



国家自然科学基金青年基金项目(51004042)

国家自然科学基金专项基金、联合基金项目(41027002、51174280)

河南理工大学博士基金项目(B2009-68)

河南省教育厅自然科学基金项目(2010B440003)

# 岩体变形光纤光栅传感检测的 理论、方法及应用

魏世明 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金青年基金项目(51004042)

国家自然科学基金专项基金、联合基金项目(41027002、51174280)

河南理工大学博士基金项目(B2009-68)

河南省教育厅自然科学基金项目(2010B440003)

# 岩体变形光纤光栅传感检测的 理论、方法及应用

魏世明 著

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书以光纤光栅传感原理为基础,研究了岩体变形光纤光栅传感检测的理论、方法及具体的现场应用。主要内容包括:光纤光栅传感的基本特性;岩体变形光纤光栅检测的方法及相关的应变传递理论;岩石单轴压缩光纤光栅传感检测的表面粘贴法;岩体变形光纤光栅传感检测的埋入法,主要针对于相似模拟实验的过程监测;岩体三维应力状态光纤光栅传感检测的方法及相关理论;济宁三号井煤矿风井松散层沉降变形光纤光栅在线监测研究,较为精确地获得了最大变形层位。

本书可作为采矿工程、土木工程、光学及力学专业的教师、研究生和高年级本科生的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

岩体变形光纤光栅传感检测的理论、方法及应用/

魏世明著. —徐州:中国矿业大学出版社,2016.12

ISBN 978-7-5646-2145-2

I. ①岩… II. ①魏… III. ①光纤器件—光电传感器—应用—围岩变形—变形观测—研究 IV. ①P541

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 286181 号

书 名 岩体变形光纤光栅传感检测的理论、方法及应用  
著 者 魏世明  
责任编辑 王美柱  
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司  
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)  
营销热线 (0516)83885307 83884995  
出版服务 (0516)83885767 83884920  
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com  
印 刷 江苏淮阴新华印刷厂  
开 本 880×1230 1/32 印张 6.5 字数 181 千字  
版次印次 2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷  
定 价 35.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



## 前 言

我国是世界上煤矿事故频繁发生的国家之一,而很多重大灾害的发生都是由于人们对煤岩体物理力学行为的认知缺乏。提高监测手段,减少灾害的发生显得尤为重要。鉴于光纤光栅传感技术的独特优点及其广阔的应用前景,借助该项技术检测岩体的变形破坏过程,研究适合于岩体的光纤光栅检测方法,对于提高人们对岩石力学行为及其变形破坏机理的认知具有非常重要的现实意义。

本书由光纤的波动理论出发,以麦克斯韦方程组及光纤光栅传输模式的正交关系为理论依据,推证出了光纤光栅的传输理论,并得到了传感方程。通过对光纤光栅的传感实验,验证了光栅波长与应变及温度之间的线性关系,表明光纤光栅具有良好的测试性能。

提出了光纤光栅传感技术对岩体变形的测试方法,即埋入法和表面粘贴法,其中,埋入法又可分为锚杆封装法、直接埋入法和钻孔注浆法。分析了埋入状态下光纤的受力特征,推导出了光纤与岩体之间的应变传递方程,得出了两者的应变传递关系。建立了光纤光栅表面粘贴时的力学传递模型,推导出了在考虑表面凹槽时的力学传递方程。在光纤及中介质的力学参数已知时,可以求得应变传递系数,通过换算得到岩体真实应变。

研究了采场周围水平应力分布的光纤光栅埋入式检测方法。在相似模型中埋入裸露的光纤光栅,检测采动过程中波长的变化。借助理入法应变传递的分析结果,由波长漂移量得出光栅附近岩体的水平应力,再由多点光栅的测试即可得出应力的分布规律。结果表明,借助光纤光栅可以测出采动影响下水平应力的分布,并通过数值模拟计算验证了测试结果。

采用光纤光栅表面粘贴法对 MTS 伺服机单轴压缩实验过程进行了检测。在试件的轴向和环向分别布置两个光栅,以测试压缩过程中的应变变化。在同一位置附近粘贴应变片,对照实验结果。实验表明,光纤光栅测试效果明显优于应变片及 MTS 的环向应变计,与 MTS 的轴向位移计精度相当。实验说明了光纤光栅优越的测试性能,并验证了所建立表面粘贴模型的正确性。

研究了围岩内部三维应力光纤光栅监测机理及方法,并进行了相关的相似模拟实验。在橡胶基质的立方体表面分别粘贴 3 根与  $x, y, z$  方向平行的光纤光栅,形成了对三维应力敏感的测试结构;以广义胡克定律为基础,推导了光纤应变与岩体应力之间的力学关系,并进行了相关力学标定实验,结果表明,传感器对三维应力具有良好的力学响应特性,与应力平行、垂直方向的灵敏度系数  $\lambda_1, \lambda_2$  分别为  $0.04714 \text{ } \epsilon/\text{MPa}$  和  $0.02184 \text{ } \epsilon/\text{MPa}$ ;对相似模拟实验三维应力变化过程进行了检测,结果表明,传感器可以实现相似模型内部三维应力变化监测,检测结果与实际变化规律相一致,可满足岩体内部三维应力监测的要求。

对济三煤矿风井松散层的沉降变形进行了光纤光栅埋入法检测的应用,光纤光栅的埋入采用钻孔注浆法。分析了使用该方法时光纤光栅传感器与松散层的应变传递关系,得出了波长漂移量与应变的传递系数。经过 8 个月在线监测,获得了大量观测数据,经分析得出了最大沉降变形的层位,为井筒的破坏预测和及时维护提供了依据。

本书是在笔者博士论文的基础上融入近几年的研究成果撰写而成,是笔者近十年研究工作的总结。本书得到了国家自然科学基金青年基金项目(51004042),国家自然科学基金专项基金项目(41027002)、联合基金项目(51174280),河南理工大学博士基金项目(B2009-68),河南省教育厅自然科学基金项目(2010B440003)的资助,在此表示衷心的感谢!

感谢笔者的导师——西安科技大学能源学院的柴敬教授!他开

## 前 言

---

启了笔者科学研究的道路,帮助笔者步入了光纤传感检测的研究领域。本人在学术道路上的点滴进步都离不开恩师的辛勤指导,本书的大部分研究成果也是在恩师的精心指导下完成的。此外,在本人的求学阶段,恩师柴敬教授及师母刘金瑄教授对笔者给予了无微不至的关怀和照顾。在本书成稿之际,谨向恩师和师母表示最衷心的感谢!

本书的第4、5、6章实验是在西安科技大学能源学院的实验室完成的,得到了李毅高级工程师、苏普正高级工程师等的指导和协助;第7章实验完成于河南理工大学相似模拟实验室,研究生马智勇、俞康建和赵亚克参与了实验研究工作。除此以外,笔者还得到了西安科技大学能源学院的诸位老师以及河南理工大学能源科学与工程学院的诸位领导、同事的帮助与指导。对于以上参与本书研究工作以及对笔者提供帮助的人员,在此一并表示诚挚的谢意!感谢妻子许力女士参与的部分研究工作。对本书所引用参考文献的作者表示感谢。

由于作者水平所限,书中不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

著 者

2016年10月

## 主要符号表

$\nabla$ ——哈密顿算符；

$u_{r,p}, u_{r,r}$ ——光纤保护层径向位移、岩体径向位移；

$H(\mathbf{r}, t)$ ——磁场矢量强度；

$u_{\theta,p}, u_{\theta,r}$ ——光纤保护层环向位移、岩体环向位移；

$D(\mathbf{r}, t)$ ——电感强度；

$\sigma_g(x)$ ——光纤轴向应力；

$B(\mathbf{r}, t)$ ——磁感强度；

$\sigma_p(x)$ ——光纤保护层轴向应力；

$\epsilon(\mathbf{r})$ ——张量介电常数；

$\sigma_h(x)$ ——粘贴层轴向应力；

$P(\mathbf{r}, t)$ ——感生极化强度；

$\sigma_r(x)$ ——岩体轴向应力；

$\mu_0$ ——介质磁导率；

$\epsilon_g(x)$ ——光纤轴向应变；

$v, \mu$ ——模序，电场与磁场的下标；

$\epsilon_p(x)$ ——光纤保护层轴向应变；

$a_v, b_\mu$ ——分解系数；

$\epsilon_h(x)$ ——粘贴层轴向应变；

$\beta_v, \beta_\mu$ ——传播系数；

$\epsilon_r(x)$ ——岩体轴向应变；

$\hat{e}_z$ —— $z$ 方向上的电场单位矢量；

$\tau_g(x, r_g)$ ——光纤体表面的剪应力；

$h_{\mu}^*$ —— $h_{\mu}$ 的共轭矢量；

- $\tau_p(x, r_p)$ ——光纤保护层外表面剪应力；  
 $S_\mu$ ——正交系数，当传播常数为实数时，通常为 1；  
 $\tau_h(x, r_h)$ ——粘贴层外表面剪应力；  
 $P_\mu$ ——第  $\mu$  个模的功率；  
 $r_g$ ——光纤半径(含包层)；  
 $\varphi$ ——幅角；  
 $r_p$ ——光纤保护层外半径；  
 $\lambda_B$ ——波长；  
 $r_h$ ——粘贴层外半径；  
 $n_{\text{eff}}$ ——有效折射率；  
 $r_s$ ——光纤光栅传感器外半径；  
 $\Lambda$ ——光栅周期；  
 $r_k$ ——钻孔半径；  
 $F_m$ ——光纤载荷；  
 $k$ ——应变传递特征值；  
 $l_m$ ——第  $m$  段光纤的长度；  
 $2L$ ——光纤光栅长度；  
 $D$ ——光栅直径；  
 $E_g$ ——光纤弹性模量；  
 $\alpha$ ——热膨胀系数；  
 $E_f$ ——GFRP 的弹性模量；  
 $\xi$ ——热光系数；  
 $G_p$ ——保护层剪切模量；  
 $\sigma_{r,p}, \sigma_{r,r}$ ——光纤保护层径向应力、岩体径向应力；  
 $G_h$ ——粘贴层剪切模量；  
 $\sigma_{\theta,p}, \sigma_{\theta,r}$ ——光纤保护层环向应力、岩体环向应力；  
 $G_c$ ——水泥砂浆的剪切模量。



## 目 录

1	绪论	1
1.1	选题背景及研究意义	1
1.2	本领域国内外研究现状	3
1.3	本书的研究内容与方法	24
2	光纤光栅传感特性分析	26
2.1	光纤光栅传感基本理论	26
2.2	光纤光栅传感特性分析	34
2.3	光纤光栅应变—温度交叉敏感问题	44
2.4	光纤光栅传感实验研究	46
3	岩体变形光纤光栅监测方法及应变传递理论	51
3.1	岩体变形光纤光栅检测方法	52
3.2	岩体埋入光纤的受力状态	56
3.3	光纤与岩体的力学作用分析	58
3.4	岩体埋入带保护层光纤光栅的应变传递	61
3.5	岩体埋入光纤光栅多层介质的应变传递	68
3.6	光纤光栅应变传递率影响参数分析	69
3.7	光纤与岩体之间的相对滑动	73
4	岩石单轴压缩光纤光栅表面粘贴法研究	75
4.1	光纤光栅表面粘贴法应变传递分析	76
4.2	岩石单轴压缩光纤光栅传感实验分析	81

4.3	应变传递系数影响参数分析	92
<b>5</b>	<b>岩体变形光纤光栅埋入法实验研究</b>	<b>95</b>
5.1	埋入方法及埋设工艺	95
5.2	模型参数选取	96
5.3	测试系统	96
5.4	模型设计原则及材料配比	99
5.5	光纤光栅参数及在模型中的埋设位置	102
5.6	模型开采过程	105
5.7	实验结果分析	107
5.8	温度补偿实验分析	116
<b>6</b>	<b>岩体应力分布的光纤光栅传感检测</b>	<b>120</b>
6.1	采动影响下矩形孔周围应力分布	120
6.2	岩层水平应力光纤光栅传感测试	126
6.3	支承压力的光纤光栅传感测试	137
6.4	数值模拟计算	138
<b>7</b>	<b>围岩三维应力光纤光栅监测的理论及方法</b>	<b>146</b>
7.1	三维应力光纤光栅传感监测原理	147
7.2	三维应力光纤光栅传感器	150
7.3	相似模拟实验监测研究	154
<b>8</b>	<b>济三煤矿松散层沉降变形光纤光栅监测应用</b>	<b>161</b>
8.1	光纤光栅传感器与松散层沉降关系分析	162
8.2	松散层沉降变形光纤光栅传感监测	167
8.3	监测结果分析	171
	<b>参考文献</b>	<b>179</b>

# 1 绪 论

## 1.1 选题背景及研究意义

### 1.1.1 选题背景

随着世界经济全球化进程的推进,我国的经济的发展正保持一种持续、平稳的增长趋势。经济发展的同时,各类基础设施的投资在国民生产总值中占越来越大比例。然而,在重大土木工程结构和基础设施(如桥梁、大跨空间结构、超高层建筑、大型水坝、核电站、海洋采油平台以及输油、供水、供气等管网系统等)的服役过程中,由于服务年限较长,在环境荷载作用、疲劳效应、腐蚀效应和材料老化等灾变因素的影响下,结构不可避免地产生损伤累积和抗力衰减,从而抵抗自然灾害的能力下降。当监测手段达不到时,就有可能引起事故的发生,甚至引发灾难性的突发事件。例如,1965年英国北海海上石油钻井平台“海上钻石”号失效;1986年中国渤海石油钻井2号平台冬天被海冰推倒;1994年韩国汉城的圣水大桥断塌;1998年宁波大桥在施工过程中主跨折断;1998年江西九江决堤;1999年重庆彩虹大桥突然倒塌;1999年日本发生核泄露;2000年台湾高屏大桥突然断为两截;2001年巴西P-36海洋平台爆炸倒塌;2001年四川宜宾南门大桥桥面断塌等。这些事故不仅造成了重大的人员伤亡和经济损失,而且产生了极坏的社会影响<sup>[1]</sup>。

在我国的煤矿生产中,安全状况令人担忧。从2001年至2004年10月底,我国煤矿共发生一次死亡10人以上的重特大事故188

起,平均每 7.4 d 一起<sup>[2]</sup>。在这些事故中,由于岩体的变形失稳所引起的占一定的比例。以 2006 年为例,顶板事故死亡人数达 1 615 人,占煤矿事故死亡人数的 42.3%。此外,滑坡、泥石流等地质灾害也时常扰乱着人们的生活。从 1972 年至今,仅重大的滑坡事故就有 30 多起,而中小型事故还远不止这些<sup>[3]</sup>。伴随这些灾害的直接危害,城镇毁灭、交通运输中断、人们无家可归,甚至丧生,年均经济损失数以 10 亿元计……

对于上述事故,由于缺乏可靠的预警及监测系统,使灾难的发生无法避免。采用有效的监测手段,对工程岩体及大型的土工工程结构的安全状况和损伤进行有效的评定,减少灾害的发生,显得尤为重要!

传统的传感器,如差动电阻式、钢弦式、电阻应变计式和电感式传感器等,普遍存在抗干扰性、耐久性和长期稳定性等较差的缺点,因此,难以适应现代工程监测的要求。

近几年来兴起的光纤光栅传感器,由于具有本质安全、抗电磁干扰、防水防潮、抗腐蚀、耐久性长及测试精度高等特点,已经成为工程监测系统研究中的研究热点,国内外学者在土木工程、水利工程和航空航天等领域已经开展了广泛的光纤传感技术理论和应用研究,取得了一系列研究成果<sup>[4]</sup>。

本书以光纤光栅传感原理及岩体的变形理论为基础,研究岩体变形过程光纤光栅传感检测的技术理论及方法。这对于岩体变形检测手段的提高,减少由于岩体变形失稳所引起的地质灾害等具有重要意义。

### 1.1.2 研究意义

#### (1) 为岩体变形检测提供新的测试手段

岩体具有复杂的变形过程,人们也曾尝试多种检测手段进行研究,如光学方法、X 射线法、声发射等。光纤光栅传感检测方法的引入为岩体的变形检测开辟新的道路。

(2) 提高岩体变形的测试精度,更有利于灾害的预防

光纤光栅具有较高的测试精度,可以测出微应变级的变形量,因此,可以在岩体破坏前作出及时的响应,减少灾害的发生。

(3) 为复杂条件下大型岩土工程长期、有效的监测提供可能

岩土工程多处于复杂条件下,易处于一定的水环境中,探头需探测水(包括湿度)对岩土体力学性态的影响。同时,传感器也应在水环境中保持工作稳定,即满足防水、防潮要求。此外,在自然环境中,应能防雷击和抗电磁干扰。并且,岩土工程一般服务年限很长,其工程介质的力学性态均具有时效影响,即应考虑其流变特性,因此,测试设备(传感器)应能保持长期稳定。

对于传统的电测传感器来说,不适于复杂环境,若作特殊防护,可作短期监测,服务年限一般为1~2 a。而对于光纤传感器来说,可在水下、潮湿、易燃易爆、电磁干扰、高能辐射等环境,且传感器的服务年限一般在10 a以上,可以实现监测的长期耐久性。

(4) 更有利于岩体的长距离、分布式监测

电测传感器大于200 m时信号传输需作前置放大;远距离传输需作中继放大。且传感器多为单点布置,不易实现分布式。而光纤传感器无需作前置放大或中继放大,易于作大范围联网监测。并且多点成栅技术的成熟很容易实现一根光纤上多个光栅的同时写入,因此,通过合理的布设,容易实施岩石的多点监测。

## 1.2 本领域国内外研究现状

### 1.2.1 岩体变形破坏检测的研究发展

岩石的变形与破坏机理一直是岩石力学研究的基本问题。由于岩石本身的复杂性及人们对其复杂多变的力学特性的认识不足,目前的理论与实验仍以宏观研究为主并已提出各式各样的数学力学模型。显然,要触及岩石变形破坏的本质,则需从其微观破坏入手

才行。

岩石在外载荷作用下的破坏,实质上是岩石中缺陷的萌生、长大、扩展和汇合的过程<sup>[5]</sup>。而研究岩石中微裂纹萌生、扩展、演化到宏观裂纹形成、断裂、破坏全过程是岩石(体)损伤力学的主要任务<sup>[6]</sup>。此项研究也越来越受到广大岩土力学工作者的重视。

岩石(体)损伤力学研究的主要手段是通过建立岩石(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。J. W. Dougill 等人首先将损伤力学引入岩石材料<sup>[7]</sup>。随后, A. Dragon 等人根据断裂面的概念,研究岩石的脆塑性损伤行为,建立了相应的连续介质模型<sup>[8]</sup>。D. Krajcinovic 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<sup>[9,10]</sup>。

在国内,谢和平较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<sup>[11]</sup>。近年来,他首次在联系岩石微观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。但分形损伤力学在工程应用方面尚有大量的工作要做。

对于岩石损伤本构关系的研究一直是研究的热点。J. Kemeny 等人<sup>[12]</sup>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。A. L. Gurson<sup>[13,14]</sup>在 F. A. McClintock<sup>[15]</sup>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<sup>[16]</sup>在 A. L. 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。王金龙等人<sup>[17]</sup>由大理石破坏过程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。李广平等人<sup>[18]</sup>提出了真三轴条件下的岩石细观损伤力学模

型,建立了岩石损伤的演化方程。李皓将金属材料中微裂纹扩展域的概念引入岩石损伤本构模型研究中。朱建明等人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。刘立等人<sup>[19]</sup>通过实验研究,给出了一个复合岩石损伤本构方程。

然而,对岩石(体)变形破坏过程的直观描述还需要通过检测手段来实现。人们也越来越认识到对岩石(体)变形破坏过程检测的重要性,许多学者开展了这方面的工作。检测的主要手段有光学检测法、声发射法和 X 射线法等。

### (1) 光学检测方法

光测方法是以光的干涉原理或者直接以数字图像分析技术为基础的一类实验方法。其中,光弹性方法(即光弹贴片法)测量得到模型的应力分布,其他光测方法均为变形测量方法。20 世纪 60 年代,随着激光的出现和数字图像处理技术的成熟,可将光测方法分为经典光测方法(包括光弹、云纹等)和现代光测方法<sup>[20-23]</sup>(全息干涉、云纹干涉、散斑计量以及数字散斑相关和数字图像分析等)。光学显微镜和扫描电镜方法属于数字图像分析的范畴。

1986 年,许江等人<sup>[24]</sup>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。另外,Nolen-Hoeksema 等人也利用光学显微镜进行了岩石裂纹发育的观测。1990 年、1993 年,卢应发<sup>[25]</sup>、张梅英等人<sup>[26]</sup>完成了大理岩静态和循环载荷试件的电镜分析。1992 年,凌建明等人<sup>[27]</sup>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。1994 年,余拱信等人<sup>[28]</sup>采用全息干涉法对岩石的裂隙变形过程进行了监测。1995 年,赵永红<sup>[29]</sup>对大理岩受单轴压缩时裂纹随外载增加时的变化过程进行了扫描电镜实时观测研究。另外,张梅英等人<sup>[30]</sup>在 1998 年利用带有最大荷载为 2 000 N 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。同年,吴立新等人<sup>[31]</sup>完成了煤岩损伤扩展规律的实时压缩电镜研究。2000 年,刘冬梅等人采用显微观测法和双曝光全息干涉法研究了单轴压力作

用下岩石损伤特征,得出了变质砂岩变形与损伤演化的关系<sup>[32]</sup>。同年,巫静波、谢和平等人<sup>[33]</sup>采用光弹实验的方法研究了岩石节理剪切的力学特性。2002年,谢锦平等人<sup>[34]</sup>采用全息二次曝光法分析了岩石侧向受压形变规律。2005年,刘传孝通过MTS系统、扫描电镜和光学电子显微镜等岩石力学实验研究,抽象出砂岩全应力—应变实验曲线的3种典型形态,从断裂损伤角度探讨了岩石节理裂隙微观、细观和宏观破坏的机理联系<sup>[35]</sup>。全息干涉法检测岩石裂纹扩展如图1-1所示<sup>[36]</sup>。

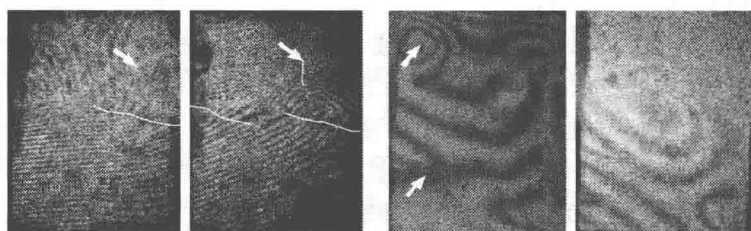


图 1-1 岩石压剪过程的全息干涉图

上述研究有力地推动了岩石变形破坏检测技术的发展,对岩石破坏机理的研究起到了积极的作用。但客观地讲,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,降低了实验结果的确定性和可靠性;另外,这种细观实验的力学机制也不很明确。

全息干涉测量的位移测量灵敏度很高,为所用激光波长的一半。但此方法需要在暗室中进行,需要复杂的隔振装置,需要用照相干版记录测量结果,因此只能记录变形破坏过程中的两个状态。由于测量灵敏度固定,其测量范围也受到限制。这些局限性都给其在岩石力学实验中的应用带来一定困难。

## (2) CT 检测岩石变形破坏进展



CT 技术首先在医学诊断方面得到应用,20 世纪 70 年代末期逐步推广到检测各种金属材料和非金属材料、合成材料、混凝土和冰体结构的研究。80 年代后期,CT 技术被用来观察岩石的内部结构。

CT 技术是通过计算机图像重建,使指定层面上不同密度的材料信息以高分辨率的数字图像显示出来。因为 CT 检测具有可以多层面扫描、可采用国际标准圆柱形试件、无损检测等优点而受到国内外岩土力学界的广泛关注<sup>[37-50]</sup>。CT 技术作为一种无损检测技术,对分析加载过程中岩石的破裂动态特征具有特别的优越性。

1989 年,黄树华<sup>[51]</sup>介绍了日本京都大学寺田等人用自制的 X 射线 CT 装置开展岩石断裂损伤力学研究的情况,他们的工作具有创新性,但在图像重建等方面尚有许多不足,且忽略了弹性波的折射和波速的不均一性。杨更社等人<sup>[52-55]</sup>在国内最早应用医用 X 射线 CT 机重点对岩石的初始损伤特性进行了研究,给出了用 CT 数表示的岩石损伤变量公式,并对单轴压缩载荷作用下砂岩损伤扩展机理进行了 CT 实时初步实验研究(1 个煤岩试件和 1 个页岩试件),同时,他们研究了三轴压缩下有预制裂纹的岩石的损伤扩展特性,其研究方法是,先在岩石力学刚性试验机上对岩石试件进行人工预致损(致损的方法是,将试件加载到峰值强度的 37% 和 61% 后卸载),然后将试件放在 CT 机上进行扫描实验,这些工作是岩石损伤检测技术的重要进展。任建喜和葛修润<sup>[6,56]</sup>也较早地开展了单轴压缩岩石细观破裂机制的研究。F. Verhelst 等人<sup>[57]</sup>(1995 年)利用 X 射线 CT 机研究了岩样的微裂缝和不均一结构。H. Kawakata 等人<sup>[58]</sup>(1997 年)用 X 射线 CT 机研究了 Westerly 花岗岩在三轴压缩时的损伤扩展特性。D. Fabre(1989)和 H. J. Vinegar(1991)等人均利用 CT 机研究对称载荷下岩石的变形破坏,结果显示初始非均匀性和局部密度变化是由岩石内部破坏机理引起的。K. Tani(1997)也利用 CT 机研究了岩石材料的变形和破坏。2005 年,郑孝军等人<sup>[59]</sup>对裂隙岩石裂纹扩展规律进行了细观 CT 实验,对含有单一裂纹的贵溪红砂岩在单轴疲劳载荷作用下的损伤扩展机理和演化过程进行了