

## 100 t EAF-LF-VD-圆坯连铸流程生产石油钻铤用钢 AISI4145HM 的工艺实践

刘 鹏

(山钢股份莱芜分公司特钢事业部, 莱芜 271105)

**摘 要** 莱钢特钢事业部新区采用铁水 + 废钢-100 t 电弧炉-LF-VD-Φ500, 600 mm 圆坯连铸-步进式加热炉-950 轧机轧制-缓冷-退火的流程生产 Φ110 ~ 260 mm AISI4145HM 钢( $\% : 0.44 \sim 0.46C, 0.21 \sim 0.23Si, 1.32 \sim 1.33Mn, 1.18 \sim 1.20Cr, 0.30 \sim 0.31Mo, 0.16 \sim 0.17Ni, \leq 0.012P, \leq 0.004S, \leq 0.05Cu, 0.15 \sim 0.35Al$ )。通过控制电弧炉终点  $[C] \geq 0.15\%$ ,  $[P] \leq 0.008\%$ , 出钢预脱氧和合金化, LF 高铝精炼渣 (30% ~ 40%  $Al_2O_3$ ) 及喂 0.45 kg/t<sub>钢</sub> 钙线, VD 后梯度软吹, 控制中间包钢水过热度 12 ~ 25 °C, 拉速 0.25 ~ 0.35 m/min, 全程保护浇铸及 M-EMS 和 F-EMS, 轧后缓冷、退火等工艺措施, 生产的铸坯低倍组织良好, 中心疏松和中心缩孔  $\leq 1.0$  级, 裂纹和皮下气泡为 0 级, 各类夹杂物级别  $\leq 1.5$ , 级别总和  $\leq 7.0$ , 钢的各项指标均满足协议要求。

**关键词** 石油钻铤用钢 AISI4145HM 电弧炉-LF-VD-CC 流程 淬透性 力学性能 生产实践

### Practice of Commercial Production of Steel AISI4145HM for Petroleum Drill by 100 t EAF-LF-VD Round Bloom CC Flowsheet

Liu Peng

(Special Division, Laiwu Branch, Shandong Iron and Steel Corp Ltd, Laiwu, 271105)

**Abstract** The Φ110 ~ 260 mm products of steel AISI4145HM ( $\% : 0.44 \sim 0.46C, 0.21 \sim 0.23Si, 1.32 \sim 1.33Mn, 1.18 \sim 1.20Cr, 0.30 \sim 0.31Mo, 0.16 \sim 0.17Ni, \leq 0.012P, \leq 0.004S, \leq 0.05Cu, 0.15 \sim 0.35Al$ ) is produced by hot-metal + scrap-100 t EAF-LF-VD-Φ500, 600 mm round bloom casting-walking beam reheating furnace-950mm rolling mill- slow cooling- annealing flowsheet, in the special steel division new district of Laiwu steel. With the process measures including controlling EAF end  $[C] \geq 0.15\%$  and  $[P] \leq 0.008\%$ , pre-deoxidation and alloying in tapping, using LF high aluminium refining slag (30% ~ 40%  $Al_2O_3$ ) and feeding 0.45 kg/t calcium wire, gradient soft blowing after VD, controlling overheating extent of liquid in tundish 12 ~ 25 °C, casting speed 0.25 ~ 0.35 m/min, whole course shielding casting, using M-EMS and F-EMS, slow cooling after rolling and annealing, the macro structure of produced casting bloom is better with center porosity and center line shrinkage  $\leq$  rating 1.0, crack and subskin blowhole rating 0, each inclusion rating  $\leq 1.5$ , total inclusions rating  $\leq 7.0$ , the each index of steel products all meets the requirement of specification.

**Material Index** Steel AISI4145HM for Petroleum Drill, Arc Furnace- LF- VD- CC Flowsheet, Hardenability, Mechanical Properties, Production Practice

AISI4145HM 钢有较高的淬透性, 经热处理后有较高的抗拉强度、韧性、抗疲劳强度和耐磨性, 故钻铤材质一般均选为 4145HM 钢种<sup>[1]</sup>。对钢水洁净度、非金属夹杂物含量、钢材的晶粒度、中心碳偏析等技术条件要求更为严格, 对交货状态硬度、末端淬透性等都有严格的检验指标<sup>[2]</sup>。

#### 1 生产工艺

山东钢铁莱钢特钢事业部新区生产 AISI4145HM 的工艺流程: 社会废钢 + 热装铁水 (或生铁块) → 100 t 电弧炉 → 双工位 120 t LF → 120 t VD → 大圆坯连铸 (Φ500, 650 mm 断面) → 步进式加热炉 → 950 轧机轧制 → 缓冷 → 退火 → 精整扒皮检验。

##### 1.1 电弧炉冶炼工艺

电弧炉冶炼采取炉内留钢、留渣操作, 铁水温度 1 280 ~ 1 350 °C, 铁水比例 50% ~ 60%, 总装入量 (130 ± 5) t, 铁水量大, 形成熔池早, 钢液能够尽早被熔渣覆盖<sup>[3]</sup>, 减少熔化过程钢液的吸气。通过合理的供电制度, 冶炼全程采取流渣操作, 电弧炉冶炼周期控制在 (50 ± 5) min。钢水终点成分实际控制为 ( $\% : \geq 0.15C, \leq 0.008P$ )。电弧炉采用偏心炉底无渣出钢, 出钢量达到 1/4 (约 30 t) 时开始随钢流加入石灰 (12 kg/t<sub>钢</sub>)、脱氧促进剂 (3 kg/t<sub>钢</sub>)、含铝 70% 钢芯铝 (2 kg/t<sub>钢</sub>) 进行渣洗预脱氧; 加入硅锰合金 (4 kg/t<sub>钢</sub>)、硅铁 (2 kg/t<sub>钢</sub>)、高锰合金 (10 kg/t<sub>钢</sub>)、高铬合金 (16 kg/t<sub>钢</sub>)、镍板 (1 kg/t<sub>钢</sub>)、钼铁 (4 kg/t<sub>钢</sub>) 进行钢包合金化。出钢量达到 3/4 (月 80 t) 时渣料与合金加入完毕。

## 1.2 精炼工艺

LF 采用大渣量高铝炉渣 [ % : 7 ~ 10SiO<sub>2</sub>、30 ~ 40Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、45 ~ 55CaO、6 ~ 9MgO; R (CaO/SiO<sub>2</sub>) ≥ 5.0 ], 精炼工艺吨钢渣料大于 14 kg, 保证精炼周期 (55 ± 5) min, 溶解氧含量 ≤ 4.0 × 10<sup>-6</sup>, 钢水硫含量 ≤ 0.005%; LF 还通过使用喂线导管可升降式喂线机喂入 Φ9 mm 钙线 0.45 kg/t<sub>钢</sub>, 在出钢前对钢水进行钙处理; 钙处理后双路氩气量控制在 (25 ± 5) L/min 进行软吹 8 ~ 12 min。精准控制钢水的化学成分, 将碳控制在内控范围中下限, 锰、铬、镍、硅控制内控范围在中上限, 使钢的淬透性在最佳范围<sup>[4]</sup>。

VD 工序, LF 出站后扒除 1/2 ~ 1/3 精炼渣进入 VD 进行真空脱气处理。真空处理参数为: 氩气流量 150 × 2 L/min, 真空度 ≤ 133 Pa 保持时间 ≥ 15 min, 总处理时间 ≥ 25 min。钙处理后钢中存在较大尺寸的夹杂物, 生产中一般采用软吹操作对钢水进行弱搅拌净化处理, 吹入的氩气泡可为钢中显微夹杂物提供黏附的基体, 使之黏附在气泡表面随气泡一起上浮排入渣中<sup>[5-6]</sup>, 采取了 VD 后梯度软吹模式: VD 破空后较大氩气流量软吹 10 min、小氩气流量软吹 10 ~ 20 min, 提高了夹杂物去除能力, 钢水可浇注性良好。

## 1.3 大断面连铸

为保证铸坯内部质量, 防止拉速过高铸坯芯部钢水补缩不及时造成凝固搭桥形成缩孔, 连铸坯 Φ500 mm、Φ650 mm 断面的拉速分别采用 0.35, 0.25 m/min 的较低拉速, 二冷配水采用动态配水, 全程保护浇注, 采用 M-EMS (电流 260 A, 频率 1.5 Hz)、F-EMS (电流 125 A, 频率 7.0 Hz), 采用钢包台状密封水口加石棉垫并吹氩气保护和中间包吹氩气保护, 铸坯矫直温度控制在 950 ~ 1 050 °C, 铸坯入坑缓冷严格执行不同断面的缓冷时间规定。中间包采用带真空保温层中间包, 烘烤温度 ≥ 1 200 °C, 中间包钢水过热度按 12 ~ 25 °C 控制, 中间包采用专用中碳碱性覆盖剂进行中间包保温。

## 1.4 轧制缓冷及退火工艺

加热炉炉气温度预热段 550 ~ 750 °C, 加热段 1 100 ~ 1 290 °C, 均热段 1 200 ~ 1 250 °C。根据轧材

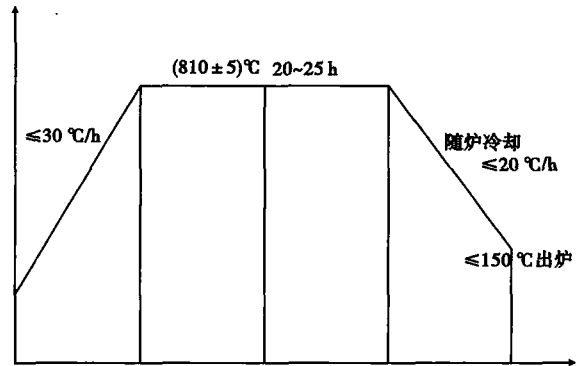


图1 AISI4145HM 钢热轧材的退火曲线

Fig. 1 Curves of annealing for hot-rolled products of steel AISI4145HM

断面粗轧 11 ~ 13 道次、连轧 6 道次, 中间坯 200 mm × 200 mm、260 mm × 260 mm、320 mm × 320 mm、380 mm × 380 mm; 开轧温度 1 160 ~ 1 185 °C, 终轧温度 960 ~ 1 000 °C。钢材大于 600 °C 入坑缓冷 48 h, 确保出缓冷坑温度小于 200 °C。为了满足 AISI4145HM 圆钢交货 HB 硬度值符合 187 ~ 229 要求, 需进行退火软化, 退火工艺见图 1。

## 2 AISI4145HM 钢试制及结果分析

### 2.1 钢水成品成分

钢水熔炼成品成分均符合技术标准要求, 具体结果见表 1。

### 2.2 铸坯低倍情况

连铸坯低倍质量良好, Φ500 mm 连铸低倍图片见图 2, 检验结果见表 2。

### 2.3 力学性能

试验钢纵向力学性能热处理: 淬火 (850 ± 20) °C 油冷 + 回火 (610 ± 25) °C 油冷。试验钢的力学性能见表 3, 钢的力学性能均满足技术条件要求。

### 2.4 非金属夹杂物

按照 GB/T10561-2005 中的 A 检验法检验钢材的非金属夹杂物, 其检验结果见表 4。AISI4145HM 钢的夹杂物级别均满足技术条件要求。

### 2.5 晶粒度

钢材应检验奥氏体晶粒度, 按照 GB/T6394-2017 测定, 所有炉次检验结果均为 8 级, 技术协议要求钢的奥氏体晶粒度应 ≥ 6 级, 满足技术条件要求。

表 1 AISI4145HM 钢水成品成分 / %

Table 1 Chemical composition of finished liquid of steel AISI4145HM / %

项目	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	S	Cu	Alt
技术标准	0.42 ~ 0.48	0.15 ~ 0.35	1.00 ~ 1.20	1.05 ~ 1.30	0.25 ~ 0.35	0.12 ~ 0.50	≤ 0.015	≤ 0.010	≤ 0.20	-
熔炼成品	0.44 ~ 0.46	0.21 ~ 0.23	1.32 ~ 1.33	1.18 ~ 1.20	0.30 ~ 0.31	0.16 ~ 0.17	≤ 0.012	≤ 0.004	≤ 0.05	0.015 ~ 0.035

注: 成品钢中五害元素成分含量 (As + Sn + Pb + Sb + Bi) < 0.025%

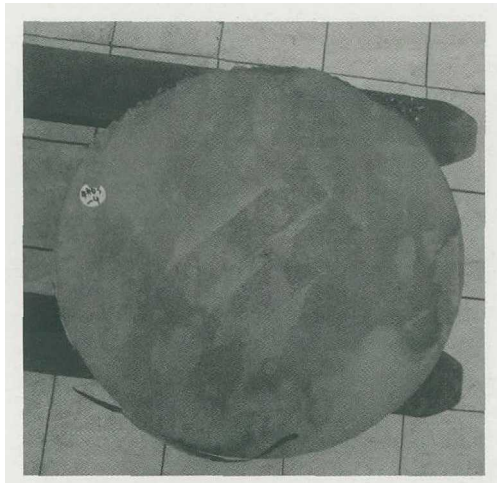


图 2 AISI4145HM 钢 Φ500mm 铸坯低倍形貌

Fig. 2 Morphology of macrostructure of steel AISI4145HM Φ500 mm casting bloom

表 2 AISI4145HM 钢 Φ500 mm 连铸坯低倍检验结果/级  
Table 2 Examination results of macrostructure of steel AISI4145HM Φ500 mm casting bloom /rating

检测项目	中心疏松	缩孔	中心裂纹	中间裂纹	皮下气泡、皮下裂纹
标准值	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤1.0
实测值	0~1.0	0.5~1.0	0	0	0

表 3 AISI4145HM 钢的力学性能

Table 3 Mechanical properties of steel AISI4145HM

检测项目	$R_m$ /MPa	$R_{el}$ /MPa	A/%	Z/%	$A_{VK2}$ /J		HBW 硬度值
					20 °C	-20 °C	
标准值	≥1 000	≥880	≥15	≥45	≥80	≥42	285~341
实测值	1 065~1 128	895~932	16~19	47~51	81~87	44~47	292~330

表 4 AISI4145HM 钢的夹杂物级别/级

Table 4 Rating of inclusions in steel AISI4145HM /rating

项目	A		B		C		D		Ds	总和
	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗		
标准值	≤2.0	≤12	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0
实测值	0.5~1.0	0.5~1.5	0.5~1.5	0.5~1.0	0	0~1.0	0	0~1.5	0.5~1.5	3.0~7.0

表 5 AISI4145HM 钢的末端淬透性

Table 5 End-quenched hardenability of steel AISI4145HM

项目	$J_{1.5}$ (HRC)	$J_{25}$ (HRC)	$J_{50}$ (HRC)
标准值	≥56	≥50	≥40
实测值	57~62	50~55	41~53
平均值	59.3	52.4	47.9

## 2.6 末端淬透性

试验钢材末端淬火的热处理:正火(880~900℃)+端淬(860±5)℃。在钻井过程中,如果淬透

性差,当淬硬层磨损后钻铤磨损速度加快,材料将很快失效<sup>[7]</sup>。试验钢的末端淬透性检验结果见表 5。

## 2.7 交货硬度

钢材退火态交货 HB 硬度值应符合 187~229,试验钢的 HB 硬度值检验结果为 198~224。

## 2.8 棒材探伤

钢材逐支进行超声波内部探伤,探伤精度按 GB/T4162-2008 中规定的不低于 B 级质量等级执行。对首批 Φ170 mm 进行逐支全探伤,探伤不合支数 2 支,探伤合格支数 173 支,合格率 98.86%。

## 2.9 轧材碳极差分析

对首批不同炉号 Φ170 mm AISI4145HM 钢材取 9 个点进行碳偏析分析,碳极差≤0.03,碳偏析指数 0.98~1.04,检验结果良好。

## 3 结论

(1)莱钢特钢事业部新区采用铁水+废钢→100 t 电弧炉→120 t LF→120 t VD→圆坯连铸(Φ500、Φ650 mm 断面)→步进式加热炉→950 轧机轧制→缓冷→退火的流程,可成功生产 Φ110~260 mm 石油钻铤用钢 AISI4145HM。

(2)通过增大 LF 渣量,确保了钢中较低夹杂物含量,采用强化脱氧、脱硫操作,VD 后梯度软吹进一步去除夹杂物,以及采用连铸低过热度、“三恒”、全程保护浇注以及 M-EMS、F-EMS 等措施,石油钻铤用钢 Φ110~260 mm 棒材的探伤合格率达到 98.86%。

## 参考文献

- [1] 彭努渊. ASTM4145H 钢冲击功偏低的原因分析[J]. 大型铸锻件, 2007(6): 32-35.
- [2] 樊治海, 安丙尧, 李鹤林. 国产 4145H 钢钻铤性能的改善[J]. 理化检验: 物理分册, 1998, 34(1): 22-24.
- [3] 刘立, 赵俊学, 李凯, 等. EAF-LF(VD)-CC 流程生产 GCr15 轴承钢氮含量分析[J]. 炼钢, 2010, 26(1): 32-35.
- [4] 苏志才, 洪小玲. Φ89 mm 和 Φ105 mm 4145H 石油钻铤管的试制[J]. 特殊钢, 2002, 23(4): 47-48.
- [5] 赵沛. 炉外精炼及铁水预处理实用技术手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [6] 李强, 王建, 王新华, 等. X80 管线钢钙处理后软吹时间对夹杂物行为的影响[J]. 钢铁钒钛, 2011, 32(2): 74-78.
- [7] 王飞, 赵千水. 转炉连铸生产石油钻铤用 AISI4145H 钢的工艺实践[C]//2009 年第七届中国钢铁年会论文集. 北京: 中国金属学会, 2009: 357-359.

刘鹏(1983-),男,工程师,2003年安徽工业大学(本科)毕业,冶金工程研究。E-mail:273786163@qq.com

收稿日期:2018-02-08