

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.05.018

# 含Nb微合金钢Q345和管线钢X70临界点的测定

王生朝, 欧玲, 孙斌

(湖南工业大学 冶金工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 利用PCY热膨胀仪(热膨胀系数仪),以2℃/min的加热/冷却速率,测定了含Nb微合金钢Q345B, Q345C和管线钢X70的临界点温度Ac1, Ac3, Ar1和Ar3,并依据膨胀曲线图计算出它们的热膨胀系数。试验结果表明,对Q345B和Q345C进行加热时,它们的临界点Ac1和Ac3大致相同,分别相差8℃和3℃;而冷却时的临界点Ar1和Ar3,分别相差23℃和25℃。由于在X70钢中,含有更多的微合金元素Nb, V, Ti等,它们的碳氮化物的溶解和析出会对钢材的相变带来较大的影响,所以X70钢的各个临界点温度比Q345B和Q345C高出许多。但所测试的3个钢种的热膨胀系数没有太大的差别。

**关键词:** 微合金钢; 临界点; 相变; 热膨胀系数

中图分类号: TG335.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)05-0088-04

## Determination of Critical Point of Nb-Microalloyed Steel Q345 and Pipeline Steel X70

Wang Shengzhao, Ou Ling, Sun Bin

(1. School of Metallurgical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** The critical points of Ac1, Ac3, Ar3 and Ar1 of Nb-microalloyed steel Q345B, Q345C and pipeline steel X70 were studied by PCY thermal expansion instrument (thermal expansion coefficient apparatus) with 2℃/min heating/cooling rate, and the thermal expansion coefficients were calculated according to the expansion curves of the experimental steel. The results showed that the difference values of critical points of Ac1 and Ac3 of Q345B and Q345C steel were not large in heating process, which were 8℃ and 3℃, but in cooling process the temperature differences of Ar1 and Ar3 were 20℃ and 25℃ respectively. As there was more microalloyed elements of Nb, V, Ti, etc. containing in X70, the dissolution and precipitation of carbon nitride brought about greater impact on the phase transformation of steel, the critical point of X70 is much higher than that of Q345B and Q345C. There is no much difference in the expansion coefficients of the three tested steel.

**Keywords:** microalloyed steel; critical point; phase change; thermal expansion coefficient

## 0 引言

钢材的临界点会随着加热或冷却速度的变化而偏离平衡相图温度,这对于钢坯在热装、热送中组织应力的变化,及钢材的组织性能等存在重要影响。在一定的加热温度范围内,钢材的临界点会随着加

热速率的增大而升高,但是其奥氏体化时间会缩短。相反,在钢材进行冷却时,其临界点也会因为降温速率的增快而变得更低。此外,钢材的临界点温度Ac1和Ac3与碳的扩散速度成正比例关系<sup>[1-4]</sup>。而对于弥散分布的细晶粒或亚稳定组织的稳定性,通常是正火组织以及淬火组织的比退火组织的要差、片

收稿日期: 2015-05-10

基金项目: 湖南省科学技术厅科技计划基金资助项目(2014GK3169)

作者简介: 王生朝(1970-),男,河南南阳人,湖南工业大学副教授,主要从事材料加工领域的教学与研究,

E-mail: steelboy2006@163.com

状珠光体比球状或粒状珠光体的要差, 而且晶粒颗粒也要细一些, 比较容易进行相变。

对于同一钢种来说, 其退火组织和球状或粒状珠光体升温时对应的Ac1和Ac3温度也要高一些。相反地, 当其进行冷却时, 相变之前的温度越高以及保温时间越长, 会因造成高温奥氏体晶粒的长大以及没有溶解的颗粒数目的减少, 导致降温时的Ar1和Ar3温度低很多<sup>[5-6]</sup>。因此, 在对钢进行临界点的测定时, 为了使得到的数据符合生产实际, 选用的测试试样一般采用退火组织, 或采用与对应钢种具有相同的变形制度和晶粒度的试样, 以保证检测数据更加准确。

本文拟利用热膨胀系数仪(PCY热膨胀仪), 对含Nb的微合金钢Q345B和Q345C, 以及管线钢X70的临界点Ac1, Ac3, Ar1和Ar3进行测定, 并通过其热膨胀曲线图计算其热膨胀系数, 探讨其相变的影响因素和变化规律。

### 1 试验原理

已有对于钢材临界点温度的测试方法, 主要有计算法、金相法和膨胀法。因为钢材的 $\gamma$ 相和 $\alpha$ 相之间存在比容的不同, 一旦进行固态相变, 会导致原有的膨胀效应和温度之间的关系发生变化, 所以能够按照热膨胀曲线来找到对应的相变温度。由于膨胀法的试验材料准备较为简单, 但其结果较为精确。因此, 本试验选用膨胀法对3种钢材的临界点温度进行测试。

如图1所示为亚共析钢在一般情况下的温度-膨胀曲线。

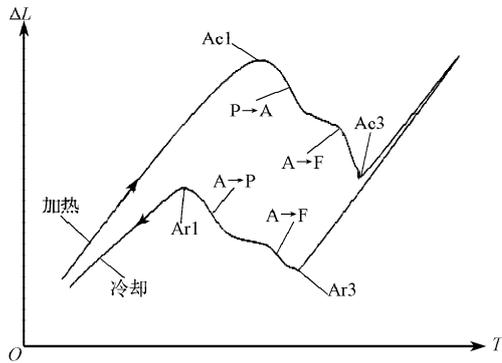


图1 亚共析钢的绝对膨胀值与温度关系

Fig. 1 The relationship between absolute expansion value and temperature of hypoeutectoid steel

由图1可知, 在钢材进行加热的过程中, 如果温度没有达到Ac1, 造成试样长度发生变化的主要原因是热膨胀现象, 即试样变长主要是由热膨胀带来的; 当温度达到Ac1时, 相变开始发生, 因为铁素

体 $\alpha$ 和奥氏体 $\gamma$ 的致密度分别为68%和74%, 所以在进行相变的过程中, 其体积也会相应减小, 与前面的热膨胀伸长叠加, 最后导致样品长度变短, 这种情况一直持续到相变结束。其后, 随着温度的进一步升高, 试样组织完全转变为奥氏体 $\gamma$ , 其长度会随着热膨胀的变化而增长<sup>[7]</sup>。

本研究使用切线法确定钢材的相转变温度, 即根据热膨胀曲线来确定铁素体向奥氏体转变的温度。具体的数据处理方法如图2所示, 即将热膨胀曲线上的纯热膨胀或纯冷却收缩区的直线段延长, 临界点(膨胀曲线偏离直线的起始位置, 即切点)所对应的温度为钢材的相转变温度。

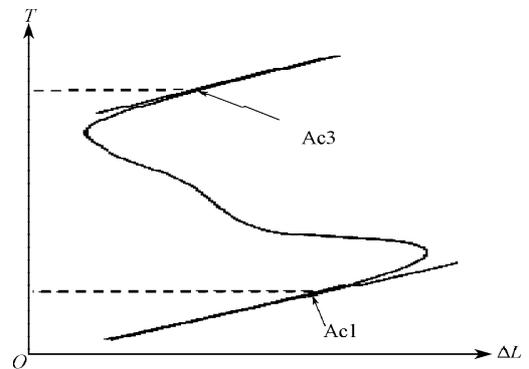


图2 切点法确定临界点示意图

Fig. 2 Schematic diagram for critical point by tangent point method

### 2 试验材料

本试验选用含Nb微合金钢Q345B和Q345C以及管线钢X70 3个钢种, 表1列出了所选用钢材的化学成分及其质量分数。

表1 试验用钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of the tested steels %

钢种	C	Si	Mn	P	S
Q345B	0.163	0.411	1.466	0.030	0.013
Q345C	0.086	0.180	1.412	0.018	0.010
C70	0.055	0.234	1.615	0.011	0.000 6
钢种	Cu	Al	Ti	V	Nb
Q345B	0.037	0.007	0.002	0.003	0.003
Q345C	0.036	0.039	0.003	0.001	0.027
C70	0.234	0.026	0.013	0.041	0.059

试样取自连铸坯, 切割位置在铸坯宽度的1/4左右, 且靠近铸坯的上表面。图3所示为试样的加工尺寸, 试样两头加工为突出的凸台, 以使得试样和膨胀仪中石英管接触面积最小, 保证试样传热的均匀性, 减少变化过程中摩擦阻力对试样的影响, 确保试验结果的精准性。

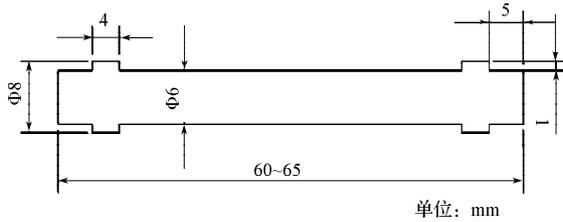


图3 试样加工尺寸图  
Fig. 3 Size of the sample

### 3 试验设备和方法

#### 3.1 试验设备

本试验中选用的主要设备为PCY系列热膨胀仪(热膨胀系数仪),该设备主要被用于检测固体无机材料、金属材料的高温膨胀性能。选用本仪器,可以完成试样的线变量、线膨胀系数、体膨胀系数、相转变等变化曲线的测定。

PCY系列热膨胀仪的关键性能参数设置如下:炉温最高值为1 200 ℃;使用电脑编程执行温度控制,升温速率为0~100 ℃/min;膨胀值测量范围为± 5 mm;膨胀值的测量分辨率为0.1~1 μm;试样可被加工为圆形或方形,尺寸大小为(2~15) mm × (2~15) mm × (20~150) mm。

#### 3.2 试验方法

将制作好的试样放置在PCY热膨胀仪中固定好,然后将测量仪器调零,先缓慢升温,控制升温速率为2 ℃/min;当温度达950 ℃时,保温10 min,以使试样完全奥氏体化;然后以2 ℃/min的冷却速率降至常温。整个试验过程由PCY热膨胀仪将温度及膨胀量的变化情况记录下来,试验温度控制曲线如图4所示。

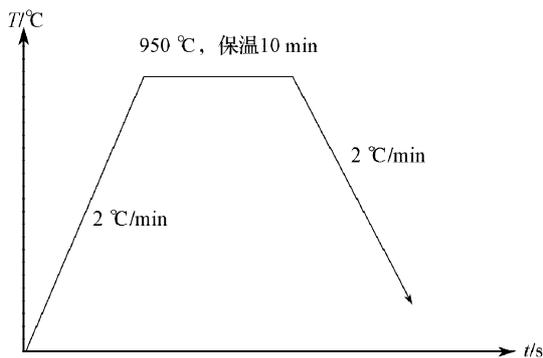


图4 试验工艺曲线  
Fig. 4 Experimental process curve

### 4 试验结果与分析

本试验中,膨胀仪记录的钢材温度-膨胀量关系曲线见图5~7。由图5~7所测钢种的温度-膨胀量关系曲线,采用切点法得出的各试验钢种临界点测量值见表2。

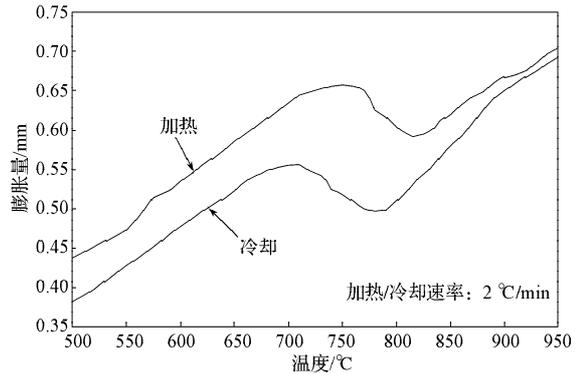


图5 Q345C钢绝对膨胀量-温度变化曲线  
Fig. 5 The changing curve of expansion value - temperature of Q345C steel

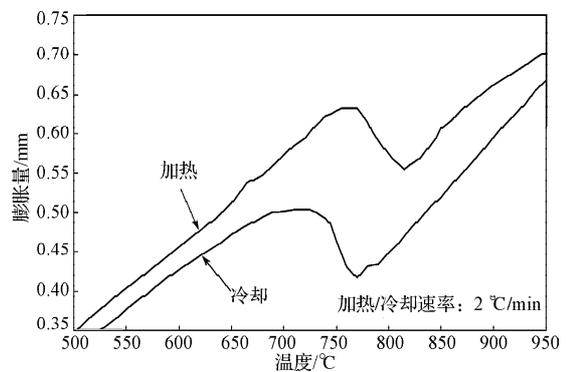


图6 Q345B钢绝对膨胀量-温度变化曲线  
Fig. 6 The changing curve of expansion value - temperature of Q345B steel

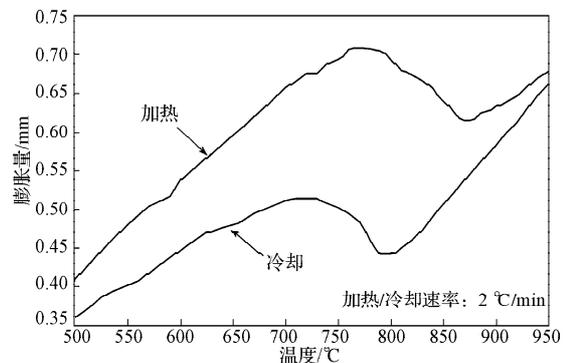


图7 X70钢绝对膨胀量-温度变化曲线  
Fig. 7 The changing curve of expansion value - temperature of X70 steel

表2 试验用钢材的临界点测量值  
Table 2 The measured values of the critical points ℃

钢种	临界点			
	Ac1	Ac3	Ar1	Ar3
Q345B	759	816	718	759
Q345C	751	819	695	784
C70	767	873	737	798

分析表2中的数据可以得知,对于微合金钢Q345B和Q345C,它们的Ac1和Ac3临界温度相差不大,分别为8 ℃和3 ℃;但是在进行降温发生相变

时,其Ar1和Ar3温度分别相差23℃和25℃。与Q345B和Q345C相比,X70钢测得的每一个临界点温度都要比它们高出很多。造成这种现象的原因,可能是在X70钢中,含有Nb,V,Ti等微合金元素的碳氮化物,而这些化合物的溶解和析出对钢的相变过程存在一定的迟滞作用。

根据图5~7所示绝对膨胀量-温度曲线,并由公式(1)计算,可得Q345C,Q345B,X70在没有发生相变的铁素体区的膨胀系数,如表3所示。

$$\alpha = \Delta L / (L \cdot \Delta T) \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 为膨胀系数,单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;

$\Delta T$ 为温度变化量,单位为 $^{\circ}\text{C}$ ;

$L$ 为试样的原始长度,单位为mm;

$\Delta L$ 为绝对膨胀量,单位为mm。

表3 试验钢种的热膨胀系数

Table 3 Thermal expansion coefficients of the tested steels  $^{\circ}\text{C}^{-1}$

钢种	Q345B	Q345C	C70
热膨胀系数	$1.30 \times 10^{-5}$	$1.38 \times 10^{-5}$	$1.40 \times 10^{-5}$

分析表3中的钢材热膨胀系数,可知3个测试钢种的热膨胀系数相差不大,相较而言,Q345B的热膨胀系数最小,为 $1.30 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ,而X70的最大,为 $1.40 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。出现这一结果的原因是钢材的膨胀系数是由钢中铁原子的排列结构决定的,而微量的合金元素基本上不会影响钢材的热膨胀系数。

## 5 结论

本研究采用膨胀法,并通过PCY系列热膨胀仪测量了Q345B,Q345C,X703个试验钢种的相变临界点Ac1,Ac3,Ar1和Ar3,并根据膨胀曲线算出了不同钢种在铁素体区的热膨胀系数。通过试验与结果分析,可得出如下结论:

1)对于Q345B和Q345C,它们的Ac1和Ac3临界温度相差不大,分别为8℃和3℃,但进行降温发生相变时,其Ar1和Ar3温度相差23℃和25℃。

2)与Q345B和Q345C相比,X70钢测得的每一个临界点温度都要比它们高很多。

3)所测试3个钢种的热膨胀系数相差不大。

## 参考文献:

- [1] 蔡正,王国栋,刘相华,等.热轧带钢在冷却中温度与相变的耦合解析[J].塑性工程学报,2000,7(2):16-19.  
Cai Zheng, Wang Guodong, Liu Xianghua, et al. A Coupling Analysis of Temperature and Phase Transformation During Cooling of Hot-Rolled Strip[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2000, 7(2): 16-19.
- [2] 崔忠圻.金属学与热处理原理[M].北京:机械工业出版社,2008:236-238.  
Cui Zhongqi. Metal Science and Heat Treatment Principle [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2008, 236-238.
- [3] 余万华,张中平.热轧钢板在加速冷却时的温度模型[J].北京科技大学学报,2005,27(5):567-570.  
Yu Wanhua, Zhang Zhongping. A Temperature Model of Hot Rolled Plates During Accelerated Cooling[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(5): 567-570.
- [4] 王生朝,蔡素莉.HB400耐磨钢的生产工艺研究[J].湖南工业大学学报,2010,24(6):1-4.  
Wang Shengzhao, Cai Suli. Investigation of Production Technology of HB400 Wear-Resistant Steel[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2010, 24(6): 1-4
- [5] 袁武华,周恒,傅强.控轧控冷工艺参数对B微合金化中碳钢组织的影响[J].特殊钢,2010,31(5):55-57.  
Yuan Wuhua, Zhou Heng, Fu Qiang. Effect of Controlling Rolling and Cooling Parameters on Structure of B Microalloyed Medium-Carbon Steel[J]. Special Steel, 2010, 31(5): 55-57.
- [6] 余刚,袁武华,刘泽亚,等.10B15冷镦钢连铸坯的高温塑性[J].特殊钢,2011,32(2):63-65.  
Yu Gang, Yuan Wuhua, Liu Zeya, et al. Hot Ductility of Continuous Casting Billet of 10B15 Cold Heading Steel[J]. Special Steel, 2011, 32(2): 63-65.
- [7] 王生朝,赵刚,鲍思前,等.含铌微合金高强度钢Q345C连铸坯的热塑性[J].钢铁,2012,47(1):74-77.  
Wang Shengzhao, Zhao Gang, Bao Siqian, et al. Hot Ductility of Niobium-Microalloyed High Strength Steel Q345C Slab[J]. Iron & Steel, 2012, 47(1): 74-77.

(责任编辑:廖友媛)