

全国第四届疲劳学术 会议论文集

中国金属学会 中国机械工程学会
中国航空学会 中国力学学会

一九八九年五月

目 录

疲劳短裂纹扩展与工程裂纹形成寿命预测	北京航空航天大学 姜伟之 徐伯庆 邵爱民 金成敏	(1)
残余应力场中裂纹扩展	北京航空材料研究所 王更生	(6)
裂纹在珠光体钢中近门槛区扩展	中国科学院力学研究所 邓蓉英 周爱华 蒋怀庆 李春秀	(10)
切口旁短裂纹的循环 J 积分与疲劳裂纹扩展	西安公路学院 王金春 西安交通大学 陆毅中 杨水龙	(14)
残余应力场中疲劳裂纹闭合模型的扩充	西安交通大学 林立 陶冶 胡奈赛	(18)
胶接补强平板疲劳裂纹扩展规律的研究	西北工业大学 陈思懿 卢智先	(22)
海洋平台用钢在程序加载下的疲劳裂纹扩展	中科院力学所 何明元 崔民子 周爱华 蒋环庆	(27)
循环压缩载荷下疲劳裂纹萌生、扩展及止裂的计算机模拟	西安交通大学 李中华 张建中 罗景华 李双国 冯忠信	(31)
超载因子与疲劳裂纹起始门槛值及起始寿命	郑州机械研究所 陈德广 西北工业大学 郑修麟	(37)
循环加载下切口旁短裂纹的弹塑性有限元应力应变分析	西安公路学院 王金春 西安交通大学 陆毅中	(43)
对焊接头疲劳寿命的估算	西北工业大学 吕宝桐 吕笑岩 崔天燮 郑修麟	(47)
含内裂纹的无限体在沟布周期应力场和小应力梯度的非均匀应力场中 疲劳裂纹的扩展分析	武汉工业大学 胡建阳 中国地质大学 刘华英	(52)
复合型疲劳裂纹扩展门槛值的研究	兰州铁道学院 林德深 杨桥生 李鹤喜	(56)
形变热处理对 55SiMnVB 弹簧钢疲劳特性的影响	武汉钢铁学院 詹方海 吴意发 代品光 彭心平	(60)
7050 铝合金的晶界偏析对疲劳裂纹扩展行为的影响	抚顺石油学院 金真弘 东北工学院 曾梅光	(64)
无规分布的刃型位错在循环载荷作用下的聚集特点	中科院金属研究所 巴图 雷琼芝	(68)
离子注入对多晶镍微观结构及疲劳行为的影响	中国科学院金属研究所 徐明华 巴图 王中华	(72)
化学镀 Ni - P 非晶对 35CrMo 微动疲劳行为的影响	高护生 顾海澄 周惠久	(76)

晶界疲劳效应及铝双晶体中超 I 阶段疲劳裂纹扩展	-----
太原工业大学数力系 李庆生	••••• (80)
激光快速熔凝钢表面微晶化的组织形貌与疲劳断裂特征	-----
东北工学院 安碧丽 李再先 才庆魁	••••• (85)
磷离子注入对多晶镍疲劳行为的影响	-----
中国科学院金属研究所 陈立凡 巴图 师昌绪	••••• (89)
应变控制下两种热作模具钢的循环软化效应及其微观机理	-----
华中理工大学 胡镇华 肖杰轩	••••• (93)
微量予应变和超载对 15MnVN 钢疲劳裂纹起始寿命的影响	-----
西北工业大学 凌超 郑修麟	••••• (97)
碳钢表面微观屈服强度研究	-----
西安交大 方信贤 何家文 中科院金属研究所 李家宝	••••• (103)
定量的热应力疲劳试验	-----
北京科技大学 冯均一 边孟欣 党紫久	••••• (107)
表面处理对钛合金微动磨损疲劳性能的影响及其机理	-----
东工 于洋 赵家绪 赖祖涵 沈阳 410 厂 高嵩 王砚芬	•• (111)
循环应力作用下工业纯铝依赖于时间的变形研究	-----
中国科学院金属研究所 阳志安 王中光	••••• (115)
预应变配合时效热轧和热处理双相钢近门槛区域疲劳裂纹扩展行为的研究	-----
中科院金属所 郑冶沙 王中光 艾素华	••••• (118)
工业纯铝疲劳行为的 SEM 原位动态观察	-----
西安交通大学 张捷平 顾海澄 周惠久	••••• (123)
ZG42CrMo 松缩区疲劳失效模型	-----
机械电子工业部 沈阳铸造研究所 赵芳欣 吴又玄 唐玉林	•• (129)
双相钢循环形变及其各相疲劳硬化和软化	-----
福州大学 机械系 何则荣 郭志	••••• (133)
坦克扭力轴材料不同热处理制度与取样方向下近门槛区疲劳裂纹扩展速率与门槛值的研究	-----
北京航空航天大学 蒋冬滨 机电部 201 所 王彦才	••••• (138)
低碳回火马氏体疲劳过程的显微组织变化	-----
西安交通大学 荣惠芬 范群成 朱道珍	••••• (142)
喷丸对材料应变疲劳行为的影响	-----
南京汽车研究所 于水和 余雷	••••• (146)
载荷频率和波形对高强度钢腐蚀疲劳裂纹扩展的影响	-----
西安交大力学系 路国强 陆毅中	••••• (149)
19Mn5 钢低循环下的变形特性	-----
西安交通大学材料强度研究所 李益民 顾海澄	••••• (152)
40Cr 钢不同原始组织经激光处理后的疲劳性能研究	-----
东北工学院 付淑云 才庆魁	••••• (158)

钛合金 TC4(Ti-6Al-4V)喷丸强化与疲劳性能研究	-----
航空航天部黎明发动机公司 马书盛	 (162)
激光熔凝处理表面裂纹疲劳行为的研究	-----
上海工程技术大学 高桦 李明 上海大隆机器厂 陈德海	 (166)
疲劳缺口敏感度指标 $q < 0$ 问题的探究	-----
宁大 陈新增 董新龙 西交大 马晋生 冯忠信 张建中	 (170)
三维裂纹近门槛区疲劳扩展规律及门槛值的研究	-----
北京航空航天大学 罗毅 刘文廷	 (174)
30CrSiNi2A 钢对焊接头的疲劳裂纹起始寿命	-----
西北工业大学 吕宝桐 李大宝 郑修麟	 (178)
复合应力状态下循环应力应变性能研究	-----
石油大学 阎相桢 北京科技大学 靳东来	 (183)
疲劳累积损伤规律及其论证	-----
东北工业大学 王镇 谢里阳 董遇泰	 (187)
LY12CZ 板试样拉—拉疲劳损伤演变和宏观裂纹形成寿命裂纹估算	-----
华中理工大学 赵慧霞 李长春 李灏 武汉工业大学 宋显辉	 (191)
非对称应力场缺口件低周疲劳问题	-----
北京科技大学 陈俊华 唐俊武 王建国 王彬	 (195)
疲劳破坏准则及其寿命估算	-----
中国农业机械化科学研究院 师照峰	 (199)
复合材料的断裂可靠性分析	-----
北航 陈爱雅 法国高等材料及机械工程学院 T.Vinh	 (203)
弯曲、扭转复合加载时的疲劳极限和裂纹扩展条件	-----
华中理工大学力学系 陈建桥	 (207)
GC-19 中温超高强度钢元件疲劳特性的研究	-----
一六二一所 刘俊洲	 (211)
平均应力对扭弯组合疲劳强度的影响	-----
浙江大学 章国瑞 董秀珍 黄玳玳	 (219)
动态应变时效强化奥氏体不锈钢疲劳强度的研究	-----
福州大学 陈文哲 钱匡武	 (223)
CT 型试样在应变疲劳中的转动因子研究	-----
机电部合肥通用机械研究所 王印培 吴晓东 章小漪	 (227)
密质骨疲劳断裂特征初探	-----
华中理工大学 张朝新 李光霞 李长春	 (231)
材料临界疲劳损伤因子 D_{fc} 的测试	-----
浙江大学分析测试中心 姜明文	 (236)
循环载荷作用下试件缺口根部的弹塑性应力应变分析	-----
武汉工学院 黄燕	 (240)

应力场状况对疲劳强度影响的试验研究——兼论疲劳破坏判据与疲劳

模拟试验的相似条件 -----

西安交通大学 张镇生 马晓士 杨仲民 孔昭月 (244)

疲劳裂纹扩展的非比例过载效应 -----

上海工大 高桦 陈友萱 李明 上海大隆机器厂 陈德海 (249)

电位法测裂纹的标定试验及其应用 -----

清华大学 陈正新 程谟仪 (253)

非均匀应力场对构件疲劳强度的影响 -----

西安交通大学 文保平 张镇生 闵行 (257)

缺口试样疲劳裂纹起始寿命的试验研究 -----

清华大学力学工程系 袁国文 杨宗发 (265)

计算机控制低周疲劳试验中塑性形变功密度之测定 -----

清华大学工程力学系 勾秋静 杨宗发 (269)

45#钢非比例循环特性实验研究 -----

清华大学工程力学系 周春田 华心 阎淑茹 (273)

循环硬化铝合金低周疲劳损伤的实验研究 -----

清华大学工程力学系 杨宗发 袁文国 (277)

拉压循环载荷作用下的薄板试件的夹具 -----

中国科学院力学研究所 王振江 (281)

一种新的低周疲劳寿命预估法 -----

重庆大学 盛光敏 龚士弘 (284)

滚压提高缺口疲劳强度原因的断裂力学方法分析 -----

西安交大强度所 杜百平 李年 (288)

一种伪随机疲劳试验方法 -----

武汉工学院 吴永桥 黄燕 (292)

微机处理疲劳数据方法 -----

东北工学院机械二系 关彦光 (296)

循环及疲劳性能参数对估算寿命的精度影响 -----

东北工学院 童小燕 王德俊 徐灏 (300)

疲劳试验升降法的数学基础及其改进 -----

东北工学院 徐国建 徐灏 谢里阳 (304)

多裂纹源多裂纹扩展路线复杂接头全寿命计算方法 -----

唐肖理 杨庆雄 (308)

TTCI数据组合的一般方法 -----

华中理工大学力学系 陈传尧 (312)

疲劳过程中的非弹性响应与循环滞回能研究 -----

东北工学院 童小燕 王德俊 徐灏 (316)

局部应力应变法的两种改进算法 -----

北京农业工程大学材料力学系 傅志一 杨永吉	(320)
全量分断模型及其对循环载荷下平面应力问题的有限元分析	
中国科学院力学研究所 徐轸 李敏华	(321)
缺口表明裂纹和角裂纹在远方拉伸情况下的应力强度因子	
北京航空材料研究所 赵伟 吴学仁 顾鸣果	(328)
铝合金材料在激光弱作用下的疲劳性能及损伤力学分析	
华工汉口分院 钱志雄 华中理工大学 李长春 李光霞	(332)
用损伤及断裂结合确定铝板试样的疲劳全寿命	
华中理工大学 李长春 倪光乐 李光霞	(336)
循环应力—应变曲线与疲劳持久极限	
北京科技大学数力系 唐俊武 王建国 徐世平 王彬	(340)
DQP-1——一个新累积损伤模型	
东北工学院 谢里阳 徐灏 王德俊	(341)
一个描述激光延寿的微观机制的方法	
华中理工大学力学系 胡小红 李光霞	(348)
裂纹在小韧带中扩展时疲劳寿命的估算	
上海纺织工业专科学校 陈贵龄	(352)
局部应力应变法弯扭复合疲劳损伤准则	
南京航空学院 聂宏 乔新 樊慰勋	(356)
机动类飞机典型结构在发动机(或气功)噪声作用下声疲劳分析方法研究	
航空航天部第601所(沈阳) 张照鑑	(363)
航空发动机用38CrA喷嘴壳体大应力低周疲劳断口模拟试验	
航空航天部黎明发动机制造公司 马书盛	(367)
高强度钢的腐蚀疲劳特性	
北京航空航天大学 钱友荣 何向东	(371)
挤压孔疲劳试验特性	
西北工业大学 邵亚生 杨庆雄	(375)
裂纹扩展微机测试及其在腐蚀疲劳中的应用	
西北工业大学 路民旭 刘晓坤 王建军	(379)
海上平台管节点腐蚀疲劳与阴极防护	
中国船舶科学研究中心 石理国 姚木林 周敏建	(386)
频率、PH值和温度对A537钢疲劳性能的影响	
中科院金属所 戴启山 刘揆 马敏雅 王兆节	
中国科学院金属腐蚀与防护研究所 柯伟 吴鑫华 朱自勇	(390)
海上平台导管架焊接接头海水腐蚀疲劳寿命的实验研究	
天津大学 贾安东 张彦华 叶建敏	(391)
在淡水介质中加载频率对铸钢试件及其焊缝的疲劳强度影响研究	
东北工学院 王德俊 黄雨华 钟苏	(398)
25#钢焊接结构腐蚀疲劳强度研究	

东北工学院 吴小军 崔广椿 张伟	(402)
构件接触疲劳寿命分析	
郑州纺织工学院 方树德	(406)
介质和温度对 20Cr2Ni4 钢疲劳裂纹扩展行为的影响	
北京工业大学 邢志强 西安交通大学 宋余九 涂铭旌	(410)
3Cr ₂ W ₃ V 钢的热疲劳及其热疲劳硬化和软化	
福州大学机械系 何则荣 郭志 陈芩	(414)
接触疲劳裂纹萌生和扩张行为的研究	
陕西机械学院 韩立宁 楼秉哲 芦正欣 刘守智 沈福三	(420)
在弱酸性和弱碱性介质中回火马氏体态 30CrNi3A 钢疲劳裂纹的扩展	
西交大 黄淑菊 李淑兰 权高峰 宋余九	(425)
在水溶液中钢的疲劳断口形貌	
西安交通大学金属材料及强度研究所 黄淑菊	(429)
腐蚀疲劳裂纹测试——裂纹扩展片技术	
西安交通大学 崔玉华 任煜 杨鸿寿 宋余九	
北京工业大学 形志强	(433)
低碳钢腐蚀疲劳裂纹扩展及活化因子在裂纹起始扩展中的作用	
北京工业大学 形志强 西安交通大学 宋余九 涂铭旌	(437)
GCr15 轴承钢接触疲劳次表面裂纹的萌生力学条件与扩展倾角	
郑州工学院 陈龙庆 洛阳工学院 陈霄 邵尔玉	(441)
疲劳失效件有效载荷谱的断口反推(摘要)	
江苏工学院 武淮生 北京航空航天大学 钟群鹏	(445)
LY12CZ 铝合金中疲劳裂纹起始的超载效应 完善的裂纹起始寿命 表达式及工程应用	
西北工业大学 郑修麟 陈德广 凌超	(449)
连接件最优干涉配合问题的研究	
北航 刘莉 何庆芝 航空工艺研究所 瞿履和	(455)
叉车半轴的疲劳强化效果的实验与理论分析	
北京机械工业管事学院 张祖明	(459)
多层多钉接头抗疲劳细节优化设计	
航空航天部 611 所 张立新 西北工业大学 杨庆雄	(464)
随机载荷谱下裂纹扩展寿命估算工程方法研究	
华中理工学院 赵廷仕 蒋金龙	(468)
探讨随机谱加载、程序谱加载及均方根载荷加载得裂纹扩展寿命	
上海交通大学 李康先 俞人基 金子鸿 梁开佐	(472)
CH36 高温低温疲劳寿命的两段混合 Weibull 分布	
西安交通大学 吴敬梓 顾海澄 周惠久	(476)
矿用联接环的拉——脉动疲劳性能	
西交大 张家口煤矿机械厂 张振洪 张良运 康绍光 金毓洲	(481)

自动断裂控制与防护软件系统的研制	-----
西安交通大学 工程力学研究所 李德利 李华	 (485)
考虑超载之间相互作用下估算随机载荷疲劳裂纹扩展寿命	-----
上海交通大学 李康先 魏国强	 (489)
S-P-N 曲线实验统计法的改进	-----
北京建筑工程学院 张明 北京科技大 盛汉中 孙业胜	 (493)
干涉配合连接结构的疲劳特性研究--详细摘要	-----
曾贤虹 吴富民	 (497)
随机疲劳寿命预估--等能量损伤法研究	-----
同济大学 胡雨人 徐骏 胡洪海	 (501)
随机疲劳寿命预估--RMS 应力寿命法的研究	-----
同济大学 胡雨人 卢健琦 林盛兰	 (506)
随机疲劳寿命预估--等能量损伤法研究	-----
同济大学 胡雨人 卢健琦 张旗红	 (510)
EQ140 汽车后桥极值--寿命曲线的试验研究摘要	-----
湖北十堰二汽技术中心结构强度室 鲁三才 杜微	 (514)
缺口试样疲劳裂纹形成寿命分析与低周疲劳缺口系数的实验确定	-----
东北工学院 柏纯清 刘毅 长沙矿冶研究院 刘寿康	 (517)
表面加工系数的估算	-----
郑州机械研究所 张健杨 西南理化检测中心 冉学臣	 (521)
混流式水轮机转轮统用载荷谱的编制研究	-----
哈尔滨大电机研究所 钟苏 米毓德 东北工学院 王德俊 黄雨华	 (524)
载荷谱数据采集中的两个问题	-----
太原重型机械研究所 张东红	 (528)
拖拉机疲劳载荷谱的规范化初探	-----
洛阳拖拉机研究所 冯锡曙	 (531)
双频载荷作用下的疲劳特性研究	-----
东北工学院 黄雨华 王德俊 毛桂庭 赵志凯	 (535)
双击式水轮机转轮结构疲劳可靠性设计	-----
中国农业机械化科学研究院 阎楚良 凌净	 (539)
天津电气传动设计研究所 付志友	 (544)
谱载荷作用的转轮叶片全尺寸室内疲劳试验研究	-----
中国农业机械化科学研究院 阎楚良	 (544)
机械电子工业部天津电气传动设计研究所 付志友 林宝琴	 (548)
焊接结构压疲劳问题初探	-----
武汉水运工程学院港口机械工程系 罗秋	 (548)
含缩孔缩松区 ZG42CrMo130t 游丰大钩疲劳载荷服役能力评价	-----
沈阳铸造研究所 吴又玄 赵芳欣 唐玉林	 (553)

压力容器孔边裂纹疲劳扩展的实验研究 - - - - -	
华东化工学院化工机械研究所 潘家桢 黄雪坤 琚定一	(557)
疲劳强度可靠性设计 - - - - -	
衡阳有色冶金机械厂 郭平辉	(561)
海洋结构疲劳可靠性的 Fuzzy 评价 - - - - -	
石油大学 方华灿 陈国明 黄东升	(565)
海洋结构宽带随机疲劳扩展寿命的估算 - - - - -	
石油大学 陈国明 方华灿 沈家骏	(570)
"十"字形焊接接头疲劳强度试验研究 - - - - -	
郑州机械研究所 方钦志	(575)
紧固件载荷—变形曲线的计算方法研究 - - - - -	
广东电力设计院 梁沛权 西北工业大学 杨庆雄	(579)
薄壁管在双轴受力下的应变疲劳寿命估算理论探讨 - - - - -	
天津大学 朱理璋 李传鼎 周士捷 北京科技大学 唐俊武 王建国	(583)

疲劳短裂纹扩展与工程裂纹形成寿命预测

北京航空航天大学 姜伟之 徐伯庆 邵爱民 金成敏

一、引言

结构疲劳的全过程按物理和工程观点可分别由图1(a)、图1(b)所示的诸分段组成^[1]，图中 a_0 为萌生初始裂纹长度； a_i 为疲劳短裂纹的上限长度； a_1 为工程初始裂纹长度； a_c 为临界裂纹长度。

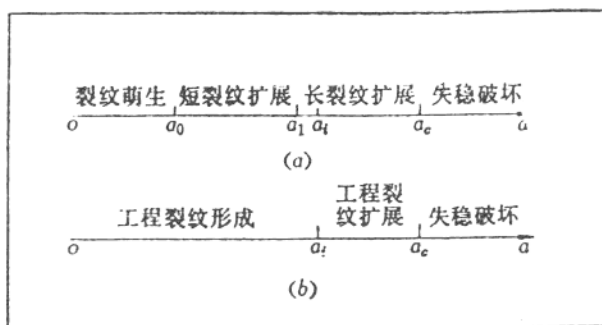


图1 (a)按物理；(b)按工程观点对全寿命的分段。

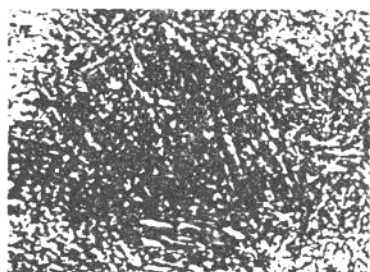


图2 M4340钢的显微组织 ×500

应当指出，工程初始裂纹长度 a_i 是由具体结构状况和当前裂纹检测水平所决定的。通常取 a_i 为0.5mm或稍大的尺寸，所以，一般 a_i 处于宏观裂纹尺寸范围内。至于短、长裂纹的分界尺寸 a_i ，则基本上是由材料性质决定的。就航空用高强金属结构材料而言， $a_i < 0.5\text{mm}$ ，图1所示的情况反映了上述相对关系。由此可见，工程裂纹形成寿命所涉及的物理过程包括裂纹萌生、短裂纹扩展和部分长裂纹扩展。不过，一般认为，即使在光滑表面上也有一些微切口存在，它们可以是微观结构的不均匀性，诸如三晶交界点、夹杂物，也可以是加工痕迹，其尺寸大致在 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ ^[2]附近。考虑到航空高强材料制备的主要承力结构，由于承载水平较大，则这种尺寸的初始裂纹很容易萌生。所以，工程裂纹形成就可以近似考虑为由 a_0 到 $a_i \approx 0.5\text{mm}$ 的短裂纹扩展寿命。从这个意义上说，如果用短裂纹扩展特性来预测结构的工程裂纹形成寿命就有可能克服诸如局部应变法预测时因不涉及裂纹而引入的随意性，从而可望在较大程度上提高预测的能力。

本文对起落架用钢M4340,进行了光滑及缺口试样的短、长裂纹扩展试验,并用局部应变法和短裂纹扩展特性分别预测了缺口试样的工程裂纹形成寿命,在与实测值的对比中,验证了上述分析。

二、材料和试验结果

1. 材料及常规力学性能

M4340 钢的基本成分(重量%)为 0.39C, 0.91Cr, 1.12Ni, 0.69Mn, 0.4Mo, 0.07N, 1.61Si。热处理状态是 870℃ 奥氏体化, 300℃ 二次回火。图 2 为其显微组织,主要是回火马氏体,原奥氏体平均晶粒尺寸为 25 μ m。材料的常规力学性能为: 拉伸强度 $\sigma_t=1950$ MPa, 屈服强度 $\sigma_{0.2}=1657$ MPa, 延伸率 $\delta_5=12.3\%$, 面缩率 $\psi=52.9\%$ 。

2. 试验方法与结果

用旋转弯曲试验和升降法测定的材料对称疲劳极限 $\sigma_{-1}=810$ MPa。用三点弯曲试样和共振实验机,在频率100Hz附近,应力比 $R=0.1$ 的条件下进行了长裂纹扩展试验,并用降载法测定了近门槛扩展特性,降载率 $\geq 10\%$ 。实测中等速率及近门槛扩展特性如图 3 中的实线所示。门槛值 $\Delta K_{th}=5.35\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, 中等速率曲线为 $da/dN=1.93\times 10^{-6}(\Delta K)^{3.14}$ 。

用旋转弯曲的光滑试样进行了短裂纹扩展试验,试样中部以曲率半径 $\rho=100$ mm制成长度约为 40mm 的载面收缩段,最小载面直径 $\phi=8$ mm。这种试样几何形状有利于在小范围内对疲劳短裂纹作复型跟踪观察。旋转弯曲试验的应力水平分别取 $\sigma/\sigma_{-1}=1.02, 1.14$ 和 1.26, 试验频率为 34.5Hz。所有试验应力水平的主裂纹和部分次裂纹的扩展速率 dc/dN (c 为表

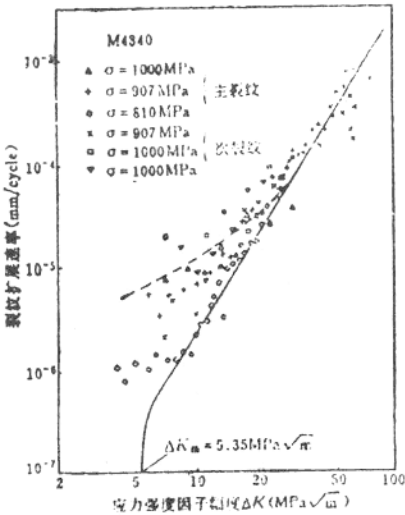


图 3 M4340 钢的长裂纹扩展特性

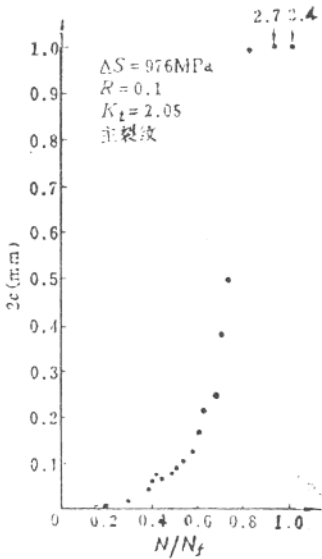


图 4 缺口根部的短裂纹扩展

面裂纹半长)和相应的表面裂纹应力强度因子幅度 $\Delta K = \sigma \sqrt{\pi c}$ 的数据点也分别示如图3。由图可见, M4340钢显示了一定的短裂纹扩展效应。

用缺口三点弯曲试样 ($K_t=2.05$) 在电液伺服试验机上以应力比 $R=0.1$, 分别在应力范围 $\Delta S=976$ 、1122、1268 MPa 的条件下也用复型法实测了缺口根部的早期裂纹扩展。图4即为在给定 ΔS 条件下缺口试样缺口根部主裂纹的裂纹长度 $2c$ 和相应循环数 N 的记录曲线。

三、工程裂纹形成寿命的实测、预测和讨论

1. 缺口试样实测的工程裂纹形成寿命

取缺口根部表面裂纹半长 $c=0.5\text{mm}$ 的循环数为工程裂纹形成寿命 $N_{c_i}^{s,p}(c_i=0.5\text{mm})$, 则三种应力水平 ΔS 的实测 $N_{c_i}^{s,p}$ 的波动范围如表1所示。

表1 缺口试样实测的 $N_{c_i}^{s,p}(c_i=0.5\text{mm})$

$\Delta S(\text{MPa})$	$N_{c_i}^{s,p} \quad (c_i \text{ cycles})$
976	9600~10250
1122	7000~9500
1268	5300~7000

2. 局部应变法预测的工程裂纹形成寿命

采用Glinka的等价应变能密度方法^[1]进行了局部应变法预测, 计算中使用的 M4340钢的低周疲劳循环应力-应变响应和应变-寿命曲线数据是由北京航空材料研究所提供的。用Glinka方法得到的缺口根部塑性区尺寸 R_p , 平均应力 σ_m , 缺口根部弹塑性应力半幅 $\Delta\sigma/2$, 应变半幅 $\Delta\epsilon/2$ 和预测的工程裂纹形成寿命 $N_{c_i}^{p,s,1}$ 分别表示如表2。

表2 缺口局部应变法计算的有关参数和预测的 $N_{c_i}^{p,s,1}$

ΔS	R_p	σ_m	$\Delta S/2$	$\Delta\epsilon/2$	$N_{c_i}^{p,s,1}$
MPa	mm	MPa	MPa	$\times 10^{-3}$	cycles
976	0.34	776	992	4.48	17750
1122	0.53	774	1128	5.16	7100
1268	0.72	761	1252	5.85	3818

3. 基于材料光滑试样短裂纹扩展特性预测的工程裂纹形成寿命

(1) 预测用短裂纹扩展特性的选取

如果认为在单向脉动加载 ($R=0$ 或接近于 $R=0$) 条件下的 $\Delta\sigma=\sigma_y$ 的短裂纹扩展可近似表征缺口试样关键部位进入弹塑性状态的短裂纹扩展, 则可按^[4]估计与脉动加载下等价的对称加载的应力半幅 $\sigma_{eq}=\sigma_y/\sqrt{2(1-R)}$, 式中取循环屈服强度 $\sigma_y=1499\text{MPa}$, $R=0$, 则 $\sigma_{eq}=1059\text{MPa}$ 。由此可见, 近似取上述 $R=-1$, $\sigma/\sigma_{-1}=1.26$, $\sigma=1000\text{MPa}$ 的光滑试样实测的短裂纹扩展特性, 为计算缺口试样工程裂纹形成寿命用, 材料短裂纹扩展特性是合

理的。不过，考虑到短裂纹扩展在微观短裂纹扩展区的扩展速率必然有较强烈的波动性^[5]，作为一种安全选择，本文取 $\sigma=1000\text{MPa}$ 的短裂纹扩展特性的上限为计算特性（图3中的虚线所示。）

(2) 缺口短裂纹扩展的驱动力

考虑到缺口表面短裂纹扩展实际上是在缺口塑性区中进行的（见表2所示的 R_F ），所以在此区内，采用等价应变强度因子 $\Delta K(\varepsilon)=E\Delta\varepsilon\sqrt{\pi c}$ 为裂纹扩展驱动力^[6]，其中应变范围由等价应变能密度方法提供（表2）。

(3) 萌生裂纹长度 c_0 的选取

对N4340钢疲劳裂纹源的显微观察表明，裂纹最初都是由三晶交点或夹杂物处开始的。它们的尺寸在 $2\sim 5\mu\text{m}$ 范围内变化。为此，按安全考虑，取 $c_0=5\mu\text{m}$ 。

(4) 工程裂纹形成寿命 $N_{c_0/c_1}^{p,pre,exp}$ ($c_0=5\mu\text{m}$, $c_1=0.5\text{mm}$) 的预测。

在上述三项基本参数选择的基础上，即可用数值积分预测缺口试样的工程裂纹形成寿命 $N_{c_0/c_1}^{p,pre,exp}$ ，结果如表3所示。用缺口试样试验的应力幅 ΔS 对实测寿命 $N_{c_0/c_1}^{p,pre}$ ，预测寿命 N_{c_0/c_1}^{pre} 和 N_{c_0/c_1}^{exp} 作图即得图5所示的结果。由图可见，尽管 N_{c_0/c_1}^{pre} 值平均上接近于 $N_{c_0/c_1}^{p,pre}$ ，但在低应力水平可出现较大的非保守估计，而 N_{c_0/c_1}^{exp} 既接近于 $N_{c_0/c_1}^{p,pre}$ ，又偏于安全。

表3 缺口试样的工程裂纹形成寿命 $N_{c_0/c_1}^{p,pre,exp}$ 的预测值

$\Delta S(\text{MPa})$	$N_{c_0/c_1}^{p,pre,exp}$ (cycles)
976	8900
1122	6520
1268	5209

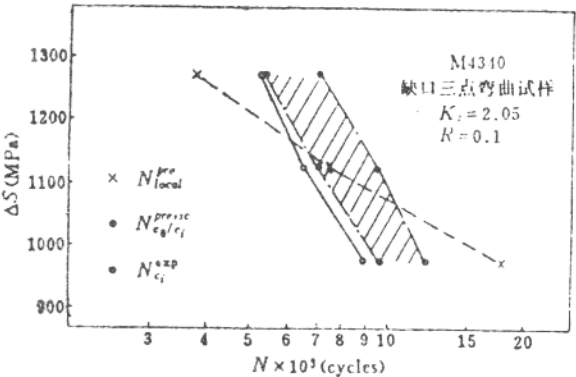


图5 缺口试样实测与预测的工程裂纹形成寿命

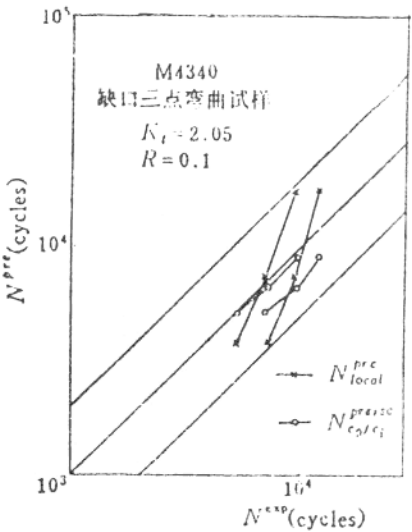


图6 预测和实测寿命的比较

(5) 预测寿命的分散因子

取缺口试样实测与预测的工程裂纹形成寿命的比值 $F(=N_{c1}^{P_{100}}/N_{c1}^{P_{100}})$, 当 $F < 1$ 时, 则取其倒数为 F 值) 为预测寿命的分散因子, 则表 4 的数据表明, 局部应变法给出了通常合理 (即最大分散因子 $F \approx 2$) 的预测, 而基于短裂纹扩展特性的预测则可使最大分散因子下降到 1.45。如果用 $N_{c1}^{P_{100}}$ 对 $N_{c1}^{P_{100}}$ 作图 (图 6), 并示出 F 值为 2 的分散带, 则上述结果更为明显。

表4 预测工程裂纹形成寿命的分散因子

ΔS MPa	$N_{c1}^{P_{100}}$ cycles	$N_{c1}^{P_{100}}$ cycles	F	$N_{c1}^{P_{100}}$ cycles	F
978	9800—12050	17750	1.05—1.47	8900	1.08—1.35
1122	7000—9500	7400	1.08—1.28	6520	1.08—1.45
1268	5300—7000	3818	1.30—1.83	5200	1.02—1.35

注: $r_0 = 5\mu\text{m}$; $r_1 = 0.5\text{mm}$ 。

四、结 束 语

考虑到结构的工程裂纹形成寿命中, 疲劳短裂纹扩展占主导地位。所以, 在适当选择材料短裂纹扩展特性、裂纹扩展驱动力以及裂纹萌生尺寸的基础上, 按材料短裂纹扩展特性预测结构的工程裂纹形成寿命, 应可给出优于其它方法的预测结果。用局部应变法预测的分散因子最大接近于 2, 而在基于短裂纹扩展特性的预测中可下降到 1.45, 由于所取扩展特性为上限曲线, 所以预测结果可确保安全。由于短、长裂纹扩展的衔接性, 为扩大损伤容限设计的应用范围提供了可能。

参 考 文 献

- 1 伍义生、张 向, 疲劳寿命预测方法研究的现状和发展, 现代理化测试技术及应用文集, 1986; 51-64
- 2 Miller K J, The behaviour of short fatigue crack and their initiation, Part 2, Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 1987; 10: 93-113
- 3 Glinka G, Calculation of inelastic notch-tip strain-stress histories under cyclic loading, Eng. Fract. Mech., 1985; 22: 839-854
- 4 Zheng Xuilin, A further study on fatigue crack initiation life, Int. J. Fatigue, 1986; 8: 17-21
- 5 Tokaji K, Ogawa T, Harada Y, et al, Evaluation of limitation of LEFM for small fatigue crack growth, Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 1987; 10: 281-289
- 6 Leis, B N, Displacement controlled fatigue crack growth in inelastic notch fields; Implication for short cracks, Eng. Fract. Mech., 1985; 22: 279-293

残余应力场中裂纹扩展

北京航空材料研究所

王更生

G. S. Wang

摘要

由于焊接技术的广泛应用,以及焊接过程易在结构中引入初始缺陷,在失效分析中焊接接点往往成为分析重点[1],但是焊接所带来的残余应力场使疲劳和断裂分析困难。再加上焊接过程引起材料特性的变化以及母体和焊料的不同,更加大了分析的复杂性。

本文对焊接接点的分析只局限于残余应力场对裂纹的影响问题。在大多数情况下,这个影响是决定疲劳裂纹疲劳裂纹扩展和断裂最主要的因素。

由于残余应力场的出现使裂纹尖端较大的塑性变形,因此分析中采用了弹塑性裂纹闭合方法对残余应力场中的裂纹扩展进行近似分析。弹塑性的闭合分析主要基于Dugdale方法[2],但经改进后保留了裂纹尾迹上的残余塑性变形。残余应力扩展的影响则通过在外载上迭加一个等效于残余应力影响的虚载,然后利用闭合模型进行分析。

实验由16G2AF钢紧凑拉伸型大试样(300×300)进行[3],采用了三种形式的试样,分无焊缝和有焊缝试样。无焊缝试样用以提供裂纹扩展速率基本数据,并以此作为一个基准比较残余应力场中的裂纹扩展情况。另外两种则是有焊缝试样,试样中采用了两种不同的焊缝位置以试样中人为产生不同的初始残余应力场。两种有焊缝试样残余应力沿裂纹线垂直于裂纹面的分布,用应变片测得的结果如图1所示。这些应力分布将被用于作为分析裂纹扩展的基础。利用实测的残余应力结果,以及紧凑拉伸试样的权函数,可以确定残余应力试样中的一个残余应力强度因子[4]。这个应力强度因子只是一个虚概念,表示在试样受载后残余应力对外加应力强度因子的抵消程度。残余应力强度因子可以折算成一个随裂纹长度变化的等效静载(虚载)如图2所示。在弹性和小变形条件下,残余应力强度因子与外载应力强度因子迭加的效果,与实载与虚载迭加后导致的应力强度因子效果是等价的。但在有一定裂纹尖端塑性变形条件下,实载加虚载的方法是更好的近似,这时残余应力场裂纹尖端塑性区的影响,可以通过虚载的作用来近似。在本文的分析中,残余应力的影响通过把图2所示的虚载迭加到实载上。然后通过弹性裂纹闭合模型对疲劳裂纹扩展进行分析。

分析与实验结果的比较如图3所示。空心圆符号为无残余应力试样的实验结果。这个结果转换为Elber等效应力强度因子关系以后的拟合,将用来作为裂纹扩展的基本数据,分析残余应力场中的裂纹扩展。图中的实心圆符号表示第一种残余应力场中的裂纹扩展实验结果,裂纹一开始以低于基线的速率扩展,然后超过基线速率,最后稳定在比基线高一点的位置上。闭合模型的分析结果如图中实线所示。可以看出,分析是十分接近实验结果的。另一种残余应力分布试样的试验结果如图中三角形符号所示。裂纹以接近基线的速率开始扩展,随后速率迅速减慢,最后基本停止了扩展。实线表示的闭合分析结果也显示出了同样的趋势。

闭合分析与实验结果相吻合的事实表明,本文所采用的近似分析方法是可以接受的。这个方法至少能预测残余应力场中裂纹扩展趋势。此法只需恒幅裂纹扩展实验结果以及残余应力场沿裂纹线分布,因而有一定应用价值。

References

- [1] Blom, A. F., "Influence of Residual Stress Fields on Fatigue Crack Propagation" to be published
- [2] Wang, G.S. and Gustavsson, A.I., "An Analytical Model to Determine Fatigue Crack Closure Slosure Stress Levels" FFAP-H-869, Sweden (1986)
- [3] Ignat'eva, V.S., and Kulakhmet'ev, R.R., "Effects of Residual Stresses on the Development of Fatigue Cracks in the Region of Butt Welds" Avt. Svarka, 1985 No.1, pp.1-4
- [4] Wu, X.-R., and Zhao, W., "Weight function and Dugdale model solution for compact specimen" ICM-5
- [5] Mall, S., and Newman, J.C., "The Dugdale Model for Compact Specimen" ASTM STP 868 Philadelphia ASTM (1985) pp.113-128

Appendix

Formulation

If the stress intensity factor $K(a)$ and the crack surface displacement $V(a, x)$ for a given loaded geometry for loading case (1) is known, the stress intensity factor $K(a)$ for any other loading case (2) can be derived as:

$$K^{(2)}(a) = \int_0^a \sigma^{(2)}(x) m(a, x) dx \quad (1)$$

where the $\sigma(x)$ is the stress distribution along the crack line in loading case (2), The $m(a, x)$ is the 'weight' function, defined by :

$$m(a, x) = \frac{E'}{K^{(1)}(a)} \frac{\partial V^{(1)}(a, x)}{\partial a} \quad (2)$$

E' is the generalized elastic modulus, and equals to E for plane stress state, $E/(1-\nu^2)$ for the plane strain state. E is the Young's modulus.

The uniform crack line loaded stress intensity factor results was obtained [4] by the boundary collocation method for the compact specimen. The results can be fitted empirically as :

$$K^{(1)}(a) = \sigma f_0 \left(\frac{a}{W} \right) \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

where

$$\begin{aligned} f_0(a/W) &= \alpha_0 + \alpha_1(a/W) + \alpha_2(a/W)^2 + \alpha_3(a/W)^3 + \alpha_4(a/W)^4 \\ &= 1.1215 - 2.1234(a/W) + 25.1446(a/W)^2 \\ &\quad - 57.8064(a/W)^3 + 58.9082(a/W)^4 \end{aligned} \quad (4)$$

$$m(a, x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi a f_0(a/W)}} \left[\beta_1 \left(\frac{a}{W} - \frac{x}{W} \right)^{-0.5} + \beta_2 \left(\frac{a}{W} - \frac{x}{W} \right)^{0.5} + \beta_3 \left(\frac{a}{W} - \frac{x}{W} \right)^{1.5} \right] \quad (5)$$

where

$$\beta_1 = 2f_0(a/W)(a/W)^{1/2}$$

$$\beta_2 = 2f_0(a/W)(a/W)^{-1/2} + 4 \frac{\partial f_0(a/W)}{\partial(a/W)} (a/W)^{1/2}$$

$$+ \frac{3}{2} \left[\frac{5\pi}{\sqrt{2}} \phi(a/W) - \frac{20}{3} f_0(a/W) \right] (a/W)^{-1/2}$$

$$\beta_3 = -\frac{1}{2} \left[\frac{5\pi}{\sqrt{2}} \phi(a/W) - \frac{20}{3} f_0(a/W) \right] (a/W)^{-3/2}$$

$$+ \left[\frac{5\pi \partial \phi(a/W)}{\sqrt{2} \partial(a/W)} - \frac{20 \partial f_0(a/W)}{3 \partial(a/W)} \right] (a/W)^{-1/2} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \phi(a/W) = & \frac{1}{2} \alpha_0^2 + \frac{2}{3} \alpha_0 \alpha_1 \left(\frac{a}{W} \right) + \frac{1}{4} (2\alpha_0 \alpha_2 + \alpha_1^2) \left(\frac{a}{W} \right)^2 + \frac{2}{5} (\alpha_1 \alpha_2 + \alpha_0 \alpha_3) \left(\frac{a}{W} \right)^3 \\ & + \frac{1}{6} (2\alpha_0 \alpha_4 + 2\alpha_1 \alpha_3 + \alpha_2^2) \left(\frac{a}{W} \right)^4 + \frac{2}{7} (\alpha_1 \alpha_4 + \alpha_2 \alpha_3) \left(\frac{a}{W} \right)^5 \\ & + \frac{1}{8} (2\alpha_2 \alpha_4 + \alpha_3^2) \left(\frac{a}{W} \right)^6 + \frac{2}{9} \alpha_3 \alpha_4 \left(\frac{a}{W} \right)^7 + \frac{1}{10} \alpha_4^2 (a/W)^8 \end{aligned}$$

The stress intensity factor for any crack line load can, therefore, be derived from eqn (1) using the weight function (5) for the compact specimen.

The crack surface displacements for any crack line loading can also be derived from the weight function by the integration relation

$$V^{(2)}(a, x) = \frac{1}{E} \int_x^a K^{(2)}(a) m(a, x) da \quad (7)$$

The $K(a)$ is the stress intensity factor and the $V(a, x)$ is the corresponding crack surface displacement at location x .