

# Nb 对 Q345 系列钢板强韧性的影响

衣鹏飞 刘春明 姜中行 侯园虹

(技术研究院)

**摘 要** 通过加入微合金元素 Nb, 发挥其在高温变形时推迟奥氏体的再结晶时间, 提高奥氏体再结晶温度的作用, 轧制工艺上采用控制轧制和控制冷却能有效提高 Q345 系列钢板的强韧性。采用再结晶控制轧制及非再结晶控制轧制等方法来控制钢板晶粒尺寸, 细化晶粒, 发挥细晶强化以及析出强化的作用, 可以降低钢板的韧脆转变温度。试验结果显示, 在钢中加入微合金元素 Nb 后, 通过控制轧制控冷工艺, 提高了 Q345 系列中厚钢板的强度, 特别是 50% FATT 达到  $-73^{\circ}\text{C}$ , 与 Q345B 钢板相比降低了  $48^{\circ}\text{C}$ 。

**关键词** Nb 控轧控冷 再结晶 50% FATT

## The Infection of Nb on the Q345E Steel Plate

YI Pengfei LIU Chunming JIANG Zhonghang HOU Yuanhong

(The Research Institute of Technology)

**Abstract** When the microalloy element Nb is added, microalloy plays a function to put off the time of austenitic re-crystallization and to improve its temperature, while on the rolling technics, the controlled rolling and controlled cooling are applied which effectively improve the intension and toughness of Q345E steel plate. And applying re-crystallization rolling and non-recrystallization rolling etc. methods to control the grain size of plate, to fine the grain and to play the action of fineness and separation intensifying can fall the 50% FATT. The testing result shows that after the microalloy element Nb is added into the plate, the strength and ductility of Q345E steel plate is improved, especially 50% FATT, it reaches to  $-73^{\circ}\text{C}$ , reduced about  $48^{\circ}\text{C}$  than Q345B Steel Plate.

**Key Words** Nb, controlled rolling and controlled cooling, re-crystallization, 50% FATT

20 世纪 50 ~ 60 年代, 以 Mn 作为合金化元素设计出我国第一个低合金钢种 16Mn, 对当时提高构件寿命和安全性、改善焊接性能等起到了很大作用。随着科学技术的发展以及用户对钢材品种质量要求的提高, 16Mn 已经难以满足钢材的使用要求。70 年代以后, 在充分认识到铌、钒、钛为合金元素对细化晶粒和析出强化的作用后, 逐渐开发出石油天然气用钢、汽车用钢、公路桥梁用钢、海洋船舶用钢、工程机械用钢、建筑用钢和锅炉压力容器用钢等系列低合金高强度钢, 基本满足了市场对高强度钢的需求。

铌是最有效细化晶粒的微合金元素之一, 通

过推迟奥氏体在变形过程中的再结晶, 使变形奥氏体内的位错密度和畸变能增加, 在快速冷却过程中提高铁素体、珠光体的形核率从而使晶粒细化<sup>[1]</sup>。由于铌合金的价格低廉, 与钒合金相比市场价格平稳, 因此在生产过程中主要采用在钢中加入微合金元素铌来达到细化晶粒, 降低钢板韧脆转变温度, 提高低温冲击韧性。首钢近年来在中厚板产品品种研发方面加强开发力度, 向着高强度高韧性方向发展, 开发出系列高强度、低合金钢。本试验主要研究铌对 Q345 系列钢板强韧性的影响。目前该技术已应用在 Q345E 钢的生产中 (供 GE 公司应用于风力发电机塔架钢结构)。

衣鹏飞: 2000 年 7 月毕业于吉林大学, 现在技术研究院从事中厚板

产品研制与开发工作, 工程师。收稿/2004-04-26

## 1 试验条件

### 1.1 试样

选取 Q345B 和 Q345E, 其钢板成分见表 1。

由表 1 可见, Q345E 与 Q345B 相比, C、Si、Mn、P、S 的含量相差不大; Q345E 钢板中增加了 0.038% 的 Nb。

表 1 钢板成分

钢种	样号	炉号	C	Si	Mn	P	S	Nb
Q345B	1	5A03776920	0.14	0.43	1.42	0.016	0.005	-
Q345E	2	4C08539540	0.15	0.42	1.42	0.018	0.005	0.038

## 2 试验结果

### 2.1 钢板力学性能

钢板力学性能见表 2。

表 2 钢板力学性能

钢种	样号	炉号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
Q345B	1	5A03776920	365	515	27.0
Q345E	2	4C08539540	450	555	23.0

由表 2 可见, 在钢中加入 0.038% 的 Nb 后, Q345E 钢板比 Q345B 钢板屈服强度提高了 85 MPa, 抗拉强度提高了 40 MPa。

### 2.2 钢板韧脆转变曲线

用 Q345B 钢板和 Q345E 钢板制成 10 mm × 10 mm × 55 mm V 型缺口试样, 做 0 °C 到 -100 °C 系列低温冲击试验, 冲击功值和脆性断面率曲线如图 1, 2 所示。

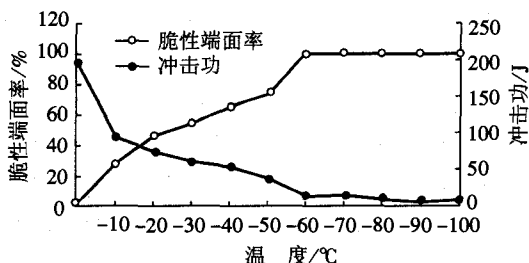


图 1 Q345B 钢板韧脆转变曲线

由图 1, 2 可见, Q345B 钢板的 50% FATT 温度为 -25 °C, Q345E 钢板的 50% FATT 温度

### 1.2 控轧控冷工艺

采用再结晶区 (I 阶段) 和未再结晶区 (II 阶段) 控轧, 钢板轧制规格为 20 mm。其轧制工艺如下:

I 阶段: 开轧温度为 1 050 ~ 1 150 °C;

II 阶段: 开轧温度小于 950 °C, 终轧温度为 800 ~ 850 °C, 终冷温度为 650 ~ 690 °C。II 阶段轧坯厚度为成品厚度的 3 倍。

为 -73 °C。与 Q345B 钢板相比, Q345E 钢板的 50% FATT 温度降低了 48 °C。

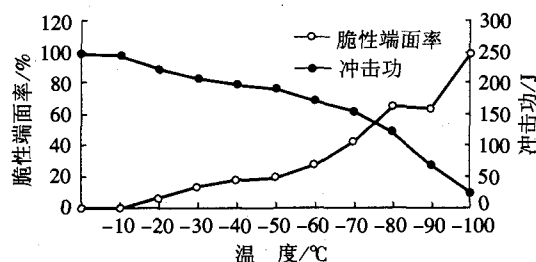


图 2 Q345E 钢板韧脆转变曲线

### 2.3 钢板非金属夹杂物

钢板非金属夹杂物含量都很低, 只有 D 类 (球形氧化物) 细系夹杂物等级为 0.5 级, 其他类别全部为 0 级, 说明这 2 种钢板的钢质都很纯净。

### 2.4 钢板组织与晶粒度

钢板组织与晶粒度见 3。

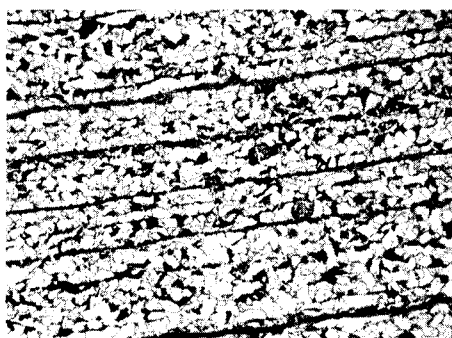
表 3 钢板组织与晶粒度

钢种	样号	炉号	金相组织			晶粒度/级
			边部	1/4 处	中心	
Q345B	1	5A03776920	F+P	F+P	F+P	8.0
Q345E	2	4C08539540	B+F+P	F+P	F+P	10.0

从表 3 可见, Q345E 钢板的晶粒度 (10.0 级) 比 Q345B 钢板的晶粒度 (8.0 级) 要细小。

1, 2 号样组织分别见图 3, 4。

由图 3, 4 可见, 1 号样的组织为铁素体 + 珠光体, 2 号样的组织为铁素体 + 珠光体 + 少量的贝氏体。

图3 1号样组织 ( $\times 200$ )图4 2号样组织 ( $\times 200$ )

### 3 分析

微合金元素 Nb、V、Al、Ti 对再结晶的阻碍作用如图 5 所示<sup>[2]</sup>。

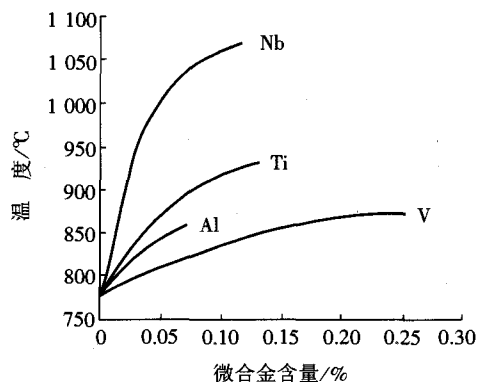
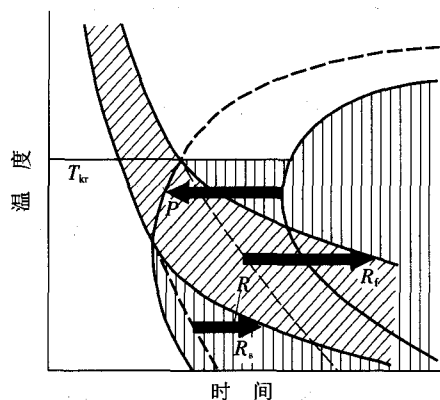


图5 微合金元素 Nb、V、Al、Ti 对再结晶的阻碍作用

传统碳锰钢的未再结晶温度比较低, 钢中加入微合金元素后, 钢的未再结晶温度就会提高, 碳、氮化物形成元素即使含量很少, 也是非常有效的, 而其中 Nb 是最有效的元素。由图 5 可见, 微合金元素 Nb、V、Al、Ti 中 Nb 能有效提

高钢板奥氏体变形的再结晶温度, 仅含 0.03% 的 Nb 钢, 在温度低于 950 °C 时, 不会发生再结晶。Q345E 钢板就是利用微合金元素 Nb 在高温变形时推迟奥氏体的再结晶时间、提高奥氏体的再结晶温度、在轧制工艺上采用两阶段控制轧制及轧后采用控制冷却, 从而达到细化晶粒、降低钢板的韧脆转变温度的目的。

奥氏体再结晶与析出的相互作用如图 6 所示<sup>[2]</sup>。



$T_{kr}$  - 再结晶温度;  $P$  - 析出;  $R_f$  - 再结晶结束;  
 $R$  - 再结晶;  $R_s$  - 再结晶开始

图6 再结晶与析出的相互作用

Nb 元素有抑制奥氏体再结晶的作用。首先是固溶态下 Nb 原子在某种程度上会推迟奥氏体的再结晶的发生; 其次, Nb 在位错多的组织中将以碳化物或氮化物的形式快速析出, 这些应变诱导析出的粒子会完全抑制再结晶的发生<sup>[3]</sup>。与 Q345B 钢板相比, Q345E 钢板就是利用微合金元素 Nb 推迟再结晶的作用, 使奥氏体晶粒沿轧制方向伸长, 变形晶粒内的变形带分割了奥氏体晶粒, 增加了奥氏体的晶界面积, 奥氏体向铁素体转变时的成核点增多, 从而细化了铁素体晶粒。这种细晶强化以及析出强化的作用, 使钢板的强韧性提高、在低温下具有较高的冲击功。

### 4 结 语

由于 Q345E 钢板中加入了微合金元素 Nb, 其在钢中以碳化物和氮化物的形式析出, 并吸附于晶界界面, 由此可显著降低界面活动性, 阻碍晶面的扩散移动, 从而阻止晶粒的长大, 同时

Nb 有很强的抑制奥氏体再结晶的作用,使变形的奥氏体晶粒晶界和晶内形核点增多,在第二阶段控制轧制和冷却过程中能够有效细化钢板的铁素体和珠光体晶粒,从而使钢板的转变温度明显降低。从本试验的结果来看, Q345E 钢板的 FATT50% 温度比 Q345B 钢板的 FATT50% 温度低 48 ℃。

## 参 考 文 献

- 1 M·科恩. 钢的微合金化及控制轧制. 北京: 冶金工业出版社, 1984: 184
- 2 东涛等. 神奇的 Nb-铌在钢铁中的应用. 北京: 中信美国钢铁公司, 1999

编辑/李 燕

(上接第 26 页) 度可用以下经验公式进行计算:

$$\sigma_{bw} = K\sigma_{br}(D/d)^{1/2} - \sigma_{br}$$

式中:  $\sigma_{bw}$ ——该道次加工硬化强度, MPa;

$K$ ——时效硬化系数, 一般取 1.05 ~ 1.15;

$D$ ——原始盘条直径, mm;

$d$ ——拉拔后钢丝直径, mm;

$\sigma_{br}$ ——盘条原始抗拉强度, MPa。

目前使用规格为  $\phi 12.5$  mm 的 82B 盘条制作 1 860 MPa 钢绞线通常采用 8 道连续拉拔, 国产设备拉拔速度小于 4 m/s, 而进口设备拉拔速度却能达 7 m/s 以上。所以在设计拉拔工艺时应合理分配每道次的减径率。一般第一道的减径率较低, 以便于穿线, 2~3 道最高, 以后逐渐减小, 最后一道考虑到钢丝的表面质量应最小。而拉拔速度应根据拉拔过程中的润滑、冷却系统和钢材的材质进行综合考虑而设定。

## 4 结 语

预应力钢绞线用 82B 盘条属于深加工盘条。

为了降低在拉拔、捻制过程中的断丝率, 应优化炼钢、连铸、轧制和控冷各环节的生产工艺, 避免在钢坯中出现大型夹杂和表面卷渣现象, 降低钢坯中的疏松、缩孔和偏析等级, 盘条的索氏体率应大于 80%, 避免盘条表面出现折叠、凹坑、结疤和耳子等缺陷; 拉拔时应选用优良的润滑剂, 设计合理的变形道次和每道次减径率, 在拉拔前应该仔细检查模子的损坏程度, 选择优良的拉丝模并调整拉丝模与拉拔中心线的位置, 在拉拔过程中应不时的捣动拉丝粉, 避免拉丝粉结成块状而影响润滑、增加断丝率。

## 参 考 文 献

- 1 陈肇元. 高强与高性能混凝土的发展及运用. 土木工程学报, 1997 (5): 3-11
- 2 G. Hampejs, D. jung wirth etc. "Galvanisation of prestressing steels" FIP commission reports Dec. 199
- 3 夏木阳, 刘建平. 非金属夹杂物对钢丝性能的影响. 金属制品, 2001 (1): 44
- 4 (日) 浅川基男. 高碳钢的拉拔性能及强度. 住友金属. 1997 (4): 41-48

编辑/李 燕