

●研究简报●

16MnR 钢的高温疲劳裂纹扩展门槛值研究*

INVESTIGATION OF FATIGUE CRACK GROWTH THRESHOLD
AT ELEVATED TEMPERATURE OF 16MNR STEEL

秦敬芳**¹ 刘长军¹ 孙亮² 谈建平¹

(1. 华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237)

(2. 中国特种设备检测研究院, 北京 100013)

QIN JingFang¹ LIU ChangJun¹ SUN Liang² TAN JianPing¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology,
Shanghai 200237, China)

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

摘要 对 16MnR 钢在 250℃ 和 300℃ 下的疲劳裂纹扩展门槛值进行了测试和分析,得到了两种温度下的疲劳裂纹扩展门槛值,并分析两种温度下门槛值不同的原因。结果表明:16MnR 钢在 300℃ 时的门槛值高于 250℃ 时的门槛值,分析认为 16MnR 钢在 250℃ 和 300℃ 门槛值不同是由于氧化作用引起裂纹闭合程度不同造成的。

关键词 16MnR 高温 疲劳裂纹扩展 门槛值 裂纹闭合

中图分类号 TG111.8

Abstract In this study, fatigue crack growth threshold of 16MnR steel at 250℃ and 300℃ were tested and analyzed. During the study, fatigue crack growth threshold at 250℃ and 300℃ were obtained and analysed the difference of fatigue crack growth threshold. The results show that fatigue crack growth threshold at 300℃ is higher than that at 250℃. The reasons of the different threshold is oxidation-induced crack closure.

Key words 16MnR; Elevated temperature; Fatigue crack growth; Threshold; Crack closure

Corresponding author: LIU ChangJun, E-mail: cjliu@ecust.edu.cn, Tel: +86-21-64251623, Fax: +86-21-64253661

The project supported by the National Science and Technology Support Program Funding (No. 2011BAK06B04), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities.

Manuscript received 20140112, in revised form 20140326

引言

疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} ,指疲劳裂纹停止扩展或其扩展速率接近于零时所对应的应力强度因子范围。实验室测量时,在空气介质和平面应变的条件下,定义疲劳裂纹扩展速率等于 10^{-7} mm/cycle 所对应的应力强度因子范围为 ΔK_{th} 。在结构的疲劳损伤容限设计中,门槛值是必须的材料性能参数。

近年来,人们对近门槛值区的疲劳裂纹扩展行为作了大量的研究,Ritchie R O^[1] 和 Lawson L^[2] 对近门槛值区疲劳裂纹扩展特性做了系统的总结,研究表明疲劳裂纹扩展受多种因素的影响,如微观组织,应力比,环境温度^[3] 等。16MnR 钢广泛应用于石化行业,其使用温度一般不超过 420℃。目前,在设计和事故

分析中,应用门槛值的案例越来越多,而近门槛值区裂纹扩展资料有限,特别是高温下近门槛值区域缺乏可靠的工程数据。因而本文研究环境温度对 16MnR 钢疲劳裂纹扩展门槛值的影响,考察 250℃、300℃ 下的近门槛值区的疲劳裂纹扩展行为,为结构疲劳设计提供依据。

1 试验材料与方法

疲劳裂纹扩展门槛值试验材料为 16MnR 钢,基本组织为铁素体 + 珠光体,形状为方向性较强的带状,晶粒较大,其化学成分列于表 1。试样采用紧凑拉伸 (CT) 试样,试样尺寸见图 1。试验参照 GB/T 6398—2000《金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》测试 16MnR 钢在 250℃、300℃ 时疲劳裂纹扩展门槛值。对缺口试样先预制长约 3 mm 的疲劳裂纹,预制疲劳裂

* 20140112 收到初稿,20140326 收到修改稿。国家科技支撑计划资助项目 (2011BAK06B04) 和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目资助。

**秦敬芳,男,1989 年 10 月生,山东聊城人,汉族。硕士研究生,主要从事高温疲劳断裂方面的研究。

纹采用 ΔK 渐减方法在常温条件下进行。再采用逐级降载法获取近门槛值区的裂纹扩展数据,降载过程中,每级载荷下降率为 5%,保持载荷比不变,并保证每级载荷作用下裂纹扩展量 Δa 是上一级载荷下塑性区尺寸

的 4~6 倍^[4]。采用直流电位法测量裂纹长度,试验应力比为 0.1,频率为 80 Hz,波形为正弦波,将 $da/dN = 1 \times 10^{-7}$ mm/cycle 对应的 ΔK 确定为疲劳裂纹扩展门槛值。

表 1 16MnR 钢化学成分
Tab.1 Chemical composition of 16MnR(wt %)

化学元素 Chemical composition	百分率 Percentage	化学元素 Chemical composition	百分率 Percentage	化学元素 Chemical composition	百分率 Percentage
C	0.165	Cr	0.021	Co	0.003
Mn	1.380	Mo	0.005	Al	0.040
Si	0.241	V	0.003	Zr	0.001
S	0.009	Cu	0.027	Bi	0.001
P	0.012	Ti	0.002	Zn	0.001
Ni	0.020	Sn	0.002	Fe	Balance

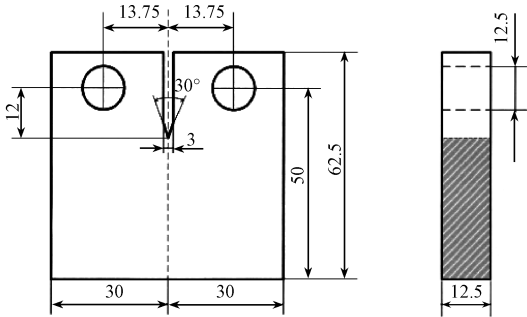


图 1 疲劳裂纹扩展门槛值 CT 试样尺寸

Fig.1 Shape and dimensions of compact tension specimen used in fatigue threshold tests

2 试验数据处理及试验结果

GB/T 6398—2000《金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》给出了两种确定门槛值 ΔK_{th} 的方法:简易方法和近门槛值区数据外推法。

简易方法利用降 K 程序,保持载荷比不变,直至循环次数 N 等于 10^6 时裂纹不发生 0.1 mm 的裂纹扩展量,或者提高测量疲劳裂纹的准确度可取 N 等于 5×10^6 时裂纹不发生 0.5 mm 的裂纹扩展量,记录后两级起始时的裂纹长度 a_k 、 a_{k-1} 和对应的力值范围 ΔP_k 、 ΔP_{k-1} ,然后计算后两级载荷对应的应力强度因子范围 ΔK_k 、 ΔK_{k-1} 。通过式(1)计算门槛值

$$\Delta K_{th} = \frac{\Delta K_k + \Delta K_{k-1}}{2} \tag{1}$$

近门槛值区数据外推法取 10^{-7} mm/cycle $\leq da/dN \leq 10^{-6}$ mm/cycle 的 $(da/dN)_i$ 对 $(\Delta K)_i$ 一组数据(至少 5 对数据点),按照式(2)以 $\lg(da/dN)$ 为自变量,用线性回归的方法拟合 $\lg(da/dN) - \lg(\Delta K)$ 数据点

$$\frac{da}{dN} = C_1 \Delta K^{n_1} \tag{2}$$

式中, C_1 和 n_1 为最佳拟合直线的斜率和截距。

由式(2)拟合的结果,取 $da/dN = 10^{-7}$ mm/cycle 计算对应的 ΔK 值,即为疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 。

图 2 为 da/dN 与 ΔK 的关系。图 2 可见,16MnR 钢在 250℃ 下的 ΔK_{th} 约为 3.48 MPa·m^{0.5},16MnR 钢在 300℃ 下的 ΔK_{th} 约为 5.28 MPa·m^{0.5}。可见 16MnR 钢 250℃ 时的门槛值比 300℃ 时的门槛值稍低。

对比 da/dN , 在 10^{-6} mm/cycle $\leq da/dN \leq 10^{-5}$ mm/cycle 区域,即 $\Delta K \geq 6$ MPa·m^{0.5} 时,16MnR 钢在 250℃ 和 300℃ 时的疲劳裂纹扩展速率基本相同;随着 ΔK 的减小,温度对疲劳裂纹扩展速率的影响逐渐增大。在 10^{-7} mm/cycle $\leq da/dN \leq 10^{-6}$ mm/cycle 区域,即 $\Delta K \leq 6$ MPa·m^{0.5} 时,16MnR 钢在 250℃ 下的疲劳裂纹扩展速率 da/dN 明显高于 300℃ 下的疲劳裂纹扩展速率 da/dN 。

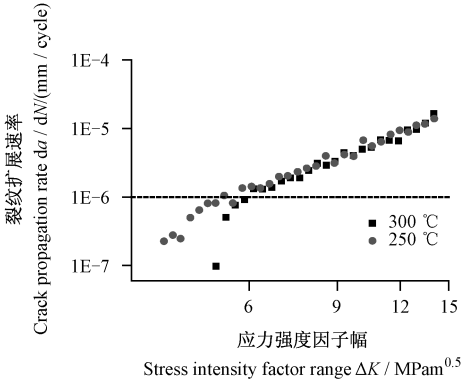


图 2 门槛值区 da/dN - ΔK 曲线

Fig.2 Curves of fatigue crack growth rate da/dN versus ΔK in threshold regime

3 结果与讨论

试验结果表明,16MnR 钢所处的温度环境不同,相应的疲劳特性也不相同。300℃ 下试样门槛值高于 250℃ 时的门槛值并且近门槛值区裂纹扩展速率低于 250℃ 下的裂纹扩展速率,可见 16MnR 钢在 300℃ 时抵抗疲劳裂纹扩展的能力要高于 250℃。另外,在

$10^{-6} \text{ mm/cycle} \leq da/dN \leq 10^{-5} \text{ mm/cycle}$ 区域, 16MnR 钢在 250 ℃ 和 300℃ 下的裂纹扩展速率相差不大, Paris 区裂纹扩展速率不受环境温度的影响。

材料的疲劳裂纹扩展门槛值的大小受应力比、微观组织和温度等因素的影响^[5-7], 这些影响可以用裂纹闭合来解释。裂纹闭合主要有粗糙度引起的闭合, 塑性引起的闭合, 以及氧化物引起的闭合^[8-9]。本次试验的应力比虽然较低, 但是试样平面应变占主导作用, 而塑性引起的闭合通常发生在平面应力条件下^[10], 并且在测定疲劳裂纹扩展门槛值的过程中采用的是逐级降载法, 裂纹尖端的应力场是逐渐降低的, 因而塑性区是不断减小的。因此低应力比和塑性区引起裂纹闭合并不是门槛值变化的主要原因。

文献研究表明, 氧化层厚度随温度的升高而变

大^[11]。16MnR 钢的试验温度分别为 250 ℃、300 ℃, 材料在高温下氧化作用增强, 温度越高, 氧化作用越明显。当裂纹扩展时会在裂纹表面产生氧化物, 氧化物沉积在裂纹尖端附近的表面上, 厚度接近裂尖的张开位移时, 会使裂纹在其裂尖处产生闭合^[12], 温度越高就会有越多的氧化物堆积在裂尖, 促进裂纹闭合, 延迟裂纹扩展。16MnR 钢在 300 ℃ 时比 250 ℃ 时更易发生氧化作用, 在裂纹表面产生更多的氧化物。如图 3 所示, 可以清楚的看到 300℃ 比 250℃ 的疲劳断口氧化较严重, 断口表面覆盖一层氧化物。300 ℃ 时的氧化层厚度大于 250 ℃ 时的厚度, 氧化层越厚, 裂纹闭合程度越大, 裂纹扩展越困难, 从而门槛值较大。所以氧化物引起的裂纹闭合是 16MnR 钢在 300 ℃ 时的门槛值比 250 ℃ 时的门槛值高的原因。

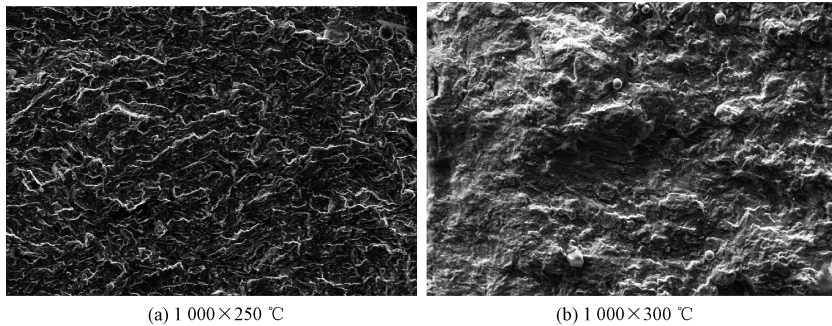


图 3 250℃ 和 300℃ 下的断口形貌

Fig. 3 Fracture morphology under 250℃ and 300 ℃

4 结论

通过上述研究和讨论, 对 16MnR 钢在不同温度下的门槛值进行比较, 并分析门槛值不同的原因, 可以得出以下结论:

1) 16MnR 钢 250 ℃ 和 300 ℃ 时的门槛值不同, 250 ℃ 时的门槛值为 $3.48 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$, 300 ℃ 时的门槛值为 $5.28 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$, 初步表明 16MnR 钢在 300 ℃ 时抵抗裂纹扩展的能力高于 250℃ 时的抵抗裂纹扩展的能力。

2) 分析认为: 250 ℃ 与 300 ℃ 门槛值不同的原因是由于裂纹闭合程度不同造成的, 氧化物诱发裂纹闭合是主要原因。

参考文献 (References)

- [1] Ritchie R O. Near-threshold fatigue-crack propagation in steels[J]. International Materials Reviews, 1979, 24(1): 205-230.
- [2] Lawson L, Chen E Y, Meshii M. Near-threshold fatigue: a review [J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21: S15-S34.
- [3] Sadananda K. Factors governing near-threshold fatigue crack growth [C]//2nd international conference on fatigue and fatigue thresholds. 1984; 1: 543-553.
- [4] GB/T 6398-2000. 金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社. 2000, 715-716.
GB/T 6398-2000. Standard test method for fatigue crack growth rates of metallic materials [S]. Beijing: China Standard Press. 2000, 715-716 (In Chinese).
- [5] Forth S C, Newman Jr J C, Forman R G. On generating fatigue crack growth thresholds[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(1): 9-15.
- [6] Taylor D. Fatigue thresholds [M]. London: Butterworths, 1989: 12-13.
- [7] McEvily A J, Minakawa K. On the effect of microstructure on crack closure in the near-threshold region [J]. Strength of Metals and Alloys, 1986: 1385-1392.
- [8] Suresh S. Fatigue of materials [M]. Cambridge University Press, 1998: 483-490.
- [9] Elbert W. The significance of fatigue crack closure [C]//Damage Tolerance in Aircraft Structures: A Symposium Presented at the Seventy-third Annual Meeting American Society for Testing and Materials, Toronto, Ontario, Canada, 21-26 June 1970. ASTM International, 1971, 486: 230.
- [10] Lindley T C, Richards C E. The relevance of crack closure to fatigue crack propagation[J]. Materials Science and Engineering, 1974, 14 (3): 281-293.
- [11] Liaw P K, Saxena A, Swaminathan V P, et al. Effects of load ratio and temperature on the near-threshold fatigue crack propagation

behavior in a CrMoV steel[J]. Metallurgical Transactions A, 1983, 14(8): 1631-1640.

[12] 何子淑, 梁益龙, 凌 敏. 疲劳裂纹扩展的门槛值研究 [J]. 贵州工业大学学报: 自然科学版, 2007, 36(3): 21-23.

HE ZiShu, LIANG YiLong, LIN Min. Study on the threshold of small fatigue cracks [J]. Guizhou Sci-tech Engineering Vocational College: Natural Science Edition, 2007, 36 (3): 21-23 (In Chinese).