



材料腐蚀丛书




Fractography Observing, Measuring
and Interpreting Fracture Surface Topography

断口形貌学

观察、测量和分析断口 表面形貌的科学

[英] Derek Hull 著 ● 李晓刚 董超芳 杜翠薇 高瑾 卢琳 译

 科学出版社
www.sciencep.com

材料腐蚀丛书

断口形貌学

观察、测量和分析断口表面形貌的科学

Fractography

Observing, Measuring and Interpreting

Fracture Surface Topography

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书译自利物浦大学和牛津大学教授 Derek Hull 的 *Fractography* 一书, 包括 10 章。第 1 章重点介绍了断口形貌学的学科本质; 第 2 章用精美的图像展示了各种断口, 并对断口形貌的主要特点进行了描述; 第 3 章介绍沿着三维双曲率表面扩展的裂纹; 第 4 章着重介绍应力场效应; 第 5 章介绍的是应力强度和断裂速度对于断口表面粗糙度的影响; 第 6 章中将介绍晶体解理; 第 7 章中介绍界面和相间裂纹扩展; 第 8 章中将介绍延性断裂; 第 9 章对裂纹扩展时, 驱动裂纹扩展的条件发生变化所导致的断口表面形貌特点进行了说明; 第 10 章从微观结构分析和失效分析等方面介绍断口形貌分析的应用。

本书适合本科高年级学生、研究生以及相关行业的科研人员和工程师、失效工程师使用。

Fractography: Observing, Measuring and Interpreting Fracture Surface Topography, 1st Edition (ISBN: 978-0-521-64684-0) by Derek Hull first published by Cambridge University Press 1999 All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press & Science Press 2009

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press or Science Press

This edition is for sale in the mainland of China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan, and may not be bought for export therefrom.

此版本仅限中华人民共和国境内销售, 不包括香港、澳门特别行政区及中国台湾。不得出口。

图书在版编目(CIP)数据

断口形貌学: 观察、测量和分析断口表面形貌的科学 = *Fractography: Observing, Measuring and Interpreting Fracture Surface Topography* / (英) 赫尔 (Derek Hull) 著; 李晓刚等译. —北京: 科学出版社, 2009

(材料腐蚀丛书)

ISBN 978-7-03-025774-1

I. 断… II. ①赫…②李… III. 断口金相 IV. TG113

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 183225 号

责任编辑: 吴凡洁/责任校对: 钟 洋
责任印制: 赵 博/封面设计: 鑫联必升

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 10 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2009 年 10 月第一次印刷 印张: 24 1/2

印数: 1—2 500 字数: 463 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

《材料腐蚀丛书》编委会

顾 问:曹楚南 侯保荣

主 编:李晓刚

编 委:(按姓氏汉语拼音字母顺序排列)

董超芳 郭兴蓬 韩 冰 何业东

林昌健 齐慧滨 乔利杰 曲良山

王福会 张鉴清 张伦武 张三平

郑玉贵 左 禹

《材料腐蚀丛书》序

材料是人类社会可接受的、能经济地制造有用器件(或物品)的物质。腐蚀是材料受环境介质的化学作用(包括电化学作用)而破坏的现象。腐蚀不仅在金属材料中发生,也存在于陶瓷、高分子材料、复合材料、功能材料等各种材料中。腐蚀是“静悄悄”地发生在所有的服役材料中的一种不可避免的过程,因此,认识材料腐蚀过程的基本规律和机理非常重要。

材料腐蚀学是一门认识材料腐蚀过程的基本规律和机理的学科,其理论与材料科学、化学、电化学、物理学、表面科学、力学、生物学、环境科学和医学等学科密切相关;其研究手段包括各种现代电化学测试分析设备、先进的材料微观分析设备、现代物理学的物相表征技术和先进的环境因素测量装备等;其防护技术应用范围涉及各种工业领域,以及大气、土壤、水环境甚至太空环境等自然环境。

对材料腐蚀过程的机理和规律的探索是材料腐蚀学科的灵魂。多学科理论的交叉,即材料科学、化学、电化学、物理学、表面科学和环境科学等学科的进一步发展及渗透促进了材料腐蚀学科基础理论的发展。其另外一个特点是理论研究与应用实际相结合,工程实际应用的需求是其理论研究发展的最大推动力。

由统计与调查结果发现,各工业发达国家的材料腐蚀年损失是国民经济总产值的2%~4%,我国2000年的材料腐蚀总损失是5000亿元人民币。利用材料的环境腐蚀数据和腐蚀规律与机理的研究成果,在设计中指导材料的科学使用,并采取相应的防护措施,有利于节约材料、节省能源消耗。若减少腐蚀经济损失的25%~30%,可对我国产生每年约1000亿人民币的效益。同时,避免和减少腐蚀事故的发生,可延长设备与构件的使用寿命,有很好的社会效益和经济效益。特别是近20年来我国冶金、化工、能源、交通、造纸等工业的发展,带来了对自然环境的污染,不仅导致生态环境的破坏,而且使材料的腐蚀速率迅速增加,设备、构件、建筑物等的使用寿命大大缩短。我国局部地区雨水pH已降低到3.2,导致普碳钢的腐蚀速率增大5~10倍,混凝土建筑物的腐蚀破坏也大大加速。只有充分认识材料在不同污染自然环境中的腐蚀规律,才能为国家制订材料保护政策和环境污染控制标准提供依据和对策。

因此,发展材料腐蚀与防护学科是国家经济建设和国防建设、科技进步和经济与社会可持续发展的迫切需要。持续深入开展本学科的基础性研究工作,有利于提高我国的材料与基础设施的整体水平,促进我国材料腐蚀基础理论体系和防

护技术工程体系的形成与发展，对国家建设、科技进步、技术创新，以及学科的进一步发展具有重要意义。

1949年后，我国的材料腐蚀理论研究和防护技术受到高度重视并迅速发展。随着经济的高速增长和工业体系的日渐完备，目前，我国有关腐蚀学科理论和各种防护技术的研究成果不仅完全可以解决自身出现的各种材料腐蚀问题，而且已经成为世界上该学科的重要组成部分，焕发出朝气蓬勃的活力。我国正逐渐由材料腐蚀研究与防护技术大国向材料腐蚀研究与防护技术强国转变。

值此科学出版社推出《材料腐蚀丛书》之际，本人很高兴以此序抒发感想并表示祝愿与感谢之意：祝愿这套丛书能充分反映我国在材料腐蚀学科基础性研究成果方面的进展与水平；感谢我国材料腐蚀学科研究者的辛勤劳动；感谢科学出版社对材料腐蚀学科的支持。相信随着我国经济水平的日益提高，我国的材料腐蚀理论研究和防护技术的发展一定会再上一个新台阶！

曹楚南

中国科学院院士、浙江大学教授

2009年8月28日

中文版序

我很高兴能有机会为本书的中文版撰写序言。关于本书的主要内容以及全书的主旨，已经在本书的英文版序言中提及，因此不再赘述。我从朋友那里得知，我的另一本专著《复合材料简介》在中国很受欢迎，因此，我希望由李晓刚教授翻译的这本《断口形貌学》也能为中国的科学和工程事业作出贡献。

断口形貌学以一种独特的视角来研究从固体物理到工程失效分析不同门类、不同学科的内容；对于微结构分析以及裂纹扩展机理和机制的理解，也是一种非常有益的手段。对于和我一样，对各种断口形貌的观察和图案非常感兴趣的人来说，本书也是一本难得的工具书。

本书的内容来源很广，涉及多个学科和工程领域。长久以来，无数的科学家以及工程人员都在努力探究各种形态的断裂现象，本书有赖于他们的学识和专业技术。书中的大部分成果都是西方世界科学研究的结晶。但我也坚信，在地球上的其他地方，一定也有很多人进行着类似的工作，特别是对于中国科学家和工程人员的工作，我还未能有适当的认知。对于未来东西方之间在学术上进行更深刻和广泛的交流沟通，我翘首以盼。今年是第29届奥运会在中国举办的大喜之年，借此机会，存在于我们之间的各种沟通障碍，无论是在社会、经济、政治和文化方面，都被大大地削弱了，我想这会有助于我们的合作，从而使我们双方在科学和工程领域都取得更大的进步。

我也很高兴地获知中国科学技术部对于本书的出版提供了经费上的支持(项目编号：2005DKA10400)。我希望向所有参加这项翻译工作的人员，尤其是李晓刚教授以及剑桥大学出版社的相关人员表示我最衷心的感谢。

Derek Hull

2008年4月16日

译者的话

1209年，一批不满意牛津大学的教师和学生从牛津大学逃离出来，来到了康河(River Cam)边，他们决定建立一所大学与牛津竞争。于是，剑桥大学(University of Cambridge)建立了，从此这个河边城镇渐为人所知，并发展成为举世闻名的大学城。

2007年7月，译者作为北京科技大学材料科学与工程学科与剑桥大学对口学科双边交流团的领队，来到剑桥大学，立即被其浓浓的学术气氛所感染。大学没有围墙和校牌，整个剑桥市区就是校园。精美的古典建筑、狭窄幽静的小巷、豁然开朗的庭院，构成了这个历史悠久的学术圣地。闹市与庄严的学府毗邻，河边牛羊与古老的教堂相映成趣。昔日王朝建筑的风采，在小城依然可见。南北走向的康河微微弯曲，穿城而过，沿岸杨柳低垂，一派田园风光。康河很浅，清澈可见水中鱼儿嬉戏畅游。日落黄昏时分，泛舟河上让人不由地联想到当年才子徐志摩在“再别康桥”中吟出的“在康河的柔波里，我甘愿做一条水草”的温婉诗句。

牛顿、达尔文、马尔萨斯、罗素和霍金等大名鼎鼎的大师是剑桥大学的校友，大约有80多位诺贝尔奖获得者也曾经在此执教或学习。译者知道，在这个为人类现代思想启蒙、科技发展和工业革命做出巨大贡献的地方，一定遍地是“宝贝”！

译者抱着“淘宝”的心理漫步在剑桥城的闹市中。在一家古色古香的书店里，摆放着剑桥大学各类学者的最新著作，真是各种“奇珍异宝”琳琅满目啊！在书架的角落里，译者淘出了Hull教授的这本*Fractography*。仔细翻阅全书后发现，这不就是要找的“宝贝”么。译者被书中翔实的内容和精美的图片深深吸引。既是“宝贝”，当为大家所共享，当即决定将此书翻译后介绍给我国读者。第二天与剑桥大学同行交流时，Hull教授出差在外十分可惜。译者通过朋友Kumar博士向Hull教授转达了这个想法，很快就得到了Hull教授的回应和支持。

2008年春节后，译者所在课题组的董超芳副教授、杜翠薇教授、高瑾研究员、卢琳讲师、肖葵博士、刘智勇博士、程学群博士和吴俊升副教授投入了紧张的翻译和校订工作。这一工作得到了科学出版社的大力支持，以最快的速度与剑桥大学出版社商定了版权事宜。译者希望将本书作为北京科技大学材料科学与工程学科与剑桥大学对口学科双边交流的成果之一，也作为译者承担的科学技术部

“国家材料环境腐蚀台网建设与共享”科技平台建设项目的成果之一，献给广大读者。愿西方最新的科研成果，伴随着西方学者执著而细腻的科学精神，源源不断地流向我国，也期望我国学者的研究成果源源不断地融入世界科技发展的大潮中。

李晓刚

2009年1月

简介

当某个固体断裂时，就会形成一个断口。断口的外观，特别是它的形貌特征，与该材料的种类，比如金属、聚合物、陶瓷、生物材料、复合材料、岩石等相关，同时和材料断裂时的环境条件，如应力(拉应力、剪切应力、蠕变应力、疲劳应力、冲击应力)、温度、环境(空气、水、油、酸)等也有关系。本书通过多种技术手段介绍断口形貌学的研究方法，以及如何从材料的微观结构和测试方法来分析断口形貌特点。

不同学科的学习者对于断口形貌学的兴趣以及他们所需理解和分析的深度有所差异，因此，本书包含了不同层次的学习内容，适于多种学习方式。在每章的开头部分都会有一幅特征形貌图，以及本章重点内容的概述。每一章节都有大量的线条图(line drawing)和半色调图像(half-tone images)，同时还配有关于该图片拍摄技术的详细说明。章节的主体文字部分也配有很多脚注，就所涉及的技术细节和信息来源作进一步的说明。

断口形貌学在材料领域应用十分广泛，尤其是材料科学及其相关学科，如物理学、化学、工程学、仿生学(biomimetics)、地球科学、生物学及考古学等。本书可作为理解各种固体形变和断裂的基础知识读本，也可作为进一步分析断口形貌，以及设计不同固体材料断口试验的入门书。本书适于本科高年级学生、研究生以及相关行业的科研人员和工程师、失效分析(failure investigation)工程师使用。

Hull 教授任职于利物浦大学和牛津大学，具有深厚的学术背景。他早期曾在威尔士大学卡迪夫学院、英国哈维尔原子能科学研究院以及牛津大学从事研究工作。他是数所大学的访问教授，同时也是英国皇家学会会员和英国皇家工程院院士。Hull 教授曾为多个国家的政府及工业公司提供咨询服务。他与别人合作出版了两本关于位错(dislocation)和复合材料方面的著作，被许多国家选作本科生教材，并被译成多国语言。本书是 Hull 教授在材料领域多年研究的成果，同时也融汇了很多他的学生和同事的工作成果。Hull 教授是剑桥大学的终身名誉教授。目前，他是剑桥大学材料科学与冶金系杰出研究员，同时，作为利物浦大学材料科学和工程系高级研究员，仍在那里继续对断裂现象进行研究。

序

断口形貌学在很多科学和工程领域都非常重要，而其之所以这么吸引人，从根本上说，是因为它能让我们对固体的本质有更加深刻的认识，而这种认识是无法通过其他方式获得的。该学科的基本前提是裂纹生长所形成的断口形貌反映了材料微结构和测试环境的特点。因此，通过观察、测量和分析断口表面的形貌，我们可以了解材料的微观结构和裂纹扩展(crack growth)机制等方面的许多特征。

显微镜观察实验的主要结果是一张断口表面的“图像”，对该图像的理解应该为断口形貌的三维印象，这个过程会涉及一些主观因素，同时图像的质量也是决定能否做出有效分析的主要因素，有些书籍和杂志中的图像质量不高，致使在复制时会丢失一些重要信息。因此，在本书的编写过程中，我们尽了最大的努力通过各种途径去收集质量最好的图像，并原样复制应用到本书中。很多书的作者都非常热心地向我提供图像的原稿。但有些时候，由于无法找到说明事物重要方面的高质量图像，我们不得不将一些质量不高的图像收录进本书。

本书可供所有对断口表面形貌感兴趣的读者阅读。难易程度适合于本科高年级学生、研究生、博士研究生、教师、工业科研人员和工程师、失效分析工程师及律师等。本书的内容涉及多个领域，特别是与材料科学及其相关学科有着密切的关系，例如物理学、化学、工程学、仿生学、地球科学、生物学以及考古学等。本书是理解各种固体的形变和断裂行为的基础，同时也是分析断口形貌、设计清晰准确的固体断口试验的基础，这些固体包括传统工程结构材料以及自然形成的固体。

不同行业，甚至同行业的学习者对于断口形貌学的兴趣及其所需了解和分析的深度都是大不相同的，因此，本书涵盖了不同深度的内容以适应不同读者的需要。使用本书时应注意，书中每个章节的前两页提供简介，适用于那些对本学科了解较少的读者，同时还有一幅特征形貌图，突出了本章的重要方面，这是学习本书的第一层次；本书的每一章都使用了大量的线条图和半色调图像，图像的解说都详细描述了在拍摄时所使用的技术手段，这是学习本书的第二层次；章节的主体文字部分则为读者提供第三层次的学习，并通过脚注加以补充，在阅读章节文字时，并不需要阅读下面的脚注；脚注是第四层次的学习，其中包括了章节文字中所使用信息来源的详细情况。本书的最后还有一个列表。

第1章重点介绍了断口形貌学的学科本质，同时明确了学习材料微观结构特

点和形貌细节之间的必然联系，还对断裂力学的主要特征作了简单介绍；第2章用图像方式展示了各种断口，并对断口形貌的主要特点进行了描述，这对于分析断口形貌信息和进行定量测量都是非常必要的，同时还对一些常见形状的断裂面进行了较为浅显的分析和描述，以此介绍断口形貌学中经常使用的主要技术手段；第3章介绍了沿着三维双曲表面扩展的裂纹，这种裂纹是脆性固体断裂的一个显著特征，裂纹的扩展符合“无扭(no-twist)”原则；在第4章中将介绍应力场的效应，这种效应会导致扩展中的裂纹发生“扭曲”，并产生“河流”花样；应力强度和裂纹扩展速度对于断口表面粗糙度的影响将在第5章中介绍，此外还介绍了在不同尺度级别下测量表面粗糙度的方法。

在接下来的三章中，我们将重点放在一些有独特的微观结构和形变特点材料的断口研究上。第6章介绍晶体解理；第7章介绍界面和相间裂纹扩展；第8章介绍延性断裂；第9章介绍了裂纹扩展时，驱动裂纹扩展的条件发生变化所导致的断口表面形貌特点，这些特点是裂纹扩展速度的直接证据，特别在疲劳失效分析时尤为重要；最后，第10章从微观结构分析和失效分析等方面介绍断口形貌学的应用。

本书重点介绍了断口形貌学的原则，这主要涉及扩展裂纹的裂尖区域的应力条件和裂纹区的材料反应之间的相互作用。尽管数学计算和分析过程是本学科发展的基石，但许多基本的理论不需要进行详细的数学计算或者分析就可以理解。本书和基本原理相关，且与所有的固体都相关，对于某种特定材料细节的观察，往往以示例的方式进行。在第6章晶体断裂中，举例说明了广泛适用于多种晶体材料的基本概念。参考文献提供了插图来源的书籍或期刊，特别是断口形貌图集提供了更多的图片。

由于本书重点介绍原理以及决定断口表面形貌的因素，这就影响到了展开有关话题的方式，这些话题包括断裂力学、微观结构和材料、断口表面形貌观察和测量的技术等。所有这些话在本书中都有所涉及，但不是集中于某一个章节，而是分布在全书中。利用这种方式，我们才可能跨越不同材料包括金属、聚合物、陶瓷、生物材料、岩石、复合材料等的边界，形成一个统一的方法和学科的规则。通过这种方式也使得我们可以将对一种材料的深入理解扩展到另外一种材料中去。这里需要特别提一下微观结构，在许多情况下，断口表面的结构细节都是受检材料所独有的。我们假定读者已经具备了一些关于材料微观结构方面的知识。

附 言

断口形貌学的研究是无止境的，数百年前人们就已经开始了对断口表面的研究。当Clarke的小说3001 *Odyssey*成为现实时，即便是在遥远的星球上，我们

仍需要对结构失效作出评估，开发新的材料，探索物质的内部结构。

上升到更深奥的层次，正如自然界的形式多样激励人们谈论上帝，断裂表面的图案所显示出的独特花样也有它们自己的美丽之处，但是“美存在于欣赏者的眼中”。

我非常清楚，直到 1998 年，有很多非常精彩的有关断口形貌分析的杰作我并没有欣赏到。断口表面的“图像”往往是最重要的实验结果。电子成像技术的出现提供了一个新的有力的工具来帮助我们收集和交换图片，但是也的确存在一个现实的威胁，即获得高品质图像的方法可能会起到相反的作用。

Derek Hull

致 谢

首先,要感谢这 40 多年来和我一起 在哈维尔原子能科学 研究院、利物浦大学以及剑桥大学共同工作的研究生和科研人员。我们共同研究了多种材料,如金属、高聚物、陶瓷、复合材料和生物材料的机械行为。通常来说,断口表面研究只是整个研究项目中很小的一部分,但这部分却非常重要。我指导学生的博士论文为我提供了大量的高质量断口表面图像。同时,我也要向我的同事 Peter Beahan、Peter Beardmore、Tim Bessell、Mike Bevis、Bill Broughton、Brian Cad-dock、John Cordwell、Colin Gatward、Ratan Govila、Linda Hoare、Paul Hogg、Sue Huang、Mark Jones、Maciez Kumosa、Adrian Lowe、Ian Mog-ford、John Murray、Trevor Owen、Nick Price、Yibing Shi、Barry Shortall 以及 Anne Valentine 表示最诚挚的感谢,他们的工作都以图片的形式收录在本书中。我的很多其他的研究生也为本书的编撰作出了贡献,在此也向他们表示感谢,还有一些国内外的博士生也很慷慨地将他们的论文副本发给了我,使我受益匪浅。

在长期的研究工作中,我受到了多个国家和国际基金组织以及工业界合作者的大力支持。正是他们的捐助才使得这项研究可以继续下去。另外,我和工业界的一些同事之间的交流也是非常重要的,他们对我的研究方向有很大的影响。要特别提一下我在利物浦大学和剑桥大学的同事们,校园生活的一个乐趣就在于能有机会和许多有天赋的人一起讨论所研究的问题,他们的友谊和支持给了我很大的帮助,我要对这些人说一声谢谢。

本书中的一些重要的观察例子来自全世界不同的研究者。许多科学家和工程师都是我的好朋友,他们不辞劳苦地找出图像的原始文件,并慷慨地同意我复印使用这些图像,这对这本书的编撰有很大的帮助。相关的细节都在本书中有所记载。我特别要对以下人员表示谢意: Edgar Andrews、Ron Armstrong、Harry Bhadeshia、Tony Ball、Cedric Beachem、Ed Beauchamp、Mike Bevis、Paul Bowen、Norman Brwon、Jim Castle、Bill Clegg、John Currey、Athene Donald、John Field、Harvey Flowers、Klaus Friedrich、John Gilman、D. Heikens、Bernard Hockey、Vyvyan Howard、Pentti Kettunen、Wolfgane Knauss、Takao Kobayashi、Brian Lawn、Jack Mecholsky、Dale Meyn、David Oakley、Roy Rice、Rob Ritchie、Joachim Schneibel、Martin Seah、Yukka Seppälä、Don Shockey、Philip Shuff、Erwin Sommer、Kiyoshi Takahashi、Roy Taylor、Tom

Thomas、Alexander Vasilev、Julian Vincent、Mark Welland、R. G. Whalley、David Williams、Mitchell Winnik、Bob Young 以及 Jie Zhang。我还要特别感谢 M. M. Plueddemann 女士，她非常慷慨地允许我使用 Ed Plueddemann 著作中的图像。

本书中使用的许多图像都是曾经在科学书籍和杂志上发表过的，图像的来源在书中有所说明。我非常感谢下列出版社能允许我使用和复制这些图像：图 5.20——学术出版社 (Academic Press)；图 9.21——美国陶瓷学会；图 10.14——美国化学会；图 6.10(a)——美国物理联合会；图 5.13、图 8.17、图 8.40 和图 8.41——美国材料信息学会；图 4.31、图 5.15 和图 9.1——美国试验与材料学会国际组织；图 1.5(a)(i)、图 1.5(a)(ii)、图 4.16、图 5.16、图 7.4(d)、图 9.10 和图 10.32 (a)——爱思唯尔出版社；图 2.2——芝加哥大学出版社；图 9.24——美国地质协会；图 8.23——Inderscience 有限公司；图 10.5——国际理论和应用化学联合会；图 6.34 和图 6.38——IRSID 联盟；图 9.8——日本应用物理杂志；图 1.5(c)(ii)、图 4.14(a)、图 4.21(b)、图 7.15、图 7.16、图 8.43 和图 10.33——Kluwer 学术出版社；图 10.44——英国材料学会；图 10.20——美国矿物、金属和材料学会；图 7.19——Steinkopff 出版社；图 5.1(a)、图 5.24、图 6.17、图 8.8、图 8.16 和图 9.2——泰勒-弗朗西斯出版集团；图 6.16——La Revue de Métallurgie 出版社；图 2.1、图 7.18(a)、图 8.38 和图 10.7——英国皇家学会；图 10.6——约翰威立父子出版公司。

本书中使用的一部分图片是公有数据，出版时不需要经过有关方面的许可。但是我还是要感谢美国陆军、美国海军研究实验室和美国国家航空航天局(NASA)提供给我这样的机会，让我可以得到这些数据。书中对这些图像的来源进行了说明。

第 4 章的引语部分得到了以下单位的许可：Alfred A. Konpf 公司(除英联邦以外的所有国家)、Harold Ober 协会(英联邦)。第 6 章的引文部分的使用得到了以下单位的许可：Faber and Faber 公司(除美国以外所有国家)、Farrar、Straus 和 Giroux(美国)。

最后，我要特别感谢不辞辛苦阅读全部或部分书稿并对最终成稿作出贡献的所有人。特别是 Brian Caddock、Frank Noble 和 Walter Owen。Elizabeth Yoffe 也通读了草稿，我非常感谢她在本书撰写期间表示出的兴趣和热情。与剑桥大学出版社的同事们的交流也起到了非常重要的作用，在此对他们一并表示感谢。

Derek Hull

目 录

《材料腐蚀丛书》序

中文版序

译者的话

简介

序

致谢

第 1 章 断口表面形貌观察、测量和分析的有关概念	1
1.1 观察的角度	1
1.2 尺度问题	6
1.2.1 概述	6
1.2.2 分形几何学	9
1.2.3 微观结构尺寸和应力场	12
1.3 什么是裂纹	13
1.4 裂纹的起源	16
1.4.1 引言	16
1.4.2 形变导致的裂纹形核	17
1.4.3 裂纹形核的其他问题	20
1.5 裂纹的力学和微观力学	22
1.5.1 引言	22
1.5.2 椭圆孔和裂纹周围的应力场	23
1.5.3 裂纹扩展的 Griffith 和 Irwin 临界条件	26
1.5.4 其他问题	31
第 2 章 观察、描述和测量断口表面形貌:相关基础以凯顿石为例	33
2.1 正确观察三维形貌图的方法	33
2.2 历史概要	35
2.3 什么是凯顿石	40
2.4 Hooke 的观察	41
2.5 光学显微镜	42
2.5.1 肉眼观察	42
2.5.2 概述	43

2.5.3	分辨率和景深	44
2.5.4	几何学的问题	47
2.5.5	照明(度)	48
2.6	光学截面和断口形貌细节的定量描述	49
2.7	共焦扫描光学显微术	54
2.8	SEM	55
2.8.1	概述	55
2.8.2	二次电子像和背散射电子像	57
2.8.3	分辨率、放大率和景深	59
2.8.4	几何学方面的问题	60
2.9	SEM 和凯顿石	61
2.10	断口表面研究的其他实验步骤	67
第3章	倾斜裂纹	68
3.1	双曲线型平滑曲线裂纹的演变	68
3.2	加载模式	73
3.3	几何约束	75
3.3.1	倾斜和扭转的定义	75
3.3.2	形成平滑表面的裂纹扩展	78
3.3.3	裂纹扩展的实验观察	79
3.4	在混合模式 I-II 下的裂纹扩展或演变	82
3.5	裂纹弯曲	87
第4章	河流花样	90
4.1	河流花样的断口形貌特征	90
4.2	晶体解理面上河流花样的形成	93
4.2.1	裂纹和螺型位错相交形成的台阶	93
4.2.2	晶体固体中的台阶高度的增大	101
4.3	非晶脆性固体中的河流花样;Sommer 实验	102
4.4	应用干涉光学显微镜测量断口表面形貌	111
4.5	不同固体中河流花样的实例	113
4.6	河流花样台阶的形核	118
4.7	台阶的分离	118
第5章	镜面区、雾状区和锯齿带:表面粗糙度、开裂速度和动态应力强度	121
5.1	镜面区、雾状区和锯齿带的含义	121
5.2	粗糙度分布图的测量得到断口表面形貌	129
5.2.1	Takahashi 和 Arakawa 的实验	129