过火处理对 Q345R 钢组织性能的影响

彭以超¹, 张麦仓¹, 李 伟¹, 董建新¹, 杜晨阳²

(1.北京科技大学材料科学与工程学院,北京 100083; 2.中国特种设备检测研究院,北京 100013)

摘 要:通过对压力容器用 Q345R 钢板不同温度及时间下的模拟过火处理实验及相关性能测试 研究了过火处理参数对 Q345R 钢宏观性能(与压力容器服役过程主受力方向相关的)的综合影响。结果表明 在过火处理温度范围内 Q345R 钢的表面硬度、抗拉强度及冲击韧度均在 700 ℃附近存在明显的下降 而 800 ℃以上处理时 综合性能明显回升;尽管 Q345R 钢板的初始组织呈带状分布 但综合性能对组织的带状分布并不敏感。因此 在 Q345R 钢压力容器设计时 应避免服役温度接近 700 ℃。进一步的等温转变曲线计算及组织观察结果表明 700 ℃处于 Q345R 钢相转变的温度波动区 在该区域保温时 珠光体退化或渗碳体球化 是 Q345R 钢性能下降的主要原因;由于 Q345R 钢板初始组织呈带状分布 ,过火处理后珠光体的退化应该是亚温球化退火和常规 球化退火两种机制共同作用的结果。

关键词: Q345R; 过火处理; 珠光体退化; 综合性能 中图分类号: TG142.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-6264(2013) 12-0108-06

Effects of simulated on-fire processing on microstructure and properties of Q345R steel

<code>PENG Yi-chao¹</code> , <code>ZHANG Mai-cang¹</code> , <code>LI Wei¹</code> , <code>DONG Jian-xin¹</code> , <code>DU Chen-yang²</code>

(1. School of Materials Science and Engineering , University of Science and Technology Beijing , Beijing 100083 , China;

2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: A series of simulated on-fire processing experiments were carried out for Q345R steel. Effects of the simulated on-fire processing on microstructure and properties of the steel were investigated. The results show that no significant change of the mechanical properties, including hardness, tensile strength and impact energy of the steel is observed when tested temperature is below 550 °C. However, if the tested temperatures are near 700 °C, all the properties of Q345R steel decrease. Once the temperatures are over 800 °C, the properties of the steel are recovered. The properties under simulated on-fire temperatures are not sensitive to the variation of holding time and the original band structure. Further microstructure analysis shows that the degeneration of pearlite near 700 °C, which is induced by interaction of both subcritical annealing and traditional spherical annealing, is the primary reason for the degradation behavior of Q345R steel. **Key words**: Q345R; simulated on-fire processing; degenerated pearlite; mechanical properties

Q345R 属于典型的工程用低合金钢,其屈服强 度为345 MPa,具有良好的焊接性及低温韧性,广泛 应用于压力容器的结构设计^[1-2]。作为一种低碳合金 钢,Q345R 中厚钢板在成形过程中珠光体与铁素体 会形成带状组织,短时的退火或正火处理亦难以消 除;加之,压力容器的服役寿命主要受过火环境及过 火温度的影响较大。因此,系统分析带状组织及过火 条件对压力容器用钢板主受力方向综合性能的影响, 对压力容器结构设计具有重要意义。"过火处理"是

收稿日期: 2012-12-12; 修订日期: 2013-09-23

- 基金项目: 国家高技术研究发展计划 "863"计划)(2012AA03A513) 作者简介: 彭以超(1989—),男,E-mail: s20120580@xs.ustb.edu. cn。
- 通讯作者: 张麦仓(1967—) , 男 副教授; 电话: 13810494881, E-mail: mczhang@ustb.edu.en。

着眼于模拟火灾环境的一种热处理方式,主要是通过 设置不同过火温度及相应的过火时间,来探究火灾条 件下材料的拉伸、冲击、硬度等力学性能的变化规律, 目的是提升材料的抗火灾性能^[34]。目前,尽管对该 合金钢在标准处理条件下组织性能的关联性研究已 有报道^[5],但接近服役条件下的过火处理模拟研究 资料相对较少。本文以 20 mm 厚的压力容器用 Q345R钢板为研究对象,通过系列的过火处理实验, 系统研究处理条件对钢板组织性能的影响规律,并从 材料学角度分析其性能变化的机理,为压力容器的结 构设计及实时寿命评估奠定基础。

1 实验材料及方法

实验材料为 20 mm 厚的 Q345R 轧态钢板 ,化学 成分为(质量分数 ,%): C 0. 16; Si 0. 45; Mn ,1.4; P,

≤0.025; S,≤0.015; Al,≥0.020; Fe,Bal.。将钢板 切割成200 mm×200 mm×20 mm 的小块在SX-5-10 型电阻炉中分别进行550 ℃×0.5 h、2 h、5 h,700 ℃ ×0.5 h、2 h、5 h 800 ℃×0.5 h、2 h、5 h和950 ℃× 0.5 h、2 h、5 h 的等温热处理,保温结束后空冷。

在不同处理状态的块状样品上切取 10 mm × 10 mm × 20 mm 的组织分析样品、标准板状拉伸及夏 比氏冲击韧度样品。采用 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀 后在 9XB-PC 型光学显微镜上观察其组织特征,并利 用 XHB-3000 数显布氏硬度计测定不同过火处理的 样品表面硬度;在 MTS-810 试验机上测试不同状态 的拉伸性能,在 JB-W 型微机控制冲击试验机上进行 冲击韧性实验并记录不同状态下的冲击功。进而,在 Leo-80 扫描电镜下观察不同处理状态下 Q345R 钢的 组织演化规律。 2 实验结果及分析

2.1 过火处理后 Q345R 钢的硬度、抗拉强度及冲击 韧性变化规律及对应的组织特征

图 1 为不同过火处理条件下布氏硬度、抗拉强度 及相应条件下冲击韧度的变化情况。可以看出, Q345R 钢的表面硬度、抗拉强度及相应条件下冲击 韧度变化主要取决于过火处理温度,而不同过火温度 下的保温时间影响则较小。综合图 1(a)、1(b) 及图 1(c)可知,在实验温度范围内,Q345R 钢的表面硬度 及冲击韧性均在 700 ℃附近存在明显的下降。即从 室温至 550 ℃区间保温后布氏硬度、抗拉强度及冲击 韧度均几乎不变,但在 700 ℃附近均有一个明显的下 降,而 800 ℃以上处理时,布氏硬度、抗拉强度及冲击 韧度又开始回升。



图 1 不同过火处理条件下 Q345R 钢的布氏硬度(a)、冲击功(b) 及抗拉强度(c) 变化 Fig. 1 Mechanical properties of Q345R steel under different simulated on-fire processing conditions

图 2 为不同过火处理条件下 Q345R 钢的组织特 征。从图 2 可以看出 ,Q345R 钢在 700 ℃以下保温 , 光学金相组织均成带状分布特征 ,其中黑色区域为珠 光体 ,白色区域为铁素体 ,二者相间分布; 需要指出的 是 ,即使在 950 ℃短时保温 ,带状组织依然存在 ,Q当 800 ℃保温 5 h 或 950 ℃保温 2 h 时 ,带状组织才消 失。对比图 2 及图 1 可知 ,尽管在 700 ℃进行不同时 间处理后 ,光学显微镜下的组织与 550 ℃处理时看似 相差不大 ,但硬度、抗拉强度及冲击韧度均有一定程 度的下降 ,因此需进一步分析讨论。

2.2 过火处理后 Q345R 钢组织与性能的关联性

2.2.1 Q345R 钢组织的带状分布及与性能的关系

从上述实验结果可以看出,在 550 ℃、700 ℃不同时间保温后的带状组织特征近似;但是 800 ℃和 950 ℃保温时却出现非常明显的变化:带状组织减 少甚至消失,整体组织趋向均匀。Q345R 钢中厚板 中带状组织效应可从以下方面解释:由于 Q345R 属 于 Mn、Si 元素含量较高的钢,在钢水冷却过程中 Mn、Si 元素容易偏析到枝晶间隙处,造成枝干和枝 晶间隙的成分不均匀;加之 ,Mn、Si 元素的扩散系数 较低 在后续热加工过程如果保温温度不够高或者 保温时间较短 "Mn、Si 元素则不容易均匀化 因而一 定程度上的 Mn、Si 元素带状分布将继续存在。图 3 为带状组织形成过程中基体金属内碳及合金元素 的扩散规律示意图。从图3可以看出,合金元素在 较大范围内的分布呈高低起伏的曲线 ,且在一定温 度和时间内变化不大;碳原子由于是间隙扩散,扩 散系数大,所以在原奥氏体内碳原子充分扩散均 匀 各处浓度保持一致。Mn 元素是扩大奥氏体区 的元素,波峰处 Mn 含量较高,使该区域的 Aa温度 下降 造成不同地方析出先共析铁素体的时间不一 致 图 3 中合金元素贫瘠的区域(即偏析曲线的波 谷处)的 Aa较高,优先形成先共析铁素体;铁素体 的 C 固溶度比较低 因而铁素体的形成促使该区域 内的 C 原子向 Aa较低的偏析区域扩散,从而使碳元 素分布曲线由一开始的直线逐渐变为与合金元素



图 2 Q345R 钢经不同过火处理后的组织(OM)

Fig. 2 Microstructure of Q345R steel under different simulated on-fire processing conditions (OM)





分布规律一致的曲线,合金元素偏析处碳原子浓度逐渐升高,该区域由于碳含量充足从而最终转变为珠光体^[6],形成了含 Mn 钢中铁素体-珠光体带状分布。 进一步提高过火温度,如800 ℃和950 ℃下组织特征 出现非常明显的变化:带状组织减少,整体组织趋向 均匀,带状组织几乎消失不见,但性能变化并不明显。 结合图1可知,在大部分过火处理条件下,Q345R 钢 的宏观性能对铁素体与珠光体是否带状分布并不敏 感,主要由于在压力容器设计时,主受力方向为板材 的轧向或横向,板材厚度方向的各向异性影响可以 忽略。

 2.2.2 Q345R 钢 700 ℃ 附近过火处理时宏观性能下 降的机理分析

图 4 为图 2 对应条件下组织的扫描电镜观察结 果。可以看出 550 ℃不同保温时间后的珠光体形态 皆为铁素体和渗碳体交替排列的片层状组织,且片层 厚度接近,故3 个保温时间下的样品硬度、抗拉强度 及冲击韧度均变化不大。

在 700 ℃保温不同时间,微观组织最明显的特 征为珠光体发生退化,如图 4(b)所示。珠光体退 化的特点是:珠光体中片状渗碳体断开,演变成短 片状、椭球状甚至接近球状^[78],渗碳体越接近球 形,珠光体的退化越深^[9]。从图 4(b)可以看出, 700 ℃保温 0.5 h时,珠光体中已经出现很多断续 的短片状,说明已经发生了轻微程度的退化;700 ℃ 保温 2 h后,已经出现珠光体的棒状组织,棒状渗碳 体颗粒长而细;700 ℃保温 5 h后棒状渗碳体变短, 接近球状。即随时间的延长,珠光体的退化程度增 加。800 ℃以上较长时间保温,部分珠光体中的渗 碳体几乎完全球化,渗碳体弥散分布于铁素体基 体,部分珠光体恢复至片层状(见图 5)。值得一提 的是,700 ℃处理渗碳体球化后,形成的组织仍为珠 光体,只是在处理前后形态上"片状"和"球状"有差



图 4 Q345R 钢经不同过火处理后的显微组织(SEM) Fig. 4 Microstructure of Q345R steel under different simulated on-fire processing conditions (SEM)



图 5 Q345R 在 950 ℃ /5 h 处理条件下的组织特征 Fig. 5 Microstructure of Q345R steel under 950 ℃ for 5 h

别而已。

进一步借助 JMATPRO 软件及其 Fe 基数据库,可 以计算得 Q345R 钢的 CCT 曲线(如图 6 所示)。从图 6 可以看出 Q345R 钢中先共析铁素体、珠光体的平衡 转变温度分别为 $A_3 \approx 828.3 \, \mathbb{C} \setminus A_1 \approx 701.2 \, \mathbb{C}$,因此该 钢的 A_{cl} 在 700 \mathbb{C} 附近。表 1 为李红英等^[10] 实验测得 的与 Q345R 钢成分近似的 16Mn 钢不同冷却速度下先 共析铁素体和珠光体的相转变温度。由表 1 可知,平 衡转变温度为: $A_3 \approx 825 \, \mathbb{C} A_1 \approx 736 \, \mathbb{C}$; Q345R 空冷冷 速约为 0.3 $\mathbb{C} / s^{[7]}$ 插值可得在空冷条件下相转变温 度分别为: $A_{cl} \approx 778 \, \mathbb{C} A_{cl} \approx 713 \, \mathbb{C}$ 。计算值和实验值 均表明 Q345R 钢的 A_{cl} 转变点在 700 \mathbb{C} 上下的小范围 内波动。



图 6 Q345R 钢的 CCT 曲线

Fig. 6 CCT diagram of Q345R steel

表1 不同冷却速度下的相变温度^[10]

 Table 1
 Transformation points for Q345R at different

 cooling rates
 cooling rates

cooling rates			
Cooling velocity	A→Fs	A→Ps	Microstructure
/(℃ •s ⁻¹)	/℃	/℃	
0.05	825	736	F + P
0.1	780	724	F + P
0.5	775	701	F + P
1	751	625	F + P

从上述分析可知,Q345R 钢700 ℃处理时性能下降主要源于其组织退化,而700 ℃恰好处于 Q345R 钢 A_{rt}的临界波动范围内。根据材料学的基本理论,Q345R 钢组织退化取决于两种因素:

1) 若 700 ℃ 保温时未发生部分奥氏体转变,则 珠光体退化的本质是亚温球化退火。亚温球化退火 源于 Q345R 钢板经控轧控冷成形后,珠光体片层非 常细^[11],渗碳体片中位错在高温回复下可获得足够 的能量产生攀移,从而胞内高密度位错不仅重新排列 和对消,而且胞壁锋锐规整化促使小角度亚晶界的形 成。珠光体中铁素体和渗碳体的亚晶界接触处会形 成凹坑(如图 7 所示),造成该处渗碳体曲率半径小 于平面处的渗碳体^[12]。与粒子粗化机制类似,此时 出现毛细管效应(Gibbs-Thomson effect)会产生浓度 梯度,即固态转变中饱和浓度随曲率增大而增大的现 象^[13],其数学解析表达式可由下式表示:

$$c_r^{\alpha} = c_{\infty}^{\alpha} \left[1 + \frac{2\sigma V}{RT} \cdot \frac{1}{r} \right]$$

其中 c[°]_a 是曲率半径无穷大时的饱和浓度 r 是曲 率半径。图 7 为渗碳体片球化的示意过程 ,由于毛细 管效应产生浓度梯度 ,致使凹处的 α(铁素体) 固溶体 的碳向平面处扩散 ,为了维持平衡 ,渗碳体尖角逐渐 溶解 ,使曲率半径更大 ,如此不断循环往复 ,渗碳体片 将被溶穿或熔断^[12]。在 700 ℃下保温时间的不同造 成渗碳体球化的量不同 ,保温时间越长 ,尖角处渗碳 体溶解和 α 固溶体中碳沿浓度梯度扩散越充分 ,球 化率越高 ,从而珠光体退化程度越高。

2) 若在 700 ℃ 时发生部分奥氏体相变,则此过 程为常规球化退火,该过程主要由于加热时奥氏体化 不均匀,奥氏体内尚存有一定数目的未溶碳化物颗 粒,从而在缓冷过程中这些碳化物粒子成为核心,长



图7 渗碳体片球化机理示意图



大形成球状碳化物^[1,14]。

综上,由于 Q345R 钢板材本身为带状组织,不同 区域的 A_{rt}转变点应该有所区别,700 ℃ 过火处理恰 好处于其 A_{rt}的临界波动范围内,可以说,Q345R 钢的 组织退化应是上述亚温球化退火和常规球化退火两 种机制共同作用的结果。

3 结论

 1) 在过火处理温度范围内 Q345R 钢的表面硬度、 抗拉强度及冲击韧度均在 700 ℃附近存在明显的下降, 而 800 ℃以上处理时 综合性能又明显回升。因此 从压 力容器设计的角度 应避免服役温度接近 700 ℃;

2) 700 ℃处于 Q345R 钢相转变的温度波动区, 珠光体退化或渗碳体球化是 Q345R 钢性能下降的主 要原因; 对于初始带状组织的 Q345R 钢,珠光体退化 应该是亚温球化退火和常规球化退火两种机制共同 作用的结果。

参考文献

- [1] 吴承建 陈国良 强文江 金属材料学[M]. 北京: 冶金工业出版社 2010.
- [2] 赵 蕾. Q345R 压力容器板性能分析与研究[J]. 物理测试 2012 30(1):5-7+16.

ZHAO Lei. Research and analysis on properties of Q345R vessel steel [J]. Physics Examination and Testing 2012 30(1):5-7+16. [3] 范圣刚 舒赣平 霍昌盛.高强度螺栓受剪连接抗火性能试验研究[J].东南大学学报:自然科学版 2012 42(6):1180-1186.

FAN Sheng-gang ,SHU Gan-ping ,HUO Chang-sheng. Experimental study on fire-resistant behavior of high-strength bolted shear connections [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition 2012 42(6): 1180 – 1186.

[4] 周杨飞,赵建平. 过火后大型原油储罐的强度评定[J]. 石油化工设备 2010 39(1):36-38.
 ZHOU Yang-fei ZHAO Jian-ping. Strength evaluation for large-scale crude oil tank after fire process [J]. Petro-Chemical Equipment 2010 39(1):36-38.

[5] 重庆钢铁股份有限公司,冶金工业信息标准研究院,鞍钢股份有限公司,等.GB 713 - 2008 锅炉和压力容器用钢板[S].北京:中国标准出 版社 2008.

Chongqing Iron and Steel Co Ltd , China Metallurgical information and standardization institute , Angang Steel Company Limited. GB 713 – 2008 , Steel plates for boilers and pressure vessels [S]. Beijing: China Standards Press 2008.

[6] 张爱民 陈 晔 描 钊.16MnR 容器钢板带状组织的研究[J].山东冶金 2002 24(6):38-40.

ZHANG Ai-min CHEN Ye MIAO Zhao. Study on banded structure in 16MnR vessel plate [J]. Shandong Metallurgy 2002 24(6): 38-40.

[7] 李文卿,王连伟,傅立元,等. 控轧控冷16Mn钢珠光体细化与退化的研究[J].钢铁研究,1990(4):52-60.

LI Wen-qing ,WANG Lian-wei ,FU Li-yuan ,et al. Study on pearlite refinement and degeneracy in control-rolled and control-cooled steel 16Mn [J]. Research on Iron and Steel ,1990(4):52-60.

- [8] O'Brien J M Hosford W F. Spheroidization of medium-carbon steels [J]. Journal of Materials Engineering and Performance ,1997 6(1):69-72.
- [9] 王连伟 毛征东. 过冷奥氏体转变温度对 16Mn 钢珠光体退化的影响 [J]. 钢铁 2002 37(2):47-51. WANG Lian-wei MAO Zheng-dong. Influence of transformation temperature of under-cooling austenite ondegeneracy of pearlite in 16Mn steel [J]. Iron and Steel 2002 37(2):47-51.
- [10] 李红英,丁常伟 涨希旺,等. 16MnR 钢奥氏体连续冷却转变曲线(CCT 图 [J]. 材料科学与工程学报 2007 25(5):727 730. LI Hong-ying ,DING Chang-wei ZHANG Xi-wang et al. Continuous coolingtransformation curve of under cooling austenite about 16MnR steel [J]. Journal of Materials Science and Engineering 2007 25(5):727 - 730.
- [11] 惠卫军,于同仁,苏世怀,等. 中碳钢球化退火行为和力学性能的研究[J]. 钢铁 2005 40(9):63-67. HUI Wei-jun,YU Tong-ren SU Shi-huai et al. Behavior in spheroidizing annealing and mechanical properties of medium carbon steel [J]. Iron and Steel 2005 40(9):63-67.
- [12] 刘宗昌 任慧平 宋义全 ,等. 金属固态相变教程[M]. 北京: 冶金工业出版社 2003.
- [13] Shanmugam S ,Ramisetti N K ,Misra R D K ,et al. Effect of cooling rate on the microstructure and mechanical properties of Nb-microalloyed steels [J]. Materials Science and Engineering 2007 ,460 - 461: 335 - 343
- [14] Wang S Kao P. The effect of alloying elements on the structure and mechanical properties of ultra low carbon bainitic steels [J]. Journal of Materials Science ,1993 28(19): 5169 - 5175.