

## 喷吹微粒脱磷法在130 t电弧炉炼钢中的应用

陈军召<sup>1</sup>,张彦辉<sup>2</sup>,谈岸童<sup>2</sup>,李立凯<sup>3</sup>,康建光<sup>2</sup>

(1 中天钢铁集团有限公司,常州 213000;2 新三洲特钢有限公司,无锡 214181;3 东方特钢有限公司,常州 213100)

**摘要:** 在130 t电弧炉上进行了复合喷吹剂喷吹微粒脱磷的实践应用。设计了电弧炉氧化期脱磷渣系的组成,炉渣碱度控制在2.2~2.8,氧化铁含量控制在15%~20%。并以氮气为载体喷吹按照一定比例配制的碳粉(15%~20%)、CaO粉(40%~60%)、MgO粉(25%~30%)、CaC粉(5%~10%)的复合粉剂。40Cr、45钢、20CrMnTi和60Si2Mn等钢采用喷吹复合喷吹剂冶炼工艺后,加快了熔剂的反应面积,提高了成渣速度,各项生产指标得到了改善,其中吨钢电耗降低90 kWh/t,吨钢钢铁料消耗降低9.3 kg/t,吨钢熔剂消耗减少4.8 kg/t,生产率提高5%~6%,吨钢综合生产成本降低了25元/t。

**关键词:** 电弧炉;脱磷;喷吹;复合粉剂;成本

## Application of Particle Injection Dephosphorization Process on Steelmaking of 130 t Electric Arc Furnace

Chen Junzhao<sup>1</sup>, Zhang Yanhui<sup>2</sup>, Tan Antong<sup>2</sup>, Li Likai<sup>3</sup>, Kang Jianguang<sup>2</sup>  
(1 Zenith Steel Group Co., Ltd., Changzhou, 213000; 2 Xinsanzhou Special Steel Co., Ltd., WuXi 214181; 3 Eastan Special Steel Co., Ltd., ChangZhou 213100)

**Abstract:** The practical application of particle dephosphorization with compound injection agent on 130 t electric arc furnace is carried out. The composition of dephosphorization slag system in the oxidation period of electric furnace is designed, basicity of slag is controlled between 2.2-2.8, and the content of iron oxide is controlled between 15%-20%. The composite powder of carbon powder (15%-20%), CaO powder (40%-60%), MgO powder (25%-30%) and CaC powder (5%-10%) prepared in a certain proportion is injected with nitrogen as the carrier. After adopting the smelting process of injection compound injection agent on EAF steelmaking of 40Cr, 0.45C steel, 20CrMnTi and 60Si2Mn etc alloy steels, the reaction area of flux is accelerated, the slag forming speed is improved, and various production indexes are improved. Among them, the power consumption per ton steel is reduced by 90 kWh/t, the steel material consumption per ton steel is reduced by 9.3 kg/t, the flux consumption per ton steel is reduced by 4.8 kg/t, the productivity is increased by 5%-6%, and the comprehensive production cost per ton of steel is reduced by 25 yuan/t.

**Key Words:** Electric Arc Furnace; Dephosphorization; Injection; Composite Powder; Cost

目前,炼钢工艺普遍使用上料仓将“块料”和“批料”加入到熔池钢水中,使用“块料”的缺点是较长的熔化时间,较低的反应效率和较低的物料有效利用率,在一定程度上已经不能适应冶金行业绿色、高效、低耗生产的实际需要。微粒子冶金工艺以现代冶金广泛采用的气-固喷射技术为技术基础,即利用氮气、氩气、压缩空气为载体,通过气-固喷吹系统,向冶金熔池内喷入冶炼所需的特定粉剂进行冶炼的一种冶金方法<sup>[1-3]</sup>。气-固喷射技术改变了传统的以“块料”和“批料”加入冶金物料的方法,气-粉会以高速射流的形式射入熔池内部,既能够高效供给冶金反应物质,又可以大幅度提高熔池搅拌强度,

为炉内冶金反应创造良好的热力学和动力学条件<sup>[4-5]</sup>。

目前电弧炉炼钢普遍采用炉壁/炉门碳粉喷吹、炉壁/炉门氧枪供氧的冶炼工艺,通过喷枪向熔池内的钢水喷吹冶炼所需要的单一粉剂(如C粉、CaO粉、MgO粉、Ca-Si粉等),通过这种方式来加速钢液脱磷、脱碳的速度,以提高钢水质量和炼钢效率<sup>[6-8]</sup>。气-固喷射技术在炼钢领域的作用被越来越多的研究人员重视,研究人员对气-固喷射技术进行了大量研究,但大都集中在C粉、CaO粉、Ca-Si粉等单一粉剂的气-固喷射技术冶金应用效果方面<sup>[9-12]</sup>。本文提出了电弧炉冶炼过程根据需要使用“粉剂”替代

“块料”和“批料”,复合粉剂替代单一粉剂喷吹的喷吹冶炼工艺(复合粉剂根据不同的需要将C粉、CaO粉、MgO粉、SiC粉、稀土粉等按照一定的配比制成成品),在电弧炉炼钢生产效率、成本控制、电弧炉炉衬维护等方面取得了较好的效果。

### 1 喷吹微粒脱磷在电弧炉炼钢中应用的可行性分析

气体夹带一定比例的熔剂颗粒喷入熔池中,能够增大熔剂与熔融金属的接触面积,有利于提高熔剂的熔化速度和成渣速度,促进脱碳、脱磷反应的快速进行。在电弧炉炼钢的冶炼过程中,由于钢液搅拌强度低,扩散传质速度较慢,导致冶金反应速度较慢,使得电弧炉炼钢需要的时间更长。采用喷射冶金技术,把碳粉、熔剂、脱氧剂等粉末状物质直接喷入钢液,能够加快界面传质速度,增加熔剂和钢液的接触面积,加快冶金反应速度,以解决限制电弧炉冶炼速度的关键环节,从而大幅提高冶炼效率,缩短冶炼时间。

在电弧炉冶炼过程中,用气体作载体,向熔池内喷吹粉料,粉料的比表面积可以达到500~2000 cm<sup>2</sup>/g,当粉料喷入熔融金属后,粉料与熔融金属的接触面积很大,粉剂熔化速度更快,并且能够快速与熔融金属发生反应。并且喷粉罐内的粉料在静压力和松动器产生的局部流态化的作用下,随着载流气体喷入熔池,气体的温度将从25℃迅速提高到1500℃以上,气泡体积也将随着温度的上升而膨胀,而随着气泡上浮钢水静压力减小,气泡也会逐渐增大。因此,粉剂出喷口必须具有足够的动量使得气泡能够突破钢液和气泡之间的界面张力,保证粉剂能够直接和钢液接触。同时,为了保证炉渣具备足够的脱磷能力,需要提前确定炉渣的成分,按照一定的比例将熔剂粉末喷入熔池内,快速形成具备较高脱磷能力的炉渣,达到快速冶炼的目的。

### 2 电弧炉氧化期脱磷的热力学分析

脱磷反应的总反应方程式如式(1)所示:



从热力学角度来看,磷元素在钢渣和钢水间的分配主要与3个因素相关,包括:炉渣的氧化性,炉渣碱度和脱磷温度,本文使用的炉渣碱度为二元碱度,如式(2)所示。Healy归纳了磷分配比和钢水温度、炉渣成分之间的关系,如式(3)所示:

$$R = \frac{(\%CaO)}{(\%SiO_2)} \quad (2)$$

$$\lg \frac{(\%P)}{[\%P]} = \frac{22350}{T} - 16 + 0.08(\%CaO) + 2.51 \lg (\%T.Fe) \quad (3)$$

炉渣碱度、炉渣氧化性对于脱磷的影响分别如图1和图2所示,随着碱度的增加,磷分配比呈现非常明显的增加趋势,并且在低碱度时尤为明显。然而炉渣碱度过高,也会带来渣量大,易喷溅,铁损高等问题。国内电炉厂普遍在氧化期将炉渣碱度(R)控制在2.2~2.8便能够取得较好的脱磷效果。高氧化性能够提高脱磷效果,然而当FeO含量高于某个临界值时,再增加FeO含量,脱磷效率增加不明显甚至会下降,这是由于渣中较高含量的FeO将稀释渣中的CaO浓度,降低CaO的脱磷作用。通常将渣中氧化铁含量控制在15%~20%就可以充分满足脱磷的要求。

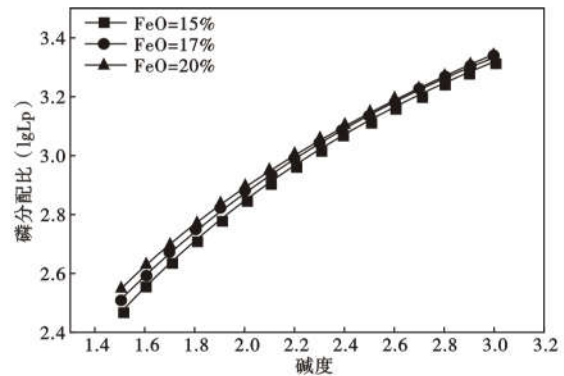


图1 炉渣碱度对电弧炉脱磷的影响

Fig. 1 Effect of slag basicity on EAF dephosphorization

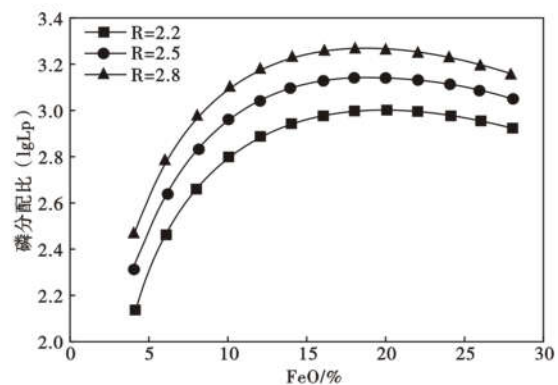


图2 炉渣氧化铁含量对电弧炉脱磷的影响

Fig. 2 Effect of content of iron oxide in slag on EAF dephosphorization

脱磷反应是一个放热反应,低温有利于脱磷反应的进行,电弧炉经过熔化期后熔池钢水温度普遍在1500℃以上,并且在实际生产条件下要考虑到炉渣必须具备一定的流动性,因此,通常将温度控制在

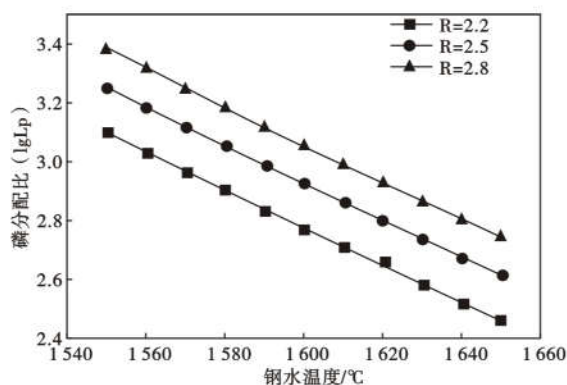


图3 电弧炉钢水温度对脱磷的影响

Fig.3 Effect of EAF liquid temperature on dephosphorization

1 550 ~ 1 580 °C, 此时脱磷反应能够同时具备较好的动力学和热力学条件, 有利于脱磷。

根据上述理论研究设计了炉渣成分, 碱度在 2.2 ~ 2.8, 氧化铁含量控制在 15% ~ 20%。并根据碱度要求将需要的粉状氧化钙通过喷吹加入到熔池中, 喷吹粉状氧化钙能够加大氧化钙与钢水的接触面积, 促进熔剂熔化, 加快成渣速度, 提高脱磷效果, 并且能够提高熔剂利用率。复合喷吹剂中除了氧化钙还有氧化镁和碳粉, 为避免初渣对炉衬的侵蚀需要保证初渣中的 MgO 含量; 碳粉可以促进泡沫渣的形成, 发挥氧化初期低温对脱磷的优势, 加快脱磷速度。

### 3 喷吹微粒脱磷在电弧炉冶炼中的应用实践

#### 3.1 电弧炉主要设备及工艺流程

由于电弧炉炼钢普遍采用留渣操作, 在冶炼熔化期炉渣的氧化性高, 但是碱度较低, 难以造好泡沫渣, 并且会降低炉衬和炉壁水冷板的寿命, 对电弧炉冶炼效果产生不利影响。同时在电弧炉炼钢生产过程中热区部分的耐材侵蚀非常快, 经常会导致炉壳发红、水冷板漏水, 影响生产节奏和电炉安全。利用复合喷吹剂的粉末材料特性, 可以大幅缩短电炉炼钢的成渣时间, 达到电弧炉炼钢快速成渣的目的, 同时在冶炼前期迅速提高渣中的 MgO 含量, 减少炉渣对炉衬的侵蚀。

在 130 t 电弧炉上开展复合喷吹剂喷吹冶炼实验, 电弧炉的主要设计参数见表 1 所示。

在喷粉过程中粉气比需要合理控制, 如果粉气比

过高容易导致喷嘴阻塞, 粉气比过低会降低冶炼效率。在电弧炉复合喷吹剂喷吹冶炼过程中, 将粉气比控制为 55 kg/kg。粉剂粒径对于冶炼效果同样具有重要影响, 电弧炉喷吹碳粉的粒度通常控制在 1 ~ 3 mm, 由于熔剂粉末难以均匀达到碳粉那么小的粒度, 因此, 将复合粉剂粒径控制在 1 ~ 5 mm, 以保证生产的顺利进行。在前期喷入的复合喷吹剂中配加较高比例的 MgO, 其目的是在前期可以显著提高炉渣中的 MgO 含量, 最终炉渣 MgO 含量可以达到 7% ~ 12%, 炉渣碱度控制在 2.2 左右, 由于前期渣中 MgO 含量较高能够起到保护炉衬、提高炉衬寿命的作用。复合喷吹剂中还含有一定量的 C 粉, 可以起到发泡剂的作用, 能够获得理想的泡沫渣成分, 从而加速泡沫渣的形成, 达到节能降耗的目的。复合喷吹剂的成分见表 2 所示。

表 1 电弧炉技术参数

Table 1 Technical parameters of EAF

项目	设计参数
公称容量/t	130
电极直径/mm	710
炉壳直径/mm	6900
熔池深度/mm	2200
电极消耗/(kg · t <sup>-1</sup> )	0.81
石灰消耗/(kg · t <sup>-1</sup> )	35
镁球消耗/(kg · t <sup>-1</sup> )	8.8
碳粉消耗/(kg · t <sup>-1</sup> )	18
喷枪型号	燃氧复合枪

表 2 复合喷吹剂的组成/%

Table 2 Ingredient of compound injection agent/%

CaO	MgO	C	CaC
40 ~ 60	25 ~ 30	15 ~ 20	5 ~ 10

#### 3.2 实践应用效果

在 130 t 电弧炉上以氮气为载体喷吹按照一定比例配制的碳粉、CaO 粉、MgO 粉、CaC 粉的复合粉剂, 以起到快速造渣, 强化冶炼, 保护炉衬的作用。130 t 电弧炉冶炼的钢种主要为 40Cr、45 钢、20CrMnTi、60Si2Mn 等。表 3 为喷粉工艺实施前后的钢水成分, 喷粉工艺能够有效提高脱磷效率, 终点钢水磷含量与原工艺相比有了明显的降低。表 4 为喷粉工艺实施前后的熔剂消耗, 喷粉工艺能够有效减少熔剂消耗

表 3 铁水和(原工艺和喷粉工艺)钢水成分/%

Table 3 Composition of hot metal and (original process and powder spraying process) molten steel/%

项目	C	Si	Mn	P	S
铁水	4.50 ~ 4.80	0.30 ~ 0.60	0.10 ~ 0.12	0.13 ~ 0.16	0.03 ~ 0.05
钢水(原工艺)	0.20 ~ 0.30	-	0.10 ~ 0.15	0.015 ~ 0.02	≤ 0.035
钢水(喷粉工艺)	0.20 ~ 0.30	-	0.15 ~ 0.20	≤ 0.013	≤ 0.03

表 4 原工艺和喷粉工艺吨钢物料消耗

Table 4 Material consumption per ton steel with original process and powder injection process

工艺	石灰/(kg·t <sup>-1</sup> )	镁球/(kg·t <sup>-1</sup> )
原工艺	35.05	8.78
喷粉工艺	32.75	7.05

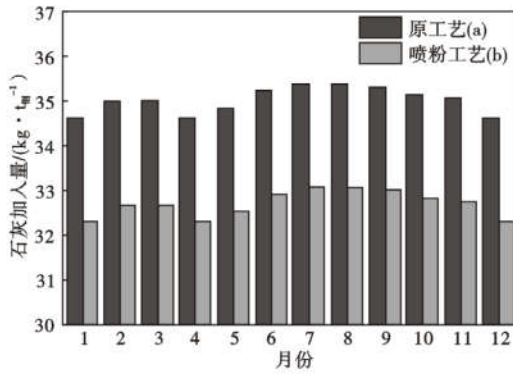


图 4 原工艺(a)和喷粉工艺(b)的石灰消耗

Fig. 4 Lime consumption of original process (a) and powder spraying process (b)

量,石灰和镁球的消耗量与原工艺相比均有所降低。

经过一段时间的稳定生产后,对喷吹复合喷吹剂冶炼前后的生产指标进行了对比,采用喷吹复合喷吹剂工艺前,130 t 电弧炉采用加入块料的方式进行造渣。图 4 为喷吹复合喷吹剂冶炼前后石灰消耗量的对比,由图 4 可知,采用喷吹复合喷吹剂冶炼工艺后,由于粉剂与块状料相比,熔化速度和成渣速度更快,前期能够快速成渣,并且喷吹剂中的碳粉加速了泡沫渣的形成,能够得到更好的脱磷效果,炉渣碱度也有所降低,石灰消耗有效减少。采用喷吹复合喷吹剂冶炼工艺后,石灰平均消耗量由 35 kg/t 降低到了 32 kg/t。

图 5 为喷吹复合喷吹剂冶炼前后镁球消耗的对 比,采用喷吹复合喷吹剂冶炼工艺后,粉剂镁球能够

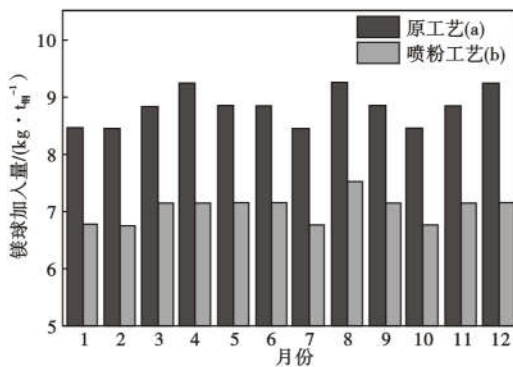


图 5 喷粉工艺实施前(a)后(b)镁球消耗

Fig. 5 Magnesium ball consumption before (a) and powder spraying process (b)

充分熔化并参与到成渣过程中,镁球的利用率更高。采用喷吹复合喷吹剂冶炼工艺后,镁球吨钢平均消耗量由 8.8 kg/t 降低到 7.0 kg/t。

图 6 为喷吹复合喷吹剂冶炼前后吨钢电耗的对比,采用喷吹复合喷吹剂冶炼工艺后,熔剂消耗减少,钢渣量也有所降低,同时炉衬侵蚀程度得到了一定程度缓解,减少了炉体散热消耗,吨钢电耗也在一定程度上有所降低。平均吨钢电耗由 425.5 kWh/t 降低到了 335.5 kWh/t。

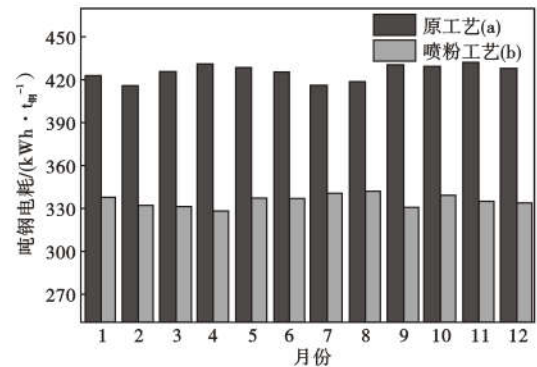


图 6 喷粉工艺实施前(a)后(b)吨钢电耗

Fig. 6 Power consumption per ton steel before (a) and after (b) implementation of powder spraying process

图 7 为喷吹复合喷吹剂冶炼前后吨钢钢铁料消耗的对比,采用喷吹复合喷吹剂冶炼工艺后,降低了渣量,炉渣氧化性也有所降低,减少了炉渣中铁氧化物的数量,提高了钢铁料的收得率。采用喷吹复合喷吹剂冶炼工艺后,钢铁料平均消耗量由 1 083 kg/t 降低到 1 073.7 kg/t。

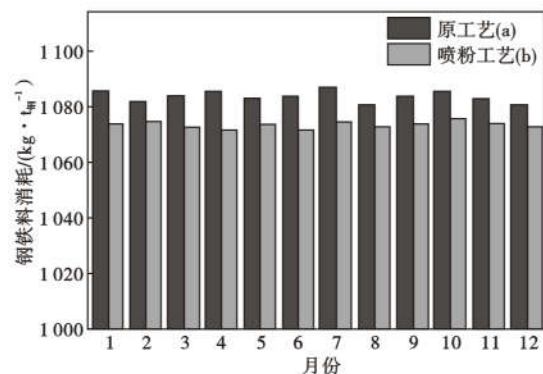


图 7 喷粉工艺实施前(a)后(b)吨钢钢铁料消耗

Fig. 7 Consumption of iron and steel materials per ton steel before (a) and after (b) implementation of powder spraying process

综上所述,采用喷吹复合喷吹剂冶炼工艺后,可降低电耗 90 度/t,降低钢铁料消耗 9.3 kg/t,降低熔

剂消耗 4.8 kg/t,提高生产率 5% ~6%,降低综合生产成本 25 元/t。

4 结论

(1)根据脱磷原理计算了电弧炉氧化期脱磷渣系的组成,炉渣碱度越高脱磷效果越好,然而炉渣碱度过高,也会带来渣量大,易喷溅等问题。因此将炉渣碱度控制在 2.2 ~2.8。

(2)随着氧化铁含量增加,脱磷能力先增加后降低,将渣中氧化铁含量控制在 15% ~20%。

(3)综合考虑脱磷能力和炉渣流动性将钢水温度控制在 1 550 ~1 580 ℃。

(4)在 130 t 电弧炉上以氮气为载体喷吹按照一定比例配制的碳粉、CaO 粉、MgO 粉、CaC 粉等的复合粉剂,以起到快速造渣,强化冶炼,保护炉衬的作用。采用喷吹复合喷吹剂冶炼工艺后,能够降低电耗 90 kWh/t,降低钢铁料消耗 9.3 kg/t,降低熔剂消耗 4.8 kg/t,提高生产率 5% ~6%,降低综合生产成本 25 元/t。

参考文献

[1]谢剑波,周建安,李志强,等.冶金炉外底喷粉气-固喷射器效率影响因素[J].中国冶金,2016,26(9):59-62.

[2]曾新光,白增玉,杨洪成,等.采用喷射冶金技术强化电炉冶炼工艺的试验研究[J].大连特殊钢,1992(3):55-66.

[3]姚同路,杨勇,贺庆,等.喷粉冶金在 100 t Consteel 电炉冶炼中的应用[J].工业加热,2019,48(4):16-20.

[4]陈勇,张大德.转炉提钒工艺的开发与优化[J].中国冶金,2003(1):43-45.

[5]罗家顶,何勇,周英豪.60 t Consteel 电弧炉泡沫渣冶炼的工艺实践分析[J].现代机械,2011(1):63-66.

[6]赵碧勋,梁扬举.电炉节电新技术-喷射冶金的试验与运用[J].四川冶金,1987(1):34-37.

[7]汤俊平. Consteel 电炉工艺参数的研究与应用[J].特殊钢.2001,22(1):20-22.

[8]顾德骥,秦永锡,陈迪,等.喷射冶金在电炉炼钢和钢包精炼中的应用[J].上海冶金,1980,2(3):10-20.

[9]赵斌,吴巍,吴伟,等.铁水脱磷顶吹氧+喷粉搅拌冶炼工艺的应用[J].钢铁,2019,54(11):33-39.

[10]赵定国,张印棠,张福君,等.转炉热熔渣中底吹喷粉行为研究[J].矿产综合利用,2020(5):191-195.

[11]赵斌,吴伟,吴巍,等.不锈钢喷粉吹氧法铁水脱磷工艺[J].中国冶金,2022(1):1-9.

[12]白瑞国,吕明,朱荣,等.150 t 转炉喷粉提钒的水模拟研究[J].钢铁,2012,47(10):34-39.

下 期 要 目

基于加热炉埋偶实验的 GCr15 钢坯心部温度预测 .....	韩怀宾等
钇含量对 3% Si 取向硅钢组织和织构的影响 .....	郭志红等
超级奥氏体不锈钢 254SMo 的均质化工艺研究 .....	史咏鑫等
不同冷却速率对 2507 超级双相不锈钢 $\sigma$ 相析出的影响 .....	易忠烈等
直接切削用 40MnVS 钢高强韧化控轧控冷工艺开发 .....	冀 鸽等
WB36 厚壁无缝钢管低倍组织气泡分析及工艺研究 .....	夏云峰等
高强度螺栓用 35CrMo 免退火冷镦钢热轧盘条的研制 .....	王海华等
焊接用双相不锈钢 ER2209 线材的生产实践 .....	李 立等
2.25Cr-1Mo-0.25V 钢 55 t 扁锭轧制的 148 mm 厚板尾部分层缺陷分析及控制工艺 .....	侯敬超等
P92 无缝钢管内表面裂纹分析及工艺优化 .....	张国忠等
固溶处理温度对冷轧 Inconel 601 镍基合金管材组织及性能的影响 .....	秦兴文等