

## Q345E 低合金高强度钢 $\Phi 600$ mm 连铸圆坯的生产实践

王社教<sup>1,2</sup> 倪红卫<sup>1</sup> 尹修刚<sup>2</sup> 陈宏豫<sup>2</sup> 成日金<sup>1</sup>

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081; 2 承德建龙特殊钢有限公司, 承德 067201)

**摘要** Q345E 钢( $\% : 0.14 \sim 0.17C, 0.20 \sim 0.30Si, 1.28 \sim 1.38Mn, \leq 0.011P, \leq 0.005S, 0.015 \sim 0.030Al, 0.032 \sim 0.045V$ )大圆坯的生产流程为 65 t LD-LF-VD- $\Phi 600$  mm 圆坯 CC 工艺。通过出钢时滑板挡渣, 加入预熔合成渣( $\% : 40 \sim 50CaO, \leq 9SiO_2, 30 \sim 40Al_2O_3, 3 \sim 7MgO, 8 \sim 10Al$ )、钢芯铝、脱氧剂和合金, 控制拉速 0.22 m/min, 32 t 中间包钢水过热度( $25 \pm 5$ ) $^{\circ}C$ , 恒液面 900 mm, 全程保护浇铸和电磁搅拌等措施, 试生产法兰用 Q345E 钢  $\Phi 600$  mm 连铸圆坯。生产结果表明, 铸坯表面无可见冷疤、鼓肚等缺陷, 中心缩孔 0.5 级, 中心疏松 1.0 级, 碳偏析  $\leq 1.09$ ,  $-50^{\circ}C$  低温冲击功超过 100 J, 完全满足标准要求。

**关键词** Q345E 低合金高强度钢 65 t LD-LF-VD-CC 流程  $\Phi 600$  mm 连铸圆坯 法兰用钢 生产实践

## Production Practice of $\Phi 600$ mm Round Bloom of HSLA Steel Q345E

Wang Shejiao<sup>1,2</sup>, Ni Hongwei<sup>1</sup>, Yin Xiugang<sup>2</sup>, Chen Hongyu<sup>2</sup> and Cheng Rijin<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Chengde Jianlong Special Steel Co Ltd, Chengde 067201)

**Abstract** The production flow sheet for heavy bloom of steel Q345E ( $\% : 0.14 \sim 0.17C, 0.20 \sim 0.30Si, 1.28 \sim 1.38Mn, \leq 0.011P, \leq 0.005S, 0.015 \sim 0.030Al, 0.032 \sim 0.045V$ ) is 65 t LD-LF-VD- $\Phi 600$  mm round bloom CC process. With the measures including using sliding plate to stop slag in tapping, and adding pre-melted synthetic slag ( $\% : 40 \sim 50CaO, \leq 9SiO_2, 30 \sim 40Al_2O_3, 3 \sim 7MgO, 8 \sim 10Al$ ), steel-clad aluminium, deoxidizer and alloys, controlling casting speed 0.22 m/min, overheating extent of liquid ( $25 \pm 5$ ) $^{\circ}C$  and constant liquid level 900 mm in 32 t tundish, whole process shield casting and electromagnetic stirring, the  $\Phi 600$  mm casting round bloom of steel Q345E for flange is pilot-produced. The production results show that there is no visible surface defect such as scab and bulging, the rating of center line shrinkage is 0.5, the center porosity 1.0 and the carbon segregation  $\leq 1.09$ , and the impact energy of steel at  $-50^{\circ}C$  is more than 100 J, all meet the requirement.

**Material Index** HSLA Steel Q345E, 65 t LD-LF-VD-CC Flow Sheet,  $\Phi 600$  mm Cast Round Bloom, Steel for Flange, Production Practice

Q345E 钢是一种综合力学性能、焊接性能、低温韧性、冷冲压及切削加工性能均较好的低合金高强度结构钢, 多用于船舶、车辆、大型容器、大型钢结构等行业。在同等的强度要求下, Q345E 钢零件的危险尺寸较小, 故一般比使用碳钢材料节约钢材 20% ~ 30%<sup>[1]</sup>。

承德建龙特殊钢有限公司引进 DANILI 的 14 m 弧半径、32 t 中间包、五机五流大圆坯连铸机于 2011 年 2 月投产, 与大圆坯连铸机配套的是 1 座 65 t 提钒转炉-2 座 65 t 氧气顶吹转炉-1 座 65 t 钢包精炼炉-1 座 65 t VOD 真空精炼炉, 可生产铸坯断面为  $\Phi 280$  mm ~ 600 mm, 1 年来累计为无缝钢管厂和锻造厂生产圆坯 70 多万吨, 30 多个钢种, 包括锻造用 CL60、42CrMo、460C、Q345E 等钢种。其中生产 Q345E 大圆坯, 共计 4 000 多吨。在 Q345E 的生产过程使钢水温度和成分得到精确控制, 铸坯质量完好, 经钢厂锻造成的风电法兰锻件质量稳定良好, 经检

测达到质量要求, 尤其低温冲击方面,  $-50^{\circ}C$   $A_{KV}$  超过 100 J。

### 1 生产工艺设计

Q345E  $\Phi 600$  mm 连铸圆坯生产工艺流程为: 铁水预处理-提钒转炉-转炉-LF-VD-圆坯连铸。根据其它工厂的生产经验<sup>[2-6]</sup>, 试验严格控制钢水成分和操作工艺。

#### 1.1 化学成分控制

试验钢添加铌、钒等微合金元素, 控制碳 0.14% ~ 0.17%, 锰 1.3% ~ 1.5%, 硫和磷含量分别控制在 0.005% 及 0.013% 以下。

由于材料晶粒的细化, 所以细化后材料的晶粒度等级明显提高, 晶界的比重加大, 同时钢的强度增加, 材料对裂纹的敏感性显著降低。当 V 含量低于 0.035% 时, 材料的低温性能及强度很难稳定地达到风电法兰用钢的要求, 当 V 含量高于 0.060% 不仅材料的成本提高, 而且容易在铁素体内产生次生的

另类组织,反而降低材料的低温冲击性能,所以确定 V 含量为 0.035% ~ 0.060%。

## 1.2 工艺流程控制

### 1.2.1 优化脱氧制度

在 65 t 转炉冶炼终点操作中,炉内钢液中碳含量、氧活度、温度存在一定的统计关系,采用多元回归分析,得到转炉终点氧含量预报模型。在铁水成分和冶炼制度一定的条件下,要准确控制转炉终点 [O],必须准确控制好以下参数:(1)控制终点 [C] 0.05% ~ 0.08% 的命中率为 90.10%;(2)控制终点温度在 1 620 ~ 1 670 °C;(3)渣中 (FeO + MnO) 14% ~ 18%;(4)提高转炉终点碳和温度的命中率,杜绝后吹。通过准确预报,采取合理脱氧制度,终点采用出钢前期加铝强制脱氧,利用钢中氧浓度高的特点,形成大颗粒  $Al_2O_3$ ,在钢中极易上浮去除,有效提高了脱氧效果。实现深度脱氧,保证合理氧含量。

### 1.2.2 转炉出钢滑板挡渣及预熔合成渣渣洗

转炉滑板挡渣工艺在承德建龙特殊钢有限公司早已推广。它的应用可确保转炉渣下到钢包中的渣厚度 < 50 mm,为提高钢水质量和合金收得率创造了条件。

为了确保钢中 P 含量低于 0.013%,又采用了留钢 (3 ~ 5 t) 出钢,防止下渣量偏大钢液回磷。

开发转炉出钢预熔合成渣渣洗工艺,在转炉出钢前和过程中,将所有预熔合成渣(成分见表 1)加入到钢包中,在出钢过程中预熔合成渣对钢水进行渣洗,而快速形成顶渣,并视过程渣情况配加钢芯铝、脱氧剂和合金。钢水经合成渣洗后,脱氧产物进一步降低。同时渣系也发生较大变化,提高了精炼渣碱度,为精炼造白渣脱硫创造了有利的热力学和动力学条件,同时配以镁碳砖综合砌筑钢包,有效降低了钢中夹杂物含量。

### 1.2.3 生产过程系统实施低温控制

炼钢厂在稳定工艺操作基础上,实施各工序低温运行,采取优化转炉出钢口材质及尺寸、钢包保温及在线烘烤、耐火纤维在包盖系统上的研究应用、合金在线高温烘烤、钢包红净出钢、连铸系统保温等技术,实现了转炉炼钢系统温度控制的低温均衡可控有效,将连铸机中间包温度稳定在液相线上 20 ~ 30

表 1 预熔合成渣成分 / %

CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Al
40 ~ 50	≤ 9	30 ~ 40	3 ~ 7	8 ~ 10

表 2 电磁搅拌参数表

电磁搅拌	位置	电流/A	频率/Hz
结晶器	距结晶器上口 400 mm	220	1.8
末端	13.4 m 弧处	900	6

°C,降低了钢水氧化性,有效减少钢水中夹杂物含量。

### 1.2.4 “三恒”稳态浇铸

制定转炉冶炼标准化操作指导书,落实转炉“恒容恒热”装入制度和标准化操作模式;建立连铸机“恒拉速 (0.22 m/min)”、“恒温度 [过热度 (25 ± 5) °C]”、“恒液面 (900 mm)”。三恒稳态浇铸工艺提高了炼钢各工序的配合意识,有效提高了铸坯质量。

### 1.2.5 连铸机全程保护浇铸和电磁搅拌

为了减少真空精炼钢水的二次氧化,连铸过程全程采用钢包加盖及长水口保护、中间包液面保护渣及吹氩保护等措施,使过程增氮 ≤ 10 × 10<sup>-6</sup>。

为了得到良好的铸坯组织,采用结晶器和二冷末端电磁搅拌技术,具体参数见表 2。

## 2 生产结果及分析

Q345E  $\Phi 600$  mm 连铸圆坯在环锻厂进行锻造风电法兰,法兰尺寸 (mm) 为 3 200 × 2 900 × 150,法兰采用 (890 ± 10) °C,1 h 雾冷正火 + 650 °C 回火工艺,力学性能和显微组织检验结果表明,此次试验生产 Q345E 钢的各项性能均达到了标准要求,一次性试验成功。

### 2.1 化学成分

GB/T1591-2008《低合金高强度结构钢》标准中 Q345E 钢的化学成分和试验钢实测化学成分如表 3 所示。由表 3 可见,生产连铸圆坯成分均精确控制在设计范围内。

### 2.2 连铸圆坯表面质量

Q345E 连铸圆坯产品经检验表面光滑,质量好,无渣坑(沟)、结疤、划痕等缺陷,切口整齐。表面和端部质量见图 1。

表 3 Q345E 钢的标准化学成分和试生产分析结果 / %

Table 3 Standard chemical composition and analysis in pilot production of steel Q345E / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	Al	Ni	V	Cu
标准	0.14 ~ 0.18	≤ 0.50	1.10 ~ 1.45	≤ 0.013	≤ 0.005	≤ 0.30	≤ 0.20	0.015 ~ 0.035	≤ 0.50	0.030 ~ 0.150	≤ 0.10
试验钢	0.14 ~ 0.17	0.20 ~ 0.30	1.28 ~ 1.38	≤ 0.011	≤ 0.005	0.04 ~ 0.06	≤ 0.003	0.015 ~ 0.030	0.05 ~ 0.06	0.032 ~ 0.045	0.02 ~ 0.03

### 2.3 Q345E 连铸圆坯的内部质量和制造法兰力学性能

经检验, Q345E 连铸圆坯的内部质量良好, 中心缩孔 $\leq 0.5$ 级, 中心疏松 $\leq 1.0$ 级, 无中心裂纹和皮下裂纹, 探伤结果良好。

按照 GB/T1591-2008 的规定, Q345E 钢锻件的力学性能要求为: 屈服强度  $R_{p0.2} \geq 265$  MPa, 抗拉强度  $450 \text{ MPa} \leq R_m \leq 600$  MPa, 锻后伸长率  $A \geq 18\%$ ,  $-40$  °C 冲击功  $A_k > 27$  J。Q345E 钢制造的法兰拉伸试验和法兰切向低温冲击性能如表 4 所示。

由表 4 可见, 试生产 Q345E  $\Phi 600$  mm 连铸圆坯制造法兰的力学性能均达到标准要求, 其中  $-50$  °C 低温冲击值均在 100 J 以上, 远高于标准要求。

### 2.5 Q345E 钢制造法兰显微组织

Q345E 钢制造法兰的显微组织图如图 2 所示。

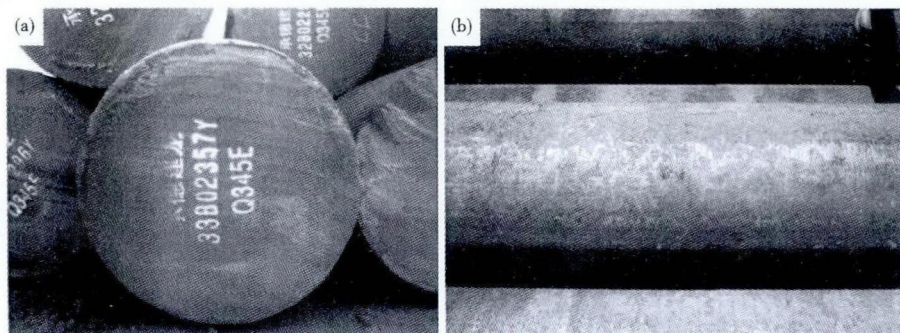


图 1 Q345E 钢  $\Phi 600$  mm 连铸圆坯断面(a)和表面(b)形貌

Fig. 1 Morphology of cross section (a) and surface (b) of  $\Phi 600$  mm cast round bloom of steel Q345E

表 4 Q345E 钢制造的法兰力学性能

Table 4 Mechanical properties of flange manufactured by steel Q345E

试样号	最小屈服强度 YS/MPa	抗拉强度 TS/MPa	最小延伸率/ %	$-50$ °C 法兰切向 冲击功/J
1	370	530	28	114
2	385	545	30	100
3	365	535	28	112
4	380	540	28	102
5	385	540	29	105
6	380	535	28	102

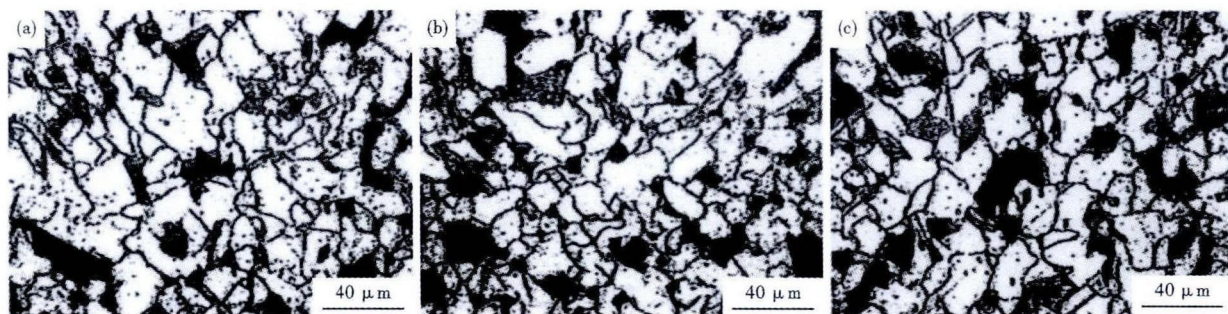


图 2 Q345E 钢法兰显微组织形貌:(a)纵向;(b)横向;(c)周向

Fig. 2 Morphology of structure of steel Q345E flange: (a) longitudinal section; (b) cross section; (c) circular direction

由图 2 可见, Q345E 钢风电法兰显微组织为铁素体 + 珠光体, 晶粒度达 8.0 级。

### 3 结论

(1) 65 t LD-LF-VD- $\Phi 600$  mm CC 工艺可成功生产高质量风电法兰用 Q345E  $\Phi 600$  mm 连铸圆坯。

(2) 优化脱氧制度, 采用出钢滑板挡渣、预熔合成渣渣洗、流程低温运行、“三恒”稳态浇铸、全程保护浇铸和电磁搅拌等措施生产 Q345E 钢锻件的综合力学性能良好。

(3) 试验钢的化学成分满足标准要求, 铸坯表面无可见冷疤、鼓肚等缺陷, 中心缩孔 0.5 级, 中心疏松 1.0 级, 碳偏析 $\leq 1.09$ ,  $-50$  °C 低温冲击功超过 100 J, 完全满足标准要求。

### 参考文献

- [1] 陈立奇, 段世浩. Q345E 钢锻件的力学性能研究[J]. 热处理, 2011, 26(2): 39-42.
- [2] 赵华, 时义祥, 宋锐, 等. Q345E 探伤不合格的原因分析与研究[J]. 科技信息, 2010(21): 19.
- [3] 齐建军, 李绍杰, 赵春风. 微合金元素对 Q345E 棒材低温韧性的影响[J]. 热加工工艺, 2009, 38(10): 80-83.
- [4] 李少杰, 王国营, 樊一丁, 等. Q345E 钢棒材低温冲击功的研究[J]. 河北冶金, 2011(5): 23-27.
- [5] 顾林豪, 隋鹤龙, 王彦锋, 等. Q345E 厚板低温冲击韧性不合格的原因分析与改进措施[J]. 首钢科技, 2009(3): 15-17.
- [6] 王建锋, 邓深, 饶江平, 等. 钛微合金化 Q345E 钢的试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2010, 31(2): 20-25.

王社教(1966-), 男, 高级工程师, 1989 年武汉大学毕业。E-mail: wangshejiao@sina.com

收稿日期: 2013-05-06