Q345E 低合金高强度结构钢的研制

孙长玉，张 军，高 军

（内蒙古包钢钢联股份有限公司薄板坯连铸连轧厂，内蒙古 包头 014010）

摘 要： 采用包钢宽厚板生产线先进的炼钢、连铸、双机架轧制及冷却工艺，分别采用两种成分设计方案生产的风电板 Q345E，试验结果表明，钢板组织均匀、性能优良，满足国家标准要求，通过对两种成分设计方案关键工艺、性能结果及工艺成本进行对比，为风电板 Q345E 工艺制定提供理论依据。

关键词： Q345E 宽厚板；成分设计；CR 工艺

中图分类号： TG142.33 **文献标识码：** B **文章编号：** 1009－5438(2017)03－0039－03

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2017.03.012

Development of Q345E High Strength Low Alloy Structural Steel

SUN Chang－yu, ZHANG Jun, GAO Jun

(*CSP Plant of Steel Union Co. Ltd. of Baotou Steel (Group) Corp.*, *Baotou* 014010, *Nei Monggol*, *China*)

Abstract: The Q345E high strength low alloy structural steel is developed by advanced steel making, continuous casting, double stand rolling and cooling processes in heavy plate production line of Baotou Steel. Two component design schemes are adopted to produce Q345E. The result shows that the steel plate is uniform in structure and good in performance, which meets the requirements of the national standard. Through the comparison of the key processes, performance results and process costs of the two component design schemes, the theoretical basis for the formulation of Q345E process is provided.

Key words: Q345E heavy plate; component design; CR technology

我国风电产业发展前景广阔，西北地区是国家风电产业开发的重点区域。内蒙古地广人稀，风能资源分布广，且稳定性好、易开发，是我国陆上风能资源最富集的地区，风能资源储量和技术可开发量居全国之首。基于这些优势，内蒙古着力打造清洁能源输出基地。包钢薄板厂宽厚板生产线年均生产风电钢达50万t，大力推进了国家的风能项目建设。在风电用钢中，塔筒用钢量最大，风电塔筒要常年经受高温、极寒、风沙等恶劣天气的考验，因此，风电塔筒用钢对焊接性能、力学结构、低温冲击韧性等要求严苛，要求根据用户使用情况对生产工艺不断优化，本文论述了厚度规格为10～40 mm的Q345E钢板两种成分工艺设计方案，并对两种成分工艺方案进行性能对比。

1 成分设计及生产工艺

1.1 技术要求

1.1.1 成分要求

Q345E低合金高强度结构钢化学成分要求执行GB/T 3274—2007[1]标准有关规定，具体见表1。

收稿日期： 2017－04－11

作者简介： 孙长玉(1982－)，女，内蒙古包头市人，工程师，现从事标准化管理工作。

中国知网 https://www.cnki.net

表1 常规化学成分(质量分数) %

C	Si	Mn	P	S	Nb	Als	N
≤0.18	≤0.50	≤1.70	≤0.025	≤0.020	≤0.070	≥0.015	≤0.012

1.1.2 力学性能要求

Q345E低合金高强度结构钢力学性能要求执行GB/T 3274—2007[1]标准有关规定,具体见表2。

表2 Q345E钢板机械性能要求

钢板厚度/mm	拉伸试验			夏比V型冲击试验		180冷弯试验
	屈服强度 R_{eH}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	延伸率 A/%	温度/℃	V型冲击功 A_{KV}/J	
6~16	≥345	470~630	≥21	-40	≥34	$d=2a$
>16~40	≥335					$d=3a$

注:Q345E交货状态为热轧、控轧和灭火。

1.2 工艺路线

KR脱硫→转炉冶炼→LF精炼→RH精炼→连铸→加热→轧制→冷却→热矫→剪切→探伤

1.3 成分设计

根据国家标准GB/T 3274—2007[1]要求,在满足标准要求和用户使用要求的前提下,对厚度规格为10~40 mm的Q345E低合金高强度结构钢进行了成分及工艺设计,分别采用两种成分工艺设计,具体的内控化学成分设计分别见表3。

表3 Q345E钢化学成分(质量分数) %

方案	C	Si	Mn	P	S	Als	Nb
方案一	0.06~0.09	≤0.50	1.30~1.50	≤0.020	≤0.012	≥0.015	0.025~0.045
方案二	0.15~0.18	≤0.35	1.35~1.45	≤0.015	≤0.005	≥0.015	0.008~0.015

1.4 工艺设计

1.4.1 冶炼工艺

保证钢质高纯净度,严格控制钢中有害元素P、S含量,并采用RH真空处理,去除钢中N、H、O有害气体,去除钢中的硫化物、氧化物等,实现钢水窄温度、窄成分的精确控制。包钢宽厚板生产线采用经过脱硫预处理的铁水和优质废钢作为原料,以高效顶底复吹、炉气自动分析以及动静态自动炼钢三项先进生产技术为保障进行转炉洁净钢的冶炼生产。精炼采用复合脱氧工艺、埋弧造渣操作,严格控制钢水成分和温度,实现钢水窄成分、恒温控制。终点成分命中率大于99%,终点温度命中率大于97%。通过优化钙处理操作和软吹工艺,进一步上浮排除钢中的非金属夹杂物,获得洁净钢质。RH工序采用循环深脱气工艺,在保证钢水温度稳定的前提下大幅降低氢、氧、氮等气体含量,减小有害气体对钢质的不利影响。方案二成分设计P、S有害元素控制比方案一更为严格,要求钢水洁净度较高。

1.4.2 连铸工艺

方案一成分设计中含有Nb元素,容易在二冷区坯壳表面的晶界处形成细小的沉淀,使钢坯表面呈脆性;方案二成分设计碳含量在包晶区,许多研究表明,包晶在连铸时容易出现纵裂纹[2],针对两种成分设计,连铸采用凝固末端动态轻压下和电磁搅拌,以及优化的动态二冷技术,保证恒温、恒拉速工艺浇注,以减轻连铸坯中心偏析和中心疏松、裂纹、振痕等缺陷,连铸工序通过采取以下工艺优化措施来改善铸坯质量:

(1)借助连续测温动态调整连铸二冷参数配比,稳定铸坯质量;

(2)优化电磁搅拌参数,提高铸坯质量;

(3)调整结晶器振动参数,减轻铸坯表面振痕;

(4)调整保护渣成分及性能指标,解决铸坯表面纵裂问题。

1.4.3 加热及轧制工艺

根据钢种特点和用途,采用优化的铸坯加热曲线充分保证钢坯加热温度和均热时间,实现在铸坯长度、宽度和厚度方向的温度均匀一致。出炉温度控制在1 180~1 220 ℃,板坯高温段停留时间不宜太长,避免奥氏体晶粒过度长大,减少对钢板力学性能的不利影响。

方案一成分设计采用TMCP轧制工艺设计[2],粗轧开轧温度为1 160~1 200 ℃,单道次相对压下率至少有两道以上控制在25%~40%,精轧开轧温度880~950 ℃,至少有两道压下率在18%以上,末道次压下率控制在10%以上,轧后钢板采用控制冷却,要求终冷温度控制在570~630 ℃之间,冷速15~20 ℃/s。通过合适的控轧+控冷工艺,最终得

中国知网 https://www.cnki.net

到晶粒细小均匀、力学性能良好的铁素体 + 珠光体组织。

方案二成分设计采用 CR 轧制工艺设计[3]，第一阶段开轧厚度为板坯厚度，粗轧开轧温度为 1 160 ~ 1 190 ℃，第一阶段高温延伸轧制时单道次压下率不低于 15%；第二阶段钢板的开轧厚度为 3 倍成品钢板厚度，第二阶段钢板开轧温度为 880 ~ 980 ℃，第二阶段终轧温度为 790 ~ 820 ℃；第二阶段轧制 5 ~ 6 道次；轧后钢板采用控制冷却，要求终冷温度控制在 630 ~ 660 ℃之间，冷速 10 ~ 15 ℃/s。通过合适的控轧 + 控冷工艺，最终得到晶粒细小均匀、力学性能良好的铁素体 + 珠光体组织。

2　试验结果对比分析

2.1　产品特性值对比

采集厚度为 20 mm 的 Q345E 两种成分设计方案连续 5 个月生产数据，采用 MINTAB 软件对照国家标准 GB/T 3274—2007[1] 进行过程能力指数分析，具体数据见表 4。

表 4　过程能力指数

项目	C_{pk}				
	碳元素	屈服强度	抗拉强度	延伸率	平均冲击功
方案一	11.91	3.29	1.15	1.02	2.53
方案二	0.97	1.38	1.50	0.88	1.22

过程能力是指过程加工质量方面的能力，是衡量过程加工内在一致性，是稳态下的最小波动。一般 $1.33 \leqslant C_{pk} \leqslant 1.67$，认为过程能力充分满足质量要求，此时产品的合格率大于 99.994%[4]。对表 4 进行分析得出：

(1) 除方案二碳元素过程能力指数低于 1。其他元素过程能力指数均大于 1。方案二碳含量设定接近标准上限，存在成分超标风险。

(2) 方案一较方案二成分设计强韧性过程能力指数高，屈服强度和冲击韧性尤为突出，但抗拉强度过程能力指数稍低，方案一成分设计性能过程能力过高，加工成本高。

2.2　弯曲试验

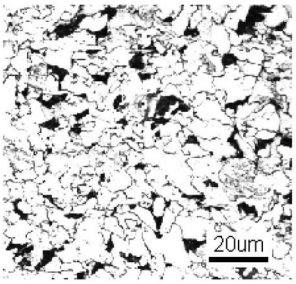
冷弯试样表面完好、无裂纹。

2.3　无损检测

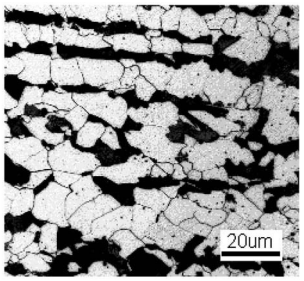
对风电钢板按照 JB/T 4730.3[5] 进行了 Ⅰ 级探伤，无裂纹、分层等内部缺陷，Ⅰ 级探伤合格。

2.4　金相组织

两种成分设计方案的金相组织都为铁素体 - 珠光体组织，晶粒度都为 8 ~ 9 级，但方案二的带状组织明显，见图 1。



(a) 方案一



(b) 方案二

图 1　两种方案成分设计 Q345E 金相组织图

2.5　表面质量及尺寸外形

两种工艺设计方案的表面质量及尺寸、外形均满足标准要求，但方案二比方案一板形较容易控制，由于板形不良追加矫直工序数量较少。

3　结论

(1) 采用方案一和方案二工艺试制的厚度为 10 ~ 40 mm Q345E 钢板，各项性能均能符合国家标准，且余量较大，完全满足用户使用要求。

(2) 在钢中加入 0.03% 左右的微合金化元素 Nb，对钢强韧性的贡献比较明显，可使钢得到极好的综合性能。

(3) 通过对两种成分设计方案性能过程能力指数分析，为开辟一条既符合顾客个性化需求、又经济的产品研制方案提供了可靠的技术支持。

参　考　文　献

[1] GB/T 3274—2007，碳素结构钢和低合金结构钢热轧厚钢板和钢带[S]

[2] 崔风平. 中厚板生产与质量控制[M]. 北京：冶金工业出版社，2008.

[3] 李远征，刘清有，贾书君，等. 轧制工艺对中碳锰钢的组织影响[J]. 材料热处理技术，2011，(6)：60 - 66

[4] 全国质量专业技术人员职业资格考试办公室. 质量专业理论与实务：中级[M]. 北京：中国人事出版社，2010.(2)：185 - 187

[5] JB/4730.3—2005，承压设备无损检测 第 3 部分：超声检测[S]

中国知网　https://www.cnki.net