

学术前沿研究

岩石(土)类材料 拉张破坏有限元法分析

王来贵 赵 娜 刘建军 李天斌 ◎著

Y

ANSHI(TU)LEICAILIAO
LAZHANGPOHUAIYOUXIANYUANFAFENXI



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

学术前沿研究
辽宁省教育厅高校科技专著出版基金资助

岩石（土）类材料 拉张破坏有限元法分析

王来贵 赵 娜 刘建军 李天斌 ©著



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

图书在版编目(CIP) 数据

岩石(土)类材料拉张破坏有限元法分析 / 王来贵等著. —北京: 北京师范大学出版社, 2011.9

(学术前沿研究)

ISBN 978-7-303-13009-2

I. ①岩… II. ①王… III. ①岩石破裂—有限元分析
IV. ①TU452

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 107355 号

营 销 中 心 电 话 010-58802181 58808006
北师大出版社高等教育分社网 <http://gaojiao.bnup.com.cn>
电 子 信 箱 beishida168@126.com

出版发行: 北京师范大学出版社 www.bnup.com.cn

北京新街口外大街 19 号

邮政编码: 100875

印 刷: 北京京师印务有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 155 mm × 235 mm

印 张: 12.75

字 数: 218 千字

版 次: 2011 年 9 月第 1 版

印 次: 2011 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 32.00 元

策划编辑: 胡廷兰 责任编辑: 胡廷兰

美术编辑: 毛 佳 装帧设计: 毛 佳

责任校对: 李 菡 责任印制: 李 啸

版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话: 010-58800697

北京读者服务部电话: 010-58808104

外埠邮购电话: 010-58808083

本书如有印装质量问题, 请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话: 010-58800825

国家自然科学基金重点项目(50434020)资助

国家自然科学基金面上项目(10972096)资助

地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放研究
基金资助项目(DZJK-0809)资助

辽宁省教育厅高等学校创新团队项目(2007T076)资助

辽宁百千万人才工程项目(2008921035)资助

摘 要

岩石(土)类材料具有低抗拉的力学特性。岩石(土)工程在拉应力作用下会发生拉张破裂,形成不连续面,出现严重的变形不协调;进而岩石(土)工程结构在实质上发生改变,相应地应力状态也重新调整。在分析了岩石(土)类材料拉张破坏现象的力学特征的基础上,建立了岩石拉张破坏的基本理论;以有限元法为基础,对岩石试件及岩石工程的拉张破坏演化过程进行模拟,对岩梁、巴西盘、圆孔、圆环、雁列式断层等最基本的岩石力学问题破裂过程进行分析;同时对软岩边坡、地下开采等工程引起的拉张破裂现象也进行了初步研究。可作为工程力学、岩土工程、采矿工程、工程地质、环境地质、灾害防治等专业的科技人员、全日制在校本科生、研究生的参考用书。

前 言

岩石(岩块)是复杂的天然介质,表现为非均匀性、非连续性、各向异性、与时间相关性等特征。岩石内部可充填水、油等液体或空气、二氧化碳、瓦斯、天然气等气体。因此,岩石是由固体、液体和气体三相介质组成的。在物理、化学甚至生物等外界环境的耦合作用下,岩石的物理、力学性质非常复杂。岩体一般由岩石和结构面组成,含有节理、层理、断层等结构缺陷,因此通常岩体的强度远远低于岩石强度,岩体变形远远大于岩石本身,岩体的渗透性远远大于岩石的渗透性;同时岩石与岩体的力学性质随时间的推移而变化。在开挖、回填、构筑等人为活动中,形成了大量的岩石工程或岩体(土)工程;开挖、回填、构筑过程使得岩石工程结构不断发生变化和调整,形成了诸如采矿、掘进等特殊的岩石工程,这种工程结构的变化是非线性的;在复杂的外界环境作用下,岩石工程的演化特性、演化过程是岩石力学工作者关心的研究课题。

岩石(土)类材料包括岩石、土、混凝土等,该类材料的物理、力学特性类似,均具有低抗拉的力学特性。一般情况下,岩石的抗拉强度仅为抗压强度的十分之一左右。由于岩石拉张破坏引发的工程灾害常常见到,如露天采矿边帮出现裂缝、地采引起地裂缝等。静力处于受压状态的岩土工程,在地震惯性力作用下就可能受拉;动力加速度幅度越大,受拉应力水平越高、范围也越大。拉张破坏是控制岩石工程稳定性的重要因素之一。

岩石(土)类介质的抗压、抗拉强度等特性差异很大,拉、压规律完全不同;岩石工程在拉应力作用下发生拉张破裂,由连续介质演化为非

连续介质,形成不连续面,变形出现严重的不协调,并且拉张破裂形成不连续面后,岩石(土)工程结构实质上发生了改变,相应地,应力状态也要重新调整。岩体拉张破裂形成不连续面,数学分析首先要突破连续性的假设,这存在很多困难。为了分析方便,传统的分析方法只能假设岩石的拉、压性质符合同一演化规律,为各向同性的连续介质。因此考虑拉、压性质不同及拉张破坏形成不连续面的分析方法,不仅仅是突破描述岩石破坏方式的问题,更是认识岩石为什么会破坏、如何破坏的科学问题,是岩石力学工作者研究的关注热点。

因此,本研究相继在国家自然科学基金重点项目(50434020)、国家自然科学基金面上项目(10972096)及地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室“科技减灾、重建家园”开放研究基金资助项目(DZKJ-0805)等的资助下,充分分析了岩石拉张破坏现象的力学特征,建立了岩石拉张破坏的基本理论,并以有限元法为基础编制程序,对岩石试件及岩石工程的拉张破坏演化过程进行了模拟。

岩石工程各式各样,岩石的力学性质千差万别,但拉应力的存在使得岩石工程拉张破坏的可能性大大增加。因此在岩石工程演化过程分析中,必须优先考虑拉张破坏,分析拉张破坏后的不连续状态与岩石工程应力状态的重新调整,这就是本研究的重点。

本书由辽宁工程技术大学王来贵教授统稿,第1章由王来贵、李天斌编写,第2章由王来贵、刘建军编写,第3章至第7章由赵娜编写。另外,感谢北京火箭软件公司给予本书中软件方面的帮助。感谢张立林、初影、曹彦彦、李磊、吕连君、白羽、危烽等对本书数值计算方面所做的工作。

由于作者水平所限,本书难免存在缺点和错误,敬请读者不吝指正。

王来贵
2010年9月

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 工程背景	(1)
1.2 研究背景	(7)
2 岩石拉张破坏的力学机理	(10)
2.1 岩石的特征单元分析	(10)
2.2 岩体中的应力状态	(13)
2.3 岩石的强度	(14)
2.4 岩石的变形破坏机理分析	(18)
2.5 岩石拉张破坏的判据	(24)
3 有限元模拟岩石拉张破裂的基本理论	(27)
3.1 有限元法的基本原理	(27)
3.2 二维弹性平面应力的有限元方程	(30)
3.3 岩体动力学问题求解方法	(32)
3.4 拉张破坏的开裂准则	(41)
3.5 程序框图	(41)
3.6 节点平均应力的计算	(45)
3.7 三节点三角形常单元开裂	(46)
3.8 裂纹贯通处理	(48)
3.9 开裂引起的畸形网格处理	(50)
4 岩石拉张破坏的基本算例	(53)
4.1 简支梁拉张破裂过程模拟	(53)
4.2 混凝土预制缺口梁试件断裂数值模拟	(54)

4.3	预制缺口梁铰支座下的拉张破裂过程模拟	(57)
4.4	巴西盘对径受压破坏过程模拟	(61)
4.5	圆孔结构变形破坏过程模拟	(63)
4.6	圆环结构破坏过程模拟	(65)
4.7	雁列式断层结构变形破坏过程模拟	(68)
5	工程简例	(73)
5.1	硐室拉张破坏的有限元数值模拟	(73)
5.2	岩(煤)体注水或注气过程的有限元数值模拟	(84)
5.3	拉张型冲击地压的有限元数值模拟	(97)
5.4	孤岛煤柱拉张型冲击地压的发生机理及数值模拟	(103)
5.5	煤层开采后顶板及地表拉张破裂的数值模拟	(106)
5.6	软岩边坡拉张破坏的有限元数值模拟	(129)
5.7	强震作用下边坡拉张破裂的有限元数值模拟	(131)
5.8	煤矿开采引发山体滑坡拉张破裂的数值模拟	(138)
5.9	不同坡角对重力坝坝踵裂纹扩展的影响	(142)
5.10	偏心加载 T 型桥拉张破坏的有限元数值模拟	(150)
5.11	岩桥破裂的数值模拟	(155)
5.12	路面结构局部松散对路面破裂的影响	(159)
5.13	残煤自燃诱发滑坡过程的数值模拟	(163)
6	岩石拉张破坏的问题探讨	(179)
6.1	不同约束对岩石破裂的影响	(179)
6.2	抗拉强度不同对岩石破裂的影响	(181)
6.3	不同加载方式对岩石破裂的影响	(182)
6.4	岩石试件拉张破裂过程中的结构调整	(185)
7	结论及展望	(190)
	参考文献	(192)

1.1 工程背景

岩土工程破坏的基本形式主要分为两种,即剪破坏和拉破坏。剪破坏的特征是岩土工程在外界环境作用下,形成一个剪切带,该剪切带最终可能形成滑移面。而岩土工程拉破坏的特征是岩(土)体在外界环境作用下形成拉张破裂面,存在明显的拉张贯通性开张裂口。该破裂面张口宽度从毫米级到米级,长度达几百甚至上千米。近年来,随着岩石工程的大规模建设,拉张破裂现象越来越多,如公路边坡破裂、露天开采边帮开裂、地采诱发的地裂缝、地震导致的地裂缝等。地裂缝的出现可进一步诱发新的灾害,如滑坡、地表不均匀下沉、地下水位下降、地下采矿透水事故等,造成巨大的经济损失和安全隐患。本节将介绍岩土工程中常见的拉张破裂现象。

1.1.1 边坡滑塌及其引起的地裂缝

如图 1-1、图 1-2、图 1-3 为阜(新)朝(阳)高速公路边坡滑体拉裂。图 1-1 所示为 2006 年 12 月 25 日该挖方段大部分地段开挖至设计标高时,路线右侧边坡发生滑塌及局部崩塌,坡顶出现多处地裂缝,施工暂停。图 1-2、图 1-3 为阜(新)朝(阳)高速公路边坡挖方段山前斜坡前缘,坡率 1:1.5;边坡已开挖形成,坡面地层为二元结构,上部为基本为黄~红色黏性土,下部为风化泥页岩;在开挖排水边沟时,左侧出现长约 20 m 边坡滑塌,距离挖方边坡坡顶线约 40 m 处出现弧形拉张裂缝。

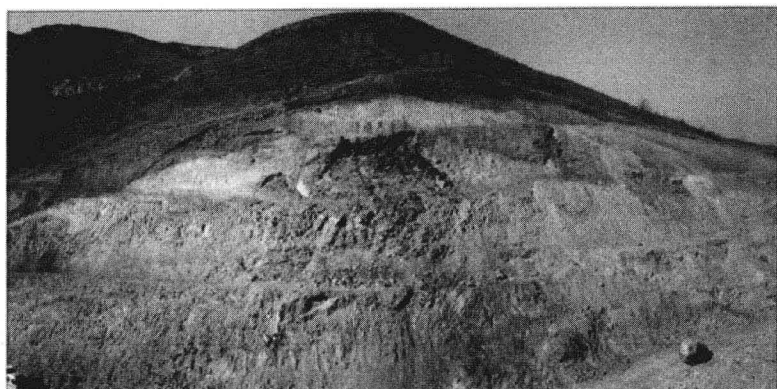


图 1-1 阜朝高速公路边坡滑塌现场

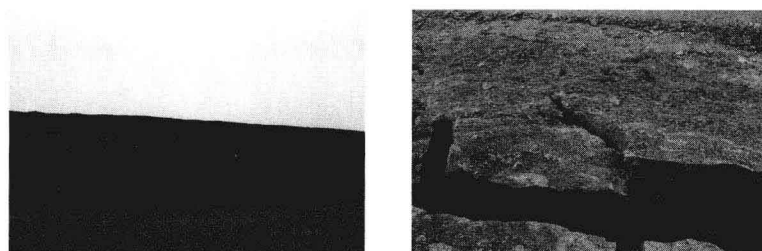


图 1-2 阜朝高速公路边坡滑体拉裂

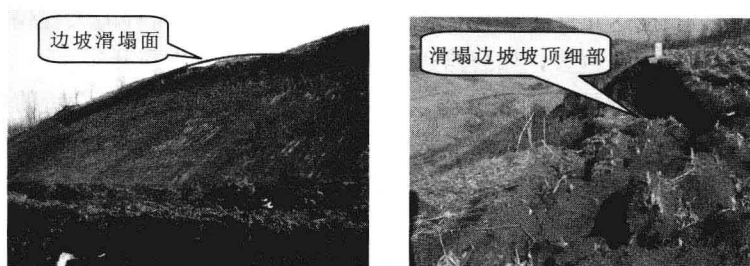


图 1-3 阜朝高速公路边坡滑塌现象

1.1.2 地面沉降引起的房屋拉裂

煤层开采后，在地下形成大面积的采空区，由于重力等作用使地表常常发生不均匀的地面沉陷、塌陷，地表房屋等建筑物地基的不均匀沉陷、地表塌陷引起开裂。图 1-4 为阜新矿区地表不均匀沉降引起的房屋开裂。

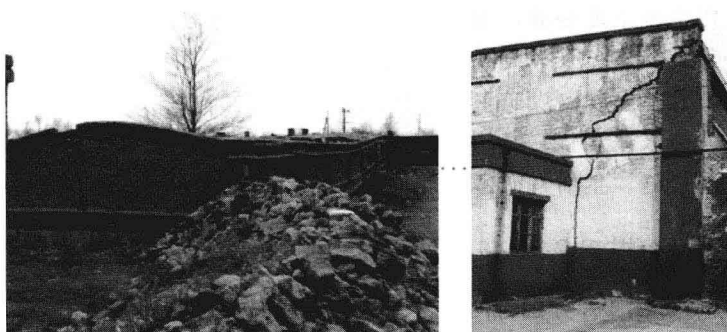


图 1-4 地面沉降引起的房屋开裂

1.1.3 煤矿开采引起的地表拉张破裂

图 1-5 为阜新矿区地下开采诱发的地裂缝，最宽处为 43 mm，长达 450 m。在开采深度较浅的矿区，地裂缝地质灾害非常常见。

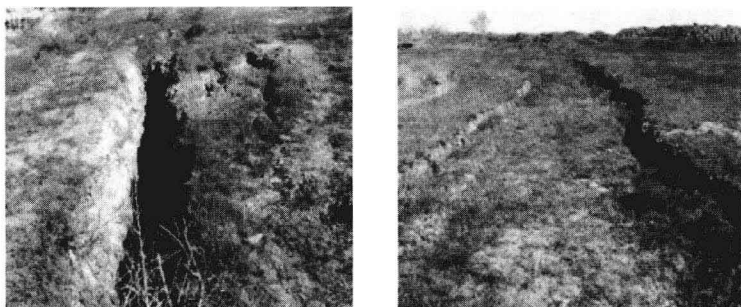


图 1-5 阜新矿区采沉地裂缝

图 1-6 为辽宁葫芦岛市建昌县冰沟煤矿采沉地裂缝，冰沟煤矿位于山区，采区地面沉陷区面积 4.87 km^2 ，严重塌陷坑 7 处，沟谷两侧的

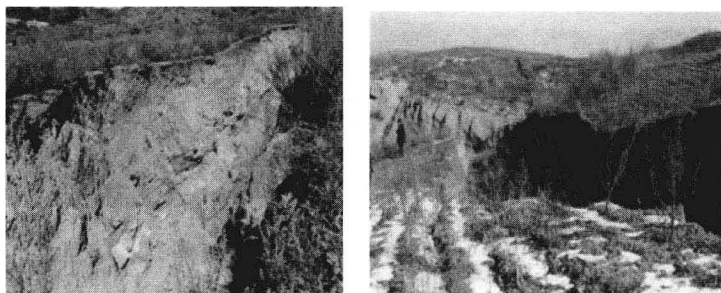


图 1-6 建昌县冰沟煤矿采沉地裂缝

山坡上伴生多条地裂缝，裂缝群集分布，地裂缝 15 条，总长 4 500 m，最长一条折线型，长 530 m，宽 0.4~3 m，最大深度大于 14 m。1998 年，有 2 人掉入冰沟煤矿 1 井一处地裂缝中死亡；2008 年 7 月，又有表兄弟 2 人掉入冰沟煤矿 1 井另一处地裂缝中死亡。此外，还先后有 15 只羊跌进裂缝。生活在矿区的居民生命财产受到严重威胁。

1.1.4 煤矿露天开采诱发的边帮地裂缝

图 1-7、图 1-8 分别为内蒙古胜利一矿和内蒙古白音华二矿边帮裂缝。这些矿区的工程地质环境条件特殊，其特征是煤炭赋存在第四系沙砾土、第三系红黏土及泥质软岩中。由于第四系沙砾土、第三系红黏土及泥质软岩形成的边坡强度低、渗透性差、含水(冰)量大，春天冰雪消融，致使露天矿在仅仅达到设计深度的五分之一开始、远未达到设计深度和坡度的情况下发生大规模地裂缝并诱发滑坡，造成长时间停工停产，生产成本增加，经济效益下降，并对国家的财产和工人生命安全构成严重威胁。

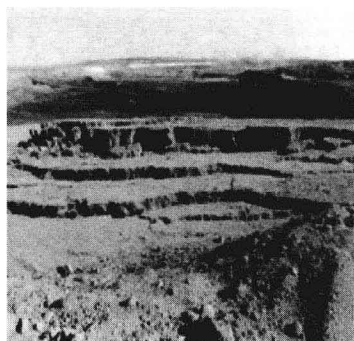


图 1-7 内蒙古胜利一矿边帮裂缝



图 1-8 内蒙古白音华二矿边帮裂缝

1.1.5 强震引起的拉张破裂

图 1-9、图 1-10 分别为强震诱发的地裂缝和斜坡拉张断裂图。静力状态下不可能破裂的地面和斜坡，在地震惯性力作用下拉张破坏，形成明显的地裂缝，甚至被抛出，如图 1-11 所示。

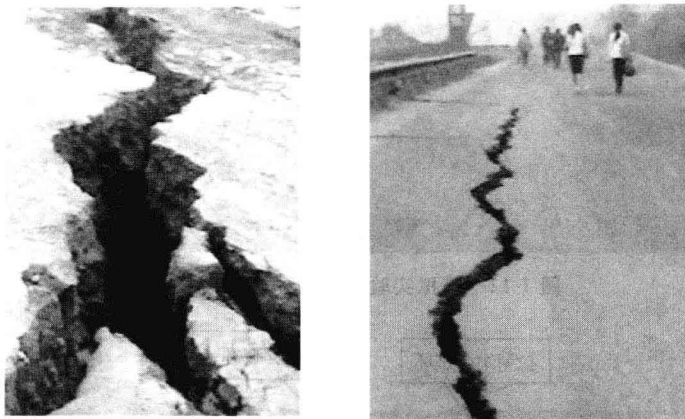


图 1-9 强震诱发的地裂缝(汶川地震照片)

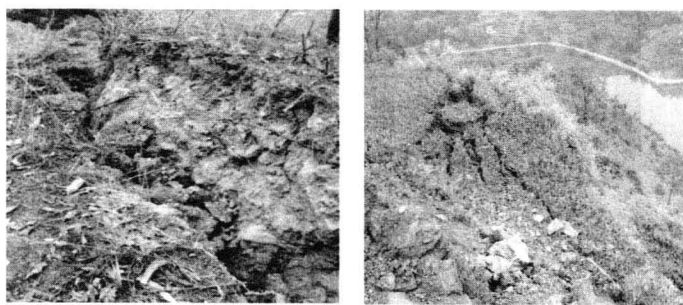


图 1-10 强震诱发斜坡拉张断裂(汶川地震照片)



图 1-11 强震诱发斜坡拉张断裂后抛出(汶川地震照片)

1.1.6 开采模拟实验中的拉张破裂

模拟实验中，可看出明显的拉张破坏现象。在如图 1-12 描述的地下开采模型实验中，煤层顶板破裂及形成离层，图 1-13 为顶板岩石的拉破坏现象。

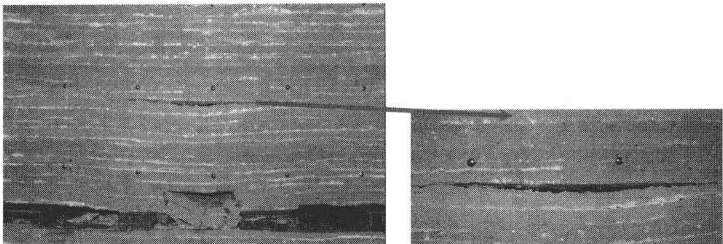


图 1-12 模拟实验中煤层顶板破裂及离层

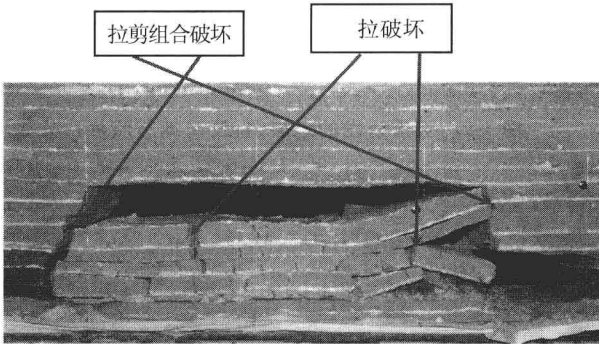


图 1-13 模拟实验中顶板岩石的拉破坏现象

图 1-14、图 1-15 分别是平朔安太堡露天矿和阜新海州露天矿露井联采相互影响的模拟实验。实验中可明显地看出露井联采可导致地表和岩层中的拉张破坏现象。

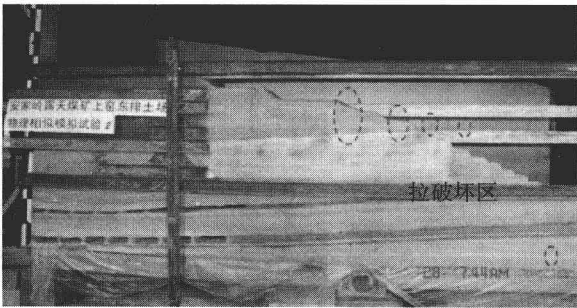


图 1-14 露井联采模拟实验(平朔安太堡露天矿)



图 1-15 露井联采模拟实验(阜新海州露天矿)

研究岩石工程拉张破裂规律,模拟岩石工程受拉破坏的过程,对于揭示岩体破坏的宏观力学现象及细观机理,评价岩石以及岩石工程的安全状态,了解岩石类材料的结构稳定性并给出合理的支护措施,都具有重要的理论意义和应用前景。同时,研究岩石受拉破坏过程和演化规律,对工程实践至关重要,可为岩石工程的安全施工和提高经济效益提供借鉴。

1.2 研究背景

材料破坏过程的模拟一直是固体力学研究中的热点,围绕这一话题,尤其是非连续介质的破坏模拟,目前仍然存在很多问题,如结构离散带来的尺度效应、材料非连续性的表征、破坏准则的选取、材料破坏后的几何描述等。

有限元方法是目前应用最为广泛的数值方法之一,由于该方法基于连续性假设,早期的有限元方法主要用于描述和计算连续介质。为了将有限元方法应用于岩体等非连续介质,R. E. Goodman 等^[1~2]、O. C. Zienkiewicz 等^[3]、J. Ghaboussi 等^[4]、M. G. Katona^[5]、C. S. Desai 等^[6]相继提出了各式各样的断裂单元(fracture element)。断裂单元的应用在很大程度上推动了有限元方法的发展,但是限于小位移和断裂面不可分离,因此其在处理破坏裂纹扩展方面存在一定的局限,另外,过多的断裂单元还会带来刚度矩阵的病态问题。

为了克服上述困难,使有限元方法更好地模拟破坏问题,一些学者在采用非连续形函数的基础上提出了强化有限元方法(enriched FEM),T. Belytschko 等^[7~8]、C. Daux 等^[9]、J. Dolbow 等^[10]在这方面做了很多工作。C. A. Duarte 等^[11~12]和 T. Strouboulis 等^[13~14]又在此基础上,

结合材料不均匀性和非线性的处理,发展了广义有限元方法(generalized FEM)并将其应用于非线性断裂分析。

1993年王来贵^[15]等从岩石拉伸流变失稳的基本概念出发,建立了描述岩石拉伸流变失稳的模型,推导了有限元公式,模拟了在煤层开挖过程岩梁初次来压拉伸流变失稳的过程,在国内首次以拉伸破坏模拟岩石破裂,如图1-16所示。2007年4月王来贵、赵娜等^[16]以岩石拉破坏的理论为基础,利用有限元方法引入裂张单元的概念,给出了岩石拉张破裂的四个判据,给出了裂张单元的原理。2007年7月邱峰等^[17]以有限元方法为基础引入一种单元分裂和界面分离技术,采用接触单元表征破坏界面,模拟岩石材料的破坏过程。2007年12月王来贵、赵娜等^[18]又采用实验和可模拟拉张破裂的数值模拟相结合的方法,选取加载面积直径分别为5 mm, 10 mm, 15 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm不同面积载荷作用下的岩石试件破裂数值模拟。史贵才^[19]对脆塑性岩石破坏后区力学特性的面向对象有限元与无界元耦合模拟进行了研究。郭子红等^[20]对单轴压力作用下岩石破坏机理进行了分析。张德海等^[21]用梁—颗粒模型对岩石单轴拉伸破坏过程进行了数值模拟。

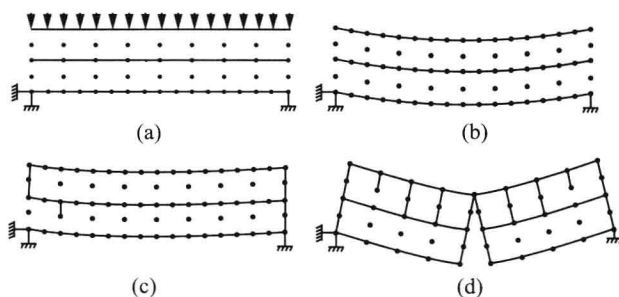


图 1-16 岩梁破坏过程图

岩石破坏是一个复杂的非平衡、非线性的演化过程。以往数值模拟分析的目的往往是为了得到一个满意的初始应力场、变形场或者最终受力结果,随着计算环境的改善和实际问题客观要求,岩石破裂过程分析正在转向整个结构和演化过程的全景模拟。

在岩石力学的分析中,传统的分析方法是将岩石介质视为各向同性的连续介质,对于原始岩石介质就为不连续面或破坏后形成了不连续面,一般在描述、分析和解算方面比较困难,关于拉张破裂分析方法还一直在探讨中。

因此,本研究相继在国家自然科学基金重点项目(50434020)、国家