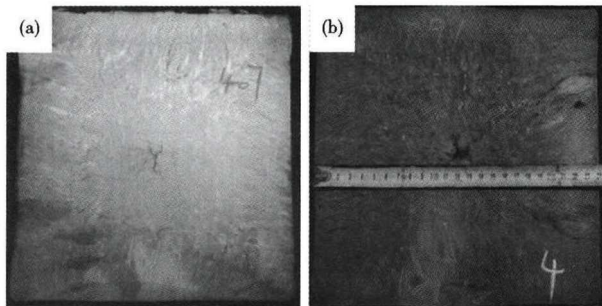


图 4 工艺优化前 T91 钢 240 mm x 240 mm 铸坯星状中心裂纹 (a) 和星状中心裂纹和缩孔 (b) 形貌

Fig. 4 Morphology of star center cracks (a) and star center cracks and shrinkage cavity (b) of 240 mm x 240 mm casting bloom of steel T91 before process optimization

温度过高,或在高温区停留时间过长造成,是加热工艺或操作不合理产生的。

由于此钢种对硫要求较低,  $S \leq 0.005\%$ , 对五害元素也有严格的限制,  $(As + Sn + Sb + Pb + Bi) \leq 0.035\%$ , 或单项指标  $\leq 0.015\%$ , 所以排除此类化学成分的影响。

通过深入调查,此类的探伤不合格产品,有这样一种规律:第一,不是整炉的不合格;第二,有时在一

个炉号的多支铸坯产生,有时虽不在同一炉号发生,但是在相邻的工卡号上连续发生。

收集现场加热数据,对数据进行有效分析,发现在轧制探伤不合格的工卡号时间段内,炉气温度超出了工艺要求,所以认为是由于操作不当造成炉气温度过高或由于铸坯在高温区停留时间过长造成。

生产实际中,发生的这两种情况,见图 5、6。

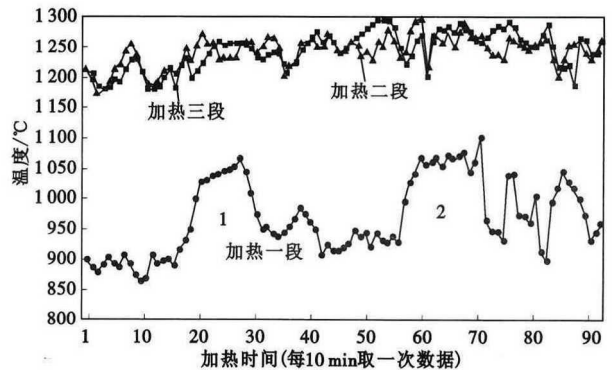


图 5 生产热停型造成 T91 钢 240 mm x 240 mm 铸坯过烧的加热曲线

Fig. 5 Overheating curves of 240 mm x 240 mm casting bloom of steel T91 by hot shut-down in production

图5为生产热停型过烧。从图5中可以看出,加热二段和均热段温度并没有太大变化,反而是加热一段温度变化较大。针对这一现象进行调查,是由于在生产过程中,生产线上出现长时间热停,而操作者并没有相应进行炉温调整,导致炉气温度升高,超出工艺要求(1 260~1 280 ℃)。由于连轧加热炉的特点,加热二段和均热段的热量传输到加热一段,导致加热一段在某一时间段出现温度骤然升高,如图5中方框线1、2所示。这是由于铸坯长时间在高温区停留,导致铸坯出现过烧。

图6为加热温度过高型过烧。从图6中可以看出,加热一段和均热段温度均在工艺要求范围内波动,而加热二段的炉气温度在一段时间内超出工艺要求,导致铸坯过烧。

生产过程中,上述操作不当所生产的工卡号成品材,与探伤出现不合格的工卡号成品材有比较好的对应性。通过上述综合分析,为解决这些质量缺陷提供了准确的信息。

#### 4 试验方法和过程

##### 4.1 轴裂型和缩孔型探伤不合格的预防措施

由于铸坯本身已检验到较严重的中心裂纹,所以调整连铸参数,对铸坯低倍进行质量改进,以减轻或消除连铸坯凝固过程中形成的中心裂纹和缩孔。

根据钢种特性和连铸机设备参数,在保证连铸生产效率不变的前提下,重新设计二次冷却参数,从弱冷角度出发,展开试验工作,并对各段水的分配进行了优化<sup>[5-6]</sup>。

通过试验,240 mm × 240 mm 连铸坯的低倍质量得到提升,中心等轴晶比率由原来的 14%,逐步提高到 25% 以上,中心裂纹级别由原来的 2.0 级降

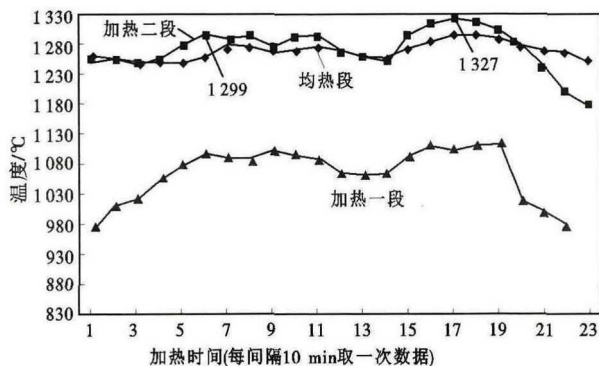


图6 加热温度过高造成 T91 钢 240 mm × 240 mm 铸坯过烧的加热曲线

Fig.6 Overheating curves of 240 mm × 240 mm casting bloom of steel T91 by higher heating temperature

表3 工艺优化前和优化后连铸二冷水水量/(L · min<sup>-1</sup>)  
Table 3 Casting secondary cooling water amount before and after process optimization/(L · min<sup>-1</sup>)

项目	一区	二区	三区
优化前参数	28	31	17
优化后参数	15	18	10

低到 0.5 级以下,消除了中心缩孔,见图 7(a)。

试验炉号的铸坯,严格按工艺规程的加热制度执行,并跟踪标定 Φ90 mm 成品材的低倍情况,未发现轴裂缺陷,中心质量非常好,而且探伤一次性全部合格,见图 7(b)。

试验结果表明,良好的铸坯低倍质量对成品材具有良好的遗传性,工艺参数调整得当,铸坯质量得到稳定提升,降低了铸坯中心裂纹级别、也消除了钢材中心缩孔。

##### 4.2 过烧型中心裂纹解决措施

###### 4.2.1 对于热停型过烧的防止措施

加热目的在于提高钢的塑性,降低变形抗力,改善金属内部组织,便于后续轧制的进行。确定合适的加热制度,既要更好地降低变形抗力和提高塑性,又要避免钢的氧化、脱碳、过热、过烧等缺陷显得尤为重要。T91 钢连铸坯在加热过程中易产生缺陷,甚至裂纹等情况,这是由于其导热系数低,铸坯易受热不均,产生的内应力过大所致。

结合钢种特性和连轧加热炉的特点,通过生产实践,重新摸索出工艺制度见表 4。

当设备或生产造成热停时,预先评估热停时间,按表 4 调节炉温。热停消除后,再升高炉温直到满足工艺要求,方可生产。

工艺改进后,操作者必须避免因操作不当而造成的过热型裂纹缺陷。

###### 4.2.2 对于加热温度过高型的裂纹防止措施

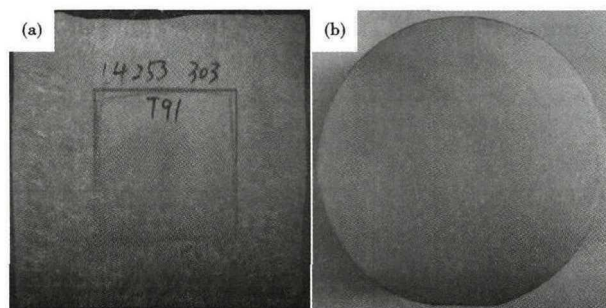


图7 连铸优化工艺 T91 钢 240 mm × 240 mm 连铸坯 (a) 和 Φ90 mm 材 (b) 的低倍组织形貌

Fig.7 Morphology of macrostructure of 240 mm × 240 mm casting bloom (a) and Φ90 mm product (b) of steel T91 after casting process optimization

**表 4 工艺改进后 T91 钢连铸坯加热工艺方案**  
**Table 4 Casting bloom heating process scheme after process improvement**

热停时间/min	比工艺中限温度降低/℃
20 ≤ 时间 < 40	30 ~ 50
40 ≤ 时间 < 120	50 ~ 120
120 ≤ 时间 < 480	< 900

当生产计划不能 100% 执行到位时,连铸坯的红送温度就会不同,高的可以达到 300 ~ 500 ℃,低的时候会 ≤ 100 ℃。通过数据统计,依据铸坯不同红送温度,在保证探伤质量的情况下,尽可能提高生产效率,制定不同的加热制度:

当铸坯红送温度在 ≥ 250 ℃ 时,炉气温度按 1 240 ~ 1 260 ℃ 控制,仪表温度超过 1 260 ℃ 的时间不得超过 5 min;

当铸坯红送温度在 250 ℃ 以下时,炉气温度按 1 250 ~ 1 280 ℃ 控制,仪表温度超过 1 280 ℃ 的时间不得持续超过 5 min。

工艺改进后,连轧材探伤一次不合格率由原来的 5.0% 降低到 0.2% 以下。

### 5 结论

(1) 超声波探伤不合格的原因是钢材存在轴心晶界裂纹、黑心和孔洞缺陷。

(2) 轴心晶间裂纹和缩孔是铸坯在凝固过程形

成的,在加工轧制后无法焊合而产生探伤缺陷。黑心是由于热加工过程中,连铸坯加热过烧造成的。

(3) 通过调整连铸二次冷却参数,中心缩孔得到消除;铸坯中心裂纹级别显著降低,有效控制了钢材的轴心晶界裂纹的产生。

(4) 为防止因操作不当产生过烧,针对不同热停时间、铸坯的不同红送温度,制定相应防止过烧的措施和加热制度。

(5) 通过以上的工艺调整和工艺规范,探伤不合格率由原来的 5.0% 降低到 0.2% 以下。

### 参考文献

[1] 蔡开科,程士富.连续铸钢原理与工艺[M].北京:冶金工业出版社,1994.  
 [2] 蔡开科.连铸坯质量控制[M].北京:冶金工业出版社,2010:346-347.  
 [3] 史宸兴.连铸钢坯质量[M].北京:冶金工业出版社,1980.  
 [4] 许庆太,王文仲.连铸钢坯低倍检验和缺陷图谱[M].北京:中国标准出版社,2009:46-47.  
 [5] 邢国成,李涛,孙大利,等.优化二冷工艺提高 T91 连铸坯中心凝固质量[J].连铸,2018,43:46-49.  
 [6] 刘合萍,田研.SA-335P22 高压锅炉管缺陷分析及改进措施[J].钢铁,2009,44(6):97-100.

邢国成(1972-),男,高级工程师,1995 年东北大学(本科)毕业,炼钢连铸工艺和品种质量研究  
 E-mail: xingguocheng-3@163.com

收稿日期:2018-10-19

## 下 期 要 目

超高压气瓶钢 34CrMo4H 热压缩流变应力行为 .....	原凌云
精轧和吐丝温度对 SCM435 线材氧化铁皮物相结构的影响 .....	王宁涛等
50 t EAF-AOD-LF-10 t 铸锭流程 AISI321 不锈钢含钛夹杂物演变行为 .....	陈瑞梅等
风电齿圈用 F42CrMo4 钢探伤缺陷分析和工艺改进 .....	刘鹏
10 t AOD 冶炼 Incone1690 合金的工艺实践 .....	张如金等
340 L 不锈钢轧制边裂缺陷研究 .....	韩立豪等
预备热处理对亚温淬火-回火的 42CrMo 钢组织和性能的影响 .....	席志伟等
热处理温度对含钼铁素体不锈钢 430FM2 组织及性能的影响 .....	姜方等
316 L/Q370qE 复合板组织演变特征及腐蚀行为 .....	王子蒙等