

任建喜 著

岩石损伤演化机理 CT实时检测

YANSHI SUNSHANG YANHUAJILI CT SHISHIJIANCE

陕西科学技术出版社

TU45

C13

国家自然科学基金资助项目(10202019,10072047)

岩石损伤演化机理 CT 实时检测

任建喜 著

陕西科学技术出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

岩石损伤演化机理 CT 实时检测 / 任建喜著. — 西安:
陕西科学技术出版社, 2003.8

ISBN 7-5369-3660-5

I. 岩... II. 任... III. 岩石—损伤(力学)—机
理—检测 IV. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 054655 号

出 版 者	陕西科学技术出版社 西安北大街 131 号 邮编 710003 电话 (029) 7211894 传真 (029) 7218236 http://www.snstp.com
发 行 者	陕西科学技术出版社 电话 (029) 7212206 7260001
印 刷	西安建筑科技大学印刷厂
规 格	850mm × 1168mm 32 开本
印 张	6.625 印张
字 数	180 千字
版 次	2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月第 1 次印刷
定 价	28.00 元

版权所有 翻印必究

(如有印装质量问题, 请与我社发行部联系调换)

前 言

岩石（体）损伤破坏演化机理试验和理论研究是岩石力学领域的一项基础性前沿课题，岩石（体）损伤力学试验研究对岩体工程稳定性评价和科学合理的支护设计决策具有重要的理论价值和实际意义。目前，在岩石（体）损伤力学研究方面已经取得了众多有价值的成果，但由于问题的复杂性，岩石（体）损伤力学还有很多问题值得深入研究。

由于细观损伤力学试验研究可以为宏观损伤力学的研究提供重要的试验基础，宏细观损伤力学的耦合研究有望在岩体损伤破坏机理研究方面取得突破。近年来，岩石细观损伤力学试验研究受到广泛重视。作为一种重要的细观试验手段，20 世纪 80 年代以来，X 射线 CT 检测技术因具有多层面扫描、可采用国际标准试件、无损检测等优点而受到国内外岩土力学界的广泛关注。作者从 1996 年在中国科学院武汉岩土力学研究所攻读博士学位起即开始从事岩石损伤演化特性 CT 实时检测方面的研究工作。作者利用导师负责总体设计的课题组研制成功的与冻土工程国家重点实验室的西门子 CT 机配套的岩土力学三轴专用加载系统对岩石损伤破坏细观机理进行了较系统地研究，同时，利用 RMT 系列岩石力学多功能伺服试验系统进行了岩石破坏机理宏观试验研究。本书即是在作者博士学位论文的基础上补充完善完成的。

本书共分为 12 章，第 1 章介绍的是国内外研究现状，为便于理解书中的有关内容，在第 2 章和第 3 章中介绍了损伤力学的基本理论和 X 射线 CT 检测技术的基本原理及 CT 机的发展与现状，第 4 章介绍了本书岩石损伤破坏机理试验研究使用的宏细观试验设备的特点和性能，在第 5 章到第 11 章里分别介绍了压缩

荷载、周期荷载、卸载、蠕变载荷作用下岩石损伤破坏全过程宏观试验与本构模型方面的研究成果，第 12 章对本书的内容进行了总结，指出了进一步研究的方向。

本书的内容是作者负责或参加的国家自然科学基金（批准号：10202019，10072047）和冻土工程国家重点实验室基金（9802，200003）的部分研究成果。在此对国家自然科学基金委员会和冻土工程国家重点实验室表示衷心的感谢！

本书的 CT 试验是在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室 CT 室完成的，试验期间得到了该室领导程国栋院士，朱元林研究员，马巍研究员的大力支持，CT 室的蒲毅彬高工、廖全荣、冯小太工程师等牺牲大量休息时间，协助完成了 CT 试验工作。本文的岩石力学宏观试验是由上海交通大学岩土力学与工程研究所蒋宇硕士和卢允德硕士协助完成的。书中的部分插图由罗英博士协助绘制。作者对他们的大力支持和帮助深表谢意。

衷心感谢作者的硕士导师刘怀恒教授和博士生导师葛修润院士，他们将作者引入了岩土工程的大门。本书的内容渗透着导师的心血，他们活跃的学术思想、敏捷的思维、敏锐的洞察力及严谨务实的作风，使作者受益匪浅，将成为作者人生的典范。

需要指出的是，岩石损伤演化过程 CT 实时检测技术刚刚起步，CT 试验费用昂贵，在试验系统的完善和试验结果分析手段的提高方面还有大量工作要做。本书的成果是初步的，有大量的问题值得深入研究。由于作者水平有限，书中难免错误和疏漏，敬请读者批评指正。

作者

2003 年 7 月于西安

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 岩石损伤力学研究进展与评述	(3)
1.3 岩体损伤力学研究进展与评述	(8)
1.4 岩石损伤 CT 检测技术的国内外现状	(13)
第2章 损伤力学基本理论	(15)
2.1 概述	(15)
2.2 损伤及其分类	(15)
2.3 损伤力学及其分类	(16)
2.4 连续介质损伤力学基本理论	(18)
2.4.1 连续介质损伤力学的热力学基础	(18)
2.4.2 等效性假设	(18)
2.4.3 损伤变量	(23)
2.4.4 损伤的测量	(24)
2.4.5 损伤演化方程和损伤本构关系	(24)
2.5 几何损伤力学基本概念	(26)
2.5.1 概述	(26)
2.5.2 损伤张量	(26)
2.6 岩体损伤有限元法基本公式	(27)
第3章 CT 检测技术基本原理与 CT 机	(29)
3.1 概述	(29)
3.2 计算机断层扫描的基本原理	(29)
3.2.1 CT 技术基本理论	(29)

3.2.2	有关 CT 的技术术语	(33)
3.2.3	CT 机的部件和功能	(37)
3.2.4	CT 机的工作步骤	(41)
3.2.5	CT 机的一些特殊功能	(41)
3.2.6	CT 机的发展	(42)
3.3	冻土工程国家重点实验室的 CT 机	(43)
第4章	宏观试验设备	(47)
4.1	概述	(47)
4.2	RMT-150B 型岩石力学多功能试验系统	(47)
4.2.1	独特的结构	(47)
4.2.2	先进的设计技术	(48)
4.2.3	多种功能	(48)
4.2.4	技术指标	(48)
4.3	岩土力学 CT 专用加载设备	(49)
4.3.1	岩土力学 CT 加载专用装置的基本要求	(49)
4.3.2	岩土力学 CT 三轴专用加载系统	(50)
第5章	压缩荷载作用下岩石损伤演化机理试验研究	(57)
5.1	概述	(57)
5.2	单轴压缩荷载作用下砂岩损伤扩展机理 CT 试验	(58)
5.2.1	试验概况	(58)
5.2.2	结果分析	(58)
5.2.3	单轴压缩时砂岩损伤扩展细观规律	(69)
5.3	三轴压缩荷载作用下砂岩损伤扩展机理 CT 试验	(72)
5.3.1	试验概况	(72)
5.3.2	试验数据分析	(73)
5.3.3	三轴压缩时砂岩损伤扩展细观规律	(81)

5.4	三轴压缩荷载作用下南桥煤岩损伤扩展机理 CT 试验	(83)
5.4.1	试验概况	(83)
5.4.2	结果分析	(86)
5.4.3	三轴压缩时南桥煤岩损伤扩展细观规律	(89)
5.5	损伤变量的定义	(90)
5.6	裂纹宽度的估算方法	(95)
5.7	CT 数减小率	(98)
5.8	单轴压缩时铜川砂岩损伤扩展机理试验分析	(98)
5.8.1	铜川砂岩损伤演化 CT 试验概况	(98)
5.8.2	结果分析	(99)
5.8.3	铜川砂岩损伤扩展机理	(103)
5.9	三轴压缩时陕北红砂岩损伤扩展机理试验分析	(104)
5.9.1	试验概况	(104)
5.9.2	结果分析	(105)
5.9.3	陕北红砂岩损伤扩展机理	(109)
5.10	小结	(110)
第6章	岩石损伤演化方程与损伤本构模型研究	(112)
6.1	概述	(112)
6.2	单轴压缩岩石损伤本构模型及损伤演化方程	(113)
6.2.1	准线性阶段	(113)
6.2.2	损伤开始演化和稳定发展阶段	(114)
6.2.3	损伤加速发展阶段	(116)
6.3	三轴压缩岩石损伤本构模型及损伤演化方程	(117)
6.3.1	准线性阶段	(118)
6.3.2	损伤开始演化和稳定发展阶段	(118)
6.3.3	损伤加速发展阶段	(119)

6.4	小结	(120)
第7章	卸载作用下岩石损伤破坏机理试验研究	(122)
7.1	概述	(122)
7.2	三轴压缩砂岩卸围压破坏机理 CT 分析	(123)
7.2.1	试验概况	(123)
7.2.2	结果分析	(125)
7.3	三峡裂隙花岗岩卸载损伤破坏全过程 CT 实时试验	(128)
7.3.1	概述	(128)
7.3.2	试样	(128)
7.3.3	试验方法	(129)
7.3.4	结果分析	(129)
7.4	小结与讨论	(135)
第8章	岩石的矿物鉴定和薄片分析试验	(137)
8.1	概述	(137)
8.2	岩石的矿物鉴定与薄片分析	(137)
8.2.1	X 射线分析结果	(137)
8.2.2	岩矿鉴定	(138)
8.2.3	微观结构的扫描电镜分析	(140)
第9章	岩石疲劳损伤演化机理宏观试验	(143)
9.1	概述	(143)
9.2	单轴压缩岩石破坏全过程试验	(143)
9.2.1	试验方法	(143)
9.2.2	试验结果	(144)
9.3	岩石疲劳破坏机理宏观试验	(146)
9.3.1	试验方法	(146)
9.3.2	轴向应变发展规律	(149)
9.3.3	横向应变发展规律	(156)

9.3.4 体积应变发展规律	(156)
9.3.5 岩石疲劳破坏变形特性的声发射特征	(158)
9.4 小结	(160)
第10章 岩石疲劳损伤演化细观机理 CT 检测	(162)
10.1 概述	(162)
10.2 岩石疲劳破坏机理 CT 试验	(162)
10.2.1 试验概况	(162)
10.2.2 疲劳损伤演化细观机理	(163)
10.3 小结	(170)
第11章 岩石蠕变损伤演化细观机理 CT 分析	(172)
11.1 概述	(172)
11.2 红砂岩单轴压缩蠕变损伤 CT 试验	(173)
11.2.1 试件	(173)
11.2.2 试验条件与方法	(173)
11.2.3 CT 蠕变试验结果分析	(175)
11.3 小结	(180)
第12章 结语与展望	(182)
12.1 小结	(182)
12.2 讨论	(185)
参考文献	(188)

第1章 绪论

1.1 概述

在矿山、水利、交通、国防、能源、人防等众多的岩体工程中,如何评价岩体稳定性,进行合理的支护设计决策,以保证工程的安全建设和营运,是岩土力学领域的一个重要课题^[1]。

在众多的影响岩体稳定性的因素中,岩体中的节理面(宏观缺陷)和微裂纹(微观缺陷)是影响岩体稳定性非常重要的因素。在岩体工程建设和营运的过程中,由于开挖卸荷等因素促使原有的微裂纹发育、扩展直至出现宏观裂缝而失稳的例子已有许多,如法国的马耳帕塞(Malpasset)坝于1959年12月发生的溃坝事故就是由于该坝建在微裂隙发育的片麻岩上,因片麻岩中微裂隙扩展而导致坝踵前沿岩体出现了宽0.4~0.5m的裂缝^[2]。

能否正确评价岩体稳定性取决于对岩体破坏机理的认识程度。岩体破坏机理的研究已取得大量成果,但组成岩体的岩石是一种天然材料,其破坏过程受各种复杂因素的影响,对其破坏机理的研究仍需深入进行。

开展岩体破坏机理的研究,进而探寻科学合理的岩体本构模型是一项非常重要的基础性前沿课题。岩石损伤力学试验研究是带有基础性研究特色的重要课题之一,一直被国内外岩石力学工作者所关注。

岩石力学试验主要分为现场原位试验、室内试验和计算机仿真模拟试验。现场原位试验的结果由于能真实反映地质条件、工

程因素等而受到重视,但是由于费用昂贵,只有少部分的重要工程才进行此类试验。室内试验在岩石基本物理力学参数的测定和力学过程研究方面具有重要地位,在进行如蠕变试验、松弛试验、卸荷试验、抗拉试验、抗压试验、疲劳试验时,力学机制明确,便于详细分析研究。随着计算机技术的迅速发展,计算机仿真模拟试验由于价格低廉而受到重视,但是,该试验的基础是必须有准确的模拟参数和合理的本构模型,而本构模型和参数的科学选择还必须依赖室内试验和室外试验的结果。目前来说,室内试验是岩石力学试验中一种不可替代的重要方法。

岩石(体)的破坏是一典型的非线性动力学过程,关于岩石(体)破坏机理的研究已经采用多种手段进行了大量的试验和理论研究,取得了丰硕的成果。由于细观力学的试验结果可以为宏观破坏机理的研究提供重要的试验基础,近年来,岩石(体)细观力学的研究特别是宏细观耦合试验研究开始受到广泛的重视。本书介绍的正是作者通过岩石破坏全过程宏观试验和岩石损伤 CT 实时试验相结合的手段研究岩石损伤演化机理取得的成果。

岩石(体)损伤力学对岩石(体)从微裂纹萌生、扩展、演化到宏观裂纹形成、断裂、破坏全过程进行研究,旨在通过建立岩石(体)损伤本构模型和损伤演化方程,评价岩体的损伤程度,进而评估其稳定性。

损伤力学在岩体工程中的应用成果总体上可以分为两个方面,即岩石损伤力学研究的成果和岩体损伤力学研究的成果,本章即按照上述的成果分类对损伤力学在岩体工程中的应用取得的诸多成果进行评述。限于篇幅,不可尽述,本章仅就一些代表性的成果给以评介。

另外,考虑到本书的重点是 CT 技术在岩石损伤扩展特性检测中的应用,因此在本章的第 1.3 节将岩土损伤力学中 CT 检测技术的应用情况单列出来进行介绍。

1.2 岩石损伤力学研究进展与评述

在岩石损伤力学的研究方面: Dougill 进行了开创性的工作, 他(1976年)最早将损伤力学引入岩石材料^[3]。随后, Dragon (1979年)根据断裂面的概念, 研究岩石的脆塑性损伤行为, 建立了相应的连续介质模型^[4]。Krajcinovic (1981年)运用热力学等理论对岩石类脆性材料的本构方程问题进行了较为全面的研究^[5~6]。

在国内, 谢和平最早从事岩石损伤力学方面的研究, 他基于岩石微观断裂机理和蠕变损伤理论的研究, 把岩石蠕变大变形有限元分析和损伤结合起来, 形成了岩石损伤力学的思想体系^[2]。近年来, 他首次在联系岩石微损伤与宏观断裂方面发展了分形几何, 定量描述了损伤, 提出了分形损伤力学理论^[7~9], 但分形损伤力学在工程应用方面尚有大量工作要做。

岩石损伤本构关系的研究一直是岩石力学工作者关心的内容, 这方面的主要成果有: J. Kemeny 等人(1986年)研究了共线裂纹间的相互影响, 根据裂纹体的等效应变能等于无裂纹体的应变能加上裂纹产生的附加应变能的假设, 推导了单向拉伸时的有效弹模和原始弹模, 给出了损伤模型^[10]。李长春考虑分布微裂纹对岩石材料力学性质的影响, 根据弹性介质假设、小裂纹假设和等效裂纹系假设, 采用自洽方法建立了岩石类脆性材料的细观损伤本构关系(1989年)^[11]。1975年, Gurson^[12~13]在 McClintock^[14]等学者工作的基础上发展了一套比较完整的细观本构模型, 用以描述微孔洞损伤对材料变形行为的影响, 这是细观损伤力学的一个重大进展。卢应发等人(1990年)在 Gurson 从微观到宏观的系统损伤本构理论的基础上, 引入微观应变向宏观应变的转化因子, 得到了岩石损伤本构关系^[15]。王金龙等人

(1990 年)由大理岩破坏过程中裂纹的扩展作用出发,把裂纹引起的体积应变与基体体积应变之比定义为视损伤变量,给出了其与损伤变量之间的关系^[16]。叶黔元(1991 年)将岩石材料分为损伤和未损伤两部分来讨论其自由能特征,引入内蕴时理论,给出了岩石内时损伤模型^[17]。李庆斌等人(1994 年)给出了一个岩石三轴损伤模型,且理论与实验结果较吻合^[18]。周光泉等人(1995 年)将连续损伤与裂纹系统弹性体的有效模量这两个分离的研究领域统一起来加以考虑,把损伤对材料性质的影响分成实际应力的变化和弹性常数的变化两部分,在 Drucker 公设的基础上建立了岩石损伤演化律和损伤本构模型^[19]。李广平(1995 年)将有效场方法用于分析压缩荷载作用下岩石材料的二维和轴对称微裂纹损伤模型,并建立了岩石材料微裂纹损伤的三维 Taylor 模型^[20]。李广平等人(1995 年)提出了真三轴条件下的岩石细观损伤力学模型,建立了岩石损伤演化方程^[21],其主要贡献是考虑了中间主应力对本构关系的影响。吴政等人(1996 年)根据 Weibull 统计理论从唯象学角度出发,推导出岩石在单轴荷载作用下的损伤模型,揭示了临界损伤值与材料固有力学特性的关系^[22]。李皓(1997 年)将金属材料中微裂纹扩展域(Domain of Microcrack Growth)的概念引入岩石损伤本构模型研究中。杨友卿(1999 年)基于岩石材料强度的概率统计特性,结合莫尔准则,给出了三轴应力状态下的岩石损伤本构模型^[23]。朱建明等人(2000 年)给出了基于三轴压缩试验的岩石弹塑性损伤演化方程的建立方法^[24]。刘立等(2000 年)通过实验研究给出了一个复合岩石损伤本构方程^[25]。

在卸载力学机理方面,吴玉山等人(1984 年)研究了大理岩的卸载力学特性^[26]。李天斌等人(1993 年)对玄武岩在卸荷应力状态下的变形破坏特征进行了研究^[27]。尤明庆等人(1998 年)完成了岩石试样的三轴卸围压实验研究,以塑性变形量和本

征强度统一研究了三轴压缩和卸围压两种力学过程^[28]。

陈忠辉等人(1997年, 1998年, 2001年)在岩石微破裂损伤演化过程动态模拟软件开发方面取得不少进展^[29~31]。他们开发的 RFPA-2D 软件基于岩石损伤定义分形维数以描述试样在各种加载条件下微破裂的演化过程, 对各种加载条件下的岩石损伤破坏演化过程进行了数值模拟。

流变是引起岩石发生损伤断裂破坏的一个重要因素。在流变损伤方面, 谢和平对岩石蠕变损伤问题做过研究, Aubertin 等人在本构方程中引入损伤内变量以描述软岩非弹性特性^[32], 受压蠕变和损伤扩展的耦合作用被引入本构方程, Chen 等人通过对盐岩蠕变失效的研究导出了多机制变形耦合本构方程^[33]。软岩的实验研究表明, 蠕变模量与加载率相关, 陈智纯等人(1994年)建立了软岩蠕变损伤方程^[34]。凌建明对岩石蠕变裂纹起裂与扩展进行了损伤力学初步分析^[35]。随后, 孙钧等人(1997年)对三峡船闸闪云斜长花岗岩的细观损伤特性进行了研究, 依据脆弹性岩体的细观损伤理论, 分析了岩石细观时效损伤对高边坡岩体稳定性的影响^[36]。肖洪天等人(1999年)结合三峡工程对岩石裂纹的流变损伤扩展问题进行了研究^[37~38]。

在疲劳损伤特性方面, 莫海鸿(1987年)、吴玉山等(1987年)在循环幅值荷载, 加载波形等因素对岩石疲劳寿命的影响等方面进行过研究。葛修润等(1992年)利用 MTS 电液伺服刚性压力机进行了大量实验研究, 提出了岩石在循环荷载作用下存在疲劳门槛值和疲劳破坏受变形控制等观点^[39]。但有关岩石疲劳破坏细观实验方面的成果并不多见。

在统计细观损伤力学方面, 李宏等人(1999年)根据统计细观力学和系统结构的观点和方法, 从理论上探讨了岩石稳定变形和失稳破坏时的两种尺寸效应机理^[40]。考虑到岩石损伤不仅受岩石内部随机分布的缺陷支配, 还要受岩石内部应力—应变状

态所控制,徐卫亚等人(2002年)基于概率论和损伤力学对岩石在荷载作用下的破坏、损伤和弹塑性变形等特征进行了探讨,提出了完善的弹塑性损伤统计本构模型,其主要特点是:在损伤演化方程中全部采用了有效应力,反映了岩石剩余强度规律,解决了统计弹性损伤本构和塑性本构耦合问题,能反映岩石强度随围压变化等特征,模型参数少,应用方便^[41]。

现有的细观分析往往侧重于采用试验的方法分析微裂纹的发育规律,且取得了比较成熟的结果。从细观分析出发,建立反映岩石宏观力学特征的细观力学模型方面,肖洪天等人取得了一定的进展^[42],他们通过分析双向压应力状态下微裂纹闭合、滑移和扩展引起的变形,建立了脆性岩石的细观力学模型。该模型将岩石的宏观变形分解成三部分:岩石介质的变形,张开裂纹闭合、滑移引起的变形和由于分支裂纹形成产生的变形,将三种机制引起的变形叠加,得到了加载过程中岩石的应力应变关系。

动力损伤问题是岩石损伤力学研究的重要内容,S. Valliappan 等人(1994年)研究了损伤结构构件的动力响应和损伤材料的动力特性问题。结果表明,在动力作用下,损伤结构的频谱变低,损伤材料的阻尼率变高,响应幅度明显增加,由于损伤扩展引起了谐振现象^[43]。高文学等人(2000年)基于实验结果,引入损伤能量耗散率,用能量法则建立了岩石动态损伤演化方程,构造了一个反映岩石冲击压缩和拉伸损伤的理论模型^[44]。金萸等人(2000年)将损伤、渗流及孔隙率演化等相互耦合的有效应力概念引入 Mohr - Coulomb 破坏准则后,对岩石类脆性材料建立了一种动力损伤破坏模型,并将该模型应用于对地震荷载作用下的堤坝和岩基动力损伤的数值分析^[45]。杨小林等人(2001年)在对爆破损伤岩石的力学特性进行实验研究的基础上,得到了不同爆点距离和爆破条件下爆破对岩石损伤作用的规律,并应用岩石弹脆性细观损伤模型,对爆破损伤岩石的细

观裂纹扩展规律及其损伤特性进行了分析^[46]。

由于岩石损伤检测的重要性,许多学者开展了这一方面的工作。许江等人(1986年)采用带有加载装置的光学显微镜对砂岩完成了不同加载阶段的裂纹损伤分析^[47]。另外,Nolen-Hoeksema等人(1987年)也利用光学显微镜进行了岩石裂纹发育的实时观测。卢应发等人(1990年)^[48],张梅英等人(1993年)^[49]完成了大理岩静态和循环荷载试件的电镜分析,凌建明等人(1992年)用扫描电镜进行了不同类型岩石材料的实时加载观测,建立了脆性岩石细观损伤模型^[50]。赵永红(1995年)对大理岩单轴压缩时裂纹随外载增加的变化过程进行了扫描电镜实时观测研究^[51]。另外,张梅英等人(1998年)利用带有最大荷载为2000N的台钳式加压装置的S-570扫描电镜完成了单轴压缩过程中岩石变形破坏机理的研究^[52],吴立新等人(1998年)完成了煤岩损伤扩展规律的实时压缩电镜研究^[53]。上述研究有力地推动了岩石损伤检测技术的发展,为岩石破坏机理的研究起到了积极的作用。但是,客观的讲,带有微型加载装置的光学显微镜和扫描电镜的岩石损伤检测也有其不足之处,因试件太小、卸载、切片扰动、单一观测断面、单轴加载及加载能力的限制等因素的影响(如文[52]采用的加载装置最大压缩荷载为600N,岩样为 $1.5\text{mm} \times 3.0\text{mm} \times 25.00\text{mm}$ 的长方柱体),降低了实验结果的确定性和可靠性,另一方面,这种细观实验的力学机制也不很明确。

在岩石损伤检测方面,声发射(Acoustic Emission,简称AE)技术在岩石损伤破坏机理的研究方面也有许多进展^[54~58]。

核废料储存技术研究是岩石力学的前沿课题之一,有关高温下岩石损伤演化破坏规律的研究已经引起广泛的关注。刘泉声等人(2000年)从花岗岩弹性模量随温度变化的规律入手,提出了热损伤的概念,导出了热损伤演化方程和一维热力耦合弹脆性