

环境对 AISI 321 不锈钢疲劳裂纹扩展过载效应的影响 *

关 辉¹⁾ 李 劲²⁾ 魏学军¹⁾ 韩恩厚¹⁾ 柯 伟¹⁾

1) 中国科学院金属研究所金属腐蚀与防护国家重点实验室, 沈阳 110016

2) 复旦大学材料科学系, 上海 200433

摘 要 研究了 3.5% NaCl 溶液对恒应力强度因子范围 ΔK 控制下 AISI 321 不锈钢疲劳裂纹扩展过载行为的影响, 与在空气中的结果比较表明, 两种条件下存在相似的过载延缓效应, 但是环境极大地削弱了过载对疲劳裂纹扩展的延缓效应, 削弱程度随过载比不同而变化, 以“损失循环数”表征约为 40%—70%, 以“过载影响区尺寸”表征则为 30%—40%。分析表明, 用“损失循环数”表征过载对裂纹扩展的延缓效应不够充分, 无法区分环境对裂纹闭合的削弱和增强作用, “过载影响区尺寸”可以区分环境对过载塑性形变增强裂纹闭合的综合影响。对断口的 SEM 分析发现, 过载造成的塑性形变在溶液中比在空气中受到更多的磨损, 表明环境对过载延缓效应的削弱除了对裂尖的影响外, 还包括对过载导致的塑性诱发裂纹闭合的影响。

关键词 环境, 不锈钢, 疲劳裂纹扩展, 过载效应

中图分类号 TG142.71, TG111.7 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2003)06-0613-04

EFFECTS OF ENVIRONMENT ON THE OVERLOAD BEHAVIOR OF FATIGUE CRACK PROPAGATION FOR AISI 321 STAINLESS STEEL

GUAN Hui¹⁾, LI Jin²⁾, WEI Xuejun¹⁾, HAN Enhou¹⁾, KE Wei¹⁾

1) State Key Laboratory of Corrosion and Protection, Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

2) Department of Materials Science, Fudan University, Shanghai 200433

Correspondent: GUAN Hui, associate professor, Tel: (024)23915898, E-mail: hguan@icpm.syb.ac.cn

Supported by National Key Basic Research and Development Programme of China (No. G19990650)

Manuscript received 2002-07-02, in revised form 2002-10-16

ABSTRACT The effects of 3.5% NaCl aqueous solution on the overload retardation behavior of AISI 321 stainless steel fatigued under constant ΔK was investigated. The results show that, compared with the air, the environment reduces the overload retardation effect significantly, although the overload behaviors in the air and environment are similar. The reducing level is approximately 40%–70% in terms of loss cycle number, and 30%–40% in terms of overload affecting zone size. The comparison of the above two parameters shows that the former is not a proper parameter to describe the overload effect because of not distinguishing between the strengthening and reducing effects of environment on the crack closure. The later is a better parameter to describe the overload effect because it can distinguish the environmental effect on the crack closure from the comprehensively environmental effects on both crack closure and crack tip. SEM analysis of the fracture surface shows that the overload plastic strain suffered more erosion in environment than in the air. It is suggested that the reduction of the plasticity-induced crack closure caused by environmental corrosion-erosion is responsible for the reduction of the overload retardation effect.

KEY WORDS environment, stainless steel, fatigue crack propagation, overload

拉伸过载对疲劳裂纹扩展有延缓效应, 相关研究已提出了多种机理。但对于塑性较好的材料, 在较低的正应力比 R 和远高于裂纹扩展门槛值的应力强度因子范围 ΔK

的条件下, 有确凿的证据表明过载延缓效应的主要机理是塑性诱发裂纹闭合^[1,2]。以往的工作^[1-5]多是在空气中进行, 在溶液环境中的研究很少^[6-8]。在考虑环境对裂纹闭合的影响时, 一般认为只有腐蚀产物塞积增强闭合^[6]。但是, 由于塑性诱发裂纹闭合是裂纹尖端后方的塑性拉伸形变造成的, 因此腐蚀性环境应该会腐蚀这种塑性形变, 特别是过载塑性形变由于形变量较高, 位错密度高, 因而

* 国家重点基础研究发展规划项目 G19990650 资助

收到初稿日期: 2002-07-02, 收到修改稿日期: 2002-10-16

作者简介: 关 辉, 男, 1969 年生, 副研究员, 博士

腐蚀速率应该较高, 导致闭合效应削弱. 但是尚未见这方面工作的报道.

本文选择 AISI 321 不锈钢作为实验材料, 与以往过载研究选择的硬铝合金和结构钢相比, 不锈钢的屈服强度较低, 而硬化指数较高, 有利于形成较大的和硬度较高的过载塑性形变, 因此过载延缓效应比较强烈. 不锈钢在一般的腐蚀环境中具有强的耐蚀性, 可以保留下清晰的断口形貌, 有利于分析环境对过载塑性形变的作用机理.

1 实验方法

实验材料为供货态 AISI 321 不锈钢板材, 化学成分(质量分数, %) 为: C 0.056, Cr 17.35, Ni 10.21, Ti 0.36, Si 0.82, Mn 0.77, S 0.015, P 0.021, 屈服强度 $\sigma_{0.2}=240$ MPa, 抗拉强度 $\sigma_b=620$ MPa, 延伸率 $\delta=45\%$. 沿轧制方向制成单边缺口试样, 试样尺寸为 $250\text{ mm}\times 36\text{ mm}\times 4\text{ mm}$, 缺口为 5 mm , 用线切割工艺加工.

实验在电液伺服疲劳机上进行, 用直流电位降法测量裂纹长度, 根据预先标定的恒 ΔK 曲线, 随裂纹扩展逐渐降低载荷控制恒 $\Delta K^{[2]}$ 为 $24\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. 采用正弦波加载, 应力比 $R=0$, 频率 $f=10\text{ Hz}$, 过载比 $y=\Delta K_{OL}/\Delta K$, ΔK_{OL} 为过载应力强度因子范围, y 分别为 $1.3, 1.5$ 和 1.8 , 过载应力为单周正弦波, $R=0, f=1\text{ Hz}$.

记录裂纹长度和相应的循环数, 求得过载对裂纹扩展速率和过载影响区尺寸的影响. 用扫描电镜观察空气和溶液中试样的断口形貌, 进行对比分析.

2 实验结果与讨论

2.1 过载实验

图 1 是 AISI 321 不锈钢在空气和 3.5% NaCl 溶液中不同过载比下的过载延缓行为, a 为裂纹长度, da/dN 为裂纹扩展速度. 在给定恒 ΔK 控制下, 空气和溶液中的 da/dN 分别为 7.3×10^{-5} 和 $11.5\times 10^{-5}\text{ mm/cyc}$. 施加过载后, da/dN 均明显降低, 裂纹需要扩展较长的距离才能够将 da/dN 恢复到过载前的正常水平. 并且随过载比的增大, 过载效应更加强烈, da/dN 降低更多, 恢复距离更长. 在相同的过载比下, 裂纹在溶液中的恢复距离均小于在空气中的相应值. 值得注意的是, da/dN 在过载达到最低点后, 在开始恢复的初期阶段, 两种曲线的差别很大, 图 1a 空气中的曲线在整个恢复范围内均比较平缓, 而图 1b 溶液中的 da/dN 在恢复初期则上升速度很快. 这种差别用溶液的腐蚀作用可以解释. 根据过载塑性形变增强裂纹闭合的机理, 对应最低 da/dN 的裂纹长度是过载塑性形变最大的位置, 这里的位错密度和硬化程度也最高. 在空气中, 裂纹面在循环载荷下进行反复挤压磨损, 硬度高的形变顶端被压缩和磨损的速度很慢, 因而 da/dN 的恢复以几何效应为主, 即随着裂纹向前扩展, 过载造成的闭合逐渐降低. 而在溶液中, 位错密度高的塑

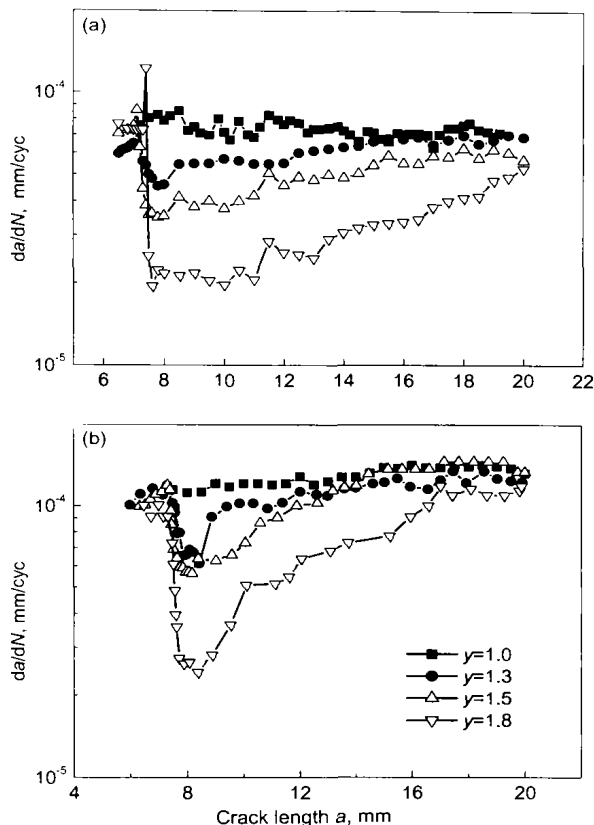


图 1 321 不锈钢疲劳裂纹扩展在不同过载比下的拉伸过载行为
Fig.1 Effect of tensile overload on the fatigue crack growth rate da/dN at different overload ratios y
(a) in the air (b) in NaCl solution

性形变顶端由于能量高, 本身是易于腐蚀的, 更严重的是, 由于形变顶端的能量高于周围的变形量较低的部分, 因而构成了典型的“大阴极、小阳极”的电偶腐蚀条件, 而且每次应力循环卸载时, 裂纹面之间的碰撞挤压可能将形变顶端的表面不断擦伤, 露出新鲜的金属表面, 增强电偶腐蚀效应, 这将极大地加速形变顶端的腐蚀, 其高硬度对此没有任何有利的影响. 因此, 塑性变形的顶端在溶液中的腐蚀磨损比在空气中的单纯磨损快得多, 对闭合的增强作用削弱得也就很快, 从裂纹扩展速率的变化上直接反映出来. 为更好地定量分析这两种条件下的过载行为, 将一些必要的参数列于表 1.

在选择表征过载效应的参数时, 同时列出了“过载影响区尺寸” Δa 和“损失循环数” N_L . 前者定义为在给定恒 ΔK 下过载后, 裂纹扩展速率从开始降低到恢复过载前速率这段时间内扩展的裂纹长度; 后者的定义是裂纹穿过过载影响区的实际测量循环数 N_{OL} 与无过载时裂纹扩展此段距离所需的比照循环数 N_0 相减的差值. 本文认为“过载影响区长度” Δa 能够更好地表征过载效应. Zuidema 等人^[6] 只考虑了环境对扩展的直接加速作用和腐蚀产物塞积导致的延缓效应, 因而选择了“损失循环

表 1 在空气和 3.5%NaCl 溶液中表征过载效应的参数
Table 1 Parameters of overload retardation in air and 3.5% NaCl solution

Overload ratio y	Overload effective distance Δa , mm		Measured cycle N_{OL} 10 ⁴ cyc		Reference cycle N_0 10 ⁴ cyc		Loss cycle N_L 10 ⁴ cyc	
	Air	Sol.	Air	Sol.	Air	Sol.	Air	Sol.
	1.3	8.3	4.6	13.3	5.02	11.4	4.00	1.9
1.5	10.9	7.7	23.6	9.28	14.9	6.70	8.7	2.58
1.8	14.4	9.6	47.0	17.3	19.7	8.35	27.3	8.95

Note: the crack growth rate in the specimen with the overload ratio 1.8 in the air does not recover from the overload effect in the specimen gauge, the corresponding values in the table is extrapolated values

数”来表征在过载实验中海水对裂纹闭合的影响。他们认为海水增加给定有效应力强度因子范围 ΔK_e 下的裂纹扩展速率和降低门槛 ΔK_e ，导致过载后的损失循环数减少；同时，增厚的氧化膜造成腐蚀产物塞积，将增加损失循环数。这个参数只能区分环境对裂纹扩展的加速和减速作用竞争的主导地位，并不能区分环境对裂纹闭合的双重作用。即在 Zuidema 等人的工作中，影响过载延缓行为的因素只有两个，它们作用相反，腐蚀产物增强闭合占优，则“损失循环数”增加，反之则减少。而从环境既可能增强闭合、又可能削弱闭合这种假设出发，考虑到环境对裂纹闭合的双重作用后，影响因素增加到 3 个，当“损失循环数”减少时，无法确定环境对裂纹闭合是否产生了削弱作用。因此如果要确定环境对裂纹闭合的作用，选择的参数必须能够将环境对裂尖的影响排除在外，根据过载塑性诱发裂纹闭合机理，裂纹扩展速率从过载后的减速恢复到过载前的速率是由于两种原因，一是交变应力的反复挤压磨损削弱过载塑性形变，二是裂纹向前扩展。由于几何效应，过载塑性形变造成的裂纹闭合与正常恒 ΔK 下较低的塑性形变造成的裂纹闭合相等。如果环境导致第一种作用发生变化，则第二种作用也会变化，即过载影响区的长度产生变化。由于腐蚀环境会造成腐蚀产物塞积增强裂纹闭合，因此当过载塑性诱发裂纹闭合造成的延缓效应占主导地位时，实际上只要过载影响区长度缩短或不变，即可判定环境对裂纹闭合有削弱作用，并且可以推断，即使过载影响区比在空气中长，削弱作用依然存在，只是腐蚀产物塞积作用占了主导地位。因此选择了“过载影响区尺寸”这个参数来表征过载效应，该参数排除了环境由于对裂尖的影响而对整个过载行为的影响，可以区分环境对裂纹闭合的影响。

由表 1 可见，相应过载比下，溶液环境与空气相比， Δa 分别减少 44%，29% 和 33%； N_{OL} 分别减少 62%，61% 和 63%； N_L 分别减少 46%，70% 和 67%。溶液环境对过载延缓效应的削弱很强烈。在本实验结果中， N_L 与 Δa 在空气和溶液中的趋势是一致的，在溶液中二者均降低，在 Zuidema 等人的工作中二者的趋势虽然也是一致的，但在溶液中随应力比 R 的不同，环境可以增加也可以降低这两个参数。而在魏学军等人^[8]的结果中，在溶液

中自腐蚀电位和强阴极极化条件下 N_L 分别为 2.8×10^4 和 0.8×10^4 ，而相应的 Δa 则是 4.6 和 5.5 mm。这种相反趋势的出现是由于强阴极极化导致的氢脆作用加速了裂纹的扩展，但强烈的阴极保护却减轻了过载塑性形变的腐蚀磨损。所以用“损失循环数”不能充分体现腐蚀环境对过载增强塑性闭合的影响。

2.2 断口分析

用扫描电镜观察了过载位置附近的断口形貌。图 2 是空气和溶液中过载比为 1.8 的试样的断口形貌。图 2a 和 b 分别是空气中断口的低倍和高倍形貌，过载的位置如图中箭头所示，留下了明显的过载线，裂纹自左向右扩展，过载位置右方为过载后形貌，分布有深色的表面平坦的“山峰”，紧邻过载线处，“山峰”数量最多，表面积最大。由图 2a 可见，“山峰”从过载位置到向右较远距离内仍存在，但“山峰”的数量减少，表面积缩小。由图 2b 可以更清楚地观察“山峰”的形貌，从“山峰”的形貌和表面积来看，越靠近过载位置的“山峰”的表面受到的压缩和磨损程度越高。这些“山峰”是过载塑性形变增强裂纹闭合的直接证据，并且越靠近过载位置，塑性形变越大，对增强闭合的作用越大，但随着裂纹继续扩展，远离过载位置的塑性形变对增强闭合也有贡献，这与前述的“几何效应”是一致的。相比之下，溶液中的“山峰”显得更多，表面积更大，随过载后距离延伸，数量和表面积减少程度较低，见图 2c 和 d。这说明在溶液中，较大塑性形变对裂纹闭合的贡献比例比在空气中低。这与对过载曲线的分析是一致的，过载延缓效应在恢复的初期，较大的塑性形变在腐蚀和磨损的双重作用下，形变顶端的削减速度比在空气中快得多，裂纹扩展速率恢复较快，这样后面较小的塑性形变就更早地开始对裂纹闭合贡献，并且贡献比例升高。“山峰”之间的“山谷”是与过载前的形貌相似的粗糙表面，图 2d 溶液中的“山谷”在过载后断口中的面积比例明显比在图 2c 空气中小。“山谷”在“山峰”的保护下未受到裂纹面之间压缩和磨损的影响，这表明过载前的裂纹面之间未发生摩擦磨损。这可能是在本实验所采用的过载比和应力比 $R=0$ 的条件下，裂尖前方塑性区的存在阻止了过载前的裂纹面的闭合摩擦的结果。

溶液和空气中“山峰”和“山谷”在面积比例的差异表明，过载塑性形变在溶液中被磨损到更低的高度。这种

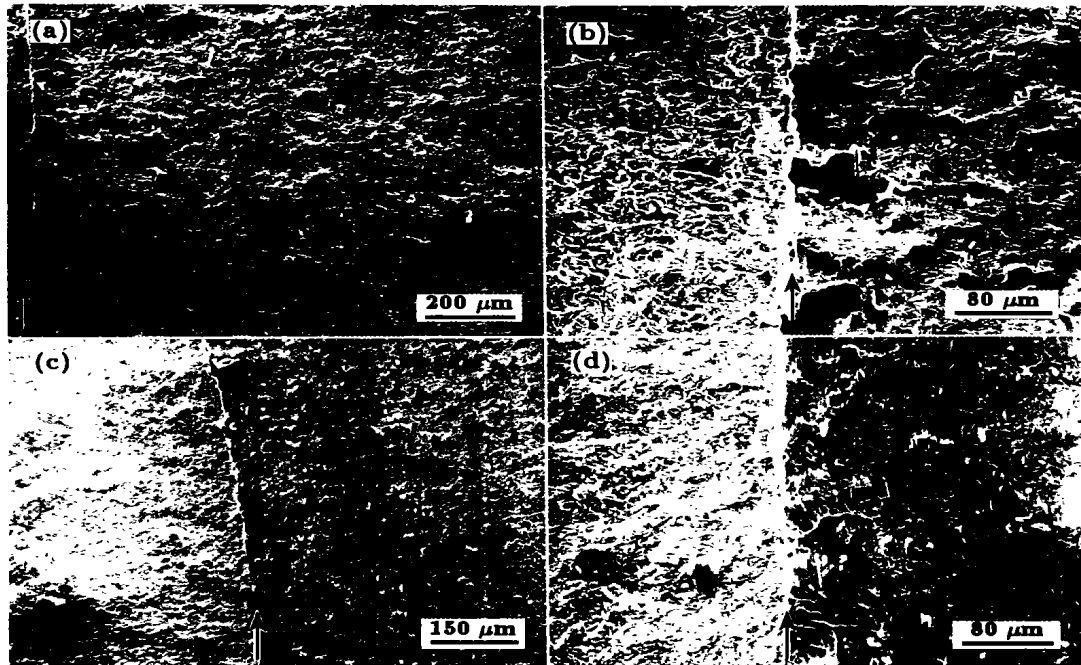


图2 AISI 321 不锈钢在空气和 3.5% NaCl 溶液中过载位置附近的扫描电镜断口形貌

Fig.2 SEM morphologies of fracture surface near the overload position ($y=1.8$) for AISI 321 stainless steel in air (a, b) and 3.5% NaCl solution (c, d) (arrows in figure showing overload position), showing the overload plastic deformation "peaks" formed in 3.5% NaCl solution suffered more erosion than those formed in the air

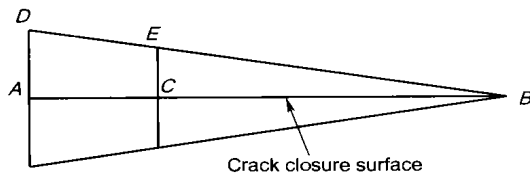


图3 AISI 321 不锈钢在空气和 3.5% NaCl 溶液中过载残余塑性形变示意图

Fig.3 Schematic diagram of remained overload plastic deformation in the air and 3.5% NaCl solution (A and C—the overload positions in the air and solution respectively, B—the position where the crack growth rate recovers, DA and EC—the finally remained height of the overload plastic deformation "peaks" formed in the air and solution respectively)

高度差可以估算,如图3所示,AB为裂纹的闭合面侧视图,A点和C点为空气和溶液中的过载点,AB的长度为空气中的过载影响区尺寸14.4 mm,CB长度为溶液中过载影响区尺寸9.6 mm;DA为空气中过载最大塑性形变的最终剩余高度,EC为溶液中过载最大塑性形变的最终剩余高度,则 $EC:DA=CB:AB=0.67$ 。断口形貌与过载曲线的综合分析表明,过载塑性形变在溶液中比在空气中受到了更多的腐蚀磨损。

3 结论

(1) AISI 321 不锈钢在 3.5% NaCl 溶液中的疲劳裂

纹过载后的扩展行为与在空气中类似,但溶液强烈地削弱了过载对裂纹扩展的延缓效应。

(2) 断口形貌证明,环境的腐蚀作用导致过载塑性形变的闭合作用在溶液中比在空气中被削弱的更多。

(3) 用循环数表征过载对裂纹扩展的延缓效应不够充分,忽略了环境对裂纹闭合的削弱作用,过载影响区尺寸可以区分环境对过载塑性形变增强裂纹闭合的综合影响。

参考文献

- [1] Shin C S, Hsu S H. *Int J Fatigue*, 1993; 15: 181
- [2] Guan H, Li J, Wei X J, Ke W. *Acta Metall Sin*, 1999; 35: 403
(关辉,李劲,魏学军,柯伟.金属学报,1999;35:403)
- [3] Knott J F, Pickard A C. *Met Sci*, 1977; Aug/Sep: 399
- [4] Shin C S, Fleck N A. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 1987; 9: 379
- [5] Wei X J, Li J, Ke W. *Chin J Mater Res*, 1996; 10: 608
(魏学军,李劲,柯伟.材料研究学报,1996;10:608)
- [6] Zuidema, J, Mense P J M, Edwards R A. *Eng Fract Mech*, 1987; 26: 693
- [7] Zang Q S, Liu K, Ke W, Zheng Y L. *J Chin Soc Corr Prot*, 1989; 9: 169
(臧启山,刘慷,柯伟,郑宇礼.中国腐蚀与防护学报,1989;9:169)
- [8] Wei X J, Li J, Ke W. *J Chin Soc Corr Prot*, 1997; 17: 99
(魏学军,李劲,柯伟.中国腐蚀与防护学报,1997;17:99)