

## 40Cr 热轧圆钢剪切开裂原因分析及改进工艺

汪春梅

(芜湖新兴铸管有限责任公司监控部, 芜湖 241000)

**摘要** 针对  $\Phi 75$  mm 的 40Cr 圆钢下料剪切出现横向开裂, 采用直读光谱仪、金相显微镜、SEM、EDS 及显微硬度计对试样进行分析。结果表明, 裂纹主要由圆钢中存在夹渣缺陷, 其表面缺陷经砂轮机打磨烧伤形成马氏体的硬化层, 塑性降低, 在剪切力作用下最终导致开裂。通过工艺改进石灰量由 2.5 kg/t 调整为 4.2 kg/t, 化渣剂由 0.45 kg/t 调整为 0.85 kg/t, Ca/Al 比由 0.05 调整为 0.07, 水口浸入深度由 95 mm 调整为 105 mm, 保护渣碱度由 0.78 调整为 0.86、粘度由 0.34 pa·s 调整为 0.45 pa·s, 减少连铸拉速波动等, 有效解决了铸坯夹渣缺陷, 轧材表面缺陷率由 0.35% 降低至 0.08%, 保证了圆钢的产品质量。

**关键词** 40Cr 钢 横向开裂 夹渣 表层硬化 保护渣

## Analysis on Causes of Shear Cracking of 40Cr Hot Rolled Round Steel and Process Improvement

Wang Chunmei

(Monitoring Department, Wuhu Xinxing Ductile Pipes Co Ltd, Wuhu 241000)

**Abstract** In view of the transverse cracking of  $\Phi 75$  mm 40Cr round steel, the samples are analyzed by direct reading spectrometer, metallographic microscope, SEM, EDS and microhardness. The results show that the cracks are mainly caused by slag inclusion in steel, and the surface defects are formed by burned in grinding to form a hardened layer of martensite, which reduces plasticity and eventually leads to cracking under the action of shearing force. Through process improvement, the amount of lime is adjusted from 2.5 kg/t to 4.2 kg/t, the slagging agent is adjusted from 0.45 kg/t to 0.85 kg/t, the Ca/Al ratio is adjusted from 0.05 to 0.07, and the nozzle penetration depth is adjusted from 95 mm to 105 mm, mold flux alkalinity is adjusted from 0.78 to 0.86, viscosity is adjusted from 0.34 pa·s to 0.45 pa·s, reducing continuous casting speed fluctuations, etc., it is effectively to avoid the defects of casting slag inclusion, and the surface defect rate of rolling materials decreases from 0.35% to 0.08%, ensuring the quality of round steel products.

**Material Index** 40Cr Steel, Transverse Cracking, Slag, Surface Hardening, Protecting Slag

40Cr 钢是 GB/T3077-2015 标准中常用的一种铬系合金结构钢, 因其具有较好的加工和使用性能, 被广泛应用于机械制造业<sup>[1]</sup>。钢厂供应的  $\Phi 75$  mm 规格热轧 40Cr 圆钢供用户加工冷剪下料时, 有时出现开裂而无法继续加工导致零件报废, 造成较大的损失。

针对上述  $\Phi 75$  mm 40Cr 圆钢开裂的缺陷试样, 通过宏观特征、金相显微组织、SEM、EDS 及显微硬度系统分析, 找出了导致开裂缺陷的主要原因, 并采取相应的控制措施后, 消除了 40Cr 圆钢开裂现象, 产品质量改善明显。

### 1 生产工艺及检验方法

#### 1.1 生产工艺

钢厂生产  $\Phi 75$  mm 40Cr 圆钢的工艺流程为: 120 t 转炉-120 t LF 精炼- $\Phi 300$  mm 圆坯连

铸-加热炉加热-轧机-精整-检验-入库, 其对应的连铸主要技术参数为表 1 所示。

#### 1.2 检验方法

裂纹试样经过机械加工和金相研磨抛光制样, 经 4% 硝酸酒精溶液腐蚀, 在 OLYMPUS-BX51M 型金相显微镜观测其显微组织形貌; 采用 iSpark 8860 型热电 ARL 直读光谱仪进行化学成分分析、采用 HVT-1000A 型显微硬度计进行了维氏硬度的检测分析、利用 EVOMA10 扫描电镜和能谱分析仪对断口样进行微观形貌和微区成分分析。

### 2 理化检验分析

#### 2.1 宏观特征

裂纹发生在客户(工程汽配零件厂)采用冷态

表 1 连铸主要技术参数

Table 1 Main technical parameters for casting

弧型半径/ mm	浇铸断面/ mm	拉速/ ( $m \cdot min^{-1}$ )	结晶器长度/ mm	铸机 流数	冷却 方式	浇铸方式	冶金长度/ m
14 000	$\Phi 300$	0.70~0.75	800	6 机 6 流	气雾冷却	浸入式水口保护浇铸	33.55

直接用液压剪剪断下料过程中,在剪口处附近发现横截面开裂,开裂外表面的磨削处颜色发蓝,呈典型的砂轮磨削烧伤特征<sup>[2]</sup>,观察断口上放射状条纹的走向,断裂源起始于钢材最外表面的擦伤处的发蓝部位,如图 1 所示。磨削产生的热量积累可使磨削面温度高达 1 000 ℃ 左右,引起表层显微组织发生变化,导致零件表层淬火或回火,甚至产生磨削裂纹<sup>[3]</sup>,将严重影响钢材的力学性能和使用寿命。

### 2.2 化学成分分析

从断裂圆钢上截取试样,采用直读光谱仪进行化学成分分析。分析结果如表 2 所示,其各元素含量均符合 GB/T3077-2015《合金结构钢》40Cr 钢材成分要求。

### 2.3 金相组织分析

直接磨制试样断面,进行金相显微分析如图 2 所示,试样裂纹源处及附近表面擦伤处已发生组织变形且呈流线状,且无铁素体和珠光体形貌特征,经局部显微放大类似于马氏体位相的淬硬性异常组织,厚度为 254.81 μm,且表层存在微细直条裂纹如图 2(a~b),表明磨削过程已发生明显的组织相变。而断裂源附近的其它周边正常外表面组织存在轻微脱碳,组织为正常的铁素体及珠光体如图 2(c)所示。通过显微组织形貌对比,初步表明该断裂源附近的异常组织为磨削过程产生,异常组织是否加剧了圆钢开裂还待进一步分析。

### 2.4 显微硬度分析

针对 40Cr 钢表层裂纹源及附近的金相检验出现流线状异常组织的现象,采用 HVT-1000A 显微硬度计对该裂纹样的异常组织区域、正常组织区域以及未开裂的正常试样,分别进行显微硬度测定及对比分析,测量数据如表 3 所示。

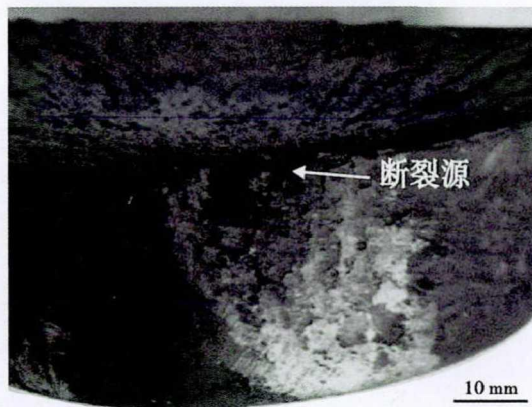


图 1 Φ75 mm 40Cr 钢材断口的宏观开裂形貌  
Fig. 1 Macroscopic crack morphology of Φ75 mm 40Cr steel bar fracture

表 2 40Cr 钢的化学成分 / %  
Table 2 Chemical composition of 40Cr steel / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo
标准范围	0.37 ~ 0.44	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	≤ 0.030	≤ 0.030	0.80 ~ 1.10	≤ 0.30	≤ 0.30	≤ 0.10
实测值	0.43	0.24	0.68	0.014	0.003	0.97	0.02	0.016	0.011

通过以上各区域测定显微硬度,同一裂纹样边缘异常组织处区域平均显微硬度值较其它边缘正常组织区域的 HV1 硬度值高出 486,而该裂纹样内部正常组织的平均 HV1 显微硬度值 214,与检测正常试样内部组织显微硬度基本一致。依据表层硬度值结果,可确定该裂纹源附近的表面异常组织出现了马氏体位相的硬化层,经宏观分析及对精整工序修磨记录进行调查,该表面硬化层是由于该批圆钢本身表面存在裂纹缺陷,经砂轮机打磨烧伤引起的表面硬化层,这种硬化层塑性极差,在剪切外力作用下会形成有规律的细裂纹,当裂纹扩展到一定深度时导致断裂。

### 2.5 扫描电镜及能谱分析

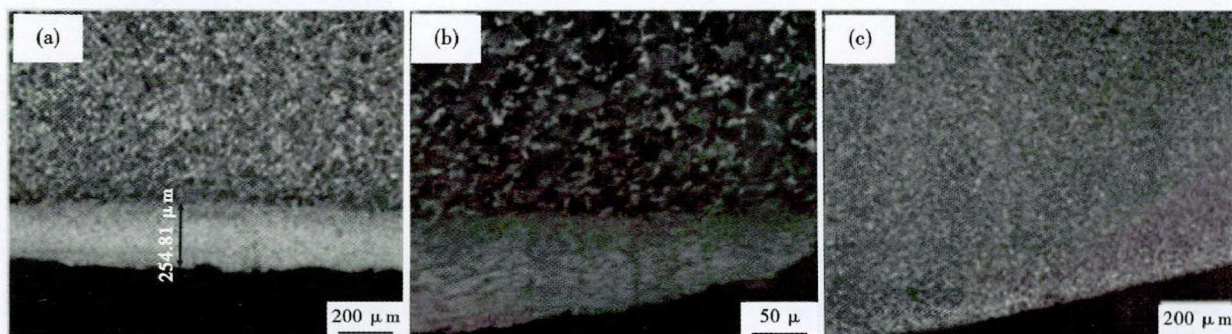


图 2 裂纹试样横截面区域的显微组织:(a) 表面异常组织厚度;(b) 异常组织处细裂纹;(c) 正常表面组织

Fig. 2 Microscopic morphology of cross-sectional area of cracked sample: (a) thickness of surface abnormal structure; (b) fine crack at abnormal structure; (c) normal surface structure

表 3 40Cr 钢在不同区域测定的维氏硬度值

Table 3 Vickers hardness values measured at different regions of steel 40Cr

区域	金相组织	显微硬度 (HV1) 值	平均显微硬度 (HV1) 值
裂纹试样边缘异常组织	流线状异常相	740.8, 738, 736, 730	736
裂纹试样边缘正常组织	铁素体 + 珠光体	248, 250, 249, 252	250
裂纹试样内部正常组织	铁素体 + 珠光体	215, 212, 211, 218	214
正常试样内部组织	铁素体 + 珠光体	212, 214, 210, 215	213

2.5.1 扫描电镜分析

用扫描电镜观察该裂纹样的断口形貌, 该试样的正常外表面处的断口特征为典型的韧窝形貌见图 3(a), 为塑性断口形貌; 而断裂源处的断口面平整, 且靠外表面处的颜色较深, 且分布有白色的细小颗粒物如图 3(b), 对断裂源颜色较深区域进行进一步放大后显微观察, 其断口形貌为典型的准解离断口以及大量白色的夹杂物如图 3(c); 且其断裂源延伸的扩展区微观形貌为具有河流花样的解理断口, 也分布少量夹杂物, 见图 3(d)。可见从电镜分析, 准

解离及解离断口为典型的脆性断口特征, 增加了圆钢受外应力作用开裂的倾向<sup>[4]</sup>, 白色颗粒物需进一步借助能谱进行表征分析。

2.5.2 能谱分析

对表面断裂源处颜色较深区域的白色颗粒物进行能谱(EDS)分析如图 4 所示, 结果表明主要含 Ca、Si、Al、O 等元素, 说明脱氧产物未能充分地上浮去除, 形成了典型的钙铝硅酸盐 (CaO · SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · SiO<sub>2</sub>) 大颗粒夹杂物。同时, 还含有一定量的 Na、Mg、K 元素, 说明结晶器内液面波动过程中也造成了保护渣的卷入。

3 结果分析与讨论

基于上述表征结果, 热轧圆钢断口存在的夹渣缺陷, 是由于当夹渣残留在铸坯表面及皮下, 缺陷铸坯在后续轧制过程中夹渣遗传扩展至圆钢皮下及表面所致, 经调查轧钢厂精整工序的修磨记录, 该批次确因圆钢表面存在夹渣缺陷, 用砂轮打磨一定深度至表面缺陷消失后判定合格入库。在圆钢表面因打磨过快导致磨削烧伤, 在磨削淬硬过程中, 工件的表面与砂轮接触, 受到磨削区域内热源的直接作用, 温

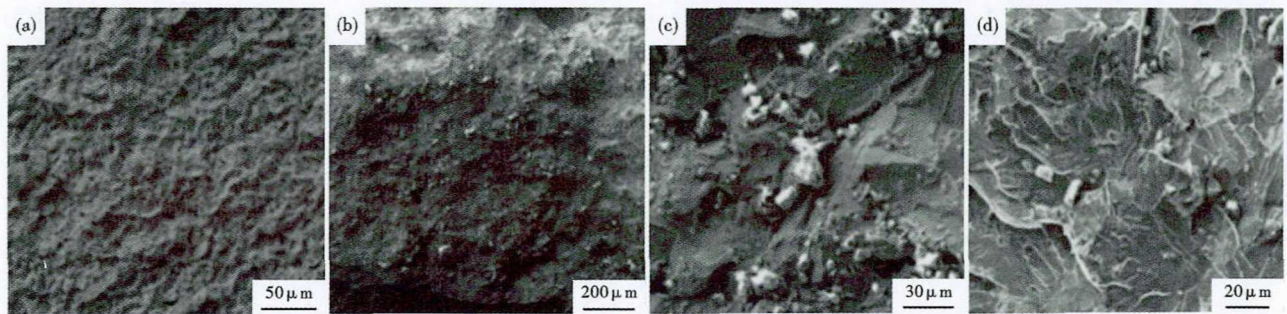


图 3 Φ75 mm 40Cr 钢断口处微观形貌: (a) 外表面韧性断裂; (b) 断裂源附近; (c) 断裂源扩展区解理断口; (d) 断裂源附近准解理断口  
Fig. 3 Microscopic morphology of round steel fracture of Φ75 mm 40Cr steel: (a) surface tough fracture; (b) near fracture source; (c) fracture source extension area cleavage fracture; (d) fracture source extension area quasi-cleavage fracture

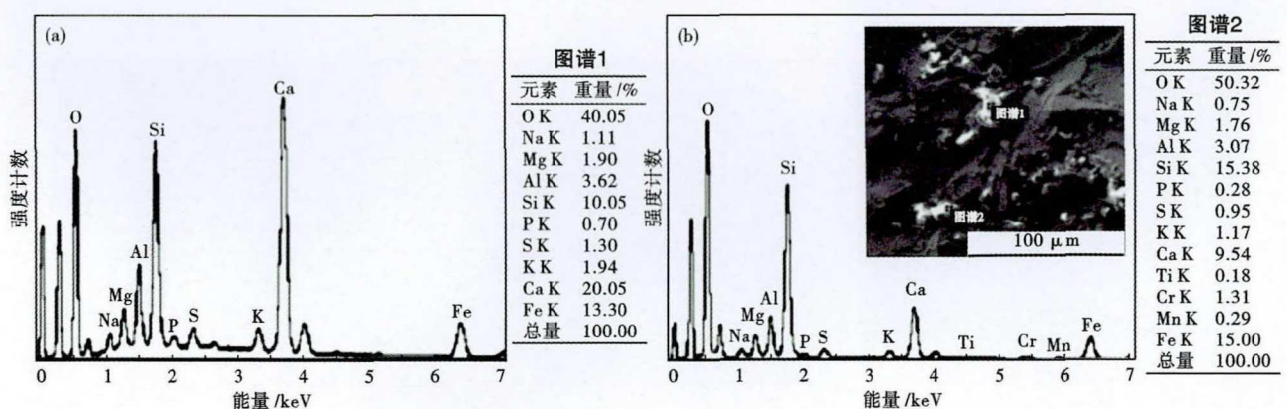


图 4 断裂源附近区域 SEM 形貌及 EDS 分析  
Fig. 4 SEM morphology and EDS analysis of area near the fracture source

度迅速超过相变临界温度使材料组织完全转化为奥氏体。随着砂轮的离开,热源迅速消失,由于材料本身优良的导热性能以及空气的冷却效果,工件表面已经奥氏体化的部分又短时间内经历了一次快速冷却的过程,于是奥氏体组织发生马氏体转变,因此在工件表面最终获得了一定厚度的马氏体组织<sup>[5]</sup>。由于表面淬硬层塑性差,在剪切外力作用下,最终导致圆钢横向开裂。由此可见,夹渣缺陷是导致圆钢开裂的真正原因。

#### 4 工艺控制措施及效果

##### 4.1 提高钢水洁净度

研究表明<sup>[6]</sup>,为促进钢液脱氧产物的充分上

浮,通过优化冶炼工艺制度,可提高钢液洁净度。降低出钢氧势,提高转炉出钢终点碳的一倒命中率;为强化精炼工序的脱氧及脱氧产物的上浮,采取增加造渣白灰、化渣剂用量、优化钙铝比、酸溶铝与全铝比值、延长白渣的保持时间和精炼后期的弱吹氩搅拌时间等措施,以利于精炼过程快速化渣、促进夹杂物变性及充分上浮,避免水口絮流卷渣;优化连铸浸入式水口采用整体式水口进行严格密封,防止钢水的二次氧化。其相应工序优化前后的工艺参数对比如表4所示;且工艺优化前后的夹杂物有了一定的改善,有效避免大颗粒夹杂物未能上浮引起的卷渣缺陷,其优化前后夹杂物对应的控制水平如表5所

表4 冶炼工艺优化前后的工艺参数  
Table 4 Process parameters before and after steelmaking process optimization

工艺	终点碳一倒命中率/ %	造渣石灰量/ (kg·t <sup>-1</sup> )	化渣剂/ (kg·t <sup>-1</sup> )	Ca/Al	Als/Al	软吹氩时间/ (min·炉 <sup>-1</sup> )	浸入式水口 类型
优化前	±75%	2.5	0.45	0.05	-	≥10	分体式水口
优化后	±95%	4.2	0.85	0.07	≥0.85	15~20	整体式水口

表5 工艺优化前后的夹杂物控制/级  
Table 5 Inclusion control before and after process optimization /rating

工艺	A		B		C		D		Ds
	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗	
优化前	0~1.0	0~0.5	0.5~1.5	0.5~1.0	0.5~1.0	0~0.5	0~1.5	0~1.5	0~1.0
优化后	0~0.5	0	0	0~0.5	0~0.5	0	0~0.5	0~0.5	0~0.5

示,通过优化后夹杂物级别降低,且整体稳定。

##### 4.2 结晶器流场优化

###### 4.2.1 减少连铸拉速波动

有研究认为,拉速波动是影响夹渣的重要原因,在所有因夹渣、翘皮缺陷降判的钢材中,因拉速波动占比近14%。这是因为,当拉速瞬时波动≥0.2 m/min时,结晶器液面波动较大,此时较易产生翘皮类缺陷<sup>[7]</sup>。同时,随着拉速的增加,液面钢液流速相应增大,回流强度增强,漩涡强度变大,促使剪切卷渣和乳化卷渣<sup>[8]</sup>。

###### 4.2.2 合理的水口浸入深度

研究表明<sup>[9-10]</sup>,适当增加水口浸入深度,可以增大上升流股到达液面的行程,让上升流股有较大的空间扩张来减小液面流速,从而减少表面卷渣的发生。

结合钢厂实际工艺设备,为减少拉速波动制定恒拉速保障措施,要求每炉次恒拉速浇铸,拉速瞬时波动控制≤0.2 m/min;建立钢包上连铸平台温度考核制度及连铸恒拉速浇铸指标奖惩规定,同时,开展水口浸入深度的攻关试验,得出最佳工艺参数由95 mm调整至105 mm。通过以上两点措施达到优化结晶器流场,有效地降低了结晶器液面的波动频次,卷渣发生率得到了明显降低。

##### 4.3 保护渣成分优化

保护渣对夹渣缺陷的影响主要体现在表面张力、黏度、渣层厚度均匀性三个方面<sup>[11]</sup>,在相同钢种和浇注温度下,提高碱度,增加了钢渣界面张力,有利于增大临界剪切力,降低剪切卷渣的风险;提高保护渣黏度,可提高结晶器内卷渣发生的钢液临界流

表6 优化前后的保护渣成分  
Table 6 Ingredient of mold powder before and after optimization

工艺	渣成分 /%						碱度(R)	1 300 °C 粘度(η)/(Pa·s)	熔点 /°C
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	F			
优化前	31.51	4.1	24.58	1.12	8.78	7.00	0.78	0.34	1 088
优化后	31.41	2.82	27.01	2.63	8.62	3.81	0.86	0.45	1 084

速,从而减低卷渣的几率。基于此,对连铸保护渣成分进行优化如表 6 所示。

#### 4.4 改进效果

通过提高钢水洁净度、减少连铸拉速波动、控制合理的水口浸入深度、优化保护渣成分等措施,生产的 40Cr 圆钢质量得到了稳步提升,2020 年 2 月~2020 年 7 月共生产 367 批 40Cr 圆钢,因夹渣缺陷产生的质量异议为零次,经统计该圆钢表面缺陷率由优化前的 0.35% 降低至优化后的 0.08%,圆钢产品质量得到有效控制。

### 5 结论

(1)40Cr 钢中的夹渣缺陷主要为脱氧不充分形成的钙铝硅酸盐以及结晶器内卷入的保护渣等形成

的复合氧化物。

(2)夹渣缺陷是导致轧材 40Cr 圆钢开裂的真正原因,其表面缺陷经打磨烧伤产生马氏体相硬化层,受剪切力作用最终导致圆钢横向开裂。

(3)为降低 40Cr 连铸圆坯卷渣缺陷而优化的工艺参数调整为:造渣石灰量为 4.2 kg/t,化渣剂为 0.85 kg/t,Ca/Al 比为 0.07,水口浸入深度为 105 mm,保护渣碱度 0.86、粘度 0.45 pa·s,减少连铸拉速波动,瞬时波动≤0.2 m/min。

(4)夹渣缺陷控制措施实施后,40Cr 圆钢表面缺陷率由优化前的 0.35% 降低至优化后的 0.08%,消除了因夹渣缺陷产生的质量异议。

#### 参考文献

[1] 黄翠环,秦树超,郭明仪,等. 钻头用含硫 XGML40Cr 钢的开发及其切削性能的改善[J]. 特殊钢,2017,38(4):60-63.

[2] 焦丽,赵英军,徐向阳. 机械加工零件表面烧伤的金相检验[J]. 热处理,2019,34(4):39-43.

[3] 朱正德. 工件磨削烧伤及其检测、评定方法简析[J]. 柴油机设计与制造,2013,19(2):36-39.

[4] 龚桂仙,陈士华,浦绍康,等. 钢产品缺陷与失效实例分析图谱[M]. 北京:冶金工业出版社,2012:162-164.

[5] 马占龙. 40Cr 调质钢外圆磨削淬硬试验研究[J]. 制造技术与机床,2011(11):107-110.

[6] 曹立国,魏雪晴,丁秀中,等. 优化 55 t LD-60 t LF-CC 工艺提高钢的洁净度[J]. 特殊钢,2006,27(1):48-50.

[7] 王帅,赵建平,冯帅,等. 热轧板夹渣缺陷成因及控制[J]. 河北冶金,2019(12):39-43.

[8] 陈建梁,梅峰,胡娇. 稳态浇铸下低碳铝硅镇静钢卷渣产生

的原因和控制对策[J]. 炼钢,2020,36(3):51-54.

[9] 雷洪,许海虹,朱苗勇,等. 高速连铸结晶器内卷渣机理及其控制研究[J]. 钢铁,1999,34(8):3-5.

[10] 吴颖东,刘中秋,全明杰,等. 连铸结晶器内钢/渣界面波动及卷渣行为的实验研究[J]. 材料与冶金学报,2020,19(1):13-19.

[11] 张俊粉,胡心光,康毅,等. 82B 钢连铸坯夹渣成因与控制[J]. 河北冶金,2014(10):49-52.

汪春梅(1985-),女,硕士(2012 年燕山大学),工程师,2009 年沈阳化工学院(本科)毕业,金属材料检验分析和连铸工艺研究。E-mail:mei\_zi1001@126.com

收稿日期:2020-10-21

## 下 期 要 目

GH2907 合金 VIM + VAR 3 t 钢锭 1 190 ℃ 均质化过程中 Nb 和 Si 的扩散行为 .....	王志刚等
Nb 和 Ti 对 444 超纯铁素体不锈钢高温氧化行为的影响 .....	段秀峰等
CaO-SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 系保护渣加 Li <sub>2</sub> O 对高铝钢 20Mn23AlV 连铸板坯表面纵裂纹的影响 .....	李晓军等
GCr15 轴承钢 250 mm × 280 mm 铸坯至 138 mm × 150 mm 坯粗轧数值模拟及工艺优化 .....	苟复钢等
油缸用 25Mn 钢 100 t EAF-LF-VD-软吹氩-CC 流程 B 类夹杂物的控制 .....	肖鸿光
冷拔应变对 304H 钢丝扭转性能的影响 .....	彭科等
退火温度对铁素体不锈钢 Y0Cr17SiS 组织和性能的影响 .....	严道聪等
120 t BOF-LF-VD-Φ300 mm CC-CR 流程 42CrMoA 钢轧材带状组织形成分析及改善措施 .....	介瑞华
Mn 含量对低碳冷镦钢 SWRCH22A 组织和性能的影响 .....	王冬晨等