

正火对 16Mn 热轧钢板断裂韧度 J_{IC} 的影响

孙建军, 方陆鹏, 段虹

(天津工程师范学院 机械工程系, 天津 300222)

摘要:通过对 16Mn 热轧钢板正火前后的常规力学性能测试数据的分析及对金相组织的观察,特别是对延性断裂韧度 J_{IC} 测试数据的比较,认为采用断裂韧度 J_{IC} 检验热轧钢板热处理后的力学性能是一种必要而有效的方法.采用这种方法检测,可以更准确地考察钢材抵抗疲劳断裂的性能,因而优于常规方法的力学性能检测.

关键词:正火;热轧钢板;断裂力学;延性断裂韧度

中图分类号:TG156.4;TG145

文献标识码:A

文章编号:1671-024X(2007)02-0073-04

Influence of normalizing on fracture toughness J_{IC} of hot-rolled 16Mn steel

SUN Jian-jun, FANG Lu-peng, DUAN Hong

(Department of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

Abstract: Through analysis and observation of its normal mechanical behavior, metallographic structure, and in particular its ductile fracture toughness J_{IC} , a better and more efficient method is proposed to examine the mechanical property of hot-rolled steel normalizing, which is using the ductile fracture toughness J_{IC} as a key indicator. This method is more accurate than using normal mechanical behavior in determining the fracture and fatigue property of steel. It is of practical significance in guaranteeing the safety of steel when its structures and spare parts are under cyclical loads.

Key words: normalizing; hot-rolled steel; fracture mechanics; ductile fracture toughness

16Mn 钢由于加入了少量的合金元素,因此强化了铁素体,并能细化组织,使其强度较高、塑性较好,也具备较好的可焊性.该钢种价格较为便宜且容易获得,是我国低合金钢中使用量较大的钢种,常应用在桥梁、船舶、车辆和压力容器的制造中^[1].有资料介绍,在使用厚度 < 50 mm 的 16Mn 热轧钢板时,一般可以不再作热处理.然而,钢材在轧制后往往出现带状组织,即铁素体和珠光体分层沿着轧制方向分布,带状组织使钢材的力学性能呈各向异性,并使其塑性和韧性降低.为了消除带状组织,需要进行高温退火及正火处理^[2].那么,16Mn 热轧钢板的正火处理对其力学性能会有多大的影响,是否会对其服役的安全性有重大的影响,这需要通过多方面的力学性能指标的对比才能说明问题.许多工程材料手册中都给出了各种钢材的常规力学性能指标,如材料的屈服点应力 σ_s 或规定残余伸长应力 $\sigma_{0.2}$ 、抗拉强度 σ_b 、伸长率 δ_5 、断面收缩率 Ψ 以及

冲击吸收功 A_K 等^[3].这些常规力学性能指标意义明确、测试简便,人们非常熟悉.随着生产的发展,越来越多的零构件承受着循环载荷的作用,如桥梁的承载与空载、船舶航行时水浪的冲击、车辆行驶时的颠簸和压力容器的充压和卸压等都是承受循环载荷的实例.有资料统计,70%~80%的零构件的损坏与疲劳断裂有关.那么,仅采用常规力学性能指标考察钢材的力学性能就存在着较大的局限性.而采用断裂力学中的断裂韧度来考察钢材的断裂性能,是一种简便易行、数据可靠的测试方法,本文对此进行了分析.

1 延性断裂韧度 J_{IC} 的概念

断裂力学是从构件中存在宏观裂纹这一点出发,利用线弹性理论和弹塑性理论的分析方法对构件中的裂纹问题进行理论分析和实验研究的一门科学.通过

断裂力学的分析,可以把构件内部的裂纹大小和构件工作应力以及材料抵抗断裂的能力(既断裂韧度)定量地联系起来.线弹性断裂理论给出的韧度指标是平面应变断裂韧度 K_{IC} ,弹塑性断裂理论给出的韧度指标是延性断裂韧度 J_{IC} .这些断裂韧度可对含裂纹构件的安全性和寿命给出定量的估算,为工程构件的安全设计、制订合理的选材原则提供了理论基础^[4].

J 积分理论是 1968 年由 Rice 提出的^[5],它是在弹塑性条件下定量地描述含裂纹物体的应力应变场的强度、并且易于试验测定或理论上估算的场参量.当裂纹尖端的塑性区应力应变场强度随外加载荷增加,直到使裂纹开裂并开始扩展的临界点时,由裂纹尖端区域的应力应变分量通过回路线积分或变形功率定义所求得的 J 积分也达到了相应的临界值 J_c .由此提出弹塑性条件下的断裂判据,对于 I 型裂纹(张开型裂纹)为: $J_I \geq J_{IC}$.它说明裂纹启裂并向失稳状态发展.在弹塑性条件下,裂纹尖端的弹塑性应力应变场由 J 积分所控制.正是因为 J 积分在超弹性的情况下所具有的能量释放差率的物理意义,故用 J_{IC} 来检验钢材抵抗疲劳断裂的性能比常规检测方法有明显优势.

16Mn 热轧钢板属于韧度较高的钢材,采用小试样在大范围屈服条件下,一般无法直接测定材料的平面应变断裂韧度 K_{IC} ,因此有必要测取材料的延性断裂韧度 J_{IC} .

2 实验方法

将 16Mn 热轧钢板制成两组试样,每组试样中包括拉伸、冲击、金相和延性断裂韧度 J_{IC} 试样.第一组试样为原材料,第二组试样为正火热处理后的材料.正火工艺为 920 °C 保温 2 h 后空冷至常温.各种试样均按照相应国家标准中的要求加工.

2.1 拉伸试验

按照国家标准《金属拉伸试验方法(GB/T228—1987)》,采用标称直径为 10 mm 的圆形截面、短比例试样,在 WE-30 型液压万能材料试验机上进行.试样的形状如图 1 所示.测试数据用微机记录,并实时绘制每件试样的载荷—变形($F-\Delta l$)曲线.

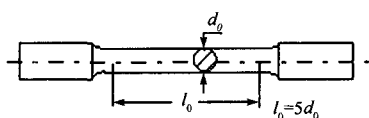


图 1 圆截面拉伸试样

Fig. 1 Tention speciment of round section

2.2 冲击试验

按照国家标准《金属夏比缺口冲击试验方法(GB/T229-1994)》采用 U 形缺口试样在 JB30A 型冲击试验机上进行.试样的形状和尺寸如图 2 所示.

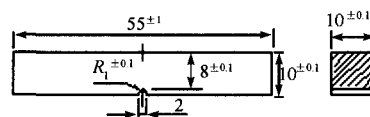


图 2 U 形缺口冲击试样

Fig. 2 U notched impact specimen

2.3 洛氏硬度试验

按照国家标准《金属洛氏硬度试验方法(GB/T 230-91)》采用断裂韧度试样在 HR-150A 型洛氏硬度试验机上进行.测取断裂韧度的试样具有平整的光滑面,满足洛氏硬度试验对试样的要求,而且将测试点远离试样中部的裂纹扩展区域,不会对延性断裂韧度 J_{IC} 的测试产生影响.

2.4 金相试验

分别从两组断裂后的断裂韧度试样上截取试样,经过研磨、抛光后,在 FS110-AF 型金相显微镜镜下观察,并用数字照相机拍照 16Mn 钢正火前、后的金相组织照片.

2.5 延性断裂韧度测定试验

按照国家标准《金属材料延性断裂韧度 J_{IC} 试验方法(GB 2038-91)》,采用三点弯曲[SE(B)]试样,在 WE-30 型液压万能材料试验机上进行试验,用多试样法先测绘出不同卸载点的载荷—加力点位移($F-\Delta$)曲线,通过二次疲劳,使各试样中的裂纹扩展量留下痕迹,用分辨率为 0.001 mm 的工具显微镜测量裂纹扩展量 Δa ,并绘制出 $J-\Delta a$ 曲线,进而得到延性断裂韧度 J_{IC} .

试样的形状和尺寸如图 3 所示.试样上疲劳裂纹的预制和裂纹扩展量的留痕,是在改进后的 AMSLER-2T 型高频疲劳试验机上完成的.

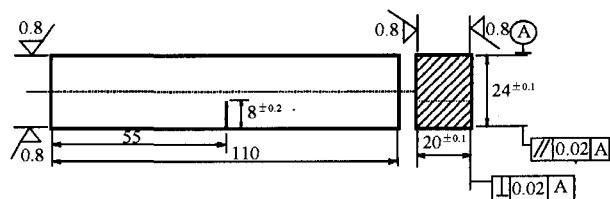


图 3 三点弯曲试样

Fig. 3 Three points bending specimen

3 测试结果与分析

3.1 拉伸试验结果的对比

两组各 3 件拉伸试样的测试结果平均值见表 1.

表 1 正火前后各力学性能测试结果的对比

Tab.1 Comparison between measured results of mechanics behaviors before and after normalizing

测试项目	试样数量	第一组 (原材料)	第二组 (正火后)	正火后与 正火前相比
屈服点应力 σ_s /MPa	各 3 件	435	405	-6.9%
抗拉强度 σ_b /MPa	各 3 件	640	590	-7.8%
伸长率 δ_5 /%	各 3 件	26	30	15.4%
断面收缩率 Ψ /%	各 3 件	62	64	3.2%
冲击吸收功 A_K /J	各 5 件	143	165	15.4%
洛氏硬度 HRB	各 5 件	88.8	82.7	-6.9%

从表中 1 可以看出:在强度上屈服点应力 σ_s 和抗拉强度 σ_b 分别降低了 6.9% 和 7.8%;在塑性上伸长率 δ_5 和断面收缩率 Ψ 分别提高了 15.4% 和 3.2%. 这里最明显的是伸长率 δ_5 的提高.

3.2 冲击试验结果的对比

表 1 中也给出了两组各 5 件试样冲击吸收功 A_K 的平均值. 从测试结果可以看出,正火使 16Mn 热轧钢板的冲击吸收功 A_K 提高了 15.4%. 这与拉伸时的伸长率变化比例相同.

3.3 洛氏硬度试验结果的对比

表 1 中还给出了两组各 5 件试样的洛氏硬度值. 从测试结果可知,正火使 16Mn 热轧钢板的洛氏硬度降低了 6.9%. 这与拉伸时强度降低的比例相近.

3.4 金相图的对比

图 4 和图 5 分别为 16Mn 热轧钢板正火前、后的金相组织照片. 从图 4 中可以明显看到铁素体和珠光体形成的带状组织. 从图 5 中可以看到正火后 16Mn

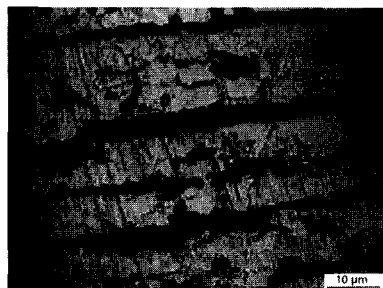


图 4 16Mn 钢正火前的金相组织

Fig.4 Metallographic of 16Mn steel before normalizing

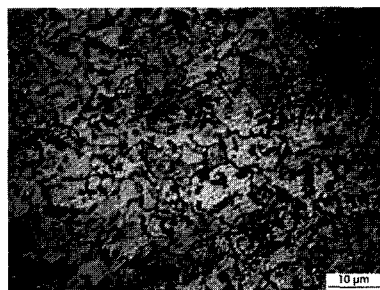


图 5 16Mn 钢正火后的金相组织

Fig.5 Metallographic of 16Mn steel after normalizing

钢形成较均匀的铁素体和索氏体组织,基本消除了正火前的带状组织.

3.5 延性断裂韧度 J_{IC} 的对比

图 6 为用两组试样测绘载荷—加力点位移 ($F-\Delta$) 曲线时第一件试样的 $F-\Delta$ 曲线. 从图 6 中可看到,未做正火处理的试样在加力点位移较小时,裂纹即失稳扩展. 这时,起裂点对应的 J_I 与延性断裂韧度 J_{IC} 一致^[4]. 而正火处理后试样的加力点位移可以达到最大载荷开始下降的位置,需要做出整个扩展阻力曲线 (即 $J-\Delta a$ 阻力曲线) 来确定延性断裂韧度 J_{IC} 的数值. 同时,从图 6 中还可看出,使正火处理后试样的裂纹发生扩展的能量 ($F-\Delta$ 曲线以下的面积) 要比未做正火处理试样的裂纹发生扩展的能量大出许多.

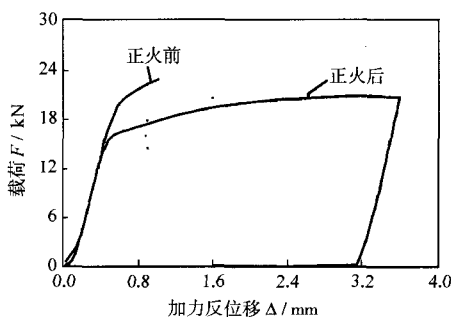
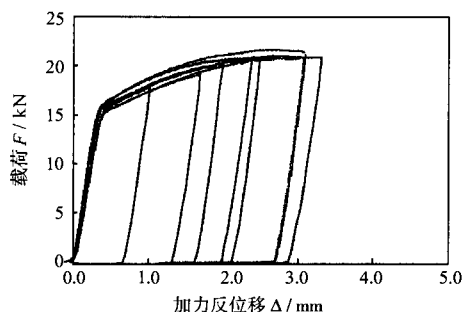
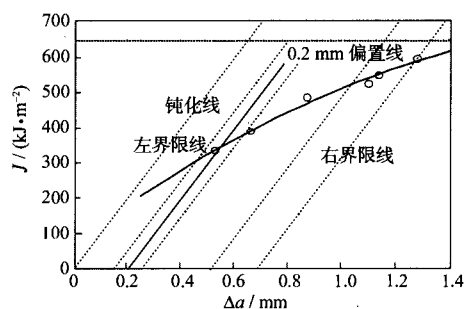


图 6 16Mn 钢正火前后的 $F-\Delta$ 曲线

Fig.6 $F-\Delta$ curve of 16Mn steel before and after normalizing

图 7 是第 2 组的 7 件试样在不同卸载点时的 $F-\Delta$ 曲线汇集图. 图 8 为用第 2 组试样的有效测试数据点绘制出的 $J-\Delta a$ 曲线. 由此曲线与 Δa 为 0.2 时的偏置线的交点得到 J_{IC} 的数值.

表 2 给出了 16Mn 热轧钢板正火前、后的延性断裂韧度 J_{IC} 测试结果. 从表 2 中数据的对比可以看到,正火处理后 16Mn 钢的延性断裂韧度 J_{IC} 比正火前提高了将近 3 倍.

图 7 16Mn 钢正火后的各条 $F-\Delta$ 曲线Fig. 7 $F-\Delta$ curves of 16Mn steel after normalizing图 8 16Mn 钢正火后的 $J-\Delta a$ 阻力曲线Fig. 8 $J-\Delta a$ curve of 16Mn steel after normalizing表 2 正火前后延性断裂韧性 J_{1C} 测试结果的对比Tab. 2 Comparison between measured results of ductile fracture toughness J_{1C} before and after normalizing

第 1 组均值(原材料) $J_{1C}/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2})$	第 2 组均值(正火后) $J_{1C}/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2})$	正火后与 正火前比值/%
91	344	278

4 结 论

通过对 16Mn 热轧钢板正火前后常规力学性能的

测试、金相组织的分析,特别是对延性断裂韧性 J_{1C} 测试数据的对比分析,得到以下结论:

(1) 16Mn 热轧钢板的正火处理对其延性断裂韧性 J_{1C} 的影响十分明显,比所测试的常规力学性能的变化比例超出十几倍.这说明正火热处理会对 16Mn 热轧钢板的安全使用产生重要的影响.因此,采用延性断裂韧性 J_{1C} 来检验 16Mn 热轧钢板的热处理效果是一种非常有效的方法.

(2) 16Mn 钢轧制后出现的带状组织是降低其延性断裂韧性 J_{1C} 的主要原因.在使用 16Mn 热轧钢板制造承受循环载荷作用的零构件时,为了保证零构件的安全使用和寿命,应当对其作正火处理,并且应检测其正火后的延性断裂韧性 J_{1C} 的数值.

(3) 从对 16Mn 热轧钢板的常规力学性能测试数据中可以看到,正火处理前、后材料的伸长率 δ_5 和冲击吸收功 A_K 的变化也相对比较明显,这也是许多检验规范中所规定的检测指标.在没有条件测试材料的断裂韧性时,应当对这两项常规力学性能指标给予充分的关切,以保证零构件的安全使用.

参考文献:

- [1] 李秀琴,齐淑改,庞海涛,等. 16MnR 厚钢板疲劳容器的制造[J]. 化工装备技术,2003,24(1):40-42.
- [2] 黑龙江机械制造学校. 金属学及热处理[M]. 北京:人民教育出版社,1978.
- [3] 孙茂才. 金属力学性能[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2003.
- [4] 陈 虎,蔡其巩,王仁智,等. 工程断裂力学[M]. 北京:国防工业出版社,1977.
- [5] RICE J R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks[J]. Appl Mech, 1968, 35: 379-386.