

# 金属材料断裂规律及机理研究进展

肖纪美

(北京科技大学)

**[提要]** “金属材料断裂规律及机理的研究”是国家自然科学基金委员会“七五”重大项目,分为三个方面十个子课题,由国家教委、中国科学院及冶金工业部所属的六个单位承担,已于1991年底完成,1992年6月通过评议验收。本文简述项目的意义、内容和研究成果,并对今后工作提出建议。

## 一、研究意义和趋向

腐蚀、磨损和断裂是工程构件的三种主要破坏方式,据美国1982年统计,它们所导致的经济损失分别为1260亿、1190亿及1190亿美元,共占美国当年国民生产总值的12.85%,其中以断裂所带来的危害为最大。美国能源部1986年的“断裂的微观力学及物理”报告中指出:“在美国的全国性报纸的头版,每周至少有一次关于新断裂事故的报道。”可见断裂事故的频繁。1972年至1982年,全世界共发生飞机空难事故919起中的1/3起是由于材料断裂引起的。1986年和1988年,我国大同和秦岭电厂两个20万千瓦发电机组大轴断裂事故,所造成的直接损失为4000多万元。我国锅炉压力容器每年的爆炸事故率约为西方国家的10倍,重大事故隐患率约为西方的100倍。70年代我国从国外引进的化工设备已达到或接近使用寿命,还有不少老的化工设备、锅炉、飞机结构件等的延寿问题,如不解决,将会导致未来的断裂事故。

本世纪20及30年代,由于钢轨及锅炉的大量应用和断裂事故的不断出现,促使人们研究疲劳及蠕变断裂。40年代,焊接新工艺带来的低温脆断问题和化学工业中的载荷与化学环境协同作用所引起的应力腐蚀问题,使低温脆断及应力腐蚀断裂研究得以发展。50年代以后,由于航空航天工业、核工业、冶金工业等对材料提出的新的特殊要求,从而促使线弹性断裂力学、弹塑性断裂力学、复合材料的界面断裂问题、辐照对断裂的作用等方面的研究有了很大发展。80年代,为深入理解和控制断裂,出现了断裂物理、断裂化学、断裂力学与断裂物理相结合的细观断裂力学和损伤力学,从理论上计算原子间结合力,分析材料内部及外部环境的化学因素对断裂的影响,研究裂纹尖端的损伤过程。

在国际上,断裂问题研究一直十分活跃。从1965到1989年,共召开了七次大型国际断裂会议,五次大型材料力学性能会议以及几十次专业性(如疲劳,应力腐蚀,氢脆,断裂力学,断裂物理等)的国际会议。总的研究趋向:一是适应工程应用的需要,试验条件接近于实际情况,并结合新材料,新工艺的发展而进行研究;二是吸收有关学科的成就,在学科的结合前提下,从宏观到微观多层次地深入研究;三是充分利用已有的断裂知识和计算机技术,建立专家系统及工程构件的寿命估算。断裂基础研究的前沿的课题包括:裂纹尖端的力学模型和位错结构、断裂的

本文于1992年9月25日收到

原子理论、界面断裂、环境效应、疲劳、新的实验方法等,研究对象则从金属扩展到陶瓷。

我国在70年代引入并发展了断裂力学,为断裂分析提供了新的学科基础。“六五”期间,国家科委把断裂方面的研究——“材料的微观结构和力学性能的研究”列为重点基础研究项目,由肖纪美教授主持,有中国科学院下属的金属研究所和力学研究所、清华大学、西安交通大学、华中工学院、北京钢铁学院六个单位参加。1987年,国家自然科学基金委员会继续把有关断裂的研究——“金属材料断裂规律及机理研究”列为“七五”重大项目之一,仍由肖纪美教授主持,上述六个单位参加。

## 二、研究内容的选择

根据我国实际情况,本重大项目对研究内容的选择有如下考虑:为与“攻关”、“高技术”等规划衔接,选择具有共性的基础性内容和少量在理论研究结果指导下解决一些具有很大经济效益的关键实际问题;安排我国已在国际上占有优势的内容,如氢致开裂、疲劳断裂等;注意学科的结合,如力学与材料科学的结合;以及经费不富裕条件下的有限领域和目标。参考断裂学科在国际上的发展趋势,优选了三个方面共十个子课题。

### 第一方面——静载断裂

注重力学与金属学的结合,从各个结构层次研究静载断裂的基础问题。设3个子课题:

#### 1. 裂纹顶端应力应变场和断裂准则的细观力学研究

由力学所、清华大学、华中理工大学承担。在学术思想上,注意连续介质力学与研究断裂现象的材料科学相结合;细观断裂机制与数值模拟及宏观断裂参量相结合;精细光学实验测量与理论分析相结合。包含4项内容:(1)裂纹顶端区域断裂过程及分离机制研究;(2)裂纹顶端区域位移和应变场的实验测定和理论分析;(3)裂纹稳态扩展的细观准则和断裂理论;(4)损伤对裂纹尖端场及断裂过程的影响。

#### 2. 细观组织缺陷的形成、演变和断裂过程的研究

由清华大学、力学所、华中理工大学承担。采用宏观与微观相结合的方法,研究剪切带、微孔洞等细观组织缺陷的形成及演变,以及它们与第二相粒子、晶界等的交互作用。研究内容有:(1)微孔洞萌生和扩展规律的显微观测及其力学分析,包括一级、二级微孔洞之间的交互作用研究;(2)剪切带形成的力学条件和材料特性条件的观测与分析;(3)裂尖塑性区不均匀组织对微孔形核与扩展的观测及力学分析。

#### 3. 复相合金的形变和断裂过程及其力学分析

由西安交通大学、北京科技大学、清华大学、金属研究所承担。研究软基体中有硬相和硬基体中有软相组织的形变和断裂过程,导出强化及韧化规律,并用于指导合金结构钢的设计。包含4项内容:(1)软基体中析出的细小第二相硬质点(尺寸约10nm)对形变和断裂过程的影响分析;(2)软基体中包含各类形态的硬相(或组织)对形变和断裂过程的影响分析;(3)硬基体中包含分散分布的软相对形态和断裂过程的影响分析;(4)温度对硬基体中有软相或软基体中有硬相的断裂方式的变化原因分析。

### 第二方面——疲劳断裂

从简单到复杂体系,研究疲劳损伤、裂纹萌生和扩展的机制和规律,设4个子课题。

#### 4. 晶内晶界的交变形变损伤积累过程及其在裂纹萌生与扩展中的作用

由北京科技大学、金属研究所承担。采用立方晶系金属的单晶及双晶试样,系统研究交变形变条件下晶内滑移及晶界的作用。包括4项内容:(1)交变形变历史对疲劳裂纹扩展的作用;(2)晶界区的协调形变及交变形变特征及其对裂纹萌生、扩展的作用;(3)交变形变损伤的过程及其表征;(4)交变形变在体心金属的表现及其在裂纹产生及扩展中心的作用。

### 5. 复相材料的疲劳断裂过程和机制的研究

由金属研究所及西安交大承担。采用双相、三相钢和其它两相组织的典型复相材料,通过研究相的特性、含量、尺寸、形态和分布对循环形变特征、裂纹萌生和扩展的影响,了解显微组织(特别是相和相界)特征与疲劳行为之间的关系,通过改变显微组织,改善疲劳性能。包括8项内容:(1)循环形变硬化或软化宏观规律和微观过程;(2)各组成相和相界以及晶界在疲劳断裂过程中的作用及其机制;(3)双相和三相组织在疲劳过程中的位错组态的变化和发展。(4)疲劳裂纹扩展门槛值和裂纹扩展规律;(5)复相材料疲劳裂纹萌生和扩展机制图;(6)双相材料循环形变的力学分析;(7)双相组织在腐蚀介质中的疲劳断裂特征和规律;(8)理论归纳与物理模型的建立。

### 6. 表层组织和状态对疲劳裂纹萌生和扩展作用机理的研究

由西安交大、金属研究所承担。力图在疲劳强化因素中分离残余应力和组织变化的作用,研究它们在交变载荷下的变化规律及对疲劳裂纹萌生和扩展的影响。包括3项内容:(1)在预应力形变强化或预应力切削时,研究分离残余应力的作用;(2)应用减薄法单独研究不均匀硬化组织在疲劳载荷下的行为;(3)探索穿透短裂纹的监测及标定方法以研究疲劳裂纹在强化层中早期扩展行为。

### 7. 缺口件的低周疲劳裂纹形成及扩展和材料循环特性的研究

由力学研究所、清华大学、北京科技大学共同承担。着重从宏观方面研究缺口件的低周疲劳裂纹形成及扩展规律,是一个重要工程问题。包括5项内容:(1)材料在单轴应力下的循环特性;(2)缺口件的应变场和超载,载荷次序对疲劳裂纹形成和扩展的影响;(3)材料在复合应力下循环特性;(4)应力集中件在复合加载下裂纹形成的研究;(5)材料在谱载下的疲劳特性及累积损伤。

## 第三方面——氢致开裂

设3个子课题,由金属研究所、清华大学及北京科技大学分别承担第8、第9及第10课题。

### 8. 氢在金属中的基本行为

研究与金属的氢致开裂密切有关的金属中氢的基本行为。包括3项内容:(1)氢的应变场;(2)氢对键合力的影响;(3)氢陷阱。

### 9. 氢致开裂的规律及控制

研究氢致开裂规律及特征参量估算,并针对重要实际问题分析预防措施。包括3项内容:(1)典型组织结构材料的氢致开裂规律及新型抗氢材料的研究;(2)不同应力状态下的氢致开裂规律及特征参量的定量估算;(3)表面改性对氢致开裂的影响。

### 10. 氢致开裂机理的研究

在过去工作的基础上,发展和完善氢促进塑性变形从而导致氢致滞后断裂的理论;深入研究各种形式断裂的物理及数学模型。包括5项内容:(1)氢促进塑性变形的研究;(2)氢促进解理断裂的研究;(3)氢致沿晶断裂的机理;(4)氢促进韧断的机理;(5)氢致塑性变形导致开裂的综

合机理。

### 三、主要研究成果

本项目自1987年1月起执行至1991年底结束,共获部委级以上奖励12项,其中获国家自然科学基金二等奖一项,国家科技进步奖三等奖一项,中科院、教委和冶金部级二等奖六项、三等奖三项、四等奖一项,还有八项通过了鉴定。发表(包括已接受的)论文369篇,其中国外学报68篇,国内一级学报116篇,专著两本。应邀在国际重要学术会议上作大会特邀报告七次,主持国际学术会议二次,还开展了三项国际合作研究。培养了一批研究生,其中已毕业的博士生30名,硕士生71名,在读博士生13名,硕士生17名。此外,通过研究还培养了一批高层次的中青年科技人才。验收组认为,“本项目的研究成果达到了国际先进水平,某些方面的成果处于世界领先地位。”现将主要的三个方面介绍如下:

#### 1. 静载断裂(第1至第3子课题)

在国际上开辟了弹塑性材料裂纹顶端高阶渐近场研究的新领域,研究结果为双参数断裂准则和韧性三轴张力相关曲线提供了理论基础。在国际上首先进行了异质场界面裂纹顶端弹塑性渐近场和高阶渐近场的系统研究,揭示了异质场界面裂纹顶端区域位移场交叉匹配的物理本质,对理解和控制复合材料的界面力学行为,有重要的参考意义。对可压缩弹塑性材料的定常扩展裂纹渐近场的研究结果,澄清了国际上对这个问题的争论。提供了清晰的铝单晶薄膜试样 I 型裂纹顶端无位错区(DFZ)渐近场及断裂过程扫描电镜在位观察的物理图象。

关于细观缺陷与断裂过程的关系,在如下三个方面取得了重大进展:

(1)微空洞 采用声发射监测与微机控制定位技术,测得球化的20号碳钢一级微空洞形核应变为0.02,二级微空洞的形核应变为0.04,两级微孔洞的交互作用使弹性模量急剧下降,在低周疲劳中由循环硬化转为软化。除滑移可形成微空洞外,也可在形变孪晶的相界面上形成;对于钛合金的超塑成型的研究结果发现,微孔洞的长大受塑性应变控制,而不是应力作用下的扩散控制。采用大变形有限元方法,计算了两级空洞交互作用,获得与实验结果相符合的结果。

(2)剪切带 利用 SEM 动态拉伸,细致地观察了脆性材料及纯铝中剪切带的形成和扩展行为,并进行了力学计算。计算结果表明,平面应变条件最易激发剪切带形成。对剪切带内速率扰动分布,扩散型数值解表明,一维和二维方法所确定的剪切带分叉的临界值是一致的。

(3)裂纹顶端区 采用 TEM 动态观察,证实了裂纹顶端无位错区(DFZ)的存在,并比较了 $\alpha$ 相及 $\gamma$ 相中DFZ的区别。采用10微米方格网络测量了Fe-3%Si及镍单晶的裂尖形变场,证实了氢能促进塑性变形及降低 $K_{IC}$ 。

从我国“六五”、“七五”期间研制的微合金化钢、双相钢、低合金高强度钢和耐寒高强度钢,以及重大生产问题中提炼出的三个具有共性的应用基础研究成果如下:

(1)采用 TEM 的静态和动态观察,研究了10nm超细粒子对位错及位错胞结构的影响,这对理解微合金化钢的强化及韧化机制,有重要的参考作用。

(2)复相材料微观组织的优化设计。在微观断裂机制和宏观力学分析结果的指导下,建立了性能与组织结构参量之间的表象方程,进行优化设计。

(3)显微组织对钢的低温脆性的影响及机理。建立了解理断裂应力与解理断裂单元之间的

关系式;提出了解理断裂的临界条件和解理启裂源的位置;研究了材料韧性分布的物理-数学模型,建立了临界温度的可靠性模型。

以上成果应用于工程实践,取得了很大的经济效益和社会效益。

## 2. 疲劳断裂(第4至第7子课题)

(1)晶体学研究 采用铝单晶及双晶的精确实验,证明了交变形变累积损伤;单晶实验结果表明,裂纹顶端的切应力及对应的交变滑移对裂纹扩展起了主要作用,而正应力分量通过撕裂机制促进了裂纹扩展;大晶实验结果指出,晶界区由于形变不协调,易于出现裂纹;提出非均质晶体塑性变形的晶体微观力学模拟,导出塑性本构方程,编制了计算程序,并用此模型研究了晶粒度及双晶间位向差的影响,其结果与实验能满意地符合。

(2)复相材料研究 在系统地研究了铁素体/马氏体(F+M)、铁素体/马氏体/奥氏体(F+M+A)、低碳马氏体/贝氏体(LCM+B)三种复相组织的循环变形以及疲劳裂纹萌生和扩展行为的基础上,提出了物理模型和机制图。其中新的发展和发现有:否定了(F+M)组织中当 $V_m$ 大于30%时只出现循环软化的国外报导;首次在一个广阔的 $V_m$ 范围(5%—82.5%)内建立起 $V_m$ 与门槛值 $\Delta K_{th}$ 的关系;提出了复相组织的循环形变中存在物理硬软化和力学硬软化两个过程;发现疲劳门槛值 $\Delta K_{th}$ 与断口分形维数 $D_F$ 存在线性关系;揭示了循环形变后的饱和位错组态与循环应变幅的关系及界面的影响;观察到了奥氏体在疲劳形变中诱发成马氏体,对疲劳断裂造成有害影响。研究中提出的三个物理模型,即双应力模型,疲劳门槛模型和I型位移下粗糙度诱发闭合模型,都是基于自己的实验结果,是对前人工作的发展和推进。

(3)表层组织和状态的研究 首次实现小缺口X射线残余应力测定,测得的数据可解释文献上不同强度材料的缺口残余应力分布规律,解释了国外报导的缺口疲劳强度高于光滑件的实验现象;首次发现材料表面屈服限和光滑疲劳限相等的规律;首次发现不同低硬度材料在周期载荷下残余应力松弛和组织软化不同,是和材料的硬化系数及层错能有关,并从微观结构上作了解释;首次计算了残余应力场中疲劳裂纹扩展速率,其预测值与实验值符合很好。

(4)应变集中的工程材料研究 本研究获得了高水平、有特色的成果:

材料在复合应力下的循环特性。解决了拉-扭非比例这一难度很大的试验技术问题,系统地研究了复合应力下应变路径应变历史对材料硬化软化规律的影响,为建立非比例加载复合型本构关系提供了全面系统的实验结果。

超载对应变集中件疲劳寿命的影响。系统地进行了不同超载比及不同超载次数的超载实验研究,对拉-拉疲劳得出有益的结果。通过计算模拟孔边应变分布和应变循环,从应变硬化的角度解释了实验现象。

材料在谱载下的疲劳特性及累积损伤。提出材料在随机载荷作用下的一个疲劳损伤计算公式,该公式改进了国外已有的方法。

应变集中件在复合加载下裂纹形成的研究。提出了拉-扭复合应力作用下,薄壁圆管裂纹形成的控制参量和寿命及开裂位置的关系,给出了相应判据。

## 3. 氢致开裂(第8至第10子课题)

在金属中氢的基本行为方面,获得如下重要成果:

(1)首次实验发现在加载奥氏体不锈钢裂纹尖端存在氢富集的双峰,并提出了相应模型。

(2)氢对键合力影响的研究取得重要进展。用多种方法在多种材料中实验确认了氢可以降低

低原子间结合力,并对其物理本质进行了研究;

(3)实验确证了氢应变场的非球对称性,氢在  $\alpha$ -Fe 中为四方应变场,并测出了其应变场分量,这对阐明氢致  $\alpha$ -Fe 开裂机理,是非常重要的概念。

(4)氢扩散和氢陷阱研究的重大进展。提出了氢扩散方程的新形式和新的理论处理方法,系统地研究了合金元素和结构缺陷(点缺陷、位错、晶界)对氢的陷阱效应以及交互作用的大小和性质,深化了对氢扩散和氢陷阱的规律性认识。

在氢致开裂的规律及控制的研究中,获得如下重要成果:

(1)系统地研究了( $\alpha$ + $\gamma$ )双相不锈钢、铁基、钴基和非晶态合金、Fe-Ni 奥氏体合金、Ti<sub>3</sub>Al+Nb 和 TiAl 金属间化合物的氢致开裂规律,既为氢致开裂机理的研究提供了实验依据,也为提高不同类型金属材料的抗氢能力提供了理论依据。

(2)系统地研究了不同类型不锈钢在不同加载类型下氢致开裂的规律,首次提出了Ⅱ型和Ⅲ型加载条件下氢致开裂的特性。系统地研究了高强钢在气体 H<sub>2</sub>、高温水蒸汽、高温水和高温 H<sub>2</sub>S 气体等环境中,氢致开裂应力强度因子门槛值和裂纹扩展速率与温度和压力关系,建立了一些特征参量半定量估算公式,较已发表的工作有较大的发展。

(3)工程中重大氢致开裂问题的研究和解决。在材料氢致开裂规律性的基础上,研究了长期未能解决的半导体外引线断裂机理和控制,及中碳非调质钢的白点等问题。弄清了外引线断裂及白点形成全过程,揭示了其影响的诸因素,提出了工程上解决的技术措施并在生产中得到了证实,解决了工程中实际问题。具有较重大的经济和社会效益。

在氢致开裂机理的研究方面,取得如下重大成果:

(1)从理论和实验两方面证明氢能促进位错的增殖和运动。用多种实验方法(电镜原位拉伸,大试样表面观察,氢对室温蠕变影响)证明氢能促进局部塑性变形。由于氢在位错周围形成气团且能跟着位错一起运动,它使位错应变能下降从而使开动位错源所需外应力降低,即氢能促进位错增殖。在外力作用下螺位错周围的气团将变成非球对称,从而就有一个附加力作用于位错,它将协助外应力促进位错的运动。

(2)首次提出氢促进局部塑性变形而导致解理断裂的两个新机理。对体心立方材料,带氢位错反应而形成解理裂纹核,氢将进入而产生氢压,它将协助外应力使形成稳定核所需的临界塞积位错数下降。因此,在其他滑移系开动(裂纹钝化而韧断)之前,氢致解理裂纹核就已稳定并能扩展,从而引起氢致解理。对其它金属,由于氢使位错源启动的摩擦力降低,氢气团存在所引起的附加力以及氢降低键合力,位错易于达到临界塞积状态,从而氢致解理裂纹在低应力下,就能形核和扩展。

(3)首先从理论和实验上证明纯剪应力能引起氢致滞后开裂。高强钢的氢致Ⅲ型裂纹沿 45°面,这是剪应力作用下非球对称畸变的氢向 45°面富集的结果。而低强钢的氢致裂纹却沿 0°面,这是氢促进室温蠕变的结果。

(4)澄清了氢在阳极溶解型应力腐蚀中的作用。氢和应力协同地促进应力腐蚀,但不起控制作用。

(5)提出了氢致白点准解理断裂及氢化物断裂机理。

#### 四、建 议

从断裂学科的发展历程来看,高新技术和新工艺的引入,新材料的采用,复杂工程的建设以

及新能源的开发,必然会引入新的断裂问题,从而推动断裂学科的进展。科学技术发展到了90年代,对可预见的新的断裂问题进行深入而同步的研究,这将为发展新材料、新工艺,开辟新的应用领域提供理论基础,避免或减少断裂事故所导致的损失。因此,建议继续支持“断裂”的基础性研究,这是投入少、产出大的科技领域。

断裂的基础性研究内容应与“攻关”、“高技术”等国家的科技规划相衔接,强调共性和基础性,其内容是其它规划所无法覆盖的,而研究成果应尽可能被引用。因此,建议将“金属材料”扩展到“材料”,特别是“无机材料”;将研究内容加以扩展进而包括具有广泛意义的“界面断裂”。

## PROGRESS IN RESEARCH ON FRACTURE MECHANISMS OF METALLIC MATERIALS

Xiao Jimei (Chi-mei Hsiao)

(University of Science and Technology Beijing)

### Abstract

One of the major projects approved by the National Natural Science Foundation of China (NSFC) entitled “Research on Fracture Mechanisms of Metallic Materials” was carried out by six institutes in China from January 1987 to December 1991. The research results was reviewed and approved in June 1992 by a committee appointed by NSFC. In the present paper, the significance and tendency of fracture research, the contents and the major results of this major research project, and the suggestions for future works are presented in four consecutive sections.

## 国家自然科学基金委员会召开管理工作会议

——表彰在国家自然科学基金管理工作中的先进集体和先进个人

国家自然科学基金委员会1992年12月16日—18日在北京首次召开了全国性管理工作会议。会上表彰了一批在国家自然科学基金管理工作中成绩显著的先进集体和先进个人。来自全国科学基金主要申请单位、科技管理部门的负责人和管理干部300余人参加了会议,有关方面负责同志出席开幕式。

浙江大学校长路甬祥、北京农业大学科研处处长白玉良等6位先进集体和先进个人代表在大会上介绍了几年来在科学基金管理工作的经验和做法,引起与会代表的很大兴趣。会议还分组进行了交流和讨论。

会议期间,国家自然科学基金委员会综合计划局负责同志向各位代表介绍了即将实施的各项管理办法,并且对即将开始的1993年度国家自然科学基金受理工作做了说明。