



现代力学丛书

# 高等断裂力学

Advanced Fracture  
Mechanics

王自强 陈少华 著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

现代力学丛书

Advanced Fracture Mechanics

# 高等断裂力学

王自强 陈少华 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统论述断裂力学的基本概念、理论基础、力学原理、分析方法以及断裂力学的实验测定和工程应用. 深入阐明了断裂力学各个重要发展阶段的新颖学术思想和原创性工作, 同时融会贯通地介绍了国内学者在作者熟悉的若干领域内的创造性贡献.

全书共 14 章. 第 1 章介绍断裂力学的历史背景和发展脉络; 第 2~5 章介绍线弹性断裂力学; 第 6~8 章论述弹塑性断裂力学; 第 9 及第 10 章分别介绍疲劳裂纹扩展和界面裂纹; 第 11~14 章阐述裂纹体弹性动力学和裂纹动态扩展.

本书适合从事断裂力学研究和应用的科技工作者及工程师使用和参考, 也可供力学专业的高年级本科生和研究生阅读参考.

### 图书在版编目(CIP)数据

高等断裂力学=Advanced Fracture Mechanics/王自强, 陈少华著. —北京: 科学出版社, 2009  
(现代力学丛书)

ISBN 978-7-03-023035-5

I. 高… II. ①王… ②陈… III. 断裂力学—研究 IV. O346.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008) 第 145638 号

责任编辑: 王飞龙 鄢德平 / 责任校对: 李奕莹  
责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009 年 3 月第 一 版 开本: B5(720 × 1000)

2009 年 3 月第一次印刷 印张: 24

印数: 1—2 500 字数: 466 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

## 《现代力学丛书》编委会

主 编：郑哲敏

副主编：白以龙

编 委：（按拼音排序）

白以龙 樊 菁 洪友士

胡文瑞 李家春 王自强

吴承康 俞鸿儒 郑哲敏

## 丛 书 序

“现代力学丛书”是由中国科学院力学研究所编著的一套丛书，由科学出版社出版发行。丛书的作者为本所的科研人员，客座研究人员及其他相关人员。出版丛书的目的是为了总结和提高我们近年来的科学研究成果并促进相关学科领域的开拓。中国科学院力学研究所自成立以来，既从事基础研究也以基础研究为手段，参与和承担了国家和部门委托的许多任务，取得了一系列重要的成果。我们认为将这些成果分类整理，系统化并加以提高，在此基础上出版专著，是一件很有价值的事，既有益于中国科学院力学研究所科研工作的进一步提高也有利于为广大读者获取新的知识，共同促进力学学科的繁荣发展。

本丛书可供相关专业的科研人员 and 研究生参考。

《高等断裂力学》是本丛书的第一卷。

郑哲敏

2009年2月于北京

# 序 言

断裂力学作为工程科学的阆苑奇葩,不仅在固体力学界大放异彩,而且在工程结构可靠性分析和损伤容限设计,材料力学性能表征,固体缺陷和强度,应用数学,地震和地壳断裂以及地质力学等领域星光闪烁,引起了广泛的关注.

断裂力学的历史渊源可以追溯到 Griffith 在 1921 年和 1924 年的开创性工作.而现代断裂力学的发展源于 Irwin 和 Orowan 在 1948 年的著名工作.因此,断裂力学作为一门工程科学已经有了 80 多年的发展历史.其基本原理已经日臻成熟,而它的应用正在向广度和深度发展.

国内已有几十种断裂力学的著作,这些著作大体分为三类:第一类作为高等院校的教材,主要介绍断裂力学的理论基础和分析方法;第二类偏重断裂力学的工程应用,主要介绍断裂力学的基本原理,断裂机理和断裂准则等一般知识;第三类是断裂力学某个领域的专著,主要介绍该领域的原创性研究成果.

本书介绍了断裂力学的历史背景和发展脉络,对断裂力学的基本概念和理论基础、力学原理、分析方法以及断裂参量实验测定方法和工程应用作了系统论述.本书还对裂纹体的弹性动力学和裂纹动态扩展作了系统介绍.书中既关注了国外学者的重要工作也关注了国内学者的创造性贡献.

国内学者对断裂力学的创造性贡献是多方面的.限于篇幅,本书只介绍了作者熟悉的若干领域内国内学者的创造性贡献.关于国内学者在断裂力学其他领域的创造性贡献,感兴趣的读者可以参阅国内诸多断裂力学专著.

本书的第 1~9 章由王自强撰写,第 10 章由王自强和陈少华共同撰写,第 11~14 章由陈少华撰写.

本书出版得到中国科学院力学研究所《现代力学丛书》出版基金资助.在此表示深切的谢意.

本书出版还得到美国加州大学 Riverside 分校机械系的徐冠水教授的帮助和中国科学院力学研究所吴永礼研究员的帮助,徐冠水教授向我们提供了 Griffith 的经典文献,吴永礼研究员对本书进行了校核,在此一并表示深切的谢意.

本书的第一作者还要感谢冯秀艳博士采集和汇总了前 9 章的电子版插图.

王自强 陈少华

2008 年 9 月 8 日于北京

# 目 录

丛书序	
序言	
第 1 章 引论	1
1.1 历史背景	1
1.2 工程意义	2
1.3 脆性破坏特征	3
1.4 断裂力学起源与发展	3
参考文献	9
第 2 章 线弹性断裂力学	14
2.1 裂纹尖端弹性应力场	14
2.2 应力强度因子理论	24
2.3 裂纹扩展能量原理	26
2.4 裂纹尖端塑性区	30
2.5 厚度对 $K_C$ 的影响	36
2.6 裂纹扩展阻力曲线	39
参考文献	41
第 3 章 应力强度因子分析方法	43
3.1 Williams 级数展开与边界配置法	43
3.2 复变函数方法	47
3.3 权函数法	54
3.4 积分变换法	60
3.5 奇异积分方程	64
3.6 有限单元法	69
参考文献	76
第 4 章 平面应变断裂韧性	78
4.1 标准试样	78
4.2 试样取向与制备	80
4.3 测试仪器和有效性分析	82
4.4 $K_R$ 曲线测试	85
参考文献	87

<b>第 5 章 复合型裂纹的脆断理论</b> .....	88
5.1 复合型裂纹变形特征 .....	88
5.2 应力参数准则 .....	90
5.3 分支裂纹应力强度因子 .....	99
5.4 能量释放率准则 .....	103
5.5 复合型裂纹脆断试验 .....	105
5.6 理论与实验比较 .....	108
5.7 塑性变形对金属材料复合型裂纹脆性断裂的影响 .....	114
参考文献 .....	118
<b>第 6 章 弹塑性断裂力学</b> .....	120
6.1 $J$ 积分原理 .....	120
6.2 HRR 奇性场 .....	125
6.3 $J$ 积分准则 .....	131
6.4 $J$ 控制扩展 .....	132
6.5 断裂韧性 $J_{IC}$ 测试 .....	136
6.6 Dugdale 模型 .....	143
6.7 带状颈缩区模型 .....	145
6.8 裂纹张开位移准则 .....	148
参考文献 .....	152
<b>第 7 章 裂纹顶端弹塑性高阶场</b> .....	155
7.1 高阶场基本方程 .....	156
7.2 一阶场和二阶场 .....	159
7.3 高阶场前 5 项完整结果 .....	162
7.4 $J$ - $Q$ 双参数方法 .....	167
7.5 $J$ - $k$ 断裂准则 .....	171
7.6 平面应力裂端弹塑性场 .....	173
参考文献 .....	180
<b>第 8 章 理想弹塑性介质扩展裂纹尖端场</b> .....	182
8.1 $\nu = 0.5$ 时的裂尖渐近场 .....	182
8.2 $\nu < 0.5$ 时的裂尖场 .....	188
8.3 理想弹塑性介质 III 型扩展裂纹 .....	194
8.4 扩展裂纹与 $J$ 积分 .....	198
参考文献 .....	202
<b>第 9 章 疲劳裂纹扩展</b> .....	204
9.1 等幅载荷下裂纹扩展 .....	204



9.2	影响疲劳裂纹扩展的因素	208
9.3	裂纹闭合效应	209
9.4	疲劳裂纹扩展阈值确定	211
9.5	等幅载荷下疲劳裂纹寿命预测	214
9.6	变幅载荷下疲劳寿命预测	215
9.7	缺口根部的疲劳裂纹	219
	参考文献	222
<b>第 10 章</b>	<b>界面裂纹</b>	<b>224</b>
10.1	弹性界面力学	224
10.2	界面裂纹弹性断裂力学	227
10.3	典型的界面断裂问题	234
10.4	界面断裂试验	261
	参考文献	267
<b>第 11 章</b>	<b>弹性动力学基本概念及方法</b>	<b>271</b>
11.1	动态惯性效应	271
11.2	线弹性动力学基本方程	271
11.3	复变解析函数	274
11.4	Laplace 变换	276
11.5	Wiener-Hopf 分解	277
11.6	动态断裂的能量概念	279
	参考文献	286
<b>第 12 章</b>	<b>静止裂纹的弹性动力学基本解</b>	<b>288</b>
12.1	突加反平面剪切载荷	288
12.2	突加裂纹面正压力	289
12.3	突加平面内剪切应力情况	295
12.4	有限长裂纹面突加载荷情况	296
12.5	动态载荷裂纹的起始扩展	298
	参考文献	302
<b>第 13 章</b>	<b>均匀材料中动态扩展裂纹</b>	<b>304</b>
13.1	动态裂纹定常扩展	304
13.2	裂纹面上集中剪切力	306
13.3	黏结区模型	307
13.4	Broberg 问题	308
13.5	对称扩展剪切裂纹	313
13.6	时间无关载荷作用下裂纹扩展	315

---

13.7	时间相关载荷作用下裂纹扩展	321
13.8	II 型超剪切波扩展裂纹	325
13.9	裂纹尖端超弹性区对 I、II 型裂纹速度的影响	335
	参考文献	340
<b>第 14 章</b>	<b>双材料界面动态裂纹扩展</b>	<b>343</b>
14.1	准静态动态裂纹扩展	344
14.2	双材料界面裂纹含接触区跨音速扩展	350
14.3	界面裂纹的超音速扩展	361
	参考文献	366
<b>索引</b>		<b>368</b>

# 第1章 引 论

## 1.1 历史背景

长期以来,工程材料与结构的广泛使用,使人类面临着大量的机遇和挑战。石器时代,人类主要利用天然材料,制作一些原始的工具。而在铜器时代和铁器时代,在金属加工成形方面,人类做了大量艰苦卓绝的努力。据粗略估计<sup>[1]</sup>,在13世纪,一个骑士和他所用的马的装备耗费的财力相当于现代制作一辆先进的坦克。中世纪关于铸件和锻件生产的历史记载现在还存在。正如 Brock<sup>[1]</sup>所指出的那样,采用这些生产方法制作的炮筒必然存在严重的技术缺陷,从而使炮手们在使用大炮前要向上帝祈祷。

近代由于工业革命,金属材料广泛使用,大型工程建筑和结构不断涌现,灾难性的不测事故的数量急剧增加。1860~1870年期间,由于车辆、车轴、轨道断裂造成的事故,英国每年均有200人丧生。

Shank<sup>[2]</sup>在1954年发表的报告中,汇编了60件大型结构的破坏事故。其中包括大桥,压力容器,储藏罐和管道等。例如,1886年长岛的250ft<sup>①</sup>高的铆接水塔在静水压力试验中脆断。当水压达到227ft高时,一条20ft的垂直裂纹出现在底部,伴随着尖锐的撕裂声,水塔垮掉了;1938年,在比利时,一座跨度245ft的焊接桥,在寒冷的天气,堕入Albert运河,发出类似爆破的巨大声响。

英国《工程》杂志在1866年2月刊上登载<sup>[3]</sup>:每年在英国五六起锅炉爆炸事件,使许多人丧命,并使许多建筑破坏。

1944年Cleveland发生的液化气罐的灾难性大破裂事故令人胆战心惊。据Atallah<sup>[4]</sup>报道:79座房屋,2个工厂以及大约217辆汽车在这次事故中被彻底毁坏。另外还有35座房屋和13个工厂遭到严重破坏。各类财产损失总和达600~700万美元(1944年)。破裂的容器泄出大量液化气,接着这些液化气被难以预防的因素点燃,液化天然容器的大火和随之而来的爆炸使130人丧生,300人重伤。图1.1展示了破坏后的残景<sup>[5]</sup>。地下管道爆炸掀起了整个街道路面,上百间房屋遭毁坏……,爆炸时的火球高达2800ft,甚至有被烤熟的鸟从天上掉下来<sup>[5]</sup>。

随着全焊接技术的诞生,一个新的结构破坏事故时期开始了<sup>[6]</sup>。二次世界大战期间,用全焊接技术建造的2700艘自由轮,其中有10艘断成两截,8艘失踪;有近90艘发生了严重的结构破坏,近400艘遭受结构损坏。全焊接技术比起铆接技术既

<sup>①</sup> 1ft=12in=30.48cm.

大大缩短了制作周期又大大降低了成本,但是随之而来的是众多的断裂事故。



图 1.1 1944 年 Cleveland 发生的液化气罐爆炸

令人惊奇的是,这些事故常常在低应力情况下发生(有几条船是在港湾内突然破坏的)。由此,很多国家开展了大规模的研究。

研究表明自由轮船舰的破坏是由下面 3 个因素组合造成的<sup>[7]</sup>:

- 1) 焊接工艺产生类似小裂纹的缺陷;
- 2) 断裂大部分起始于甲板舱口的角点,此处有局部应力集中;
- 3) 制造自由轮的钢材在低温下韧性很差。

一艘全焊接的船,可以看作是一片金属,裂纹在一片韧性很差的金属中可以快速传播而不受很强阻力。铆接技术是将许多板块有效地铆接起来,裂纹在铆接处受阻,不易穿越不同板块。

自由轮船艇的断裂事故,引起了美国政府的高度重视。在华盛顿海军研究实验室,以 Irwin 为领导的一个研究组对断裂问题进行了系统研究,这就促成了断裂力学的诞生。

## 1.2 工程意义

1982 年,美国 Battelle's Columbus 实验室受美国国家标准局 (NBS) 的委托,对断裂破坏事故及防范,每年所造成的经济损失和耗费作了评估。这项研究是由 Duga<sup>[8]</sup> 领导的研究组进行的。同时广泛征求了材料专家、设计专家、结构专家、经济学家和企业家的意见。听取了工业咨询委员会、政府、科学院、商品安全和保险部门的意见。研究表明,这个经济损失费用确实是很高。这项花费每年约 1190 亿美元,相当于美国国民生产总值 4%。随着社会的日益进步,对于新材料及巨型工程结构的使用更加广泛,这种花费会逐步增加。近年的研究表明,发达国家如美、日、

欧盟等, 这种花费约占国民生产总值的 6%。

NBS 委托的研究工作还表明: 如果充分利用现有的和未来的先进断裂控制技术, 那么经济损失可以减少一半, 即达到当年国民生产总值 2%~3% 的经济效益。

据我国劳动部统计<sup>[9]</sup>, 我国在 20 世纪 80 年代发生的锅炉和压力容器的爆炸事故约 5000 起, 人员伤亡累计近万人, 居国内劳动安全事故的第二位。我国这类事故的发生率比经济发达国家高 10 倍, 而重大恶性事故比经济发达国家高 100 倍。综合上述, 可以清楚地看出, 断裂事故的防范是一个非常重要的问题。断裂力学的深入研究和实际应用有重大的工程意义。

断裂力学已经在工程结构的设计中, 得到了切实的应用。美国材料试验协会已将材料平面应变断裂韧性  $K_{IC}$  作为材料性能重要指标列入规范。裂纹张开位移作为断裂参量已经成为压力容器结构<sup>[10]</sup> 和承压核结构<sup>[11]</sup> 的缺陷评定标准。美国电力研究院发展了以  $J$  积分为基础的弹塑性缺陷评估方法, 称为 EPRI 方法<sup>[12]</sup>。航空部门以断裂力学为基础, 提出了损伤容限设计思想<sup>[13]</sup>。断裂力学在选材方面的应用也有了专门的指导手册<sup>[14]</sup>。

### 1.3 脆性破坏特征

工程结构破坏事故的综合分析表明, 脆性破坏有以下特征<sup>[15]</sup>:

- 1) 尽管结构是由有延性的材料制成的, 但大多数工程结构的灾难性破坏具有脆性的特征, 也就是说只发生少量塑性变形;
- 2) 大多数脆性破坏发生在低温下;
- 3) 大多数脆性破坏是低应力破坏, 也就是破坏瞬时的名义应力远低于材料屈服应力;
- 4) 大多数破坏起始于缺陷、孔边、缺口根部以及出口舱角类等结构不连续部位;
- 5) 破坏源通常是预先存在的或服役过程中出现的缺陷或小裂纹;
- 6) 高强材料制成的结构, 容易产生脆性破坏;
- 7) 脆性破坏的传播速度很高, 通常是介质纵波速度的  $1/4 \sim 1/3$ ;
- 8) 高速撞击容易造成结构脆性破坏。

掌握这些特征, 有助于发展新的设计思想, 有效防范断裂事故的发生。

### 1.4 断裂力学起源与发展

工程结构的设计与制造已有很长的发展历史。古代的建筑, 如希腊的圆形体育场, 中国的万里长城, 埃及的金字塔, 欧洲大教堂, 主要依靠实践经验。直到 16~19

世纪, 应力和应变概念的发展和弹性理论、材料力学的建立, 才使定量设计成为可能.

近代结构设计是建立在强度准则基础之上, 而忽略结构和材料内部缺陷. 对于脆性破坏, 最大拉伸应力准则和 Coulomb-Mohr 准则是比较流行的. 而对韧性破坏, 通常采用屈服准则和极限载荷设计思想.

但是这些经典的设计思想不能解释一大类结构的脆性破坏. 很久以来, 人们就认识到这一点.

Leonardo da Vinci (1452~1519) 进行了不同长度相同直径铁丝强度实验. Lloyd(1830) 和 Le Blanc(1839) 进行了类似的实验<sup>[16,17]</sup> 他们发现短铁丝的强度高长铁丝.

Stanton 和 Batson<sup>[18]</sup> 1921 年报道了带缺口杆试样的实验, 发现每单位体积的断裂功随着试样尺寸的增加而减小. Docherty<sup>[19]</sup> 进行了几何相似带缺口杆试样的弯曲试验, 发现类似的行为. 这些早期的实验指出固体强度的尺寸效应. 美国海军研究实验室关于玻璃纤维的实验<sup>[20]</sup> 进一步确认了 Leonardo da Vinci 等的早期发现. 图 1.2 显示了实验结果. 图中上面曲线是精细制作的玻璃纤维实验结果. 下面的曲线是粗糙处理的玻璃纤维实验结果. 精细制作的纤维, 谨慎预防出现损伤, 而粗糙制作的纤维存在缺陷, 这就导致材料强度降低.

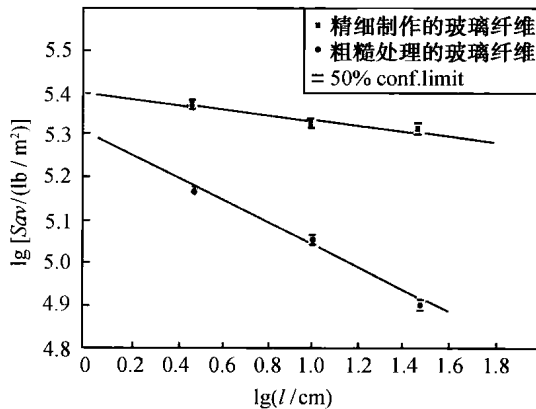


图 1.2

为了解释这些实验现象, 可以设想材料中含有缺陷. 试样尺寸越大, 试样中含有大尺寸缺陷的可能性也越大, 这就使材料的强度降低.

#### 1.4.1 Griffith 工作

1921 年和 1924 年, Griffith<sup>[21,22]</sup> 对脆性材料的断裂理论作了开创性研究. 他发现玻璃的实际强度远远低于分子结构理论所预期的理论强度. 他认为强度的降低是

由于玻璃内部存在细小的缺陷裂纹导致玻璃在低应力下发生脆断。他从能量平衡观点出发,提出了裂纹失稳扩展条件:当裂纹扩展释放的弹性应变能等于新裂纹形成的表面能时,裂纹就会失稳扩展。

他注意到 Inglis<sup>[23]</sup>关于无限大板含椭圆孔的弹性解,利用这个解答,他求得在板中心割开一个长度为  $2a$  的裂纹,释放的弹性应变能为

$$U = \frac{\pi a^2 \sigma^2 B}{E} \quad (1.1)$$

式中,  $\sigma$  是无穷远处施加的均匀应力,  $B$  是板厚,  $E$  是弹性模量。根据 (1.1) 式,得断裂应力的公式:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \quad (1.2)$$

式中,  $\gamma$  是材料的表面能。

为了验证他的理论,他做了两组实验。一组是玻璃薄壁球壳。他用金刚钻或钢刃结合轻轻敲凿制作裂纹,然后在  $450^\circ\text{C}$  下进行回火处理以消除残余应力。在球壳内部的裂纹处黏上赛璐洛胶冻以防止漏气。为了消除球壳曲率半径的影响,他选取的球壳直径比裂纹长度大许多。球壳的壁厚比直径小两个数量级,所以可以看作是玻璃制品的球泡。

在球泡内部冲压,直至球泡爆裂。表 1.1 列出他的实验结果。从表中不难看出,断裂应力随着裂纹尺寸的增大而减小,但  $\sigma_f \sqrt{a}$  却基本保持常值,这证明了公式 (1.2) 的正确性。

表 1.1 含裂纹薄壁球壳的爆裂应力

$2a/\text{in}$	$D/\text{in}$	$(\sigma_x)_f^1/\text{ksi}$	$(\sigma_y)_f/\text{ksi}$	$\sigma_f \sqrt{a}$
0.15	1.49	0.864	0.864	0.237
0.27	1.53	0.623	0.623	0.228
0.54	1.60	0.482	0.482	0.251
0.89	2.00	0.366	0.366	0.244

1)  $x$  轴平行于裂纹,  $y$  轴垂直于裂纹。

第二组实验是含裂纹薄壁圆柱壳的爆裂实验,实验结果也支持他的理论。Griffith 还将自己的理论用于解释玻璃纤维强度的尺寸效应。图 1.3 显示的是 Griffith<sup>[21]</sup>对不同直径的玻璃纤维拉伸强度的实验结果。从图上不难看出随着玻璃纤维直径的减小,玻璃纤维拉伸强度不断增加,而当玻璃纤维直径大于  $0.04\text{in}$  时,玻璃纤维的拉伸强度就趋于玻璃块体的强度值  $25\text{klb}/(\text{in})^2$ <sup>①</sup>。Griffith 认为这种尺寸效应实际上是玻璃体内存在微小裂纹造成的。纤维的直径越小,它所含的裂纹尺寸也越小,这

①  $1\text{lb}=453.59\text{g}$ 。

就造成断裂强度升高,当纤维直径趋于 0 的时候,纤维的断裂强度就趋于理论强度 1600klb/in<sup>2</sup>.

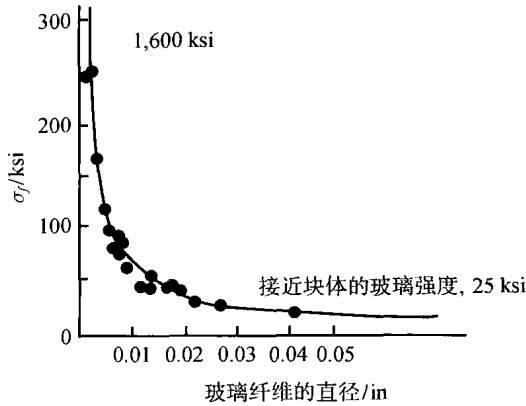


图 1.3

### 1.4.2 Irwin 应力强度因子理论

在 Griffith 理论发表以后的二十余年内,断裂这个学科曾经吸引了一些科学家的兴趣,但是并没有重要进展. Griffith 理论严格地说只适用于理想脆性材料,对含裂纹固体的整体能量释放率计算显得复杂,特别是复合应力下,能量释放率计算比较困难.

为了推动断裂学科发展,有两个关键的科学问题需要解决. 一是如何将 Griffith 理论扩展到工程材料; 二是如何能将 Griffith 整体能量平衡概念与某种容易分析的新的参数相联系.

Irwin<sup>[24]</sup> 和 Orowan<sup>[25]</sup> 各自独立地提出了裂纹尖端区域塑性耗散功概念,认为对工程材料,塑性耗散功要比表面自由能  $2\gamma$  大几个数量级. 因此,在能量平衡分析中,只需将塑性耗散功补充进表面能上,修正的 Griffith 理论就能用到工程材料上去.

Irwin<sup>[26]</sup> 进一步提出了应力强度因子概念,巧妙地将能量释放率与裂纹尖端应力强度因子联系起来,从而开创了断裂力学新时代.

Irwin 的应力强度因子理论很快引起了国际学术界与工程界的重视. 20 世纪六七十年代断裂力学得到了迅猛发展,引起了很多固体力学家,材料物理学家,应用数学家和工程师、设计师的兴趣.

1961 年, Paris 和他的合作者<sup>[27]</sup> 提出了用应力强度因子方法分析疲劳裂纹扩展. Irwin<sup>[28]</sup> 在同一年提出了小范围屈服塑性区修正. 同一时期, Dugdale<sup>[29]</sup> 和 Barenblatt<sup>[30]</sup> 分别提出了条状屈服区模型和内聚力区模型. 这些模型与稍后发展



起来的 BCS 位错连续分布模型<sup>[31]</sup> 成为分析板材平面应力裂纹问题的理论基础. Wells<sup>[32]</sup> 提出了以裂纹张开位移为断裂参量的 COD 方法, 来分析含裂纹宽板的弹塑性断裂问题.

Liebowitz<sup>[33]</sup> 主编《断裂》七卷丛书和 Sih<sup>[34]</sup> 主编的《断裂力学》丛书 (6 卷) 的出版象征着断裂力学的辉煌. 而 1973 年 Tada、Paris 和 Irwin<sup>[35]</sup> 汇编的第一本应力强度因子手册问世, 标志着线弹性断裂力学趋于成熟.

### 1.4.3 弹塑性断裂力学

1968 年 Rice<sup>[36]</sup> 和 Cherepanov<sup>[37]</sup> 提出了路径无关的  $J$  积分<sup>①</sup>, 同年 Hutchinson<sup>[38]</sup>、Rice 和 Rosengren<sup>[39]</sup> 建立了著名的 HRR 奇性场, 为弹塑性断裂力学奠定了重要的理论框架. 这些学者都用全量理论描述材料的塑性本构关系, 也就是用适用于单调加载的非线性弹性理论来表征加载时裂纹顶端区域的塑性变形.

后来发现  $J$  积分是 Eshelby<sup>[40]</sup> 1951 年建立的能量动量张量中的第一平移积分, 而能量动量张量又是与物理中 Noether 守恒积分紧密相关的<sup>[41]</sup>.

$J$  积分不仅具有守恒性, 而且与能量释放率  $G$  是相等的, 这不仅使  $J$  积分具有明确的物理意义, 而且为能量释放率计算提供了有效的工具. 在具体计算时, 我们可以用精度较高的远场来精确计算能量释放率.

HRR 奇性场表征了弹塑性材料裂纹尖端应力应变场的主要特征, 而  $J$  积分刻画了 HRR 奇性场强度. 1972 年 Begley 和 Landes<sup>[42]</sup> 基于块体试样的弹塑性断裂实验, 提出了以  $J$  积分为控制参量的弹塑性断裂准则. Rice, Paris 和 Merkle<sup>[43]</sup> 进一步发展了  $J$  积分估算方法, 从而为单试样测定  $J_{IC}$  提供了实用途径.

$J$  积分作为单参数断裂准则, 在 20 世纪七八十年代曾经风行一时, 独领风骚十余年. 但是精细的数值计算表明<sup>[44,45]</sup> 裂纹顶端的应力应变场难以用 HRR 场表征. 大量的实验<sup>[46,47]</sup> 证实, 材料的断裂韧性  $J_{IC}$  强烈地依赖试样几何和加载方式. 中心裂纹试样测得的  $J_{IC}$  要比弯曲试样测得的  $J_{IC}$  高一个数量级.

鉴于这种状况, 1986 年李尧臣和王自强<sup>[48]</sup> 建立了裂纹顶端弹塑性高阶场的基本方程, 得到平面应变的二阶场. 证实了二阶场是本征场, 它的幅值系数表征裂纹尖端的三轴张力状态, 这就为弹塑性断裂双参数断裂准则提供了理论基础.

对于平面应变 I 型裂纹, 夏霖和王自强<sup>[52]</sup>, Xia、Wang 和 Shih<sup>[53]</sup> 得到了裂纹尖端弹塑性应力应变场本征级数展开式前五项完整结果. Chao 和 Yang<sup>[54,55]</sup> 得到了高阶场前 4 项结果.

Betegon 和 Hancock<sup>[56]</sup> 指出了  $T$  应力的影响. Sharma 和 Aravas<sup>[57]</sup>, O'Dowd 和 Shih<sup>[58]</sup> 从不同角度分析了裂纹尖端场两项展开, 证实了李尧臣和王自强<sup>[48]</sup> 理论分析的正确性. O'Dowd、Shih 和 Dodds<sup>[59]</sup> 进一步提出了  $J$ - $Q$  双参数断裂准则.

① 俄文版原文发表在 1967 年.