

## 连铸小方坯生产易切削钢 SUM24HSL 的技术措施

孙 华<sup>1,2</sup> 高 宇<sup>1</sup> 孙彦辉<sup>1</sup> 李士琦<sup>1</sup>

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2 南京钢铁联合有限公司, 南京 210035)

**摘 要** 铅易切削钢生产的关键技术是控制铅的收得率, 铅在钢液中的均匀性, 铅蒸汽对环境的污染、铸坯表面质量及顺行浇铸。从铅的控制和提高可浇铸性两方面研究了 SUM24HSL 钢( % :  $\leq 0.11\text{C}$ 、 $1.0 \sim 1.5\text{Mn}$ 、 $\leq 0.05\text{Si}$ 、 $0.04 \sim 0.09\text{P}$ 、 $0.26 \sim 0.42\text{S}$ 、 $0.25 \sim 0.32\text{Pb}$ ) 的 100 t EAF-LF-CC 工艺。结果表明, 在 1 620 ~ 1 640 °C 加铅 3.5 ~ 4.0 kg/t, 铅粒度 2 ~ 3 mm, 加入速度 50 ~ 60 kg/min, 氩气流量 420 ~ 480 L/min, 铅的收得率为 75%。匹配结晶器振动参数, 合适的结晶器保护渣、浇铸温度和保护浇铸技术可保证连铸顺行和轧材冶金质量。

**关键词** 铅 易切削钢 SUM24HSL 小方坯连铸

## Technology Measures for Production of Free-Cutting Steel SUM24HSL by Continuous Casting Billet

Sun Hua<sup>1,2</sup>, Gao Yu<sup>1</sup>, Sun Yanhui<sup>1</sup> and Li shiqi<sup>1</sup>

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Nanjing Iron and Steel Corporation, Nanjing 210035)

**Abstract** The key technology for production of lead free-cutting steel is to control the yield of lead, the homogeneity of lead in liquid, the lead vapour pollution on environment, the surface quality of billet and smooth casting. Both controlling lead and increasing castability of steel SUM24HSL ( % :  $\leq 0.11\text{C}$ ,  $1.0 \sim 1.5\text{Mn}$ ,  $\leq 0.05\text{Si}$ ,  $0.04 \sim 0.09\text{P}$ ,  $0.26 \sim 0.42\text{S}$ ,  $0.25 \sim 0.32\text{Pb}$ ) produced by 100 t EAF-LF-CC process has been studied. Results show that with adding lead 3.5 ~ 4.0 kg/t (size 2 ~ 3 mm) at 1 620 ~ 1 640 °C, adding speed 50 ~ 60 kg/min, argon blowing rate 420 ~ 480 L/min, the yield of lead is 75%. Smooth casting and qualified metallurgical quality are insured by combined mold vibration parameters, suitable mold flux, casting temperature and shield casting technology.

**Material Index** Lead, Free-Cutting Steel SUM24HSL, Billet Continuous Casting

我国易切削钢年产量为 6 万 t 左右, 占全国钢产量的 0.14%。其中约 90% 是硫系易切削钢, 而且钢号少、品种不全, 而我国需求量每年在 30 万 t 左右。本文针对 SUM24HSL 钢的炼钢要点进行了研究。

### 1 SUM24HSL 钢种的要求及工艺条件

SUM24HSL 易切削钢产品成分控制如表 1 所示。

表 1 易切削钢 SUM24HSL 的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of free-cutting steel SUM24HSL / %

C	Mn	P	S	Si	Pb
$\leq 0.11$	1.00 ~ 1.50	0.04 ~ 0.09	0.26 ~ 0.42	$\leq 0.05$	0.25 ~ 0.32

易切削钢是世界三大难以连铸的钢种之一<sup>[1]</sup>, 在易切削钢连铸工艺的开发过程中应解决的问题是: 在环保条件要求下, 铅的加入方式; 铅在钢中的均匀分布; 钢中化学成分的优化控制; 最佳氧含量的确定及脱氧制度的选择; 耐火材料的研发或选型; 连

铸工艺参数尤其是温度制度和冷却制度的确定; 结晶器保护渣的研制及合理的后续轧制制度的配合。

含铅易切钢生产在南钢全连铸电炉厂进行, 根据 SUM24HSL 钢种特点, 其工艺流程设定为: 100 t 超高功率电弧炉熔炼 → LF 二次精炼 → 5 流方坯连铸机 (mm: 150 × 150、150 × 220、180 × 240) 全保护浇铸 → 高速线材轧机控制轧制。

### 2 关键工艺技术

#### 2.1 钢中铅的控制

采用带有专用除尘系统的加铅设备, 避免加铅后有铅挥发造成环境污染及危害人身健康; 从钢包底部吹入惰性气体 (氩气) 进行搅拌, 在钢包上方利用导管将铅粒低速均匀加入, 加铅导管上伴有惰性气体吹送。

工艺参数的控制为:

(1) 铅的加入量。在 1 600 ~ 1 650 °C, Pb 在钢中溶解度为 0.3% ~ 0.4%, 美国铅易切削钢的制造方法是在钢液中大量添加铅至溶解度以上, 机械地使其混合, 由乳液状态进行铸锭。日本则添加铅至

稍稍超出溶解度,使其大部分溶解于钢中,以图在铸锭凝固时以铅微粒形式重新析出,从而获得高质量的含铅微粒的易切削钢。

本研究采用在钢包内加铅粒,利用大流量氩气搅拌混合,实现乳液状态,使铅快速溶解于钢中,在连铸时随溶解度降低由乳液状态进行铸锭,实现对钢中铅含量的控制。对于 100 t 钢水的钢包,吨钢加入量则为 3.5~4 kg。

(2) 铅粒度的选择。考虑前述喷粉方法的弱点,喷粉区域大和环保问题,该工艺采用的是用导向管向钢包中加入铅粒的方式。用不同粒度的铅粒进行生产现场试用。由表 2 结果可见,当铅粒度为 6~8

mm 时,分布均匀性较差,铸坯中有大颗粒铅粒(图 1a),钢包底有大量铅的富集;该工艺铅粒合适的控制粒度为 2~3 mm,加入速度 50~60 kg/min,铅粒

表 2 铅粒度对铅在钢水中均匀性的影响

Table 2 Effect of lead size on homogeneity of lead in liquid

粒度/ mm	收得率/ %	加入速度/ (kg·min <sup>-1</sup> )	分布 均匀性	铸坯中铅 粒度/μm	备注
6~8	38~40	50~60	较差	有大颗粒铅粒(图 1a)	钢包底有大量铅的富集
4~5	49~54	50~60	一般	<7	钢包底有铅的富集
2~3	63~70	50~60	好	<5	正常
<2	50~55	50~60	好	<5	钢包渣中有大量铅的富集

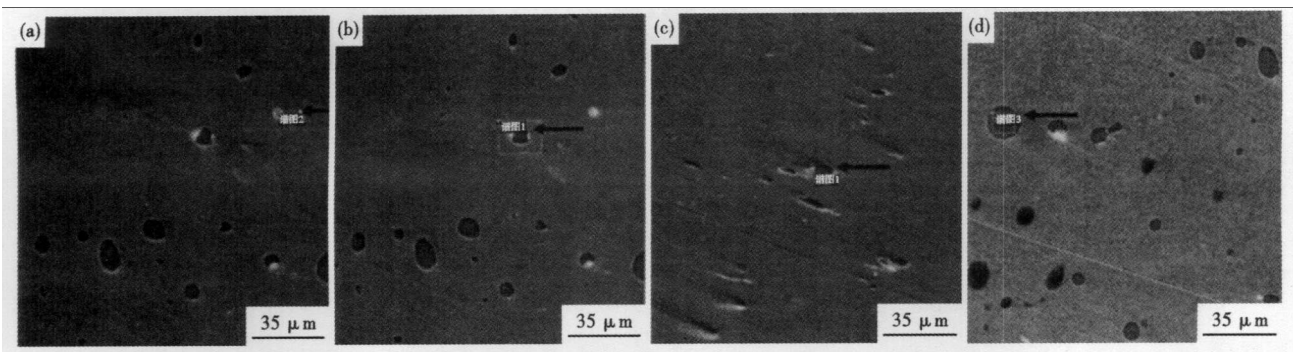


图 1 (a) 钢中细小铅颗粒分布形貌;(b) 铅附于硫化物形成复合夹杂物;(c) 热轧后铅附在变形 MnS 的两端;(d) 不含铅的硫化物形貌

Fig. 1 (a) Morphology of fine lead particles distributed in steel (billet and products); (b) lead attached to sulfide forming compound inclusion; (c) after hot rolling lead attached to two end of deformed MnS; (d) morphology of sulfide un-containing lead

加入量 4~5 kg/t<sub>钢</sub>。

(3) 铅加入时的钢包钢水温度。综合考虑收得率、铅在钢中分布的均匀性、钢水转动过程中钢包钢水的温降及浇铸温度,确定加铅温度为 1 620~1 640 ℃(如表 3 所示)。

## 2.2 连铸中提高钢的可浇铸性

### 2.2.1 浇铸温度

易切削钢由于铅、硫、氧的存在,钢液粘度大,流动性差,为保证其可浇性必须提高浇铸温度,但同时易切削钢又是裂纹敏感钢种,过高的浇铸温度对控制裂纹不利<sup>[2]</sup>。同时浇铸温度过高,铅的蒸汽压增大,不仅不利于铅的收得率控制,并且结晶器液面翻腾严重,影响浇铸顺行,及铸坯表面和皮下质量。实践表明,含铅易切削钢中间包的过热度比正常钢种过热度高 10 ℃ 较为合适。

### 2.2.2 振动参数

原结晶器的振动参数列于表 4。由于铅蒸汽、

表 3 易切削钢 SUM24HSL 的加铅工艺和铅收率得

Table 3 Adding process of lead for free-cutting steel SUM24HSL and yield of lead

粒度/ mm	加入速度/ (kg·min <sup>-1</sup> )	加铅温度/ ℃	氩气流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	氩气压力/ MPa	加入量/ (kg·t <sup>-1</sup> )	收得率/ %
2~3	50~60	1 620~1 640	420~480	8~12	4~5	70~80

表 4 原结晶器振动参数

Table 4 Original vibration parameters of mold

拉速/ (m·min <sup>-1</sup> )	负滑脱率/ %	振动频率/ (c·min <sup>-1</sup> )	负滑脱时间/ s	结晶器导前/ m
1.5	37	139.7	0.159	0.003 917
1.6	37	149.0	0.149	0.003 917
1.7	37	158.3	0.140	0.003 917
1.8	37	167.6	0.132	0.003 917
1.9	37	176.9	0.125	0.003 917
2.0	37	186.2	0.119	0.003 917
2.1	37	195.5	0.114	0.003 917
2.2	37	204.9	0.108	0.003 917
2.3	37	214.2	0.104	0.003 917
2.4	37	223.5	0.099	0.003 917
2.5	37	232.8	0.095	0.003 917

注:振程 8.6 mm。

凝固过程产生的 CO 气体的共同作用,使得浇铸过

程结晶器液面翻腾严重,为保证保护渣液渣层不被翻开,影响保护渣的正常流入,同时为防止保护渣富碳层及粉渣层的卷入影响浇铸的顺行,及铸坯内、外部质量,保护渣的黏度选用的是高粘度,粘度为 $0.8 \sim 1.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。这势必影响保护渣的消耗量。为保证保护渣的均匀流入,须靠控制结晶器振动参数来实现,保证控制保护渣消耗的负滑脱时间在中上线。

根据不同断面及不同拉速段设计了表5所示的结晶器振动参数,在振程恒定后,通过控制负滑脱率来实现对振动参数的控制,实现浇铸顺行铅硫易切削钢、有效控制铸坯表面质量。拉速为 $1.2 \sim 2.3 \text{ m/min}$ , $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 断面原振动参数与改进的振动参数铸坯表面质量比较见图2(a)。

由图2可见,原振动参数由于在高拉速下,负滑脱时间短,频率高,摩擦大,保护渣消耗量低,其表面反映出明显的润滑不良现象。改进的振动参数保证了润滑,表面质量良好。

### 2.2.3 结晶器保护渣

控制润滑、传热、铸坯表面质量的结晶器保护渣的正确设计,是含铅、硫易切削钢能正常浇铸和获得优良铸坯表面的关键技术之一<sup>[3]</sup>。其保护渣应具有如下特点:

(1) 保护渣应具有强的吸收硫化物和 $\text{MnO-SiO}_2$ 夹杂物的能力,而且吸收之后其性能又要满足连铸工艺的要求,并保持相对的性能稳定性;

(2) 保护渣应具有提高钢渣界面张力的能力,使钢渣易于分离,从而减少铸坯表面及皮下的夹渣,并能改善润滑效果;

(3) 控制好保护渣的粘度,使保护渣在结晶器内有良好的流动性,以利于吸收夹杂物。同时又要防止由于液面的剧烈翻腾,液渣层被翻开的危险;

(4) 为了提高保护渣吸收夹杂物的能力,及保护渣的硫容量,保护渣的碱度应控制高一些;

(5) 含铅、硫易切削钢连铸时,拉坯速度相对低一些,因此保护渣的熔化速度相应慢一些;

(6) 保护渣须有较强的平衡上浮于渣中的 $\text{MnO}$ 夹杂导致保护渣熔点、粘度降低的能力。

表5 改进的结晶器振动参数

Table 5 Improved vibration parameters of mold

断面/ (mm × mm)	拉速段/ (m · min <sup>-1</sup> )	负滑脱率/ %	振动频率/ (c · min <sup>-1</sup> )	负滑脱 时间/s	振程/ mm
150 × 220	0.9 ~ 1.9	38	80 ~ 180	0.12 ~ 0.25	9.6 ~ 10.2
150 × 150	2 ~ 2.8	33	130 ~ 180	0.13 ~ 0.16	9.6 ~ 10.2
180 × 240	0.9 ~ 1.3	38	80 ~ 130	0.12 ~ 0.26	8.7 ~ 10

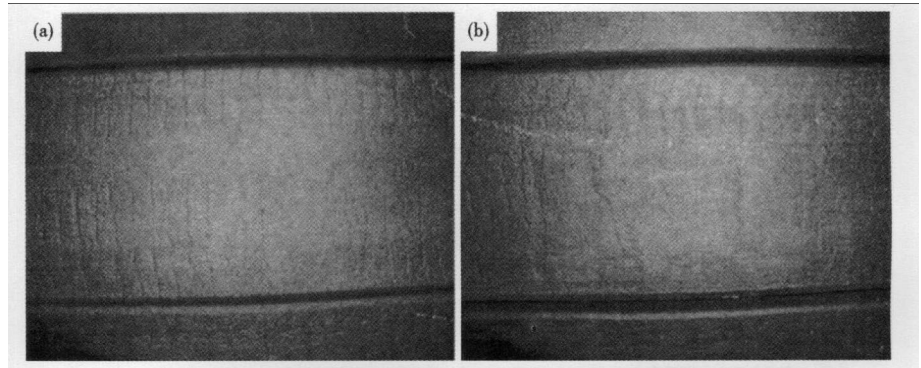


图2 用改进振动参数(a)和原振动参数(b)浇铸的易切削钢 SUM24HSL 铸坯表面质量  
Fig. 2 Surface quality of billet of free-cutting steel SUM24HSL casting with improved vibration parameters (a) and original vibration parameters (b)

常规的保护渣在一定的碱度范围内,通过控制各相关成分可得到理想的熔融特性。但复合合金加入后是否能达到要求的熔融特性须待研究。

考虑该钢种含有较高的 $[\text{Mn}]$ ,保护渣中应配加一定量的 $(\text{MnO})$ ,以平衡其对保护渣性能的影响。由此实验研究主要从以下3个方面进行:(1)保护渣中加入复合型合金前后保护渣理化性能及变化;(2)保护渣加入 $\text{MnO}$ 前后保护渣理化性能的变化;(3)保护渣中加入 $\text{FeS}$ 后,保护渣的理化性能及化学稳定性和热稳定性的变化。

研究用保护渣组成如表6所示,加入合金前后保护渣理化性能变化如表7所示。

由表7所示,不含 $\text{MnO}$ 的2<sup>#</sup>渣加入合金后粘度

表6 保护渣的化学组成和碱度

Table 6 Ingredient and basicity of mold flux

渣号	化学组成/%							碱度 (R)
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	
1-1	25.19	30.63	3.76	3.98	0.12	8	3.36	0.82
2-1	28.17	34.41	3.95	0.82	0.15	8.9	0	0.79

表7 加入合金前后保护渣理化性能

Table 7 Physical-chemical properties of mold flux before and after alloys adding

渣号	加入合金前		加入合金后	
	粘度/(Pa · s)	熔点/°C	粘度/(Pa · s)	熔点/°C
1-2	0.26	1 072	0.45	1 103.5
2-2	0.23	1 083	0.74	1 092.5

变化太大,而含少量 MnO 的保护渣的理化性能的改变要小得多。因此进一步的研究以含 MnO 的 1-2<sup>#</sup>保护渣为基础。

1-2<sup>#</sup>保护渣吸收上浮的 FeS 后保护渣熔点及粘度呈下降的趋势,因此该渣系吸收 FeS 夹杂后不会影响润滑性。在加入 6% FeS 后熔点及粘度变化不大,分别为 1 071.5 °C 和 0.4 Pa·s,这说明浇铸前后保护渣熔融特性基本稳定。

为考察浇铸过程中保护渣润滑性能的稳定性,分别测试了 1-2<sup>#</sup>渣吸收 FeS 夹杂后以及不吸收 FeS 夹杂的原渣系,粘度随温度的变化特性,测试结果如图 3 所示。

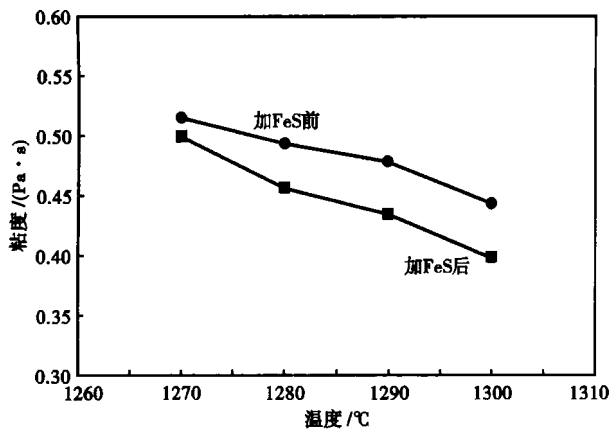


图 3 温度和加 FeS 对 1-2<sup>#</sup>渣粘度的影响

Fig.3 Effect of temperature and adding FeS on viscosity of No1-2 flux

由图 3 可见,加入 FeS 前后的两条粘度随温度的变化曲线平缓,说明该渣系在浇铸、凝固过程中稳定,能满足铸坯的润滑要求。图 3 所示加入 FeS 后的粘度虽有减小,但两者之间的差距只有 0.30 ~ 0.40 Pa·s,这能满足浇铸过程渣的流变特性要求。

### 3 易切削钢质量分析

#### 3.1 Pb 在固态钢中的存在形式

由扫描电镜及能谱分析铅以细小颗粒分布于钢中(铸坯、轧材),如图 1(a);或以复合夹杂物形式附存于硫化物周围,如图 1(b)。热加工变形后,铅附在变形的 MnS 两端呈尾状物存在(拉长的硫化锰夹杂两端有亮白色),如图 1(c)。这与文献[4]提到连铸坯中铅以单质、氧化物或硫化物复合存在的报道相同。该文献认为硫化物在结晶初期形成,并

表 8 研制的易切削钢 SUM24HSL 的切削性能

Table 8 Cutting performance of developed free-cutting steel SUM24HSL

主轴转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	切削速度/ ( $m \cdot \min^{-1}$ )	切削深度/ mm	钻孔进给量/ mm	钻孔深度/ mm	表面粗糙度/ s	外径尺寸 变化/mm
3 500	96.0	1.25	0.03	11	3.2	0.015
4 600	86.7	1.25	0.03	11	3.2	0.010
5 100	65.9	1.25	0.03	11	6.3	0.015

对随后铅析出起到基底作用,使铅粒在钢中分布细小而均匀,铅粒又对硫化物形态有一定的控制作用,该类硫化物为球形,热变形能力低,切削加工性好。硫化物夹杂也有不含铅的,如图 1(d)。

#### 3.2 切削性能分析

为检验开发的硫铅易切钢的切削性能,该研究通过对生产 SUM24HSL 的轧材随机取样,加工为  $\Phi 6.0$  mm 的研磨棒,并测试了其切削性能。使用机械为 NS-P1053,使用工具为华隆牌(9.5 × 9.5)车刀及  $\Phi 2.7$  mm 超硬麻花钻。

由表 8 数据显示,在不同切削速度下,南钢棒材尺寸变化不大,表面粗糙度与转速成正比,在 3 种速度内,断屑情况都较好;但切削速度达到 96 m/min 时,尺寸跳动会变大 0.01 mm。

### 4 结论

(1)建立了由超高功率电弧炉-LF 精炼-小方坯连铸-高速线材轧机批量、稳定生产含铅易切钢的生产工艺制度。

(2)采用在钢包上方利用导管将铅粒低速均匀加入钢包钢水中,并用底部吹入氩气进行搅拌的工艺,通过合理控制铅粒粒度、加入速度、氩气流量、氩气压力以及加入铅粒时钢包钢水温度,可将铅的回收率控制在 75%。

(3)匹配的结晶器振动参数,结晶器保护渣,浇铸温度,保护浇铸技术是保证该钢种连铸顺行和轧材表面、内部质量及切削性能的关键。

#### 参考文献

- 1 卢盛意. 连铸坯质量. 北京:冶金工业出版社,2005
- 2 蔡开科. 浇注与凝固. 北京:冶金工业出版社,1987
- 3 迟景灏,甘永年. 连铸保护渣. 沈阳:东北大学出版社,1992
- 4 项程云. 金属结构钢. 北京:冶金工业出版社,1999

孙 华(1969-),女,博士研究生,1991年北京科技大学毕业,特种钢冶炼研究。

收稿日期:2010-05-07