

第六届全国疲劳学术会议 论文集 (上)

Proceedings of The 6th National Conference
on

FATIGUE

The Chinese Society of Theoretical
and Applied Mechanics
The Chinese Society of Mechanical Engineering
The Chinese Society of Metals
The Chinese Society of Aeronautics and Astronautics

August 1993 Xiamen, China

中国力学学会 中国机械工程学会
中国金属学会 中国航空学会

1993年8月 中国厦门

第六届全国疲劳学术会议

名誉主席	李敏华	
大会主席	吴富民	
副主席	杨宗发	伍义生
组织委员会	杨庆雄	吴富民
	高镇同	杨宗发
	王中光	林 实
	徐 灏	赵少汴
	孙镇华	胡淑敏
	伍义生	

目 录

上册

一、大会报告

超载对低周疲劳寿命影响的文献综述 李敏华	3
国产机械材料疲劳设计数据与设计方法的试验研究 赵少汴、王忠保	4
小裂纹效应与全寿命预测 吴学仁、J.C.Newman, Jr.	14
金属腐蚀疲劳过程中若干参量的原位测量与计算机模拟 柯伟、韩恩厚 ...	21

二、金属、非金属及其他新材料的疲劳性能

聚氯乙烯静荷与循环特性 陈正新、闫淑茹、傅承诵	36
Al 单晶体在循环形变中的力学行为及晶体取向的影响 夏月波	40
两种高聚物疲劳特性的实验研究 刘智、傅承诵	45
高分子材料预制裂纹的高温切割法和疲劳法 刘智、傅承诵	50
多滑移铜单晶体的疲劳行为 谭若兵、闫军、张天宜、王中光	54
60Si2Mn 低周疲劳特性研究 张琼敏、熊云奇、濮进	58
30Cr2NiMoV 钢的疲劳断裂分析 崔民子、柳春图、周爱华、蒋怀庆、 阚常珍	61
Al-Al ₃ Ni 自生复合材料的疲劳损伤断裂研究 王明章、李学勤、林实、 肖纪美	65
纯铝在 300 和 673K 下的低周疲劳行为 肖林、顾海澄	69
矿用圆环链用钢 20MnVK 的低周疲劳特性 张良运、袁克昌、张振洪、 向定汉、金毓洲、康绍光、范寒晋	74
一种新型的凸轮齿轮专用钢——cf53 向定汉、张良运、陆志荣、李平、 余正模、张盛林	78
复合材料夹层结构撞击损伤后强度特性与疲劳特性研究 吴观石	82

三、疲劳行为的试验、模拟和计算分析

Nicrofer 5219Nb 合金裂纹扩展过程的动态扫描观察 李年 杜百平 黄剑	88
论疲劳缺口减缩系数 K_f 姚卫星 顾怡	92

40Cr 钢疲劳裂纹的扩展 何则荣、陈苓	96
动态应变时效与恒载低周疲劳 陈文哲、彭开萍、钱匡武	101
2024-T3 铝板试件的疲劳裂纹张开应力测量 伍义生、J.Schijve	105
次载锻炼后 35VB 钢的疲劳裂纹萌生观察 张琼、蔡传荣	109
范德华力在微裂纹生长中的作用 李守新、王中光、孙立志	112
疲劳初始裂纹的工程测定方法研究 董登科、薛景川、吴富民	116
变幅疲劳裂纹扩展加速效应的直接观察 张平生、蔡和平、刘军海、 苏启生、何玉定	124
公式 $da/dN = \langle C \rangle (\Delta K)^{\langle M \rangle}$ 分析 王立君、张彦华	129
应变疲劳裂纹扩展与应力疲劳裂纹扩展的统一规律简介 雷月葆、李培宁、 据定一	133
计算机辅助试验系统 MTA-92 在谱载疲劳裂纹扩展试验中的应用 黄新跃、刘绍伦、欧阳辉、吴学仁	139
不同载荷谱下裂纹扩展计算分析 陈志伟、王智	144
疲劳裂纹在焊接残余压应力场中的扩展 尚德广、王德俊、平安	148
焊接接头焊趾表面裂纹疲劳扩展寿命分析 张彦华、贾安东	152
疲劳裂纹扩展的随机模型与模拟 张彦华、王立君	156
用共振频率法测量疲劳裂纹扩展量 方陆鹏、杨海元、余振勋、 徐家福	160
裂纹增长预测模型参数的确定方法 朱亦钢、张诗捷	167
焊趾疲劳裂纹扩展驱动力的统计特性 王立君、张彦华	171
复合型(II+III)周期加载对 I 型疲劳裂纹扩展的影响 杜百平、李年	174
用 Bezier 曲线估算门槛值初探 吴永端、周克印、叶永山	181
近门槛值裂纹增长(NTCG)在疲劳裂纹张开应力测量中的应用 张诗捷、 朱亦刚	185
全复合型裂纹疲劳扩展门槛限估算 钱士强、高桦	189
用零裂纹扩展法测定门槛值 ΔK_{th} 王红缨、王建国、佟建国、 徐世平	196
裂纹扩展与闭合效应 平安、王德俊、尚德广、徐灏	200
表面裂纹闭合特性研究 刘晓光、潘际炎	204
测量位置对疲劳裂纹闭合效应评价的影响 孙正明、 R.Jackel、B.Weiss、R.Stickler、王中光	207

疲劳短裂纹的取向规律和分形特性 洪友士、李国琛	211
弹塑性疲劳裂纹扩展速率与低周疲劳特性 戴振羽	215
焊接接头低周疲劳特性及能量——寿命关系 程光旭、匡震那、 楼志文	220
钢纤维混凝土单轴压缩疲劳模型研究 高路彬、程庆国	226
应变疲劳参数的近似估算 蔡显新、任培正、廖学军、汤凤	232
低周非对称循环下材料循环特性研究 佟建国、靳东来、陈章华	236
拉扭复合比例及非比例循环加载的试验曲线研究 勾秋静、高宝奎、 周春田	240
非比例加载条件下平均应变对循环特性的影响 周春田、高宝奎	245
随机载荷谱下锥形螺栓干涉配合强化效果的试验研究 肖寿庭、邢文珍、 傅祥炯	250
随机谱下疲劳裂纹扩展的 PFM 模型 廖敏、杨庆雄	254
T 型板节点局部应力分析与 K_t -R 关系 彭凡	258
45 [#] 钢缺口板试样疲劳寿命研究 吴永桥	262
局部应力——应变法在中高周疲劳寿命估算中的应用 张晓慧、赵少汴、 王忠保	266
内环加强 T 型管节点疲劳试验研究 姚木林、石理国	272
结构疲劳裂纹应变检测技术 陈建国、李庆吉、申山宏	278
局部应力——应变法如何推广应用于高周疲劳 赵少汴、王忠保	282
监控部位名义应力与危险部位局部应力关系的确定 张熙箴	285
疲劳韧性的数学表达式 王永廉	289
金属塑性变形传播特性与疲劳性能的关系 张建中、冯忠信、杨建军、 陈新增	293

四、疲劳的微观机理

LY12CZ 薄板的激光冲击及疲劳寿命 李光霞、刘菊岗、罗欣	299
不同制造工艺下对焊接接头静力与疲劳特性分析 胡兵、薛景川、 杨玉恭	302
微结构循环弹塑性场的数值模拟 孙秦、杨庆雄、童小燕	308
优化高频淬火强化工艺提高抽油杆疲劳寿命的试验研究 黄东升、	

陈国民、方华灿、宋孟裕、赵学胜	312
超载和常幅低周疲劳铝合金试样晶体滑移线的对比实验 李敏华、 李静	317
一种镍基单晶高温合金低周疲劳软化硬化特点及位错结构 焦育宁、 徐永波、王中光、张静华、胡壮麒	321
铝合金应变疲劳行为及位错结构演变 李云卿、唐祥云、刘禹门	326
用计算微观力学研究单晶体的循环特性 张永伟、杨庆雄	330
低碳钢微应变范围内的循环应力应变特性 谈国华、张力宁	334
双相钢中马氏体形貌对疲劳疲纹屏蔽效应影响的有限元分析 孙立志、 李守新、唐延东、王中光	339
空心车轴内腔表面允许缺陷的研究 侯炳麟、程育仁、彭相	345
马氏体含量对双相钢低周疲劳性能的影响 艾素华、杜晓冬、冯泽民、 王中光	349
多级疲劳损伤分析 李细广、琚定一	353
无搭接激光局部强化方法 刘常升、才庆魁、徐灏	357
激光辐照后微观组织的变化及其对疲劳断裂性能影响 周克印、吴永端、 叶永山	361
激光强化技术在 Y7 飞机上应用的模拟试验研究 魏志德、何秋菊、李光霞、 李长春	365
孔挤压强化对两种高强度钢疲劳裂纹起始与扩展寿命的影响 丁传富、 赵振业、宋德玉	370
交变应力下冷挤孔边残余应力变化规律研究 邢文珍、刘一兵	375
冷挤孔边残余应力衰减规律初探 邢文珍	379
Corton-Dolan 累积损伤理论指数 d 的探讨 赵少汴、王忠保	383
先进拟合优度检验方法及应用 董聪、戎海武、杨庆雄	386
一种新的低循环疲劳损伤变量及其测量 程光旭、楼志文、匡震邦	395
低周疲劳累积损伤的探讨 赵廷仕	400
线性累积损伤法则的概率解释 谢里阳、林文强	403
一种新的疲劳损伤累积模型 李细广、琚定一	407
损伤公式对复杂载荷下裂纹形成寿命预测的影响 王茂廷、谢根栓	412
随机低周疲劳瞬态塑性功累积损伤研究 华心	419
随机疲劳累积损伤统计自洽模型 董聪、杨庆雄、李为吉	427

金属材料形变过程中的热发射 童小燕、孙秦、张燕民、杨庆雄、朱明烈、 蔡柏青、张承学、孙铁辉	434
疲劳破坏塑性应变能初探 吴富民	439
对数高斯窄带平稳随机过程荷载作用下材料的疲劳损伤 吴弋慧	444
加载波形对混凝土材料疲劳损伤影响的实验研究 吴弋慧	447
一种新的损伤计算方法 郑松林	449
* 英斯特朗公司及其材料试验机	452
* Instron 国际有限公司 1993 年推出与众不同的新一代 5500 系列电子万能 材料试验机	456
* 引进、吸收国际先进技术, 开发系列新产品——长春试验机厂研制成功 WEW-200、600 型微机控制液压万能试验机	458
* 金华试验机厂向机械行业提供先进的检测仪器	460

下册

五、特殊环境下的疲劳

随机变幅载荷下海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率的断裂力学参量选择 薛以年、 徐纪林	463
低温循环塑性和 Masing 性能研究 王建国、徐世平、王红缨、唐俊武...	467
磨蚀及磨蚀疲劳可靠性分析 贺东斌、冯元生	471
热处理、轧制方向与腐蚀介质对 A537 钢疲劳裂纹扩展中声发射规律的影响 研究 王政富、李劲、柯伟、朱祖铭	476
阴极极化条件下 A357 钢在 3.5%NaCl 中 CF 裂尖塑性行为的研究 魏学军、 王政富、李劲、周向阳、柯伟	481
氢脆与阳极溶解条件下加载波型对低合金钢 CF 裂纹的扩展速率影响机理的 研究 李劲、王政富、王俭秋、柯伟	486
随机变幅载荷下焊接接头的海水腐蚀疲劳裂纹扩展试验 徐纪林、薛以年、 李禾	491
LY12CZ、LC4CS 铝合金、30CrMnSiA 钢在不同介质下的 DFR cutoff 值 郭洪全、许瑞献、沈月	496

铝合金 7050-T7651 腐蚀疲劳裂纹扩展特性的试验研究 刘绍伦、 欧阳辉、李谦、岳俊文、罗安民	501
X56 钢管焊缝在海洋环境下的疲劳强度 臧启山、刘路、刘慷、韩恩厚、 韩玉梅、柯伟	505
高压加氢管工作温度下低周疲劳及寿命预测 李忠超、吴志学	509
间歇多次超载腐蚀疲劳裂纹扩展行为的研究 刘路、臧启山、刘慷	513
极化对腐蚀疲劳裂纹内电位及裂纹扩展的影响 韩恩厚、韩玉梅、郑宇礼、 柯伟	517
加载频率对 X56 管线钢腐蚀疲劳性能的影响 韩玉梅、韩恩厚、郑宇礼、 臧启山、柯伟	521
温度对金属材料循环特性的影响 王永廉	525
预应力混凝土轨枕在不稳定变幅循环荷载弯矩作用下载面裂缝扩展深度预测 理论模型 吴弋慧、徐晨、陈岳源	529

六、工程应用

随机疲劳载荷的处理及载荷谱编制准则 王德俊、平安、徐灏	535
最少空测采样飞行起落个数的估计 闫楚良、高镇同	539
飞——飞载荷谱下裂纹形成寿命估算方法的研究 王智、陈志伟	543
临时采油平台的疲劳分析 王兆吉、李玉珊、刘杰鸣	547
疲劳极限与非扩展裂纹 吴志学、王德俊、徐灏	552
强化 S 链板的疲劳性能 陈德海	556
用专家系统进行抗疲劳细节优化设计 杨庆雄、唐宁	559
耕耘机械外载谱及其计算机统计处理 康晓第、闫楚良、沈超和	563
汽车后桥极值载荷分析及在疲劳试验中的应用 王占奎、鲁三才	567
全尺寸机翼结构剩余强度试验位移变化规律研究 安刚	571
发电机转子护环的剩余寿命预测 刘瑞堂、张春亚	574
复合材料层板螺栓连接疲劳试验及寿命估算 张博平、张开达	578
随机载荷下的疲劳寿命计算 吴永礼	582
金属材料疲劳性能的预测研究 赵林、王德俊、徐灏	586
摩托车的疲劳寿命预估方法 杨振东、王虹、韩文年、董正身	593
海上平台管节点疲劳寿命预测方法 石理国、姚木林、周敏健	597

南浦大桥主桥钢梁焊缝疲劳性能试验研究 姚健安、赵俊、叶满	605
用少数样本快速制取构件的 R-S-N 曲线簇的方法 周青国、杨万凯、 梁恩忠	611
在多级载荷作用下构件疲劳损伤的全寿命估算 虞岩贵	615
一种估算疲劳裂纹起始寿命的新方法 李臻、郑修麟	621
某飞机阻力伞锁钩断口分析和磨损研究 张承学、朱明烈	628
飞机结构振动疲劳问题 肖寿庭、杜修德	634
飞机起落架扭力臂变行程疲劳试验技术与实施 龙凤鸣、张鸿元 ...	638
飞机消耗寿命计算方法研究 张熙箴	643
混铁水车车轴的疲劳寿命预测 赵明 皋、张石山、吴素君	647
K-8 机翼主梁接头疲劳分析 徐晓飞、叶彬	651
随机载荷作用下海洋结构疲劳可靠性的研究 陈国明、方华灿	656
多级应力作用下的疲劳可靠性估算 刘建中、谢里阳、徐灏	660
结构疲劳可靠性分析 (2D-RDCDR 模型) 徐国建、高镇同	666
随机疲劳载荷谱编制方法的研究 胡俏、谢里阳、平安、徐灏	671
EQ140-1 传动轴载荷谱的编制 张弘彬、高翔	675
歼击机平尾五参数疲劳载荷谱编制 田丁栓、孙书田	680
钢筋混凝土梁的疲劳失效准则 程育仁、张光玉、彭湘	685
对交变应力极限的探讨 武振先	689
受内压厚壁圆筒构件的疲劳寿命试验方法 任安峰	699
疲劳极限的预估及测试 毋永利	703
汽车磨擦焊半轴强度试验研究 陈学勤	707
XX 飞机连接加强件的疲劳寿命研究 何宇廷、富贵华、林文章	710
某型号发动机主安装节的疲劳寿命预测 任培正、蔡显新、 廖学军、汤凤	714
通用桥式起重机主梁腹板疲劳断裂分析 黄志	718
火炮身管射击过程中的初始裂纹研究 任安峰	724
II 型疲劳裂纹尖端的屏蔽功能——粗糙度引入 II 型裂纹扩展的剪切阻力 郑治沙、王中光、艾素华	729
飞机起落架随机变行程疲劳试验技术模拟试验验证 冯培礼	733
中高周全尺寸结构疲劳试验疲劳监控技术研究 陈建国、李庆吉	738
LC4 合金不同类型载荷谱下疲劳断口分形特征 仪建章、王苏程、	

吕景春	744
实际工程结构 ΔJ 的计算方法探讨 雷月葆、李培宁、琚定	748

五、特殊环境下的疲劳

随机变幅载荷下海水腐蚀疲劳裂纹 扩展速率的断裂力学参量选择

薛以年 徐纪林

(中国科学院力学研究所, 100080)

提要 本文就随机变幅载荷下疲劳裂纹扩展速率的断裂力学参量的选择进行了分析, 并与随机变幅载荷下焊接接头海水腐蚀疲劳裂纹扩展试验数据进行了比较。由此认为采用 $\Delta K_{r.m.}$ 作为断裂力学控制参量是可取的; 并且认为用常幅循环加载下的焊接接头海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率曲线代替以 $\Delta K_{r.m.}$ 为参量的随机变幅加载下的裂纹扩展速率曲线, 以此来估算其海水腐蚀疲劳裂纹扩展寿命, 在工程应用上不仅方便可行, 而且是安全保守的。

关键词 随机变幅载荷 海水腐蚀疲劳 焊接接头 裂纹扩展速率 断裂力学参量

一、引言

导管架海上平台是大型焊接结构, 裂纹扩展寿命占总寿命的大部分, 因此基于疲劳裂纹扩展数据的断裂力学分析方法是估算导管架平台管节点疲劳寿命的有效途径。海上平台经受的波浪载荷是随机变幅循环载荷, 在不考虑平台结构本身响应的情况下, 需要对窄带随机载荷下的裂纹扩展进行分析研究。通常认为常幅循环载荷下的裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}$ 与断裂力学参数应力强度因子范围 ΔK 的关系遵从 Paris 公式

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (1)$$

其中 $\Delta K = \Delta S \sqrt{\pi a} Y(a)$, ΔS 为应力范围, a 为裂纹深度, $Y(a)$ 为几何修正系数。对于随机变幅载荷下, 人们也设想建立类似于上式的关系式, 左端采用裂纹扩展平均速率 $\overline{\frac{da}{dN}}$; 右端 ΔK 采用某一种统计平均值。传统的工作一般采用 ΔK 的均方根值作为断裂力学参量, 因为一方面峰值为瑞利 (Rayleigh) 分布的载荷谱本身是以过程的均方根值表征的; 另一方面过去许多工作包括航空领域中的随机疲劳问题表明, 均方根应力幅值很适合作为窄带随机加载过程的疲劳应力参数, 于是关系式为

$$\overline{\frac{da}{dN}} = C \Delta K_{r.m.}^m \quad (2)$$

其中 $\Delta K_{r.m.}$ 即 ΔK 的均方根值。

我们曾开展了随机变幅载荷下焊接接头的海水腐蚀疲劳裂纹扩展试验^[1], 并采用公式 (2) 对试验数据进行分析。此外, 也有人采用 ΔK 的均立方根值或更高阶的统计平均值作为断裂力学参量来建立类似于公式 (2) 的关系式。本文就随机变幅载荷下疲劳裂纹扩展速率的断裂力学参量的选择进行分析比较。

二、等效应力强度因子范围

随机变幅循环加载过程中每一次循环加载都可以与常幅循环加载过程联系起来,也就是说每次循环加载的裂纹扩展量服从于应力强度因子范围相同的 Paris 公式

$$\Delta a_i = C \Delta K_i^m \quad (3)$$

其中 Δa_i 是第 i 次循环加载的裂纹扩展量, ΔK_i 是相对应的应力强度因子范围。与线性累积损伤法则一样,假定各次载荷的次序和大小对裂纹扩展没有影响,即不考虑载荷的交互作用,从而得到

$$\sum_i \Delta a_i = C \sum_i (\Delta K_i)^m \quad (4)$$

对一定循环次数 n 的裂纹扩展量取平均,则有

$$\frac{\overline{da}}{dN} = C \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta K_i)^m}{n} \quad (5)$$

将上式写成

$$\frac{\overline{da}}{dN} = C (\Delta K_{rmm})^m \quad (6)$$

则

$$\Delta K_{rmm} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta K_i)^m}{n} \right]^{1/m} \quad (7)$$

ΔK_{rmm} 就可看作为随机变幅加载下相应于 Paris 公式中的等效应力强度因子范围,实际上是 ΔK 的 m 次幂平均的 m 次方根值,这里的 m 值和常幅循环加载 Paris 公式 (1) 中的 m 值是相同的。由此可见,在遵从线性累积损伤法则的意义下,关系式 (6) 具有明显的力学意义。

三、断裂力学参量的比较

等效应力强度因子范围 ΔK_{rmm} 可看作是随机变幅载荷下疲劳裂纹扩展速率的断裂力学控制参量,当 $m=2$ 时,公式 (7) 是 ΔK 的均方根值 ΔK_{rms} 。在常幅循环载荷下海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率公式 (1) 中, m 值一般在 2 到 5 之间,但不一定是整数,下面我们分析比较一下 m 取值不同,对用断裂力学参量 ΔK_{rmm} 表达的结果有什么差别。

随机变幅波浪载荷幅值的长期分布通常可以方便地由几个不同幅值水平的瑞利 (Rayleigh) 分布来组成^[2],因此我们只要对峰值应力 S 为瑞利分布的随机变幅循环载荷的情况进行分析比较。由微机对试验系统进行峰值应力为瑞利分布的随机变幅加载控制是这样实现的^[1],首先利用随机数源 RND(P) 产生 0 到 1 之间的均匀分布随机数,再根据瑞利分布的函数表达式^[2]

$$S = \left\{ 2\sigma^2 \ln \frac{1}{P} \right\}^{1/2} \quad (8)$$

计算得到瑞利分布的应力峰值 S , 其中 σ 为应力水平参数。实际上随机数只取一定数目,比如在试验 [1] 中取 20000 个数为一个历程块,然后反复循环,即进行伪随机加载试验。这里不妨假定应力比 $R=-1$, 则应力范围 $\Delta S = 2S$, 于是

$$\Delta K = 2S \sqrt{\pi a} Y(a) \quad (9)$$

在一个历程块加载中, 每 2000 次加载后测量一次裂纹深度, 实际裂纹深度 a 变化不大 ($\Delta a \ll a$); 在试验数据具体处理时, 我们对裂纹深度 a 是取其加载前后的测量平均值, 于是当 a 被看作为常数的情况下, 则由 (9) 式

$$\Delta K_{rmm} = 2S_{rmm}\sqrt{\pi a} \cdot Y(a) \quad (10)$$

由此只需要对 m 值不同的 S_{rmm} 进行比较即可。

本文计算了 $m=2, 3, 4, 5$ 的 S_{rmm} 值, 计算中任意取 $\sigma = 8$, 并且在随机数源中分别取 2000 个数和 20000 个数, 以便检查它们之间的误差。 S_{rmm} 的计算结果见下表 ($S_{rm2} = S_{rm2}$):

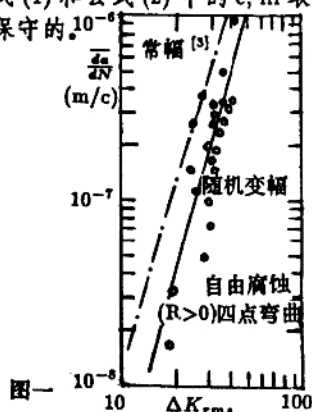
历程块大小	S_{rm2}	S_{rm3}	$\frac{S_{rm3}-S_{rm2}}{S_{rm2}}$	S_{rm4}	$\frac{S_{rm4}-S_{rm2}}{S_{rm2}}$	S_{rm5}	$\frac{S_{rm5}-S_{rm2}}{S_{rm2}}$
2000 个数	113.5	125.1	10.2%	135.4	19.3%	144.9	27.7%
20000 个数	112.6	124.1	10.2%	134.4	19.4%	143.9	27.8%

可以看到, S_{rm3} 比 S_{rm2} 约大 10%, S_{rm4} 比 S_{rm2} 约大 19%, S_{rm5} 比 S_{rm2} 约大 28%。

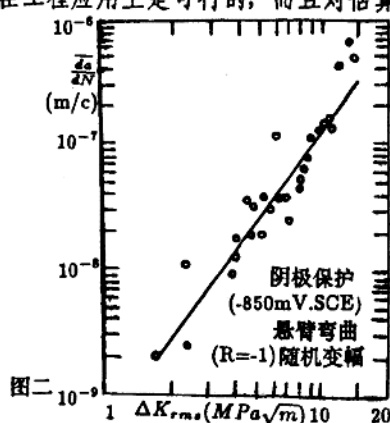
四、讨论

从上面比较来看, 对于峰值应力为瑞利分布的随机变幅加载情况, 在假定不考虑载荷的交互作用前提下, 由线性累积损伤法则求得的等效应力强度因子范围 ΔK_{rmm} 与均方根 ΔK_{rm} 相差并不大, $m=3$ 时约大 10%, $m=4$ 时约大 19%, $m=5$ 时约大 28%, 因此我们认为传统采用 ΔK_{rm} 作为随机变幅载荷下裂纹扩展速率的断裂力学控制参量是可取的。

对于我们得到的随机变幅载荷下焊接接头海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN} - \Delta K_{rm}$ 曲线^[1](见图 1, 2), 如果横坐标采用 ΔK_{rmm} 作为断裂力学参量, 无非是把试验点及其拟合线向右平移一段距离, 从上面比较来看, 移动是比较少的; 同时可以看到采用 ΔK_{rm} 作为断裂力学参量的 $\frac{da}{dN} - \Delta K_{rm}$ 曲线与常幅循环载荷下的海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN} - \Delta K$ 曲线^[3]最接近(见图 1)。由此我们认为用常幅循环载荷下焊接接头的海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率曲线代替随机变幅载荷下裂纹扩展速率曲线, $\frac{da}{dN} - \Delta K_{rm}$, 也就是说公式 (1) 和公式 (2) 中的 c, m 取值相同, 在工程应用上是可行的, 而且对估算寿命是安全保守的。



图一



图二

关于在随机变幅载荷下用等效应力强度因子方法研究疲劳裂纹扩展的工作一直受到人们的重视,起先是用应力强度因子范围的均方根值 $\Delta K_{r,m}$ 作为等效应力强度因子^[4,5],并且与常幅循环加载的疲劳裂纹扩展建立联系;后来大多偏向于采用 $\Delta K_{r,mm}$ 作为等效应力强度因子^[6,7,8]认为比较合理。以上这些工作都是通过钢材的裂纹扩展试验进行研究的,而且有些只是在空气中的试验工作,本文是针对焊接接头在海水环境中的疲劳裂纹扩展试验工作^[1],进行了以上分析讨论。需要指出,之所以随机变幅加载的疲劳裂纹扩展速率与常幅循环加载情况比较接近,是由于应力范围以瑞利分布作随机变幅加载,并且受促动器容量的限制,存在应力截断水平 $\frac{\Delta S_{max}}{\Delta S_{min}}$ 约等于 4,因此在加载过程中不会突然出现很大的峰值应力,致使载荷的交互作用影响不显著,然而却多少使裂纹扩展速率有所降低,实际上,海上平台所受的海浪载荷就是符合这样的随机变幅加载过程。

五、结论

对于峰值应力为瑞利分布的随机变幅加载情况,等效应力强度因子范围 $\Delta K_{r,mm}$ ($m = 3, 4, 5$) 与均方根值 $\Delta K_{r,m}$ 相差不大,因此采用 $\Delta K_{r,m}$ 作为断裂力学控制参量可取的;从随机变幅载荷下焊接接头海水腐蚀疲劳裂纹扩展试验来看,采用 $\Delta K_{r,m}$ 作为断裂力学控制参量的 $\frac{da}{dN} - \Delta K_{r,m}$ 曲线与常幅循环载荷下的 $\frac{da}{dN} - \Delta K$ 曲线更为接近。因此我们认为可以用常幅循环加载下的焊接接头海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率曲线代替以 $\Delta K_{r,m}$ 为断裂力学参量的随机变幅载荷下的裂纹扩展速率曲线,以此来估算焊接接头的海水腐蚀疲劳裂纹扩展寿命,在工程应用上不仅方便可行,而且是安全保守的。

参 考 文 献

- [1] 徐纪林、薛以年、李禾,“随机变幅载荷下焊接接头的海水腐蚀疲劳裂纹扩展试验”,本文集,1993年。
- [2] 薛以年、徐纪林、李延苹、李禾,“随机变幅载荷下焊接接头的海水腐蚀疲劳研究”,海洋工程,10卷2期,16-22页,1992年5月。
- [3] 薛以年、徐纪林、李禾,“焊接接头热影响区的海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率”,实验力学,5卷4期,396-402页,1990年12月。
- [4] J.M.Barsom, “Fatigue-Crack Growth under Variable-Amplitude Loading in ASTM A514-B Steel”, Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing, ASTM STP536 ASTM, 1973, p.147.
- [5] P.J.Haagensen, “Fatigue Crack Growth in Steel in Air and Sea Water under Constant Amplitude and Random Loading”, Advances in Research on the Strength and Fracture of Materials, Vol.2B, ICF4 Waterloo, Canada 1977.
- [6] Y.W.Cheng, “The Fatigue Crack Growth of a Ship Steel in Seawater under Spectrum Loading”, Int.J.Fatigue 7, No.2 (1985) pp.95-100.
- [7] D.Ritchie, P.A.J. Van Der Veer and K.Smit, “Fatigue Crack Growth under Broad Band Stationary and Non-Stationary Random Loading”, Steel in Marine Structures (SIMS'87), Delft, The Netherlands, 1987, TS47.
- [8] A.Bignonnet, Y.Sixou and J.Verstavel, “Fatigue Crack Growth under Random Loading-the Equivalent Loading Approach”, Advances in Fracture Research, Vol.2, ICF7 Houston, Texas, USA 1989.

低温循环塑性和 Masing 性能研究

王建国 徐世平 王红缨 唐俊武

(北京科技大学新金属材料国家重点实验室, 100083)

摘要 本文主要研究碳钢材料在低温状态下的循环性能和 Masing 特性。试验选用工程中常用的 A3 和 45 碳钢, 温度分别选择 -50°C 和 -30°C , 为了便于与室温状态下的性能加以比较, 在做低温试验的同时还做了室温试验。

试验结果表明, 两种材料在三种试验温度状态下, 循环应力-应变曲线均有明显的屈服平台, 且都不呈现 Masing 性能。但有趣的是 45 钢在三种试验温度状态下, 包氏应变(Bauschinger strain)与塑性应变范围均呈线性关系, 而 A3 钢在塑性应变范围大于 0.4% 时也有上述现象。如果使用另一种方法, 即将不同应变范围循环稳定滞回环的加载迹线重合在一起, 结果两种材料在三种试验温度状态下均可作为 Masing 材料来处理。由此可以提出, 关于 Masing 材料的定义应重新加以讨论。

关键词 循环屈服; 循环稳定; 加载迹线

一、前言

工程中的许多构件及设备, 常常是在低温状态下工作。例如, 在我国的东北地区, 桥梁、大型液体储存罐、钢轨、管道和地面交通工具等, 这些构件及设备的工作温度有时可低达 -50°C 以下, 而这些构件多数是由低碳钢制做的, 因此, 研究低碳钢材料在低温状态下的循环性能对工程设计和进行事故分析有着十分重要的意义。

众所周知, 材料的循环应力应变响应不仅仅依赖于材料本身, 还与材料的初始状态、循环加载历史和工作温度等有关。因此, 在分析承受循环载荷作用下工程构件的应力-应变响应和寿命预测时, 材料在单调状态下的应力-应变性能已不适用, 必须获得材料在各种试验条件下的循环应力-应变性能。

材料的循环塑性性能包括循环硬化、循环软化、循环蠕变、循环松弛以及循环记忆性等。国内外研究工作者对上述问题进行了大量的试验研究, 为工程设计和设备事故分析提供了许多重要数据。但是, 关于循环塑性性能的另一主要问题, 循环屈服以及材料的 Masing 性能的研究还不多, 而这项工作又是在进行构件的弹塑性应力-应变分析中不可缺少的。因此, 本文对工程中常用的碳钢材料 A3 和 45 钢的循环塑性性能以及它们的 Masing 特性加以初步研究。

二、试验方法

材料选用工程中常用的 A3 和 45 钢。为了防止试验过程中试样发生失稳, 采用短标距试样, 标距为 25mm, 直径为 10mm。试验在 MTS 809 拉-扭疲劳试验机上进行。采用应变控制, 引伸计型号为 MTS632.11C-20, 波形为三角波, 对称循环, 试验频率为 0.1Hz。试验温度选择 -50°C 、 -30°C 和室温。