

金属初性破坏的 细观力学及其应用研究

陈长陶 周利 张克玄 著

国防工业出版社

金属韧性破坏的细观力学 及其应用研究

郑长卿 周 利 张克实 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

金属韧性破坏的细观力学及其应用研究 / 郑长卿等著.
北京:国防工业出版社,1995.9

ISBN 7-118-01420-6

I. 金… II. 郑… III. ①金属-韧性-金相学②金属-断裂-金相学 IV. ①TG113.25②TG111.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 01466 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 7 $\frac{3}{4}$ 184 千字

1995 年 9 月第 1 版 1995 年 9 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:14.40 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾 铎

秘 书 长 刘琯德

委 员 尤子平 朱森元 朵英贤 刘 仁
(按姓氏笔划为序)

何庆芝 何国伟 何新贵 宋家树

张汝果 范学虹 胡万忱 柯有安

侯 迁 侯正明 莫梧生 崔尔杰

序

这本专著是以郑长卿同志为首的科研组十余年来的理论研究和大量实验工作积累而建立起来的金属韧性破坏的细观力学理论研究成果总结。这是在该方面理论与实验研究的开拓性工作,它不但具有重要的理论价值,而且达到了可以工程应用的程度,诸如能用来解决工程实际问题中的金属材料韧性破坏方面的计算等。本书在附篇中所给出的若干常用金属材料的临界空穴扩张比 V_{cc} ,以及有关参数的实测数据、图表,都是根据作者们和他们的合作者经过多年艰苦的实验室工作积累起来的第一手资料得到的。这些资料十分可贵,来之不易、可供工程界人士应用,并期待着有更多资料的补充,以扩大工程应用的范围。

这本专著是我国力学工作者们对金属材料韧性破坏理论研究成果的重大贡献。书中不仅系统地论述了作者们所发展的空穴扩张比(V_G)判据和临界空穴扩张比(V_{cc})参数的宏、细观理论与实验依据,倡议了 V_{cc} 的工程测试标准,还进一步提出了若干更深入的观点,诸如:空穴多级形核规律、空穴多级形核断裂准则与本构方程、组合功密度损伤破坏模型等等,都是作者们首创的,并得到了国际上同行们的推崇。

值得指出的是,自 70 年代末、80 年代初期以来,本书作者能以其对新的学术思想的敏感性,不避风险与艰难,毅然开展并坚持进行材料力学与材料科学相结合的细观力学研究,逐步建立了书中介绍的这一套同时适用于裂纹体和无裂纹体的金属材料韧性损伤破坏的统一理论,初步打破了断裂力学理论与经典强度理论之间的人为分界。还应特别指出的是:为了建立这个理论体系,郑长卿同志等带领着历届的硕士和博士研究生,在国内有关科研单位

和钢铁公司的协助与合作下,进行了大量的实验和电镜观察,其劳动量之大、实验工作之艰辛,实非局外人所能想象的。在我国当前的条件下,书中介绍的资料与成果的取得,实属难能可贵。

万事开头难,在金属材料韧性破坏的细观力学理论研究方面有了这个良好的开端,可以预期,在本书作者及合作者们和全国有志于此理论与实验研究的各方人士的继续努力下,我国在金属材料韧性破坏的细观力学理论研究,将不断拓宽其研究领域,并取得更多的成绩。

杨南生

孙训方

1999. 4. 24

杨南生,国际宇航研究院院士,国家航天局科技委顾问、研究员,西北工业大学名誉教授,固体力学博士导师。

孙训方,中国力学学会名誉理事,西南交通大学教授,固体力学博士导师。

前 言

力学与材料科学的结合,从宏观到微观的各个层次研究材料的力学性质和各有关的物理、化学以至生物性质等及其交互作用,已经成为当今甚至今后相当长一段时期内固体力学研究的一种趋向。作为宏观与微观研究结合点的细观力学这一新学科分支,近年尤其受到力学与材料科学界和工程界的重视,已逐步形成一支规模不小的研究队伍。作为一支游击小队,我们有幸跻身其中,十余年来在金属材料韧性断裂细观力学方面做了一点工作。现将部分研究结果整理成书,恳请读者指正。

作者在研究工作中不仅企求在理论认识上能不断深化和逐步完善,也力图将已获得的一些理论认识推广于实际应用,并使前者得到考核与修正。而这后一内容的难度与耗费的精力是始末顾及的。近十几年来结合培养研究生进行的细观力学研究工作,尽管很辛苦,但回过头来看,所得的有实际工程应用价值的结果并不多。主要是两个韧性破坏判据(或模型)与两个相应的材料韧断特性参数:空穴扩张比判据与临界空穴扩张比参数(V_{ac});组合功密度损伤破坏模型与断裂组合功密度(W_f)。前一模型与相应参数可认为是后一模型与相应参数的某种简化形式。前者比较直观、简洁,便于工程应用;后者在理论上更严密一些,适用范围可能更宽些,但要广为接受和应用,还有许多工作要做。

与上述工作相应,本书内容兼顾理论与应用两方面:前一方面着重于阐述模型与参数的物理概念、研究思路和必要的基本公式;后一方面介绍具体计算与测量方法(包括拟议的试验标准,专用引伸计等)、若干类型应用实例以及实测数据图表,以便进一步研究与应用参考。并希望使有关理论研究、教学、设计、应用和实验等不

同工作领域的读者都能从书中找到自己感兴趣的内容。此外,还编制了可在微机上运行的专用弹塑性大应变有限元程序,已提供给部分有关院校、研究所和工厂,并希望逐步做到相应实验数据的自动采集与结果处理(包括预测结果)。书中叙述了成功应用的实例,也不避讳存疑的情况和有待进一步探讨的问题,以利于研究的深入。

本书主要是在笔者主持撰写的《裂纹体与无裂纹体统一损伤断裂理论研究文集》一书^①基础上重新整理的,并参照孙训方教授等的审稿意见,吸取了《韧性断裂细观力学的初步研究及其应用》一书^②的部分有关内容,以使问题的叙述更系统一些。本书第一~四章和第六章由郑长卿撰写,第五章及第七~八章与附篇由周利执笔。张克实参加了第七~八章的撰写与校核工作。全书由郑长卿统稿。

本书反映的研究工作先后得到国家自然科学基金、原航空航天部科学技术研究院与航空科学基金和西北工业大学科研处的资助;并得到武钢钢研所、宝钢钢研所、北京航空材料研究所及校内外许多兄弟单位的大力协作与支持;得到我校胡沛泉教授、杨南生名誉教授与西南交通大学孙训方教授和校内外各方面师长的指教与帮助,以及许多同志、朋友和亲人、特别是本人的妻子李云珠副教授的关心、支持和谅解。对此表示深切的谢意。

感谢杨南生教授和孙训方教授为本书作序。

感谢国防科技图书出版基金评审委员会资助出版本书。同时感谢国防工业出版社各有关部门同志的支持和为出版本书所付出

① 西北工业大学国内交流图书,1991年8月内部版,印数300册。曾作为中国力学学会第二次细观力学试验技术与计算方法研讨会(西安,1991年10月)交流资料。该书作者除本书已署名者外,还有:岳珠峰、冯苏宁、陈晓明、施纪泽、李小陵、哈恩 H G。

② 西北工业大学出版社1988年9月出版,曾作为中国力学学会第一次细观力学试验技术与计算方法研讨会(西安,1989年6月)交流资料,印数1200册,早已售缺。该书由郑长卿主持撰写,作者除本书已署名者外,还有:雷登 J C,刘建民,马若涓,华利生,吴国运,李世辉,郑秀芳,张桂芳。

的辛勤劳动,特别是本书责任编辑唐应恒同志的督促和耐心细致的工作。没有他们的大力支持,本书的出版也是难以想象的。

郑长卿

于西北工业大学工程力学系

1994. 4. 25

内 容 简 介

本书从宏观与细观相结合的角度,用实验、模拟计算与理论分析相结合的方法研究总结了一套同时适用于描述金属材料裂纹体与无裂纹体韧性损伤断裂过程的理论与方法。主要有两个参数与相应判据,即:初级近似:临界空穴扩张比参数与判据;高级近似:组合功密度参数与判据。书中介绍了所述参数与判据的物理背景、理论基础、初步应用实例、有关参数的实测方法以及积累的若干材料的相关数据、图表等,供进一步研究和工程应用参考。本书适于从事力学、强度、材料研究、教学、实验等人员阅读参考。

ISBN 7-118-01420-6/TB · 57

定价:14.40 元

目 录

第一章 金属材料塑性损伤破坏的细观过程	1
1.1 材料与实验方法	2
1.2 空穴的形成过程	5
1.3 空穴的扩张	8
1.4 空穴的聚合	16
1.5 结论	17
参考文献	18
第二章 金属材料塑性变形、破坏过程中空穴扩张的 模拟计算	19
2.1 材料与试样	20
2.2 计算模型	21
2.3 计算结果分析	22
2.4 关于空穴扩张规律问题的进一步讨论	31
2.5 结论	32
参考文献	33
第三章 临界空穴扩张比判据的理论与实验背景	35
3.1 临界空穴扩张比的宏观理论与实验背景	35
3.2 临界空穴扩张比参数的细观实验基础及相应的理论背景	39
3.3 临界空穴扩张比参数 V_{oc} 的宏观测试	42
3.4 临界空穴扩张比参数 V_{oc} 与断裂吸收比能 ASPEF	45
3.5 结论	47
参考文献	48
第四章 临界空穴扩张比判据与相应参数的初步应用	50
4.1 临界空穴扩张比参数 V_{oi} 与 V_{oc}	50
4.2 用于评价材料与热处理工艺	51
4.3 用于预测无裂纹体与裂纹体的启裂	51

4.4 用于表征损伤参量	61
4.5 非比例载荷下的应用	64
4.6 韧—脆转变区应用的可能性	70
参考文献	71
第五章 临界空穴扩张比参数 V_{oc} 的工程试验方法	74
5.1 试样型式的选择	76
5.2 V_{oc} 的工程试验方法	88
5.3 V_{oc} 测量误差分析	96
5.4 关于 V_{oc} 测试中若干问题的讨论	97
5.5 两种高精度轴向、径向引伸计	101
5.6 V_{oc} 与其它材料性能参数的关系探讨	107
参考文献	110
第六章 临界空穴扩张比参数研究中若干问题的 进一步探讨	112
6.1 初步的三维分析	112
6.2 铝合金与不锈钢的 V_{oc} 试测	121
6.3 复合载荷作用下的适用性探讨	129
6.4 关于应力三维度函数的选择问题	134
参考文献	137
第七章 含空穴材料的细观断裂模型与相应的本构方程	138
7.1 Gurson 塑性本构模型及其发展	139
7.2 空穴多级形核规律及控制参数	144
7.3 空穴多级形核断裂准则与本构方程	148
7.4 空穴多级形核破坏理论与 V_o 破坏理论的关系	150
7.5 空穴多级形核模型在 CF 钢破坏分析中的应用	152
7.6 关于空穴多级形核模型的讨论	158
参考文献	159
第八章 组合功密度损伤破坏模型及其应用	162
8.1 组合功密度损伤破坏模型	162
8.2 有限元计算程序简介	165
8.3 组合功密度模型参数的确定	168
8.4 轴对称试样拉伸变形与断裂过程的计算模拟	171
8.5 三点弯曲裂纹试样变形与断裂过程的模拟	175

8.6 结论与讨论	179
参考文献	181
附篇 几种常用金属材料的 V_{ac} 及有关参数实测数据	183
I 几种国产材料的 V_{ac} 值(总表)	184
I 几种国产材料的有关参数及实测数据	186
一、30CrMnSiA、20 钢	186
二、45 钢	192
三、40CrNiMoA	196
四、DE36	200
五、CF60	205
六、CF80	207
七、40Cr	210
八、16MnNb	215

第一章 金属材料塑性损伤破坏 的细观过程

“塑性表示材料中的应力超过屈服极限后,能产生显著的塑性变形而不立即破坏的性质”^[1]。金属的塑性变形一般可看作是晶体的缺陷运动,其中位错运动是基本的、主要的。从本世纪 30 年代泰勒(G. I. Taylor)等人提出位错(dislocation)概念至今的 60 年间,位错理论已获得蓬勃发展,取得很大成功;对于一些问题,其数学形式已可表述得相当好。但从力学应用与工程角度来看,往往显得相当复杂,要用它直接定量预测或判断材料与构件的破坏,往往还有巨大的困难。因此本书试图从较“位错”稍粗一点的层次——空穴或孔洞入手,来考察有关问题。

空穴(void)在夹杂或第二相质点等边界的形成过程是金属材料塑性损伤破坏的重要机制之一。一般认为上述过程大致可划分为三阶段,即空穴的形核(nucleation)、扩张(growth)与聚合(coalescence)。由于微空穴的聚合而导致材料的塑性破断〔或称为韧性破断,简称韧断(ductile fracture)〕,在韧断表面呈现出韧窝(dimple)型断口。

本章以海洋平台结构用钢——低合金钢 50D 为典型,介绍了用该材料制成的圆柱拉伸试样在塑性变形各阶段空穴形成过程的一些定量观测结果,对比分析了其他一些研究者关于空穴扩张与塑性应变及应力三维度的关系的实验结果,进而与 Rice-Tracey 的空穴扩张公式^[2]作了比较,得到一些新的认识。

1.1 材料与实验方法

1.1.1 材料与试样

一、材料

所用试验材料为广泛用于北海油田平台结构的低合金钢 BS4360-50D,其主要化学成分和常规机械性能如表 1-1、1-2 所示。

表 1-1 50D 钢的主要化学成份(wt%)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu
0.18	0.36	1.40	0.095	0.11	0.16

表 1-2 50D 钢常规机械性能

σ_s (MPa)	σ_u (MPa)	δ (%)	ψ (%)	E (GPa)
383	543	33	65.5	213

二、试样

目前常用的考察金属材料塑性变形过程中空穴形成、扩张过程的样品大体有两类:一类是板片试样,主要用于考察平面应力状态或试样表面的塑性变形细观特征;另一类是厚试样,例如各种轴对称拉伸试样以及其他类型试样,可用以考察不同三轴应力状态下塑性变形时试样内部的一些细观特征。就考察表面细观特征的试样而言,最常用的也有两种。一种主要是用于电镜原位观察的动态拉伸试样,由于目前扫描电镜加载台的载荷仅达 200kg,因此所用试样甚薄;另一种试样厚度可不加严格限制,其型式也不一定限于平板,加载过程中用多次复膜的方法考察试样表面塑性变形的细观特征。

本章着重考察在塑性变形过程中试样内部的空穴形成过程并初步探讨应力三维度变化带来的影响,因此采用圆柱试样。

(一)宏观试样