

控轧控冷工艺参数对风电法兰用钢 Q345E 低温冲击韧性的影响

杨顺虎^{1,2} 朱苗勇¹ 王忠英²

(1 东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004; 2 江苏沙钢集团淮钢特钢股份有限公司, 淮安 223002)

摘要 低合金高强度钢 Q345E(/% : 0.12 ~ 0.15C, 0.20 ~ 0.25Si, 1.40 ~ 1.50Mn, ≤0.010P, ≤0.005S) 的生产流程为 80 t 顶底复吹转炉-LF-RH-Φ450 mm 铸坯 CC-Φ110 mm 棒材连轧工艺。工艺试验了压缩比(10.33 ~ 20.25)、开轧温度(1 120 ~ 1 080 ℃)和冷却方式(0.2 ℃/s 空冷和 0.5 ℃/s 风冷)对该钢 -40 ℃, V-型缺口冲击韧性的影响。结果表明, 随压缩比增加, 开轧温度降低, 冷却速度增加, 该钢 -40 ℃ 冲击功显著增加, 采用压缩比 16.74, 开轧温度 1 100 ℃, 0.5 ℃/s 风冷工艺, Q345E 钢组织细小、均匀, -40 ℃ 冲击功为 40 J。

关键词 风电法兰用钢 Q345E 控轧控冷工艺 组织 低温冲击功

Effect of Controlling Rolling and Cooling Parameters on Low Temperature Impact Toughness of Q345E Steel for Wind Power Flange

Yang Shunhu^{1,2}, Zhu Miaoyong¹ and Wang Zhongying²

(1 School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004;
2 Huaigang Special Steel Co Ltd, Jiangsu Shagang Group, Huai'an 223200)

Abstract The production flowsheet for low alloy high strength steel Q345E (/% : 0.12 ~ 0.15C, 0.20 ~ 0.25Si, 1.40 ~ 1.50Mn, ≤0.010P, ≤0.005S) is 80 t top and bottom combined blown converter-LF-RH-Φ450 mm bloom CC-Φ110 mm bar continuous rolling process. The effect of reduction ratio (10.33 ~ 20.25), beginning rolling temperature (1 120 ~ 1 080 ℃) and cooling mode (0.2 ℃/s air cooling and 0.5 ℃/s wind cooling) on V-notch impact energy of steel at -40 ℃ has been commercial-tested. Results show that with increasing reduction ratio, decreasing beginning rolling temperature and increasing cooling speed the impact energy of steel at -40 ℃ obviously increases; and with using reduction ratio 16.74, beginning rolling at 1 100 ℃ and 0.5 ℃/s wind cooling process, the steel Q345E has fine and homogeneous structure and its impact energy at -40 ℃ is 40 J.

Material Index Q345E Steel for Wind Power Flange, Controlling Rolling and Cooling Process, Structure, Low Temperature Impact Energy

低合金高强度钢在钢铁材料中是使用量最大的工程结构钢^[1], Q345E 钢生产工艺及质量的研究大多集中在微合金元素对控轧控冷生产板材性能的影响^[2-4]。

目前淮钢生产的 Q345E 主要应用于风制作电法兰, 该产品生产初期 -50 ℃ 低温冲击韧性不合格率较高, 为了解决这个问题, 首先降低钢中的 P、S 含量, 磷对钢材的低温脆性转变温度的影响极大, 每增加 0.01% 则可使低温脆性转变温度提高约 7 ℃, 因此磷是极为有害的元素^[5]。同时对生产过程采用控轧控冷工艺^[6], 改善 Q345E 的微观组织状态, 来提高低温冲击韧性, 取得了较好的效果。

1 试验材料及方法

1.1 Q345E 棒材主要技术指标及生产工艺流程

试验采用淮钢第四轧钢厂生产的 Q345E 棒材, 生产工艺流程为: 80 t BOF + LF + RH + CCM, 主要

装备及技术参数如表 1, 连铸成分执行 GB/T1591-2008 中规定 Q345E 钢的化学成分, 并加以控制, 符合表 2 范围。碳、锰、镍、磷元素对钢材冲击功的相关影响如下:

(1) 碳: 碳使正火碳素钢的脆性转变温度升高, 使冲击吸收功下降。

(2) 锰: 铁素体-珠光体钢的冲击吸收功, 可因添加锰而得到改善。锰可以降低奥氏体向铁素体转变的温度, 从而可使晶粒细化。

(3) 镍: 加镍会使碳钢的缺口韧性改善。在含碳 0.1% ~ 0.2% 的钢中加入镍时随加入量的增加, 冲击吸收功提高, 当镍的含量为 0.15% ~ 0.25% 时, 能有效地提高冲击吸收功。

(4) 磷: 磷降低钢的冲击功, 提高钢的脆性转变温度, 还明显促进钢的回火脆性。

1.2 试验方法

钢材轧制的主要过程为: 经过双蓄热步进梁式

表1 BOF-LF-RH-CC 主要装备及技术参数

Table 1 BOF-LF-RH-CC flowsheet main equipment and technical parameters

主要装备	项目	技术参数
顶底复吹转炉	公称容量/t	80
	熔池深度/mm	1 293
	熔池直径/mm	4 080
	有效工作容积/m ²	79.7
	冶炼周期/min	35
LF 钢包精炼炉	公称容量/t	90
	变压器额定容量/MVA	18
	升温速度/(°C · min ⁻¹)	3~4
	处理周期	30~40
RH 真空处理装置	公称容量/t	100
	插入管内径/mm	450
	循环流量/(t · min ⁻¹)	95
	真空棒抽气能力/(kg · h ⁻¹)	600
	真空棒工作真空度/Pa	67
	极限真空度/Pa	20
	冷态抽气时间/min	<3.5
	真空处理时间/min	15~20
圆坯连铸机	连铸机流数	4
	弧半径(R)/m	14
	铸坯断面/mm	450
	拉速范围/(m · min ⁻¹)	0.18~0.22
	过热度控制/°C	20~40

表2 Q345E 钢的化学成分/%

Table 2 Chemical composition of steel Q345E / %

项目	C	Si	Mn	P	S
GB/T 1591-2008	≤0.18	≤0.55	1.00~1.60	≤0.025	≤0.025
试验钢	0.12~0.15	0.20~0.25	1.40~1.50	≤0.010	≤0.005

加热炉加热后,先采用有牌坊双辊可逆式轧机进行开坯,然后采用短应力线卡盘式轧机进行连轧,棒材出了成品轧机后进入步进式冷床,进行冷却。

试验采用 Φ450 mm 的圆铸坯,由圆铸坯轧制的圆钢的直径以及压缩比如表 3 所示。

以规格 Φ110 mm 的钢材作为研究对象,根据钢材的含碳量确定了加热温度为 1 200 °C。研究了钢坯不同开轧温度、钢材不同冷却方式(表 3)对钢材

低温冲击韧性的影响。

2 试验结果与分析

将钢加热到奥氏体化温度,然后进行塑性变形,在每道次的变形过程中或者在两道次之间发生动态或静态再结晶,并完成其再结晶过程。经过反复轧制和再结晶,使奥氏体晶粒细化,这为相变后生成细小的铁素体晶粒提供了先决条件。

材料的加工工艺,包括加工后的冷却工艺和材料的成分一起还影响材料的相变产物的种类、形貌、数量等组织结构特征,从而影响材料的韧性。

2.1 试验结果

根据 GB/T229-2007 制作标准冲击试样,试样长度为 55 mm,横截面为 10 mm × 10 mm 方形截面,在试样长度中间有 V 型缺口。V 型缺口的夹角为 45°,深度为 2 mm,底部曲率半径为 0.25 mm。检验其在 -40 °C 下的冲击性能。试验结果如表 3 所示。

2.2 微观组织分析

将冲击试样磨横向后制作成金相试样,用 4%

表3 Q345E 钢压缩比、开轧温度和冷却方式对 -40 °C V-型冲击功的影响

Table 3 Effect of reduction ratio, beginning rolling temperature and cooling mode on -40 °C V-Type impact energy of steel Q345E

编号	规格 Φ/mm	压缩比	开轧温度/°C	冷却方式	-40 °C 冲击功/J
1#	140	10.33	1 120	空冷	17
2#	130	11.98	1 120	空冷	22
3#	120	14.06	1 120	空冷	25
4#	110	16.74	1 120	空冷	34
5#	100	20.25	1 120	空冷	50
6#	110	16.74	1 120	空冷	22
(同 2#)	110	16.74	1 120	空冷	22
7#	110	16.74	1 100	空冷	33
8#	110	16.74	1 080	空冷	38
9#	110	16.74	1 100	空冷	33
(同 7#)	110	16.74	1 100	(0.2 °C/s)	33
10#	110	16.74	1 100	风冷 (0.5 °C/s)	40

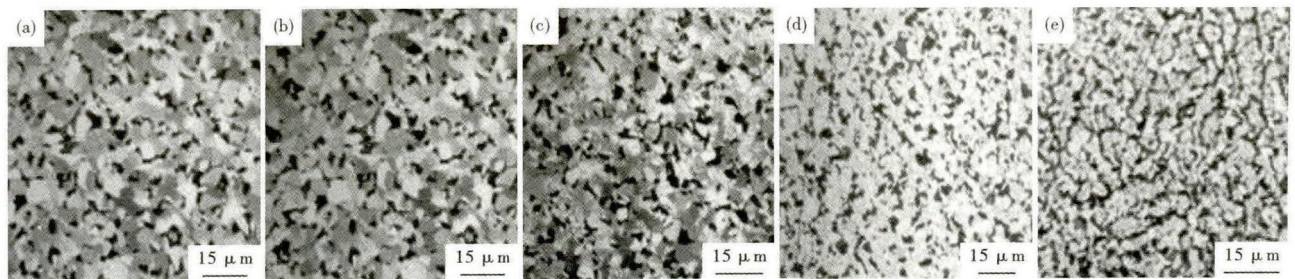


图1 压缩比(a)10.33,(b)11.98,(c)14.06,(d)16.74和(e)20.25对Q345E钢组织形貌的影响,开轧温度1 120 °C,空冷
Fig. 1 Effect of reduction ratio on morphology of structure of steel Q345E, reduction ration 10.33 (a), 11.98 (b), 14.06 (c), 16.74 (d) and 20.25 (e), beginning rolling temperature at 1 120 °C, air cooling

的硝酸酒精溶液腐蚀后观察样品的微观组织。

从图 1 可以看出,随着材料压缩比的增加,试样的铁素体和珠光体的颗粒逐渐减小。由于细晶粒受到外力发生塑性变形时,其塑性变形可分散在更多的晶粒内进行,塑性变形均匀,应力集中较小。此外,晶粒越细,晶界越多,晶界越曲折,越不利于裂纹的扩展,因此 5# 样的低温冲击值就略高些。

从图 2 可以看出,若开轧温度比较高,则奥氏体晶粒比较大。随着开轧温度的降低,原始奥氏体晶粒尺寸逐渐减小,经过轧制后铁素体和珠光体的组织较为致密。

晶粒越细小,晶粒内部的空位数目和位错均减少,位错与空位以及位错间的弹性交互作用的机遇下降,位错易于运动,亦即表现出较好的塑性;位错数目减少,塞积位错数目下降,只能产生轻度的应力场,从而将推迟微孔和微裂纹的萌发,致使断裂应变增加。除此之外,细晶粒为同时在更多的晶粒内开动位错和增殖位错提供了机遇,即细晶粒能使塑性变形更加均匀,呈现出较高的塑性变形。

从图 3 中可以看出,轧后冷却方式不同所得到的组织状态有明显的区别。空冷和风冷相比,冷却速度慢,先共析铁素体转变越充分,碳元素分布越不均匀,带状组织越严重。

轧后控制材料的冷却速度可以细化相变前的奥氏体组织,阻止或延迟碳化物在冷却过程中过早析出,使其在铁素体中弥散析出,提高强度。同时减小珠光体团的尺寸,细化珠光体片层间距,改善钢材包括塑性、韧性等在内的综合力学性能。

带状组织的存在使钢的组织不均匀,并影响钢材性能,形成各向异性,降低钢的塑性、冲击韧性和断面收缩率。

3 结论

(1) 晶界是位错运动的障碍,细化晶粒可使材料的屈服强度提高。晶界可把塑性变形限定在一定的范围内,使变形均匀化,晶粒细化可以提高材料的塑性;晶界又是裂纹扩展的阻力,所以细化晶粒还可

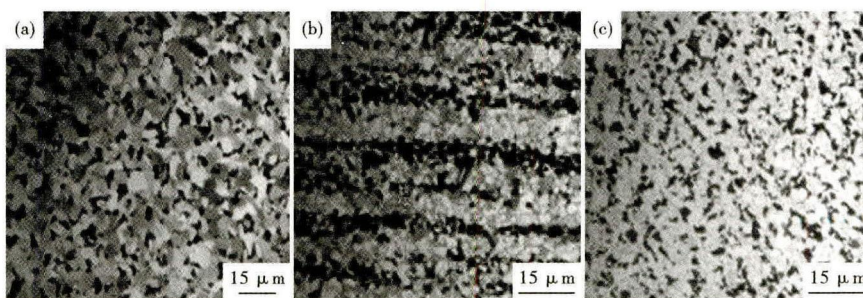


图 2 开轧温度对 Q345E 钢组织形貌的影响,开轧温度:(a)1120 °C;(b)1100 °C;(c)1080 °C,压缩比 16.74,空冷

Fig.2 Effect of beginning rolling temperature on morphology of structure of steel Q345E, beginning rolling at (a) 1120 °C; (b) 1100 °C and (c) 1080 °C, reduction ratio 16.74, air cooling

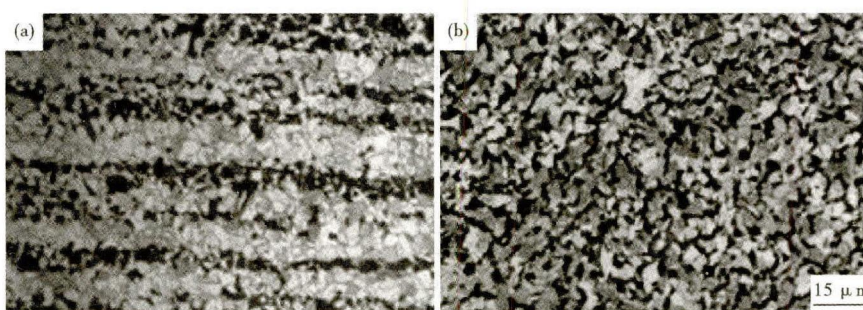


图 3 冷却速度对 Q345E 钢组织形貌的影响:(a)0.2 °C/s 空冷;(b)0.5 °C/s 风冷,压缩比 16.74,开轧温度 1100 °C

Fig.3 Effect of cooling speed on morphology of structure of steel Q345E, (a) 0.2 °C/s air cooling and (b) 0.5 °C/s wind cooling, reduction ratio 16.74, beginning rolling temperature at 1100 °C

以改善材料的韧性。晶粒愈细,裂纹扩展临界应力也愈大,材料的韧性愈高。

(2) 控制 Q345E 钢中的硫、磷含量,使压缩比增至 16.74,开轧温度降至 1100 °C,轧后风冷速度增至 0.5 °C/s,该钢的 -40 °C 冲击功可达 40 J。

江苏省重点技术创新项目[2011]-524

参考文献

- [1] 干勇,田志凌,董翰,等.中国材料工程大典第 2 卷钢铁材料工程(上)[M].北京:化学工业出版社,2006:409-419.
- [2] 朱伏先,刘彦春,李艳梅,等. Q345 钢奥氏体再结晶行为对组织和性能的影响[J].东北大学学报(自然科学版),2005,26(6):566-569.
- [3] 范建文,易敏,陈明跃,等.细晶强化 Q345 中板的控轧控冷工艺研究[J].轧钢,2003,20(1):11-14.
- [4] 赵刚,解国宏,余驰斌,等.含铌钛微合金汽车用钢力学性能与控轧控冷工艺关系的研究[J].钢铁研究,2003(2):30-32.
- [5] 李长龙,陈言俊,梁如国,等. Q345 钢在低温下的力学性能研究[J].山东建筑工程学院学报,2003(1):19-20.
- [6] 李曼云,孙本荣.钢的控制轧制和控制冷却技术手册[M].北京:冶金工业出版社,1990:25.

杨顺虎(1974-),男,博士生(东北大学),高级工程师,燕山大学(本科)毕业,钢铁冶金、金属材料研究。

E-mail: YSH3754134@163.COM

收稿日期:2014-12-15