

西南(唐山)交通大学 百周年校庆论文集

应用理科分册



1896—1996

西南交通大学出版社

西南（唐山）交通大学百周年校庆论文集

应用理科分册

主 编 陈 虬

副主编 王光钦 王 黎

编 委 李世华 谢建华 潘亦甦

西南交通大学出版社

西南(唐山)交通大学百周年校庆论文集

应用理科分册

陈 虬 主编

*

西南交通大学出版社出版发行

(成都 二环路北一段 610031)

郫县印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 20.25

字数: 485 千字 印数: 1—800 册

1996 年 4 月第 1 版 1996 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 7—81022—893—5/Z · 062

总定价: 163.00 元(本分册定价: 20.00 元)

总 前 言

1996年是西南交通大学建校一百周年。为了检阅改革开放以来学校在德育、教育、科研及高校管理等领域取得的成绩,反映我校作为中国近代建校最早的一所理工科大学的优良办学经验和改革创新成果,特在百周年校庆筹委会统一筹划下编辑出版了这套百周年校庆学术论文集。

我校在邓小平同志建设有中国特色社会主义理论的指导下,在铁道部、四川省和成都市的领导下,深入贯彻实施《中国教育改革和发展纲要》,始终把培养高质量人才和发展科学技术有机地结合起来,形成了教学科研两个中心。多年来,为通应国民经济和铁路现代化发展的需要,学校坚持“以学科建设为中心,以提高教育质量为本,坚持改革开放,坚持改进思想政治工作”的办学总方针,不断完善和加强德育体系的建设,形成了全员育人、全程育人、全面育人的良好局面。在学科建设方面取得重大进展,优化学科结构,建成了我国交通行业唯一的具有国际先进水平的“牵引动力国家重点实验室”,带动了学校整体水平的提高;教学改革不断深入,形成了完整的人才培养体系,在教育教学中继承和发扬我校严谨治学的优良传统,教学质量和水平不断提高,并率先在路内建立联合办学董事会,实现了办学体制改革上的新突破。科研方面通过改革,已形成包括基础研究、应用研究、开发研究在内的具有纵深配置的科研体系,整体实力明显增强,“七五”以来全校共完成各类科研项目1800多项,科研经费累计已突破2亿元。科研工作坚持面向铁路建设主战场,以“大”(大型项目)和“高”(高展次)作为学校科研的主干,组织产学研联合攻关,充分发挥多学科综合优势,着力于解决铁路现代化及国民经济发展中的重大综合性科学技术问题,成为铁路专业理论,超前发展研究和重大科技攻关的重要方面军。校办产业已建立“创效益、出人才、转成果、促学科”的发展模式,取得较大发展。在上级主管部门的领导和关怀下,通过全校师生员工的通力协作和共同努力,1994年7月我校顺利通过了由铁道部、国家教委组织的“211工程”部门预审,并已进入建设阶段。这是我校发展史上又一个新的重要的里程碑,它预示着,交通大学在21世纪初叶,必将跻身于世界一流大学的行列。

百年盛典,人生难逢。为了诚邀广大校友回母校参加庆典,学校积极筹备各项活动,包括校友联谊活动、学术交流、成果发布、科技协作等。学术论文是反映高校研究能力与学术水平的重要标志之一。学校决定以各学科为依托,编辑出版学术论文集。校庆筹备组于1995年春向全校发出征文通知,得到师生员工的热烈响应,在不到半年的时间内筹备组收到应征论文千余篇,内容涉及思想教育研究、教育研究、科学研究及改革管理等各个领域。这些论文具有广泛的代表性,反映我校“八五”期间各个方面取得的进展和成果。论文选题既紧密结合教育、科技改革实践,总结成功的经验,探索进一步增强实力、加快发展的新路子;又围绕与国民经济主战场密切相关的重大课题研究及高新技术开发,反映我校在发挥综合优势开展联合攻关及基础理论新兴学科研究方面的进展和水平。这些论文体现了前瞻性与针对性

相结合、理论研究与实践应用相结合、学术性与科技政策性相结合的学术特征。特别值得提出的是，一批青年教职工和研究生撰写的论文占了相当比例，显示我校青年科技工作者已成为一支朝气蓬勃的生力军。

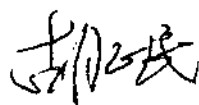
为了做好应征论文的评审与审阅，学校组成了有各学科教授、专家参加的学科评审组和编委会，在较短的时间内对提交的各类论文进行严格细致的逐篇评审，写出评审意见；校庆论文筹备组又组织专家对推荐来的论文进行两轮审阅，最后共评选出700余篇学术论文，编辑成西南交通大学学报庆祝建校百周年专刊和高等教育管理与改革正式公开出版。同时按照学科分类，编辑出版了下列分册：社会科学及思想教育研究、科技产业研究、土木工程、机械工程、材料科学、电气工程、计算机与通信工程、交通运输、管理科学、应用理科、图书情报与出版编辑、博士后论文集及研究生论文专集等，以供校庆期间开展学术交流和专题研讨用。这套校庆论文集能如期和读者见面，要特别地对在论文征集、评审、编辑、出版等方面给予指导把关和组织实施的专家和同志们致以衷心感谢，正是通过他们的热情支持和卓有成效的工作才得以向百周年校庆献上这份厚礼。

由于出版时两紧迫，海内外校友的学术论文与研究成果未及编入论文集，准备在百年校庆期间进行编印与交流。望广大校友与来宾踊跃参加，进行赐教与指导，为母校的建设与发展继续提供支持和帮助，共商学校发展宏图。

回顾过去，使我们精神振奋和自豪；展望未来，更感到任重而道远。诞生于上世纪之交的西南交通大学，将以什么样的面貌迎接新的世纪之交呢？为此，学校已确立发展的目标是：认真贯彻落实科教兴国和科教兴路、科教兴川的战略，深入进行高等教育体制改革，通过五年或更长一段时间的努力，使学校的综合实力、教育质量、学科结构、科研水平、办学效益及自我发展能力有明显提高，把西南交大建设成为国内先进、国际知名、具有铁路特色的一流理工大学。这既是上级领导对我们的殷切希望，也是几代数万名海内外校友的期望和重托，更是全校师生员工的共同心愿。

俟实扬华，日新月异。让我们发扬我校长期办学历程中形成的爱国爱校及严谨治学的传统，承扬百年，继往开来，把“211工程”建设作为创业的新起点，励精图治，开拓奋进，为实现学校改革、建设与发展的“九五”计划和“211工程”规划所确立的宏伟目标而努力奋斗！

西南交通大学校长、西南（唐山）交通大学
百周年校庆筹备委员会主任



1996年4月

前 言

俟实扬华,共庆百寿。在这欢庆的日子里,反映近年我校在力学、物理和化学等学科领域中的研究进展和工程应用的论文集分册,如期与广大读者见面了。随着近代科学技术的发展,力学、物理和化学等学科的科研愈加深入,其特征是:学科的交叉和渗透、理论的探索和创新、应用的新颖和广泛。“八五”期间我校在力学、物理和化学领域内取得了累累硕果。诸如:“超高能宇宙线天体物理现象观测研究”是国家重点自然科学基金项目,我校是该项目中方合作委员会单位,在我国西藏羊八井建立了北半球海拔最高的宇宙线观测站,截止1994年底,已累积采集了15亿个超高能宇宙线事例;国际科学界著名的《科学》周刊,对此项喜马拉雅山宇宙线探测的“大科学工程”给予了高度评价。“金属材料非比例加载的本构理论研究”已创造性地开展了系列工作,取得了国内领先、达到国际先进水平的成果,1995年获得四川省科技成果二等奖。“多体系统的碰撞振动稳定和分叉”连续取得两项国家自然科学基金的资助,深入研究了碰撞和冲击造成的强非线性行为,1994年获得国家教委的科技成果二等奖。“精密冲压成型的数值模拟”是我校主持的国家重点自然科学基金项目,目前正在扎扎实实开展研究工作。

本论文集反映了我校近年力学、物理和化学等学科的部分最新研究成果,其中包括了“力学学科进展与展望”报告会的12篇邀请报告,它们都是有关专家的力作;另有50篇是从近百篇应征论文中选出的佳作。内容涉及:高能物理的理论和实验、物理参数的量测、化学分析和性能测定、振动冲击和控制、断裂力学和安全评定、疲劳力学的试验和分析、计算力学理论和方法、复合材料力学与应用、岩土力学和工程、结构分析方法和应用等。作为应用理科,应当包含数学的研究内容,本论文集仅在邀请报告中收入《关于格值逻辑系统的研究》一文,以饯读者。其它丰硕的数学研究成果,发表在《数学季刊》No2,1996。

承扬百年,开创未来。愿交大的莘莘学子在科学的崎岖道路上不断攀登,不断开拓。

西南交通大学百周年校庆科教论文组

应用理科分册编委会

1995年12月

目 录

研究 进 展

断裂力学的新进展与结构在延寿阶段的断裂安全评定	孙训方	1
关于冲击动力学和冲击动力系统几何理论	舒仲周	8
关于多体充液复杂系统动力学与运动稳定性研究	王照林	12
金属材料超声疲劳研究进展	孔祥安, C. Bathias	23
岩土力学的现状与展望	郑鸿泰, 郭培军	29
焦炭塔堵焦阀接管部位的应力计算及高温应力测定	成建国, 王庆华, 黄振仁	36
随机变分原理与有限元列式——随机有限元法理论研究(I)	陈 虬, 刘先斌	43
用连续损伤力学及有限元法计算疲劳裂纹尖端区的力学特性	金心全, 张会银	51
结构拓扑变化理论中主 Z 值单调性定理与计算特征值的新方法	荣廷玉	57
非对称参数对转向架蛇行临界速度的影响	杨翊仁	62
面向对象有限元程序的单元库设计	曹中清, 周本宽	67
关于格值逻辑系统的研究	徐 杨, 秦克云	72

力 学

含不确定参数的线性动力系统的稳定性分析	曹登庆	81
随机激励作用下的随机冲击减振器	戚作涛, 江晓仑	86
中心值形一范式方法在客车转向架蛇行分析中的应用	罗冠炜, 谢建华	93
非线性系统非平稳响应的高阶线性化方法	张 明	97
特殊结构抗震分析计算	金建明, 高淑英, 高芳清	101
高桥墩的地震反应分析	邱秉权, 苏振超	106
Zr-4 合金应变疲劳行为研究	戴振羽, 金 尧, 高 庆等	113
制造金属基复合材料浇注过程之数值模拟	唐达培, 高芝晖, 范镜泓	119
片状模塑料材料的低温力学性能特性及其机理分析	贺百玲, 郑世瀛	127
夹层梁在集中载荷下层间应力分布	金 尧, 郑世瀛	131
复合材料层合壳的几何非线性分层理论	王 坚	135
冲压模拟新算法的空间函数正交化	柳葆生, 刘 渝	140
随机场离散与分离——随机有限元法理论研究(II)	刘先斌, 陈 虬	145
面向对象有限元程序设计及其前景	孔祥安, 翟 己	150
铁路加筋路基的有限元分析	潘亦魁, 王海涛	154
膨胀岩路堑边坡稳定性的有限元分析	丁桂保	159

含切口试样微型剪切试验方法研究	王光钦, 赵正佳	163
光弹性双向应变计的研究	胡德麒, 张健	168
钢弦式钢筋测力传感器的研究	刘尚举, 吴锁珠	174
轴向疲劳试验尺寸效应的新诠释	黄郁仲	181
高速列车车头的压力负荷计算	刘怡	185

物 理

非对称半导体双立体结中光学声子的界面模式	江光佐	191
准高速铁路接触网动态参数地面测量系统	高晓蓉, 王黎, 韩立唐	196
多层铁氧体毫米波段的计算机辅助分析	王慧, 张庆福	202
羊八井宇宙线观测站实验研究成果	宇宙线研究组	207
羊八井宇宙线观测站阵列时间标定原理	贾焕玉, 冯振勇, 余光策等	211
羊八井宇宙线观测站采用 RPC 的效果分析	郑见春, 余光策, 贾焕玉等	215
羊八井宇宙线观测站阵列角分辨估算及修正	贾焕玉, 冯振勇, 余光策等	219
双极静电消除器工作特性分析	徐国忠, 王家强	222
超高斯光束通过硬边光阑的衍射损耗	王喜庆, 吕百达, 张庆福	225
激光扫描测量接触网导线磨损的研究	郭建强, 王泽勇	229
光纤传感器用于高速铁路	韩立唐	235
铁道曲率半径测量新方法	余光策, 李光明	239
夸克、轻子形变与旋量空间	焦善庆, 王慧	243
q 形变光场的偶相干态与两能级原子相互作用的非线性光学模型	韦联福	248
多层高反射膜层数优化选择的矩阵方法	沈家华	252
电多极子势场三维空间分布的模拟计算	王慧, 张庆福	257
一种适用于 Ramsauer 装置的电子枪	王泽勇	261
浅层地下裂隙的红外检测预报研究	余光策	265
失配样品参比法测定硅单晶中氮-氮对杂质含量	郑家树	269

化 学

无机含氧酸的强度	黄绍清	271
钢铁表面低温磷化的研究	李世华, 李桂芳, 赵春吉	276
邻氯代环己酮肟及其类似物的合成法研究	卢淑和, 童志平	281
复合镀层电沉积工艺中搅拌间歇时间估算法的研究	任平弟	284
巯基棉分离—化学发光法测定人发中铜	管 棟	288
新型高效减水剂的研究	沈如, 邹斌	293
双偶氮开链冠醚的合成	童志平, 卢淑和, 李世华	297
新型穿流式搅拌器在液相系统中的搅拌性能研究	刘静, 王能勤, 梁玉祥	300
乙二醛 Cannizzaro 反应的理论研究	周红平, 唐作华	305
新型组合光亮剂 CZ 的研制及作用	管 棟, 卢昌颖, 徐志东	308

CONTENTS

RECENT DEVELOPMENTS

The Novel Progress in Fracture Mechanics and the Assessment of Integrity of an Operating structure	Sun Xunfang	1
On the Impulsive Dynamics and the Geometric Theory of Impulsive Dynamical Systems	Shu Zhongzhou	8
On the Dynamics and Stability of Motion of Multibody Liquid-filled Complex Systems	Wang Zhaolin	12
Advances in Ultrasonic Fatigue of Metal Materials	Kong Xiang'an, C. Bathias	23
The Present State and Prospects in Rock and Soil Mechanics	Zheng Hongtai, Guo Peijun	29
Stress Calculation and Measuring under High Temperature for Nozzle Region of a Coke Tower	Cheng Jianguo, Wang Qinghua, Huang Zhenren	36
Stochastic Variational Principle and F. E. Formulation —The Theory of Stochastic F. E. Method (I)	Chen Qiu, Liu Xianbin	43
Using Mechanics of Continuous Damage and F. E. Analysis Calculate Mechanics Character in the Region of the Fatigue Crack Tip	Jin Xuquan, Zhang Huiyin	51
The Monotonousness Theorem of Principal Z-Deformations in the Theory of Structural Topological Variations and a New Method for Calculating Eigenvalues	Rong Tingyu	57
The Influence of Unsymmetrical Parameters on the Critical Hunting Speed of a Bogie	Yang Yiren	62
Designing the Elements of Object-oriented Finite Element Program	Cao Zhongqing, Zhou Benkuan	67
On the Lattice Valued Logic Systems	Xu Yang, Qin Keyun	72

MECHANICS

Stability Analysis for the Linear Dynamical Systems with Uncertain Parameters	Cao Dengqing	81
Random Impact Damper to Stationary Random Excitation	Qi Zuotao, Jiang Xiaolun	86
Center Manifold-Normal Forms Method and Its Application to Analysis of Hunting of Passenger Coach Bogie	Luo Guanwei, Xie Jianhua	93

Higher Order Linearization in Non-Stationary Random Response of Non-linear System	Zhang Ming	97
Earthquake Analysis for a Special Structure		
..... Jin Jianming, Gao Shuyang, Cao fangqing		101
Seismic Response Analysis of Tall Piers	Qiu Bingquan, Su Zhenchao	106
A Study on Strain Fatigue Behavior of Zircaloy — 4		
..... Dai Zhenyu, Jin Yao, Gao Qing et. al.		113
The Numerical Simulation of Casting Process for Making the Metal Matrix Composites	Tang Dapei, Gao Zhikui, Fan Jinghong	119
The Low-Temperature Mechanical Characteristics and Mechanismic Analysis on SMC Material	He Bailing, Zheng Shiyang	127
Interlaminar Stresses of Sandwich Beam under Concentrated Load		
..... Jin Yao, Zheng Shiyang		131
Refined Geometrically Non-linear Layerwise Theories of Anisotropic Laminated Shells	Wang Jian	135
The Orthogonalisation of Space functions in New Algorithm for Numerical Simulation on Metal Forming	Liu Baosheng, Liu Yu	140
Random Field Discretization and Separation		
—The Theory of Stochastic Finite Element Method(I)	Liu Xianbin, Chen Qiu	145
An Object-oriented Design of FEM Programs and Its Prospects		
..... Kong Xiang'an, Zhai Ji		150
Finite Element Analysis of the Reinforced Embankments of Railway		
..... Pan Yisi, Wang Haitao		154
The Stability Analysis of Swelling Rock Slope by Finite Element Methods	Ding Guibao	159
The Study of Micro-Shear Test for a Notched Specimen		
..... Wang Guangqin, Zhao Zhengjia		163
A Study of 2-D Photoelastic Strainmeter	Hu Deqi, Zhang Jian	168
The Study for Steel Measure Force Sensors by Steel Strings		
..... Liu Shangju, Wu Suozhu		174
A New Explanation for the Dimension Effect in Axial-load Fatigue Tests	Huang Yuzhong	181
Calculation of Pressure on Locomotive of High-speed Train	Liu Yi	185

PHYSICS

Interface Modes of Optical Phonons in Asymmetric Semiconductor Double Heterostructure	Jiang Guangzuo	191
Systems for Measuring the Overhead Catenary's Dynamic		

Behaviors on the Ground at High Speeds	Gao Xiaorong, Wang Li, Han Litang	196
The Computer Aided Analysis for Multilayer Ferrite Material in Millimetre Frequency Band	Wang Hui, Zhang Qingfu	202
Experiment Results of Yangbajing Cosmic Ray Observatory	Group of Cosmic Ray Research	207
Method of Time-Calibration of Yangbajing Air shower Array	Jia Huanyu, Feng Zhenyong, Yu Guangce et. al.	211
The Effect Analyse of PRC at Yangbajing Cosmic Ray Observatory	Zheng Jianchun, Yu Guangce, Jia Huanyu et. al.	215
Calculation and Correction of Angle-Resolution of Yangbajing Air Shower Array	Jia Huanyu, Feng Zhenyong, Yu Guangce et. al.	219
A Study of the Operating Characteristic of Bipolar Static Charge Eliminator	Xu Guozhong, Wang Jiaqiang	222
Loss Calculation for Supergaussian Beams Propagating through Hard Aperture	Wang Xiqing, Lü Baida, Zhang Qingfu	225
One New Way of Measuring the Carpet of Power Line of Train by Laser Scanning with a Wide Beam.	Guo Jianqiang, Wang Zeyong	229
Application of Fiberoptic Sensor to High Speed Railway	Han Litang	235
A New Measurement of the Railway Curvature	Yu Guangce, Li Guangming	239
The Deformation of Quark, Lepton and Spinor Space	Jiao Shanguo, Wang Hui	243
The Nonlinear Optical Model of Interaction between q-Analogue even Coherent State Field and two-level Atom	Wei Lianfu	248
The Method about the Excellent Choice of Optical Membrane Layers	Shen Jiahua	252
The Computer Simulation of Three Dimensions for the Potential of Electromultipoles	Wang Hui, Zhang Qingfu	257
A Electron Gun Suitable for Ramsauer Apparatus	Wang Zeyong	261
The Research of Infrared Calculating and Forecast of Shallow Crevice Underground	Yu Guangce	265
The Measurement of N-N Pair's Concentration with Uncompatible Reference and Sampler in Silicon Crystal by FTIR Spectrum	Zheng Jianshu	269

CHEMISTRY

Strength of Inorganic Oxo Acid	Huang Shaoqing	271
Studies on Low Temperature Phosphorylation of the Surface of Steel and Iron	Li Shihua, Li Guifang, Zhao Chunyi	276
A Study on the Synthesis Methods of 2-Chlorocyclohexanone		

Oxime and Its Analogs	Lu Shuhe, Tong Zhiping	281
The Research of Stirring Intermittance Time Estimating Method about Compound Plating Electromic Deposition Technology	Ren Pingdi	284
Determination of Copper(II) in Hair by Chemiluminescence with Sulfhydryl Cotton Separation	Guan Di	288
Research on a Water-reducing Agent of New Type and High Efficiency	Shen Ru, Zou Bin	293
Synthesis of Bis-azo Acyclic Crown Ethers	Tong Zhiping, Lu Shuhe, Li Shihua	297
Agitation Characteristics of a New-type Punched Agitators Used in Liquids	Liu Jing, Wang Nengqin, Liang Yuxiang	300
Theoretical Study on the Cannizzaro Rearrangement of the Ethane Diaetal	Zhou Hongping, Tang Zuohua	305
Research and Function of New Combined Bright Agent CZ	Guan Di, Lu Changying, Xu Zhidong	308

断裂力学的新进展与 结构在延寿阶段的断裂安全评定

孙训方

【摘 要】 本文综合介绍了近年来发展甚快的两参数断裂力学理论,着重说明了如何按该理论从标准试样测定的断裂韧度值判断含初始缺陷结构在进行断裂安全评定部位处的断裂韧度。并指出将两参数断裂力学理论用于含初始缺陷结构在延寿阶段进行断裂安全评定时,同时应考虑到对未确知模糊信息及随机变量等的处理。

【关键词】 两参数断裂力学; 断裂应力场的“约束度”; 解理断裂韧度; J_R 阻力曲线; 未确知模糊信息

1 断裂力学的新进展 两参数断裂力学

线弹性断裂力学(LEFM)以及弹塑性(非线性)断裂力学(EPFM 或 NLFM),分别以 K 、 J 或 δ 作为断裂参数,它们统称为单参数断裂力学(SPFM)。其相应的断裂韧度值 K_{Ic} 、 J_{Ic} 或 δ_{Ic} 在平面应变条件下,原设想是材料常数值,与裂纹体的几何构形无关。初期采用深裂纹($a/w \geq 0.5$)弯曲型标准试样(三点弯曲或紧凑拉伸试样)来测定材料的平面应变断裂韧度值 K_{Ic} 、 J_{Ic} 、 δ_{Ic} ,并对试样的几何尺寸加以限制,以保证所测得的是材料断裂韧度的下界值。当时认为,按这种下界值进行含缺陷结构的断裂安全评定是偏于安全的。对于某些重要的结构,诸如核电站中的压力容器,有些规范还采用所谓的“参考断裂韧度 K_{IR} ”作为 LEFM 断裂判据中的断裂韧度值,它实际是以所用材料在平面应变条件下试验所得结果(含 K_{Ic} 、 K_{IR} 、 K_{IS})与试验温度间关系的下包络线值。这显然是很保守的。当时认为这样做是对核电站结构质量严格把关所必须的。

即使在线弹性断裂力学研究、开发与应用的初期,也有人批评用单参数 K 进行断裂安全评定的方法,这是因为在用 SPFM 方法建立起的断裂判据中,即使按测试标准所规定的试样尺寸测定的平面应变断裂韧度 K_{Ic} ,也并非材料的常数,因为用浅裂纹($a/w \ll 0.5$)试样所测得的断裂韧度值就远高于用标准试样测定的断裂韧度值,更不要说用其它裂纹几何构形(例如中心裂纹拉伸板条、单边裂纹拉伸板条等)来测定的断裂韧度值。对实际的含表面缺陷的结构进行断裂安全评定时,其简化的计算模型多看作是表面浅裂纹,若仍用标准试样所测得的断裂韧度 K_{Ic} 对它进行断裂安全评定,显然是偏于过分保守了。

到了 80 年代后期,人们对断裂韧度随试样几何的不同而有所改变的这一现象所进行的研究,已开始从对试样尺寸的限制转向对裂尖应力场三轴度的研究。Liu 等人在文[1]中指出, Hancock 和 Cowling^[2]对 HY80 钢曾测定出,在裂纹启裂时双边深切口拉伸试样的裂尖张开位

移临界值 δ_f 仅为 $90\text{ }\mu\text{m}$, 而对于单边浅裂纹拉伸板条, 此 δ_f 值则高达 $900\text{ }\mu\text{m}$ 。Liu 等人用有限元方法对裂尖附近处的应力场和位移场计算所得结果, 发现这种 δ_f 值存在着成十倍差异的原因在于裂尖附近处的应力场中距裂尖为 $r=2\delta$ 处在 x 轴(沿裂纹线方向)上的局部张开应力 σ_{xx} 与该点处的 v. Mises 等效应力 $\bar{\sigma}$ 的比值 $\frac{\sigma_{xx}}{\bar{\sigma}}$ 对于启裂时的 δ_f 有很大的影响。但在他们的文章中并未给出一个参数来反映裂尖附近应力场三轴度的影响。

Larsson 等人⁽³⁾对小范围屈服的线弹性问题, 按 Williams⁽⁴⁾的级数解, 对二维的 I 型裂纹问题得到了在裂尖附近处应力场的诸应力分量, 在考虑到级数的第二项时, 其解为:

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{xx}(\theta) + T$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{yy}(\theta)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{xy}(\theta)$$

或简写成

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + T \delta_{ii} \delta_{jj} \quad (1)$$

并指出断裂韧度值之所以受到试样几何的影响, 其主要原因是受到 T 参数的影响。后来, 人们指出, T 参数的存在将引起裂尖附近应力场中的静水应力 σ_m 的改变, 从而引起了应力三轴度 $\frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}$ 的变化。而当裂尖附近处应力三轴度降低时, 即相当于 T 参数为负值时, 裂纹较难启裂。因而, 在此情况下就有较高的断裂韧度。随后, 很多文献对典型裂纹构形的 K_I 和 T 两个参数均求得解。但目前尚未见类似于应力强度因子 K 手册的 T 参数手册。这种含 K 、 T 两个参数的断裂力学通常被称为两参数断裂力学(2PFM)的 K - T 理论。

所谓的两参数断裂力学, 实质上仍是按原来的单参数来建立断裂判据, 但在确定断裂韧度值时, 则应考虑到另一个参数, 例如在线弹性两参数断裂力学中的 T 参数的影响。该参数实质上是对单参数裂尖附近的应力场中应力三轴度的修正量。换言之, 表示抗断裂阻力的断裂韧度不是个材料常数, 而是个随裂尖附近的应力场三轴度这个约束参量而改变的数值。这就是两参数断裂力学区别于单参数断裂力学的实质所在。在两参数断裂力学中, 在计算断裂推力, 例如 K 的同时, 还需求出表示裂尖附近应力场三轴度的参量, 例如 T , 这样才能确定断裂韧度, 例如 $K_{Ic} = K_{Ic}(T)$, 并据此以建立断裂判据, 例如 $K_I = K_{Ic}(T)$ 。

在线弹性两参数断裂力学的 K - T 理论问世后, 更多的学者对平面应变弹塑性断裂力学中的断裂韧度值受到反映裂尖应力场三轴度(有人也称之为“约束度”)影响的另一个参数进行了大量的理论分析和实验研究工作。美国 ASTM 和美国 ASTM 与欧洲 ESIS 分别于 1991 年 5 月和 1993 年 11 月在美国召开过两次讨论裂纹尖端附近处的“约束度”对断裂破坏影响的国际讨论会。并先后以 ASTM STP 1171 和 ASTM STP 1224 与 STP 1244 三文集发表了数十篇论文。这在断裂力学的理论、实验和应用研究方面掀起了一个热潮, 推动这个热潮的工业背景是: 自从按断裂力学理论对含初始缺陷结构投产运行到 90 年代已有三四十年来, 大量的结构面临延寿问题, 为确保这些含初始缺陷的结构在延寿阶段能安全运行, 采用更精确的两参数断裂力学理论与方法论进行断裂安全评定, 具有在安全和经济两方面的重大意义。下面简单介绍弹塑性两参数断裂力学中的主要研究成果。

O'Dowd 和 Shih⁽⁵⁾⁽⁶⁾对弹塑性断裂力学中裂尖附近应力场中的“约束度”所进行的研究最有代表性。下面着重介绍他们的工作。他们以 HRR 渐进解中裂尖渐近场的前两项代替了原来的奇异项 HRR 渐进解,并得到如下的渐近解析表达式:

$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_0} = \left(\frac{J}{\alpha \sigma_0 \varepsilon_0 I_s r} \right)^{1/(n+1)} \tilde{\sigma}_{ij}(\theta; n) + Q \left(\frac{r}{J/\sigma_0} \right)^n \hat{\sigma}_{ij}(\theta; n) + \text{高阶项} \quad (2)$$

经过分析,他们指出该渐近解中二阶项中的指数 $|n| \ll 1$; 且在 $-(\pi/2) \leq \theta \leq \pi/2$ 的扇形范围内, $\hat{\sigma}_{ij}$ 随 θ 的变化很慢。此外, $\hat{\sigma}_{\theta\theta} \ll \hat{\sigma}_{rr}$ 和 $\hat{\sigma}_{\theta r}$ 。且在 $|\theta| \leq \frac{\pi}{4}$ 的扇形区内 $\hat{\sigma}_{rr}/\hat{\sigma}_{\theta\theta} \approx 1$ 。这就是说,在平面应变条件下,渐近解中的二阶项接近于一个静水应力状态。上式中的 Q , 在取 $\hat{\sigma}_{rr} = \hat{\sigma}_{\theta\theta} = 1$ 的正则化条件后,可看作是一个无量纲的静水应力参量,因而,可将它看作是影响到裂尖附近应力场中“约束度”的参量。若将(2)式中渐近解的一阶项称为 HRR 解,并将其写作 $\sigma_{ij}|_{\text{HRR}}/\sigma_0$, 则在裂纹线上($\theta=0$)靠近裂尖处($r < 5 \frac{J}{\sigma_0}$), (2)式可简写为:

$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_0} = \frac{\sigma_{ij}|_{\text{HRR}}}{\sigma_0} + Q \delta_{ij} \quad (\theta=0, r < 5 \frac{J}{\sigma_0}) \quad (3)$$

通过对裂纹体作全场有限元解,可得到 $\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_0}$, 由(3)式可求得 $Q = \left[\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_0} - \frac{\sigma_{ij}|_{\text{HRR}}}{\sigma_0} \right] \delta_{ij}$ 。由 O'Dowd 和 Shih 的文⁽⁵⁾中可见,在($\theta=0, r < 5 \frac{J}{\sigma_0}$)区间内, Q 值仅与 r 弱相关。

Kirk 等人⁽⁷⁾用修正后的边界层(MBL)方法,即在以裂尖为圆心、在 K 控制区内作一个圆,在圆边界上施加以 K, T 两个参数所表示的应力场或位移场,按有限元方法求得的裂尖附近区域内应力场的解即 σ_{ij} , 而在 $T=0$ 时,所得到的解称之为小范围屈服(SSY)解。Kirk 等人认为,若以按 MBL 方法求得 $T=0$ 情况下的小范围屈服解,即 $\sigma_{ij}|_{\text{SSY}, T=0}$, 作为参考应力,求得的 Q 值,即

$$Q = \left[\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_0} - \frac{\sigma_{ij}|_{\text{SSY}, T=0}}{\sigma_0} \right] \delta_{ij} \quad (r < 5 \frac{J}{\sigma_0}; \theta=0) \quad (4)$$

则此 Q 值更接近于一个与 r 无关的常数。

下面来讨论为什么无量纲参数 Q 可以看作是一个无量纲的静水应力参量。由(2)式可知,其右端第二项在裂尖附近($\theta=0, r < 5 \frac{J}{\sigma_0}$)范围内存在看如下关系:

$$\frac{\Delta \sigma_{11}}{\sigma_0} = \frac{\Delta \sigma_{22}}{\sigma_0} = Q \quad \text{或} \quad \Delta \sigma_{11} = \Delta \sigma_{22} = Q \sigma_0 \quad (5)$$

上式中的 $\Delta \sigma_{11}, \Delta \sigma_{22}$ 分别为裂尖附近($\theta=0, r < 5 \frac{J}{\sigma_0}$)范围内,按全场解所求得的应力分量 σ_{11}, σ_{22} 与 HRR 奇异解中相应的应力分量 $\sigma_{11}|_{\text{HRR}}, \sigma_{22}|_{\text{HRR}}$ 间的差;或按(4)式,等于与 SSY, $T=0$ 解中相应的应力分量 $\sigma_{11}|_{\text{SSY}, T=0}, \sigma_{22}|_{\text{SSY}, T=0}$ 间的差。由于在平面应变条件下,由塑性变形的体积不可压缩性和塑性状态下的泊松比 $\nu=0.5$ 可得 $\Delta \sigma_{33} = 0.5(\Delta \sigma_{11} + \Delta \sigma_{22}) = \Delta \sigma_{11} = \Delta \sigma_{22} = Q \sigma_0$ 。从而可知, $Q \sigma_0 = \frac{1}{3}(\Delta \sigma_{11} + \Delta \sigma_{22} + \Delta \sigma_{33}) \equiv \Delta \sigma_m$, 也就是说, $Q = \frac{\Delta \sigma_m}{\sigma_0}$, 即无量纲参数 Q 是一个无量纲的静水应力参量。当 Q 为负值时,意味着裂尖附近的应力场三轴度将有所降低,即“约束度”有所减弱,因而,断裂韧度值就将有所增高。

O'Dowd 和 Shih⁽⁸⁾研究了多种试样几何在不同塑性变形程度下(从小范围屈服直至全面屈服)的 Q 值。

(1) 在小范围屈服(SSY)情况下,可通过 Q_{SSY} 与 T 间的关系式,以材料的幂硬化指数 n 为隐式参变量,来表达 Q_{SSY} :

$$Q_{SSY} = a_1(T/\sigma_0) + a_2(T/\sigma_0)^2 + a_3(T/\sigma_0)^3 \quad (6)$$

上式中的 a_1, a_2, a_3 三系数随 n 值而变化:

$$n=3: a_1=0.6438, a_2=-0.1864, a_3=-0.0448$$

$$n=5: a_1=0.7639, a_2=-0.3219, a_3=-0.0906$$

$$n=10: a_1=0.7594, a_2=-0.5221, a_3=0.0$$

$$n=20: a_1=0.7438, a_2=-0.6673, a_3=0.1078$$

$$n=\infty: a_1=0.6567, a_2=-0.8820, a_3=0.3275$$

(2) 对于全塑性(Fully Plastic)裂纹体问题^[9],则可利用 EPRI 的 J_p 手册中所给的 J_p 值,通过数值解法求得 Q_{FP} 。Shih 等人设想可在 EPRI 的 J_p 手册中加上 Q_{FP} 值的图表,以备工程设计人员查找。

(3) 对于大范围屈服(LSY)裂纹体问题^[9],其参数 Q_{LSY} 应介于 Q_{SSY} 和 Q_{FP} 两者之间,Shih 等人建议了一种内插法,可根据已知的 Q_{SSY} 和 Q_{FP} 值,按内插法原理求得。

在两参数断裂力学中,根据第二个参数 Q 就可以找出用不同几何构形的试样所测定的断裂韧度值间的关系。为此,需利用引起材料解理断裂的细观力学条件。例如,对于 I 型裂纹发生的解理断裂,Ritchie 等人^[10]认为是由于在裂尖前方距裂尖为 r_c 处的张开应力 σ_y 或 (σ_m) 达到了材料的解理临界应力 σ_c 所引起的。于是,由(2)式可得 Q 为任意值的试样,在裂尖前方距裂尖为 r_c 处发生解理断裂时,应有如下关系:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_0} = \left[\frac{J_c}{\alpha \sigma_0 \epsilon_0 l_p r_c} \right]^{1/(n+1)} \bar{\sigma}_m(\theta=0) + Q$$

由上式可知,对于 $Q=0$ 的标准试样(深裂纹、弯曲型标准试样即符合 $Q=0$ 的条件),在裂纹前方距裂尖为 r_c 处发生解理断裂时,应符合以下条件:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_0} = \left[\frac{J_0}{\alpha \sigma_0 \epsilon_0 l_p r_c} \right]^{1/(n+1)} \bar{\sigma}_m(\theta=0)$$

由以上两式可得到:

$$\frac{J_c}{J_0} = \left[1 - \frac{Q \sigma_0}{\sigma_c} \right]^{(n+1)} \quad (7)$$

上式中的 J_c 和 J_0 分别为用上述两种试样测得的解理断裂韧度值, n 为材料的硬化指数。由(7)式显然可见,在 $Q=0$ 时的 J_c 即等于 J_0 ,而用 Q 为负值的试样(例如浅裂纹弯曲型试样)测得的 J_c 值将大于 J_0 值。附带指出,利用(7)式还可以从符合 $Q=0$ 条件的标准试样测定的断裂韧度 J_0 值,估计实际含缺陷结构在缺陷部位材料的断裂韧度 J_c 值,据此以进行含缺陷结构的断裂安全评定。在 O'Dowd 和 Shih 的文^[8]中还用图示法(参看该文的 Fig. 18)对上述两方面作了说明。

以上是以解理断裂为研究对象所得到的结果,在裂纹发生解理断裂前已经历过一段延性撕裂过程的断裂问题,就不能采用以上方法来确定 J_c 了,因为以上分析均基于 HRR 渐近场的处理,这种渐近场只适用于裂尖附近无卸载情况的非扩展裂纹这一特定情况。

对于以撕裂为基础的 J_R 阻力曲线,以大量试验结果为依据,Turner 在文^[11]中指出 J_R 曲线也应随所用试样的几何构形不同而异,这也是由裂尖应力场中的“约束度”作用所引起的。

“约束度”对 J_R 曲线的影响,显然是不能用前述方法加以解决的。Xia 和 Shih^[12]曾采用 Gurson 模型,在裂纹线上排列一行含孔洞的体元,其余部分则按有限元加以划分,然后,用有限元方法来确定,随着外加荷载的增大,裂纹扩展量增加的定量结果。Xia 等人^[13]并按此思路绘出了同一个 a/w 比值下不同几何构形试样的 J_R 曲线,由这些曲线可以看出:中心裂纹板条试样的 J_R 曲线最高,而三点弯曲和紧凑拉伸试样的 J_R 曲线最低。这种趋势是和按(7)式求得 J_c 的趋势一致的,但其定量关系则显然不同。

近年来已有不少学者将“约束度”影响引入失效评定图(FAD)的分析中,例如 Garwood 等在文[14]中的研究成果,以及在同一期刊中 I. MacLennan 等人的论文^[15],以及 Ainsworth^[16]的工作。在这三篇文章中并有一些与会学者的讨论和英国的一些大学拟开展有关断裂方面研究工作(涉及“约束度”影响的课题)的建议,这些均可供参考。

对于含表面浅裂纹结构物的断裂安全评定,在考虑到裂尖附近应力场中“约束度”的影响时,可以避免因过分保守而带来不必要的经济损失。然而,对于含深埋小裂纹的结构,则由于其裂尖附近应力场中“约束度”可能会有所提高(即 Q 为正值),这时,若再按标准试件测得的断裂韧度值进行断裂安全评定,反而会得到偏于危险的预测。这方面的问题还有待进一步研究。

2 含缺陷结构在延寿阶段的断裂安全评定中应考虑的因素

两参数断裂力学主要是为了更合乎实际情况地确定材料的断裂韧度,以避免用单参数断裂力学并取断裂韧度的下界值而造成过分保守的断裂安全评定。如果说按单参数断裂力学取保守的断裂韧度下界值,对初投产的含初始缺陷结构严格把关,尽可能地避免了该结构在服役的早期发生脆断事故,从而起到了积极作用的话,则到了延寿阶段,就宜于采用两参数断裂力学,以如实地采用缺陷部位材料的断裂韧度,例如按(7)式,进行估算,从而减少过于保守的断裂安全评定所带来的经济损失,显然是更合理的。

然而,对于含“初始缺陷”(注意:这里的“初始缺陷”指的是在延寿阶段对经过长期服役后的结构进行探伤时所探出的缺陷尺寸、形状及性质)结构作延寿阶段的断裂安全评定时,除了要按两参数断裂力学有可能提高缺陷部位材料的断裂韧度这一有利因素外,还应综合考虑某些未确知信息、随机变量和某些概率变量所带来的影响,作出全面的分析,以求在延寿阶段的含“初始缺陷”结构能继续安全地服役,而不致发生断裂事故。

(1) 首先应对含初始缺陷(即投产前已存在的缺陷)的结构进行严格的探伤。由于结构经过几十年的服役期后,探伤设备的改进、探伤灵敏度的提高以及探伤人员技术水平的提高,探伤结果应比结构投产前所探得的初始缺陷信息更为准确。对于由这种原因所造成的“初始缺陷”有所增大应作具体分析,不宜简单地就认为初始缺陷已经扩展了。一般说来,在准静态、低荷载下工作的结构,其中的深埋缺陷往往不可能发生明显的扩展;然而,多年来在荷载起伏较大且变化次数较多的低周以至高周疲劳条件下,若发现“初始缺陷”的信息确有了明显增大时,则应引起注意,在延寿阶段的断裂安全评定时,对这类“初始缺陷”要予以重视。此外,目前常用的超声波探伤仪所探得的“伤信”只是个未确知信息,为此,在与投产前的“伤情”进行比较时,应按未确知信息的处理方法加以分析,切不可简单地按确定性模型来分析、计算。

(2) 在“初始缺陷”附近处材料的断裂韧度值是否会在经过服役期内长期使用后发生衰变?目前虽有连续损伤力学理论可资利用,但却难对“初始缺陷”附近处材料的断裂韧度值作出