

## Q450NQR1 高强度耐候钢连铸板坯的高温性能

黎建全<sup>1</sup> 杨素波<sup>1</sup> 高兴健<sup>2</sup> 陈登福<sup>2</sup> 宋立伟<sup>2</sup> 毕艳艳<sup>2</sup>

(1 攀枝花钢铁有限公司,攀枝花 617067; 2 重庆大学材料科学与工程学院,重庆 400030)

**摘要** 采用 DIL402C 热膨胀仪和 Gleeble-1500D 热模拟试验机,测试了 Q450NQR1 钢(%:0.05~0.10C, 0.30~0.50Si, 0.80~1.00Mn, 0.20~0.30Cu, 0.15~0.35Ni, 0.40~0.60Cr)200 mm×1 350 mm 铸坯的热膨胀性能和高温力学性能。结果表明,升-降温速率由 5 °C/min 提高至 10 °C/min 时,升温相变温度区间上移,降温相变区间下移;Q450NQR1 钢连铸坯二次脆性区为 750~1 050 °C,铸坯的矫直温度应 ≥1 050 °C。

**关键词** Q450NQR1 高强度耐候钢 热膨胀性能 热塑性

## Elevated Temperature Performance of Casting Slab of High Strength Weather-Resisting Steel Q450NQR1

Li Jianquan<sup>1</sup>, Yang Subo<sup>1</sup>, Gao Xingjian<sup>2</sup>, Chen Dengfu<sup>2</sup>, Song Liwei<sup>2</sup> and Bi Yanyan<sup>2</sup>

(1 Steel and Vanadium Co Ltd, Pansteel Group, Panzhihua 617067;

2 College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030)

**Abstract** Thermal expansion characteristics and elevated temperature mechanical properties of 200 mm×1 350 mm casting slab of steel Q450NQR1 (%: 0.05~0.10C, 0.30~0.50Si, 0.80~1.00Mn, 0.20~0.30Cu, 0.15~0.35Ni, 0.40~0.60Cr) have been examined by using thermal expansion tester DIL402C and thermal simulator Gleeble-1500D. Results show that with increasing heating and cooling rate from 5 °C/min to 10 °C/min, the heating phase transformation region moves up and the cooling phase transformation region moves down; the secondary brittleness zone of casting slab of steel Q450NQR1 is 750~1 050 °C, therefore the straightening temperature of slab should be ≥1 050 °C.

**Material Index** High Strength Weather-Resisting Steel Q450NQR1, Thermal Expansion Characteristic, Thermoplasticity

攀钢炼钢厂 2# 板坯连铸机为二冷区带直线段的立弯式铸机。近年的生产实践表明,2# 铸机在生产某些低合金高强度钢时,存在比较严重的裂纹缺陷。连铸过程中,凝固坯壳产生裂纹的原因极其复杂,受设备、冷却条件及工艺操作等多方面因素的影响,但最本质的影响因素是铸坯在高温凝固过程中的力学行为<sup>[1-3]</sup>。

高强耐候钢是在钢中添加一定量的 Cu、P、Cr 和 Ni 等合金元素制成的具有优良耐大气腐蚀性能的低合金钢<sup>[4-10]</sup>。Q450NQR1 是屈服强度高达 450 MPa 的新一代高强耐候钢。

### 1 实验研究方法

测试所用的试样取自 2# 铸机所生产的板坯,断面尺寸为 200 mm×1 350 mm,从铸坯横向中心开始向一边进行取样,其化学成分列于表 1 中。

#### 1.1 热膨胀性能测试

实验采用热膨胀仪 DIL402C 对铸坯试样进行热膨胀性能测试。试样尺寸为 Φ4 mm×25 mm,测试过程中通入 Ar 气保护。制订了两组不同的测试温度制度:(1)从室温以 10 °C/min 速度升至 1 250 °C

表 1 Q450NQR1 钢连铸坯的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of casting slab of steel Q450NQR1 /%

| C         | Si        | Mn        | P       | S       | Cu        | Ni        | Cr        |
|-----------|-----------|-----------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
| 0.05~0.10 | 0.30~0.50 | 0.80~1.00 | 0~0.020 | 0~0.008 | 0.20~0.30 | 0.15~0.35 | 0.40~0.60 |

保温 10 min,再以 10 °C/min 降至 100 °C;(2)从室温以 5 °C/min 升至 1 250 °C 保温 10 min,再以 5 °C/min 降至 100 °C。

#### 1.2 高温力学性能测试

实验采用 Gleeble-1500D 热/力模拟试验机对铸坯试样进行热拉伸测试。根据仪器的要求,将试样加工成 Φ10 mm×120 mm 的标准热拉伸圆棒试样,试样的轴向方向与板坯柱状晶生长方向平行。由于中低温度下钢的强度较大,为了保证热拉伸测试顺利完成,将测试温度低于 950 °C 时的试样中间大部分区域的断面直径缩减为 6 mm,在 10 mm 和 6 mm 直径衔接处,采用一定的弧度平滑过渡。

热拉伸测试的温度范围为 600~1 300 °C。测试时,将试样夹持在真空度为 1.33×10<sup>-5</sup> MPa 的真

空槽内,通过大电流以 10 °C/s 的速度加热试样。实验采用两组不同的温度制度,当测试温度低于 1 200 °C 时,将温度从室温加热至测试温度以上 50 °C,保温 3 min 后以 1.65 °C/s 降至所测温度值,在测试温度下保温 5 min,待试样内外温度均匀后,进行热拉伸实验;当温度高于 1 200 °C 时,将温度从室温加热至所测温度,在测试温度下保温 5 min 后,进行热拉伸实验。铸坯试样的热拉伸应变率为  $5 \times 10^{-3} 1/s$ 。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 热膨胀性能

由图 1(a) 可以看出,当升-降温速率均为 5 °C/min 时,升温膨胀曲线上出现两个拐点,其中 749

°C 左右的为  $A_{c1}$  点,895 °C 左右的为  $A_{c3}$  点;而降温膨胀曲线上也出现两个拐点,其中 824 °C 左右的为  $A_{r3}$  点,682 °C 左右的为  $A_{r1}$  点。升温过程中相应的相变点(或区域)的温度高于降温过程,这一差异主要是由于存在一定的升-降温速率引起的。

由图 1(b) 可以看出,升-降温速率提高,升温膨胀曲线上的相变温度区间有所提高,即铸坯试样发生铁素体及珠光体向奥氏体转变的温度区间总体向高温区移动;而降温膨胀曲线上的相变温度区间则有所降低,即铸坯试样发生奥氏体向铁素体及珠光体转变的温度区间总体向低温区移动。

### 2.2 高温强度

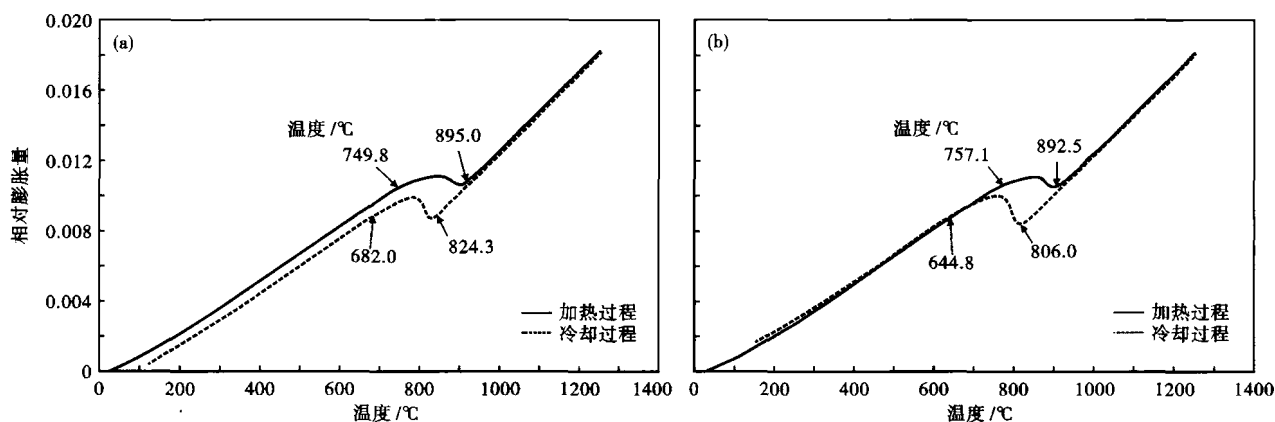


图 1 温度对 Q450NQR1 钢铸坯相对膨胀量的影响:升-降温速率- (a)5 °C/min;(b)10 °C/min

Fig.1 Effect of temperature on relative expansion ratio of casting slab of steel Q450NQR1; heating-cooling rate- (a) 5 °C/min; (b) 10 °C/min

由图 2 可以看出,Q450NQR1 钢连铸坯的高温屈服强度和抗拉强度均是随温度的升高,总体呈下降趋势,仅在 800 ~ 1 000 °C 有一些小的波动。在 600 ~ 750 °C,随着温度的升高,铸坯的强度指标快

速下降;而在 750 ~ 900 °C,抗拉强度值基本保持在 115 MPa 左右,屈服强度值的下降也开始变得缓慢;在 900 °C 以上,铸坯的强度指标随温度的升高平缓降低。在 1 300 °C 时,铸坯试样的屈服强度仅为 15 MPa,而抗拉强度仅为 20 MPa。

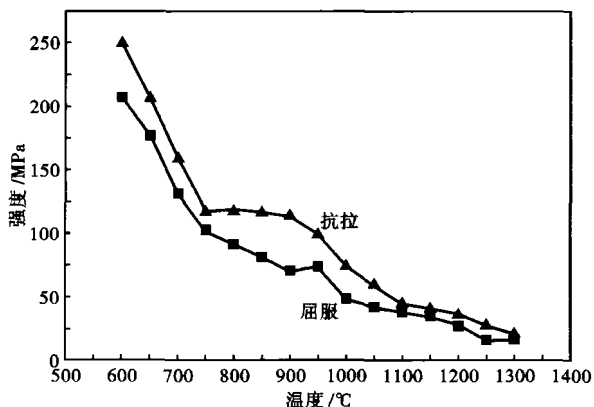


图 2 温度对 Q450NQR1 钢铸坯屈服和抗拉强度的影响

Fig.2 Effect of temperature on yield and tensile strength of casting slab of steel Q450NQR1

值得注意的是,在抗拉强度曲线上,750 °C 和 900 °C 时曲线的斜率发生了较大的变化。这说明,随着温度的降低,在 900 °C 时由形变诱导产生的铁素体薄膜开始在奥氏体晶界处形成;在 900 ~ 750 °C,基本保持不变的抗拉强度值表明铁素体仍以薄膜的形式存在于凝固组织中;当温度下降到 750 °C 时,由  $\gamma \rightarrow \alpha$  相变产生的大量铁素体将使铸坯的塑性变形能力得到一定的改善。

### 2.3 热塑性

由图 3 可以看出,在 750 ~ 1 050 °C,热塑性曲线上出现了一个明显的塑性凹槽,850 °C 谷底处的断面收缩率为 22%;在 850 ~ 1 050 °C,随着温度升

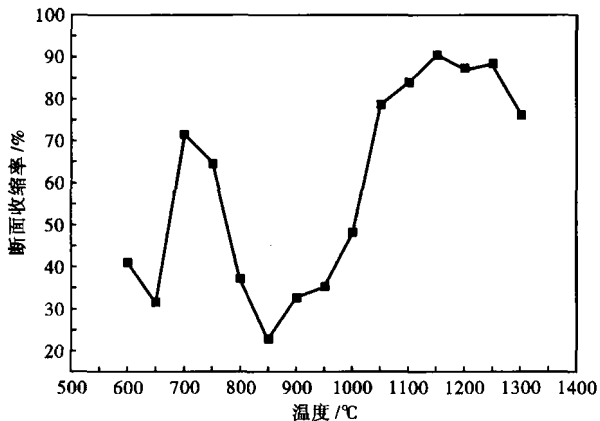


图 3 温度对 Q450NQR1 钢铸坯断面收缩率的影响

Fig. 3 Effect of temperature on reduction of area of casting slab of steel Q450NQR1

高, 试样的断面收缩率逐渐回升。这说明, Q450NQR1 钢连铸坯的二次脆性区出现在 750 ~ 1 050 °C。而 1 050 ~ 1 250 °C 为铸坯的最佳塑性区, 铸坯试样的断面收缩率基本保持在 80% 以上。

Suzuki 等人的研究表明<sup>[11,12]</sup>, 连铸过程中铸坯发生二次脆化是由于在奥氏体晶界处析出的 Nb(CN) 和 AlN 等第二相质点在外力作用下引起晶界滑移, 形成空洞, 增加了晶界的脆性。而 Mintz 等人的研究表明<sup>[13]</sup>, 在  $\gamma \rightarrow \alpha$  相变时, 在  $\gamma$  晶界产生薄膜状的初生铁素体, 其强度仅为奥氏体的 1/4, 易使晶界集中不均匀变形而产生晶界脆裂。由于 Q450NQR1 钢连铸坯以 Cu、Ni、Cr 为主要合金化元素, 其二次脆性区产生脆化主要是由奥氏体晶界处

形变诱导产生的铁素体薄膜所引起的。

由图 3 还可以看出, 在 700 °C 以下, 热塑性曲线上出现一个低温脆性区, 在 650 °C 时, 铸坯试样的断面收缩率仅为 31%。实践经验和大量研究表明<sup>[14,15]</sup>, 当断面收缩率( $\psi$ ) > 60% 时, 铸坯不出现裂纹; 当 40% <  $\psi$  < 60% 时, 铸坯裂纹发生率较低; 当  $\psi$  < 40% 时铸坯裂纹敏感性增高。因此, 对 Q450NQR1 钢的连铸过程, 铸坯的冷却宜采用弱冷热行方案, 铸坯的目标表面温度特别是矫直区域的表面温度应控制在 1 050 °C 以上。

### 3 结论

(1) 提高升温速率, Q450NQR1 钢铸坯试样发生  $\alpha \rightarrow \gamma$  相变的温度区总体向高温区移动; 提高降温速率, 铸坯试样发生  $\gamma \rightarrow \alpha$  相变的温度区间总体向低温区移动。

(2) Q450NQR1 钢在高温奥氏体单相区, 铸坯容易受外力而发生塑性变形, 容易产生裂纹缺陷。

(3) Q450NQR1 钢连铸坯的二次脆性区出现在 750 ~ 1 050 °C, 塑性凹槽较深较宽, 该温度区产生脆化主要是由奥氏体晶界处形变诱导产生的铁素体薄膜所引起的。此外, 在 700 °C 以下出现一个低温脆性区。因此, 铸坯的冷却宜采用弱冷热行方案, 矫直区域的表面温度应控制在 1 050 °C 以上。

国家自然科学基金资助(50774105); 2009 年高等学校博士学科点专项科研基金资助(20090191110012)

### 参考文献

- 蔡开科, 秦哲, 孙彦辉. 连铸坯凝固过程坯壳变形与铸坯裂纹控制. 中国金属学会 2008 年连铸设备技术交流会, 2008 年
- 陈登福, 高兴健, 王启明, 等. Q235G 钢连铸坯的高温力学性能分析. 过程工程学报, 2009, 9(21): 210
- Jonsta Z, Hernas A, Mazanec K. Contribution to Mechanical Metallurgy Behavior of Steel during Continuous Casting. Materials Processing Technology, 1998, 78: 90
- 钱余海, 李自刚. 加速腐蚀环境下高强耐候钢 Q450NQR1 的耐腐蚀性能研究. 宝钢技术, 2007(2): 5
- Prasad S N, Mediratta S R, Sarma D S. Influence of Austenitisation Temperature on the Structure and Properties of Weather Resistant Steels. Materials Science and Engineering, 2003, A358: 288
- 陆匠心, 李爱柏, 李自刚, 等. 宝钢耐候钢产品开发的现状及展望. 中国冶金, 2004(12): 23
- 于千. 耐候钢发展现状及展望. 钢铁研究学报, 2007, 19(11): 1
- 刘丽宏, 齐慧滨, 卢燕平, 等. 耐大气腐蚀钢的研究概况. 腐蚀科学与防护技术, 2003, 15(2): 86
- Tow Nsend H E. Effects of Alloying Elements on the Corrosion of Steel in Industrial Atmospheres. Corrosion, 2001, 57(6): 497
- 于元法, 范柜深. 低合金钢在海洋环境中的腐蚀规律. 钢铁, 1992, 27(11): 33
- Suzuki H G, Nishimura S, Imamura J, et al. Embrittlement of Steels Occurring in the Temperature Range From 1000 to 600°C. Transactions ISIJ, 1984, 24: 169
- Suzuki H G, Nishimura S, Nakamura Y. Characteristics of Hot Ductility in Steels Subjected to the Melting and Solidification. Transactions ISIJ, 1982, 22: 48
- Mintz B, Abu-Shosha R, Shaker M. Influence of Deformation Induced Ferrite, Grain Boundary Sliding, and Dynamic Recrystallization on Hot Ductility of 0.1% - 0.75% C Steels. Materials Science and Technology, 1993(9): 907
- Minz B, Arrowsmith J M. Hot-ductility Behavior of C-Mn-Nb-Al Steels and its Relationship to Crack Propagation during the Straightening of Continuously Cast Strand. Metals Technology, 1979, 24(1): 31
- Minz B, Mohamed Z, Abushosha R. Influence of Calcium on Hot Ductility of Steels. Materials Science and Technology, 1989, 7: 682

黎建全(1968-), 男, 高级工程师, 重庆大学毕业, 连铸工艺和质量控制。

收稿日期: 2009-11-03