



移动扫码阅读

文 虎,樊世星,马 研,等.煤岩损伤研究的 CT 扫描技术发展现状及展望[J].煤炭科学技术,2019,47(1):44-51.doi:10.13199/j.cnki.est.2019.01.006  
 WEN Hu,FAN Shixing,MA Li,*et al*.CT Scanning Technology on coal-rock damage: a comprehensive review[J].Coal Science and Technology,2019,47(1):44-51.doi:10.13199/j.cnki.est.2019.01.006

# 煤岩损伤研究的 CT 扫描技术发展现状及展望

文 虎<sup>1,2</sup>,樊世星<sup>1,2</sup>,马 研<sup>1,2</sup>,郭 军<sup>1,2</sup>,程小蛟<sup>1,2</sup>,童校长<sup>1,2</sup>

(1.西安科技大学 安全科学与工程学院,陕西 西安 710054;2.教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室,陕西 西安 710054)

**摘要:**CT 扫描技术因其无损伤、高分辨率、数字化等优点被广泛应用于煤岩损伤研究领域,为促进煤岩损伤理论研究的深入,从 CT 扫描技术着眼,基于前期文献调研,总结归纳了煤岩损伤领域该技术及装备的发展历程,回顾了利用 CT 扫描试验进行煤岩损伤表征的研究进展,主要包括:煤岩损伤程度的 CT 图像和 CT 数表征,损伤变量的 CT 数定义,以及满足工程实践的煤岩损伤本构方程的构建。在此基础上,分析了当前技术条件下利用 CT 扫描技术进行煤岩损伤研究所遇到的问题,指出提高 CT 图像时空分辨率、改进图像处理软件、开发新型图像重构算法、研发与 CT 系统相适应的复杂应力加载系统,将会对煤岩损伤研究的发展起到更大的作用。

**关键词:**计算机断层扫描;煤岩损伤;损伤变量;应力-应变;本构方程

**中图分类号:**TD164      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-2336(2019)01-0044-08

## CT Scanning Technology on coal-rock damage: a comprehensive review

WEN Hu<sup>1,2</sup>,FAN Shixing<sup>1,2</sup>,MA Li<sup>1,2</sup>,GUO Jun<sup>1,2</sup>,CHENG Xiaojiao<sup>1,2</sup>,TONG Xiaozhang<sup>1,2</sup>

(1. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Western Mine and Hazard Prevention, Ministry of Education of China, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** CT Scanning Technology has been widely applied in the study of coal-rock damage because of its advantages of non-destructive monitoring, high resolution, and digitization. The purpose of this review is to promote theoretical research on coal-rock damages. Comprehensive literature reviews of CT Scanning Technology were conducted. Then the authors overviewed the development of CT technology and equipment in the field of coal-rock damage and summarized research progress on CT characterization of coal-rock damage. The focus of this review is on the CT characterization of degree on coal-rock damage, the definition of the damage variables based on the CT numbers, and the construction of the constitutive equation of coal-rock damage meeting the engineering practice. Problems and challenges encountered in the study of coal-rock damage using CT technology under current technical conditions were also analyzed. Furthermore, suggestions for further research were discussed. Improving the spatial and temporal resolution of CT images, improving image processing software, developing new image reconstruction algorithms, and developing complex stress loading systems that are compatible with CT systems will play a great role in the development of coal rock damage research.

**Key words:** CT Scanning Technology; coal-rock damage; damage variables; stress-strain; constitutive equation

## 0 引言

自 20 世纪 80 年代损伤理论在岩石力学中应用以来,有关煤岩损伤的研究非常活跃<sup>[1]</sup>。煤岩损伤是指煤岩体内微裂纹、微孔隙在外荷载或环境作用下逐渐萌生、扩展从而引起煤岩整体宏观力学性能

劣化的现象<sup>[2-3]</sup>。煤岩损伤研究的核心是建立损伤演化方程,构建损伤的初、边值问题,进而求解煤岩体应力场、变形场和损伤场<sup>[4]</sup>。

解决上述这些问题的基础是煤岩损伤变量的确定,而在众多测定煤岩损伤变量的方法中,CT 扫描技术因其无损伤、高分辨率、数字化等优点而被广泛

收稿日期:2018-03-18;责任编辑:曾康生

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801802);国家自然科学基金面上资助项目(51574193);陕西省教育厅专项科学计划资助项目(17JK0495)

作者简介:文 虎(1972—),男,新疆石河子人,教授,博士生导师,博士。Tel:029-83858286,E-mail:wenh@xust.edu.cn

采用<sup>[5]</sup>。自 1989 年开创性地将 CT 扫描技术从医学界引入到岩石力学研究领域,CT 扫描技术就一直在不断的更新和发展中。当前使用的工业微焦 CT 相比常规医用 CT 空间分辨率已经提升 2 个数量级<sup>[6-7]</sup>。

CT 扫描技术的快速发展为煤岩损伤的研究奠定了良好的技术基础,促进了诸多有代表性成果的产生。1990 年中国科学院寒区旱区环境与工程研究所购置了美国通用 GE8800CT 机,并配合葛修润院士主持研制的特制三轴试验机构建了岩石加载实时 CT 扫描实验系统<sup>[8]</sup>。杨更社等<sup>[1]</sup>利用该系统在国内首次研究了煤岩的初始损伤,给出了用 CT 数表示的岩石损伤变量,并探讨了单轴压缩下的煤岩损伤扩展机理;许多学者等先后对各类煤岩开展了单轴、三轴压缩荷载作用全过程的实时 CT 扫描试验,给出了应力损伤阈值,引入初始损伤影响因子和闭合影响系数对损伤变量进行了修正<sup>[9-10]</sup>。基于对煤岩各个阶段的 CT 图像和 CT 数的分析,将应力-应变全过程曲线分为 4 段,从工程实践角度出发,给出了峰前各段损伤演化本构方程<sup>[11-12]</sup>。随后,多家单位引进了 CT 扫描试验机,对煤岩进行了不同应力加载路径下的 CT 扫描试验,取得了一些成果。例如:葛修润等<sup>[13]</sup>、郑孝军等<sup>[14]</sup>进行了岩石疲劳损伤扩展规律的研究,发现岩石疲劳破坏存在门槛值,得到了岩石细观疲劳损伤扩展的初步规律;任建喜等<sup>[15-16]</sup>对连续加载实验条件下和卸去围压作用下砂岩破坏细观机理进行对比,发现岩石卸荷演化破坏更具有突发性;蔡小虎等<sup>[17]</sup>、李树春等<sup>[18]</sup>借助 CT 实验结果分别对岩石冲击荷载和循环荷载下的损伤规律进行了研究。除此之外,近年来 CT 扫描技术也被应用于冻土受荷损伤的研究中,目前虽有不少学者针对各类冻土进行了单轴压缩、三轴剪切、冻土正融等过程的细观损伤 CT 试验<sup>[19-21]</sup>,但是相对于普通煤岩方面的研究成果仍比较缺乏。

总结近 20 年来 CT 扫描技术在岩石损伤演化领域的研究成果发现,缺乏既能精确控温、又符合 CT 实验机使用要求的辅助装置是制约 CT 扫描技术在冻土<sup>[22]</sup>、煤田火区演化<sup>[23]</sup>、CO<sub>2</sub>压裂油气增产<sup>[24-25]</sup>等相关领域应用的主要原因。如何利用 CT 试验结果来解释煤岩体在低温、高温、高压等作用下内部细观结构发生的变化,仍有很多技术问题需要解决。在这种背景下,笔者从 CT 测试的发展历程出发,总结了 CT 扫描技术在煤岩损伤领域的研究成果和存在的问题及未来值得关注的研究方向,希望为 CT 扫描技术在煤岩领域的进一步发展提供基础。

## 1 CT 扫描技术装备的发展

自 1969 年 Hounsfield 教授成功完成 CT 扫描装置设计,1972 年在放射学会上公布以后,CT 扫描技术掀起了医学图像领域的一场革命<sup>[23]</sup>。1989 年日本学者 Teda 等开创性地将 CT 扫描技术引入到岩石力学研究领域<sup>[6]</sup>。自此基于医用 CT 机配合辅助加载设备的 CT 测试系统初步形成并得到了进一步的发展,其扫描系统如图 1a 所示。国内最早建立 CT 测试系统并将其应用于岩土工程领域的是中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,该机构于 1990 年利用美国通用 GE8800CT 机和葛修润院士主持研制的加载装置建立了冻土研究工作站<sup>[23]</sup>。并先后于 1998 年和 2010 年分别引进了德国西门子 SOMATOM-PLUS 螺旋 CT 机和荷兰皇家飞利浦 Brilliance16 多能量螺旋 CT 机,这为煤岩损伤实时动态高精度测量提供了良好的技术基础<sup>[26]</sup>。



(a) 基于医用 CT 的扫描系统 (b) 工业 CT 扫描系统 (c) 微型 CT 扫描试验系统

图 1 常见的 CT 扫描系统

Fig.1 Common system of CT Scanning Technology

除了基于医用 CT 机发展而来的 CT 扫描测试系统外。目前在我国比较典型的还有中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室购置的 X 射线工业 CT 检测实验系统 ACTIS300-320/225<sup>[27]</sup>,如图 1b 所示。在此基础上,该试验研究团队设计和开发了能够在 CT 试验台上对尺寸为 25 mm×25 mm×50 mm 和 φ25 mm×50 mm 的 2 种试件进行远程实时加载的试验装置<sup>[28]</sup>。此外,太原理工大学联合中国工程物理研究院应用电子学研究所共同研制了 μCT225kvFCB 型高精度(μm 级)显微 CT 试验系统<sup>[29]</sup>,如图 1c 所示。

这些 CT 扫描技术能够对煤岩高温热解、低温冷冻、高压环境下吸附气体、冻土冻融等条件下的损伤进行实时动态高精度的测试,势必对煤岩损伤领域的研究发展起到更大的推动作用,为解决复杂的工程问题提供有力的科学依据。

## 2 煤岩损伤的 CT 扫描研究现状

根据损伤力学中的定义,损伤是由外载或环境

所引起的材料体积单元破坏、宏观力学行为劣化的现象。煤岩体中常见的损伤形式包括弹性损伤、弹塑性损伤、蠕变损伤、疲劳损伤、循环荷载损伤、腐蚀损伤、爆炸冲击损伤、高温及冷冻损伤等。自 CT 扫描技术引入到岩土工程领域,国内外学者针对上述各种损伤的初始特性及损伤扩展规律进行了大量的研究,取得了丰硕的研究成果。

## 2.1 利用 CT 图像和 CT 数进行煤岩损伤分析

CT 扫描是由 X 射线源发射一束精确准直的 X 射线,并使其从四周对煤岩试件某一层面进行扫描,通过收集 X 射线穿过物体之后的衰减程度重建 CT 图像,进而推断出煤岩损伤程度。如果假设被测试件的密度为  $\rho$ ,其对 X 射线的质量吸收吸收系数为  $\mu_m$ ,那么该试件对 X 射线的吸收系数  $\mu$  可用下式表示为

$$\mu = \rho \mu_m \quad (1)$$

相应地,借助  $\mu_m$  与  $\mu$ ,CT 数可表示为<sup>[30]</sup>

$$CT = 1000 \times \frac{\mu - \mu_w}{\mu_w} \quad (2)$$

式中: $\mu_w$  为煤岩中水分的质量吸收系数。

将式(2)代入式(1)中,被测物体的 X 射线吸收系数  $\mu$  可表示为

$$\mu = \rho \mu_m = \mu_w \left( \frac{CT}{1000} + 1 \right) \quad (3)$$

而被测物体的密度  $\rho$  可表示为

$$\rho = \frac{\mu_w}{\mu_m} \left( \frac{CT}{1000} + 1 \right) \quad (4)$$

由式(3)可得,被测物体对 X 射线的吸收系数与其 CT 数成正比,式(4)反应了被测物体的密度与 CT 数成正比。因此 CT 图像在一定程度上可以反应被测物体的密度分布<sup>[30]</sup>。早在 1989 年 RAYNAUD S 等<sup>[31]</sup>采用 CT 扫描技术给出了多种岩石在三轴压缩破裂后扫描断面的 CT 图像,发现岩石密度与 CT 数有一定的关系。但是,由于人眼对于灰度分辨的限制,加之初始阶段煤岩损伤较小,单纯利用 CT 图像研究损伤具有一定的局限性。只有当损伤扩展到一定阶段,岩样产生明显变化时,CT 图像才会相较初始发生明显变化。因此,想要借助 CT 图像分析煤岩损伤,常辅以 CT 图像处理技术和 CT 数变化。KAWAKATA H 等<sup>[32]</sup>采用重复采样的方法首次实现了 CT 图像的三维重构;UETAK 等<sup>[33]</sup>完成了室内砂体受剪切时砂体内部产生的剪切带的空间三维图像及其演化过程;而杨更社等<sup>[34]</sup>首次将 CT 扫描技术应用到岩石损伤检测的研究中,并且提出了一种 CT 图像分析方法,即先利用数字图像增

强技术和灰度直方图技术对 CT 图像进行增强,增加人眼对岩石损伤演化直观感受的同时还可准确、定量地分析损伤演化过程和演变规律。结合 CT 图像和 CT 数的变化,得出岩体的初始微观损伤主要与成岩条件和环境条件有关。不同的岩石,其损伤形式不同,同一种岩石,不同扫描层面的损伤也不同。煤样与砂岩和石灰岩的损伤呈现出不同的方式,除了孔洞引起的损伤外,主要是微裂隙和界面引起的损伤。肖旸等<sup>[23]</sup>通过对比煤田火区试样升温过程中不同温度下的 CT 扫描图像和二值化图像,研究了煤岩体热破坏裂隙扩展及分布规律。发现无烟煤煤样从 200 ℃ 时开始形成裂隙,且随温度的升高裂隙逐渐增多、加宽、扩展;刘慧等<sup>[35]</sup>用了 Visual C++ 实现了冻结岩石 CT 图像的伪彩色增强,充分利用 CT 图像包含的微观物理信息,对岩石损伤的大小以及空间位置做出了定量的评价。许多研究学者通过对煤岩单轴压缩的实时 CT 扫描试验,建立了 CT 扫描图像、CT 数与煤岩应力应变曲线的对应关系,如图 2 所示,为中小裂纹的起裂门槛值的求解及煤岩损伤演化规律的分析提供了依据<sup>[6,36-37]</sup>。

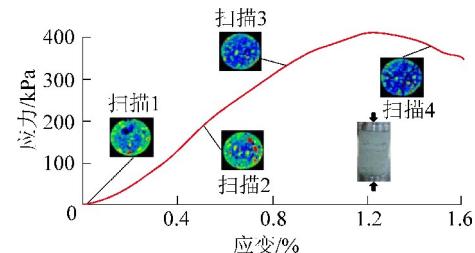


图 2 CT 图像与应力-应变的对应关系

Fig. 2 Relationship between stress-strain and CT image

李廷春<sup>[38]</sup>、李术才等<sup>[39]</sup>通过对含有不同数量和形状的预置裂隙试件进行单轴和三轴压缩试验,借助试件预置裂隙边缘位置的横、纵向 CT 扫描图像,采用扫描层面上同心圆、等圆和等椭圆区域内的 CT 数、CT 数方差及 CT 数-应变关系分析了荷载作用下裂隙扩展的时空演化规律,推导了适用于裂隙岩体的三位断裂损伤本构关系,并进行了工程验证。

综合来看,利用 CT 图像和 CT 数分析损伤演化过程,主要是通过对比煤岩试件在不同试验阶段同一扫描位置处 CT 图像和 CT 数的变化来实现的。

## 2.2 CT 数与煤岩损伤变量的关系

对煤岩损伤开展更深入的研究,需要引入损伤变量这一表征材料或结构裂化程度的物理量,以此来建立煤岩微结构特征和宏观力学性能间的关系。目前损伤变量的定义角度大致可以分为微观和宏观两个角度。微观角度主要是通过微缺陷的面积、体

积、数目和分形法等来定义,而宏观角度的定义依据检测方法的不同可采用弹性模量、超声波波速、密度的变化、应变等来描述。

杨更社等<sup>[4,40]</sup>在国内较早的开始了 CT 扫描技术在煤岩损伤的研究,根据扫描图像的 CT 数分布,建立了 CT 数分布规律的数学模型,推导了用 CT 数表达损伤变量的公式,即

$$D = \frac{1}{m_0^2} \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \frac{1}{m_0^2} \cdot \frac{\rho_0 - \rho_i}{\rho_0} \quad (5)$$

将式(5)中的密度分别用式(1)代替可得

$$D = \frac{1}{m_0^2} \left( 1 - \frac{1000 + CT_i}{1000 + CT_0} \right) \quad (6)$$

其中: $m_0$ 为 CT 机的空间分辨率,  $\Delta\rho$  为煤岩损伤演化过程中的密度变化,  $\rho_0$  为岩石初始密度,  $\rho_i$  为某一应力状态下的煤岩密度,  $CT_0$ 、 $CT_i$  分别为初始和某一应力状态下的 CT 数。式(5)相比 Bellion 所证明的 Kachanor 损伤变量  $-\Delta\rho/\rho_0$  和 Lemaitre 基于球形胞元假设提出的损伤变量  $(-\Delta\rho/\rho_0)^{2/3}$  更具有普遍性,且随着 CT 分辨率的提高,能识别更细观的损伤,充分考虑了损伤的尺度问题。葛修润等<sup>[9]</sup>指出上式没有考虑初始损伤对  $D$  的影响,建议在式子右端乘以影响因子  $e$  来考虑初始损伤对  $D$  的影响,即

$$D = \frac{e}{m_0^2} \left( 1 - \frac{1000 + CT_i}{1000 + CT_0} \right) \quad (7)$$

其中: $e$  的值应大于 1,其值大小可由试验得到的应力-应变关系曲线与本构模型理论公式拟合确定。任建喜等<sup>[10]</sup>针对有些煤岩在单轴压缩过程中会出现对应于裂隙压密的 CT 数增加的情况,引入闭合影响系数  $\alpha_c$  对式(7)进行了修正,得

$$D = \frac{e}{m_0^2} \left( 1 - \frac{1000 + CT_i}{1000 + \alpha_c CT_0} \right) \quad (8)$$

其中: $\alpha_c$  的值取决于试件在加载初期被压密的程度,其值可用压密时的 CT 数与初始未加载时的 CT 数相比求得,从本质上来说  $\alpha_c$  是由岩石的孔隙率决定的。丁卫华等<sup>[41]</sup>据式(7)给出了密度损伤增量  $\Delta D$  的表达式为

$$\Delta D = \frac{CT_i - CT_0}{1000 + CT_0} \quad (9)$$

并借助密度损伤与体应变的关系,推导出岩石内部裂纹宽度的普适性计算公式<sup>[42-43]</sup>为

$$d = -\frac{\pi b \Delta D}{2(1 + \Delta D)} \quad (10)$$

这种确定裂纹宽度的方法相比 Robert 等所采用的在 CT 图像上与已知实际裂纹相比较的方法<sup>[44]</sup>,实现了裂纹宽度的定量计算。上述基于 CT

数的损伤变量表示为定量研究煤岩损伤提供了有力的理论依据,被广大学者所接收和使用。除此之外另外还有一些适用于某些特殊岩体工程的损伤变量的表达形式,陈蕴生等<sup>[45]</sup>针对工程中常见的存在于非贯通裂隙岩体中由规则的裂隙造成的奇异损伤和由随机分布的孔隙、裂隙造成的分布损伤定义了损伤变量。其中奇异损伤变量  $D_f$  是根据 CT 数的变化来定义的可表示为

$$D_f = \lambda |\Delta CT| / CT_0 \quad (11)$$

其中: $\Delta CT$  为裂隙带 CT 数均值变化量。而分布损伤变量  $D_m$  由非裂隙区孔隙、微裂隙面积与总面积的比值来定义,可表示为

$$D_m = A' / A_0 \quad (12)$$

朱赛楠等<sup>[46]</sup>根据泥岩试件某截面数值为 0 的像素点个数  $N'$  与截面图像总像素个数  $N$  的比值来定义损伤变量;刘小红等<sup>[47]</sup>通过粉砂岩在三轴应力状态下的 CT 扫描试验,发现在围压恒定逐渐增加轴压条件下,粉砂岩经历压密、扩容直至破坏,其中岩石的损伤演化需要经历相对较长的应力段,是一个量变不断积累的过程,而裂纹的产生及扩展是损伤积累到一定阶段的质变过程,具有突发性。损伤变量  $D$  在压密阶段显示为正,扩容阶段和破坏后显示为负。赵淑萍等<sup>[48]</sup>对冻结饱水兰州黄土试样进行了不同温度下的单轴压缩试验,推导出了冻土塑性应变  $\varepsilon_p$  与损伤力学中连续性变量  $\phi$  之间的关系:  $\phi = a\varepsilon_p + b$ ,  $a$ 、 $b$  为回归常数,又借助损伤力学中关于连续性变量  $\phi$  与损伤变量  $D$  之间的关系:  $D = 1 - \phi$ ,得出了损伤演化方程  $D = 1 - \sqrt{(a\varepsilon_p + b)}$  和损伤耗散势函数。

### 2.3 煤岩损伤的应力-应变本构关系

煤岩损伤力学研究的核心目标是建立煤岩损伤本构理论,该理论主要包括 2 方面内容:煤岩应力-应变关系和损伤演化方程,只有 2 个方程都建立起来,损伤本构理论才得以建立<sup>[49]</sup>。由于损伤变量的定义形式不同,构建的损伤本构理论也呈现不同的形式。为使材料在考虑损伤后的本构方程的建立得以简化,法国著名学者 Lemaitre 教授提出了等效应变假设<sup>[2]</sup>。杨更社等<sup>[11]</sup>针对在同样损伤扩展应力、应变状态下由 CT 扫描和 Lemaitre 假设计算出的损伤变量的不一致性进行分析,发现 Lemaitre 假设对于不同形式的损伤变量并不总是直接满足的。张全胜等<sup>[50]</sup>将 Lemaitre 假设推广为更具普遍性的等效应变原理认为材料在基准损伤状态下的有效应力作用于后续损伤状态下引起的应变等价于后续损伤状态下的有效应力作用于基准损伤状态引起的应变。

那么受力  $F$  作用的煤岩体初始损伤状态和后续损伤下的有效应力  $\sigma, \sigma'$ , 弹性模量  $E, E'$  和有效承载面积  $A, A'$  存在以下关系为

$$\begin{cases} \varepsilon = \sigma/E' = \sigma'/E \\ F = \sigma A = \sigma' A' \\ D = (A - A')/A \end{cases} \quad (13)$$

联立式(13), 求得损伤本构方程为

$$\sigma = E\varepsilon(1 - D) \quad (14)$$

式(14)相比传统损伤本构方程, 弹性模量比较容易测量, 因此体现一定的优势。刘增利等<sup>[49]</sup>针对冻土单轴压缩实时 CT 试验, 假设冻土在受载过程中塑性硬化与损伤演化过程相分离, 采用连续介质力学和热力学方法建立了单轴压缩情况下的冻土含损伤的应力-应变关系为

$$\sigma = E\varepsilon^e(1 - D) \quad (15)$$

式中:  $E$  为未损伤冻土初始状态下的弹性模量;  $\varepsilon^e$  为弹性应变。

代高飞等<sup>[51]</sup>基于假设: 损伤是弹性与塑性损伤的耦合, 损伤的主体在应力主轴方向, 损伤演化是应力或应变状态的某种幂函数关系。认为煤岩在单轴压缩应力状态下损伤变量  $D$  与应变的关系可表示为  $D = m\varepsilon^n$ ,  $m, n$  为材料参数,  $\varepsilon$  为轴向压应变, 将此式代入到式(14)中则有

$$\sigma = E\varepsilon(1 - m\varepsilon^n) \quad (16)$$

若假设  $\varepsilon_s = m^{-1/n}$ , 那么有  $m = (1/\varepsilon_s)^n$ , 则损伤变量可表示为

$$D = (\varepsilon/\varepsilon_s)^n \quad (17)$$

相应的本构方程可表示为

$$\sigma = E\varepsilon[1 - (\varepsilon/\varepsilon_s)^n] \quad (18)$$

以上各种表达形式的损伤本构模型大都是针对煤岩应力-应变的某一特定阶段而构建的。想要构建1个损伤本构模型及演化方程能普遍反映多种材料在各个阶段的损伤演化机理几乎是不可能的。因此, 从细观动态实验出发, 构建具有一定精度而又能够用于指导工程实践的损伤演化方程无疑是1种可行性方法。其中将应力-应变曲线先进行分段, 然后再分别求其损伤演化方程的方法最为普遍。任建喜等<sup>[12]</sup>、代高飞等<sup>[51]</sup>认为岩石应力-应变曲线的压密阶段和弹性阶段可合并为准线性阶段, 再加上其后的损伤演化并稳定发展阶段、损伤加速发展阶段, 岩石峰值前的应力-应变曲线可分为3段。对以上3个阶段绘制损伤变量  $D$  与应变  $\varepsilon$  的关系曲线并采用线性函数、指数函数、幂指函数分段拟合进而给出各个阶段的损伤演化方程。张全胜等<sup>[50]</sup>用文献[30]所得到的试验结果对所求的演化方程进行了

验证, 发现在求解基准弹性模量时应尽量使每级荷载与前一级荷载相比增量较小, 保证由各次扫描计算的斜率均是在微裂隙、微孔扩展之前求得, 这样采用平均斜率法求解的斜率相对准确。陈蕴生等<sup>[45]</sup>采用弹性闭合原件和弹性变形原件的串联模型表示试件的总应变, 结合相应的应力条件求出了含裂隙试件的损伤本构方程, 经过试验验证对其进行了客观分析和评价。

### 3 存在问题及解决方法

CT 扫描技术已被证明是进行岩石损伤检测的有效工具。它不仅使任意应力下岩石内部细观裂纹的观测变成了可能; 而且填补了从常规 SEM 尺度到肉眼可见的宏观尺度之间裂纹演化过程观测的空白, 更为重要的是 CT 的观测结果可以更直接的与岩石试件的应力应变曲线相联系, 用于岩石本构关系和损伤演化方程的推导。CT 扫描具有如此多的优势, 这些优势都是建立在高质量图像的基础之上的。目前, 受限于时空分辨率、图像重构算法以及噪声等因素, 高质量 CT 图像的获取也相对较难, 因此基于 CT 扫描的损伤本构关系的建立仍有不少问题需要解决。主要表现在以下2方面。

1) CT 扫描仪器的空间分辨率主要由其焦点尺寸和检测器分辨率所决定, 通常提高分辨率的做法是缩小样品尺寸或扫描区域。而进行物理力学性质测定的煤岩试件尺寸是固定不变的, 因此上述方法在煤岩损伤 CT 检测方面的应用会受到限制。而改变 CT 机的扫描电压可改变 X 射线的波长, 进而针对同一扫描试件可以获得不同的 CT 数。经常可以通过改变扫描电压对煤岩进行多次扫描从而获得高质量的图像。目前应用在岩石损伤检测中的 CT 扫描测试系统最大分辨率通常为几百微米, 小于以上尺寸的裂隙和孔洞则无法检测。未来将多能量、高分辨率 CT 机引入到煤岩损伤检测将是一种趋势。

2) 和任何成像技术一样, 伪影同样也会影响 CT 图像的质量, 伪影是多方面的原因造成的, 主要有 CT 射束硬化伪影、噪声伪影、环状伪影和运动伪影等<sup>[1]</sup>。尽管伪影本身会对图形的质量造成很大的影响, 但是通过计算机软件处理技术或者一些新型的算法可以实现 CT 图像的过滤、噪音的消除和被破坏像素点的修复。因此新型图像处理软件的改进和算法的开发应是科学的研究的关注重点。

实际工程实践中, 煤岩的受力情况比较复杂, 目前实验室能实现煤岩加载和卸载方式仍相对较少, 加之 CT 扫描无法做到对损伤扩展部位和破坏时刻

的精确定位,损伤破坏细节的精确信息无法提取,因此与 CT 系统相适应的能够模拟各种复杂应力加载路径的加载设备和具备局部精确扫描功能的 CT 系统的研究也不应忽视。

## 4 结 语

自 20 世纪 90 年代 CT 扫描技术被引入岩石损伤检测研究中,诸多学者已针对普通煤岩损伤开展了大量试验研究工作,得出了煤岩在压缩、冲击、持续、周期荷载等作用下的损伤扩展规律。本文主要介绍了 CT 扫描技术在煤岩损伤研究领域的应用历史及主要研究成果,说明 CT 扫描是研究煤岩内部微观结构演化有效手段。指出提高 CT 扫描技术的分辨率,改进图像处理软件和算法,实现复杂应力加载路径的模拟和温度、压力精确控制将是未来 CT 扫描技术的发展方向。

## 参考文献(References) :

- [1] 杨更社,谢定义,张长庆,等. CT 扫描技术在岩石损伤检测中的应用研究 [J]. 实验力学, 1998, 27(4): 451-456.  
YANG Gengshe, XIE Dingyi, ZHANG Changqing, et al. Application of CT Technique in the damage detection of rock materials [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1998, 27(4): 451-456.
- [2] 楼志文. 损伤力学基础 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990.
- [3] 杨更社. 岩石损伤检测技术及其进展 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23(6): 47-55.  
YANG Gengshe. Advances and development of damage measurement technique of rock [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(6): 47-55.
- [4] 杨更社,张长庆. 岩体损伤及检测 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998.
- [5] 朱红光,谢和平,易成,等. 岩石材料微裂隙演化的 CT 识别 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1230-1238.  
ZHU Hongguang, XIE Heping, YI Cheng, et al. CT Identification of microcracks evolution for rock materials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1230-1238.
- [6] 任建喜,葛修润,杨更社. 单轴压缩岩石损伤扩展微观机理 CT 实时试验 [J]. 岩土力学, 2001, 22(2): 130-133.  
REN Jianxi, GE Xiurun, YANG Gengshe. CT real-time on damage propagation microscopic mechanism of rock under uniaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(2): 130-133.
- [7] 王常彬,曹安业,井广成,等. 单轴受载下岩体破裂演化特征的声发射 CT 成像 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(10): 2044-2053.  
WANG Changbin, CAO Anye, JING Guangcheng, et al. Evolution characteristics of rock fracture under uniaxial loading by combining acoustic emission and CT imaging [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(10): 2044-2053.
- [8] 佚名. 终身奋斗在岩土一线: 葛修润院士(三) [B]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 222-223.
- [9] 葛修润,任建喜,蒲毅彬,等. 煤岩三轴微观损伤演化规律的 CT 动态试验 [J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 497-502.  
GE Xiurun, REN Jianxi, PU Yibin, et al. A real-in-time CT triaxial testing study of meso-damage evolution law of coal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 497-502.
- [10] 任建喜,葛修润. 岩石单轴微观损伤演化特性的 CT 实时分析 [J]. 土木工程学报, 2000, 33(6): 99-104.  
REN Jianxi, GE Xiurun. Real-time CT test on the meso-damage evolution of rock under uniaxial compression [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(6): 99-104.
- [11] 杨更社,谢定义. 岩石单轴受力 CT 识别损伤本构关系的探讨 [J]. 岩土力学, 1997, 18(2): 29-34.  
YANG Gengshe, XIE Dingyi. The discussion about damage constitutive relation of rock under uniaxial stress identified by CT [J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(2): 29-34.
- [12] 任建喜,葛修润. 单轴压缩岩石损伤演化微观机理及其本构模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 425-431.  
REN Jianxi, GE Xiurun. Study of rock meso-damage evolution law and its constitutive model under uniaxial compression loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 425-431.
- [13] 葛修润,任建喜,蒲毅彬,等. 岩石疲劳损伤扩展规律 CT 细观分析初探 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 191-195.  
GE Xiurun, REN Jianxi, PU Yibin, et al. Primary study of CT real-time testing of fatigue meso-damage propagation law of rock [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 191-195.
- [14] 郑孝军,胡志军,刘倡清,等. 裂隙岩石疲劳损伤变形规律 CT 试验初探 [J]. 西安科技大学学报, 2005, 25(4): 469-472.  
ZHENG Xiaojun, HU Zhijun, LIU Changqing, et al. Deformation characteristic of crack rock fatigue failure by using CT testing [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005, 25(4): 469-472.
- [15] 任建喜,罗英,刘文刚,等. CT 检测技术在岩石加卸载破坏机理研究中的应用 [J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 672-675.  
REN Jianxi, LUO Ying, LIU Wengang, et al. Application of computerized topography testing technology on studying rock failure mechanism under loading and unloading [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 672-675.
- [16] 任建喜,葛修润,蒲毅彬,等. 岩石卸荷损伤演化机理 CT 实时分析初探 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 697-701.  
REN Jianxi, GE Xiurun, PU Yibin, et al. Primary study of real-time testing of unloading damage evolution law of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 697-701.
- [17] 蔡小虎,高文乐,戴碧勇. 大理岩冲击脆断的 CT 观察研究 [J]. 工程爆破, 1999, 5(1): 27-29.  
CAI Xiaohu, GAO Wenle, DAI Biyong. CT observation for brittle-shock fracture surface of marble. Engineering Blasting [J]. Engineering Blasting, 1999, 5(1): 27-29.
- [18] 李树春,许江,杨春和,等. 循环荷载下岩石损伤的 CT 细观试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1604-1609.

- LI Shuchun, XU Jiang, YANG Chunhe, et al. Study of CT meso-experiment of rock damage under cyclic load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 5(1): 27-29.
- [19] 任建喜, 冯晓光, 刘慧. 三轴压缩单一裂隙砂岩细观损伤破坏特性 CT 分析 [J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(3): 300-304.
- REN Jianxi, FENG Xiaoguan, LIU Hui. CT testing on meso-damage propagation mechanism of cracked-sandstone sample under triaxial compression loading [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005, 25(4): 469-472.
- [20] 任建喜. 三轴压缩岩石细观损伤扩展特性 CT 实时检测 [J]. 实验力学, 2001, 16(4): 387-395.
- REN Jianxi. Real-time CT monitoring for the meso-damage propagation characteristics of rock under Triaxial compression [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2001, 16(4): 387-395.
- [21] 刘波, 李东阳, 刘璐璐, 等. 冻土正融过程 CT 扫描试验及图像分析 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(12): 2014-2019.
- LIU Bo, LI Dongyang, LIU Lulu, et al. CT scanning and images analysis during frozen soil thawing [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 2014-2019.
- [22] 陈世杰, 赵淑萍, 马巍, 等. 利用 CT 扫描技术进行冻土研究的现状和展望 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 193-200.
- CHEN Shijie, ZHAO Shuping, MA Wei, et al. Studying frozen soil with CT technology: presents studies and prospects [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 193-200.
- [23] 肖旸. 煤田火区煤岩体裂隙渗流的热-流-固多场耦合力学特性研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
- [24] FENG Zengchao, CAI Tingting, ZHOU Dong, et al. Temperature and deformation changes in anthracite coal after methane adsorption [J]. Fuel, 2017, 192: 27-34.
- [25] 赵静, 冯增朝, 杨栋, 等. 基于三维 CT 图像的油页岩热解及内部结构变化特征分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 112-117.
- ZHAO Jing, FENG Zengchao, YANG Dong, et al. Study of pyrolysis of oil shale based on 3D CT images. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 112-117.
- [26] 方建银, 党发宁, 肖耀庭, 等. 粉砂岩三轴压缩 CT 试验过程的分区定量研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 1976-1984.
- FANG Jianyin, DANG Fanling, XIAO Yaoting, et al. Quantitative study on the CT test process of siltstone under triaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10): 1976-1984.
- [27] NIE Baisheng, HE Xueqiu, LI Xiangchun, et al. Meso-structures evolution rules of coal fracture with the computerized tomography scanning method [J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 41(5): 81-88.
- [28] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深部岩体力学研究与探索 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161-2178.
- XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178.
- [29] 孟巧荣. 热解条件下煤孔隙裂演化的显微 CT 实验研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
- [30] 王彦琪, 冯增朝, 郭红强, 等. 基于图像检索技术的岩石单轴压缩破坏过程 CT 描述 [J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2534-2540.
- WANG Yanqi, FENG Zengchao, GUO Hongqiang, et al. CT description of rock failure process under uniaxial compression loading based on image retrieval technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2534-2540.
- [31] RAYNAUD S, FABRE D, MAZEROLLE F, et al. Analysis of the internal structure of rocks and characterization of mechanical deformation by a non-destructive method: X-ray tom densitometry [J]. Tectonophysics, 1989, 159(1): 149-159.
- [32] KAWAKATA H, CHO A, YANAGIDANI T, et al. Gross structure of a fault during its formation process in Westerly granite [J]. Tectonophysics, 2000(1): 61-76.
- [33] UETA K, TANI K, KATO T. Computerized X-ray tomography analysis of three-dimensional fault geometries in basement-induced wrench faulting [J]. Engineering Geology, 2000, 56(1/2): 197-210.
- [34] 杨更社, 刘慧. 基于 CT 图像处理技术的岩石损伤特性研究 [J]. 煤炭学报, 2007, 32(5): 463-468.
- YANG Gengshe, LIU Hui. Study on the rock damage characteristics based on the technique of CT image processing [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(5): 463-468.
- [35] 刘慧, 杨更社, 叶万军, 等. 基于 CT 图像的冻结岩石冰含量及损伤特性分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2016(4): 912-919.
- LIU Hui, YANG Gengshe, YE Wanjun, et al. Analysis of ice content and damage characteristics of frozen rock based on pseudo-color enhanced CT image [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016(4): 912-919.
- [36] 尹光志, 代高飞, 皮文丽, 等. 单轴压缩荷载作用下煤岩损伤演化规律的 CT 实验 [J]. 重庆大学学报, 2003, 26(6): 96-100.
- YIN Guangzhi, DAI Gaofei, PI Wenli, et al. CT real-time analysis of damage evolution of coal under uniaxial compression [J]. Journal of Chongqing University, 2003, 26(6): 96-100.
- [37] 仵彦卿, 曹广祝, 王殿武. 基于 X-射线 CT 方法的岩石小裂纹扩展过程分析 [J]. 应用力学学报, 2005, 22(3): 484-490.
- WU Yanqing, CAO Guangzhu, WANG Dianwu. Microfracturing processes of rock by real-time observation of X-ray CT [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2005, 22(3): 484-490.
- [38] 李廷春. 三维裂隙扩展的 CT 试验及理论分析研究 [D]. 武汉: 中国科学院研究生院武汉岩土力学研究所, 2005.
- [39] 李术才, 李廷春, 王刚, 等. 单轴压缩作用下内置裂隙扩展的 CT 扫描试验 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 484-492.
- LI Shucai, LI Tingchun, WANG Gang, et al. CT real-time scanning tests on rock specimens with artificial initial crack under uniaxial conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 484-492.
- [40] 杨更社, 谢定义. 岩石损伤 CT 数分布规律的定量分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 279-285.
- YANG Gengshe, XIE Dingyi. The quantitative analysis of distribution regulation of CT values of rock damage [J]. Chinese Journal

- of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(3):279-285.
- [41] 丁卫华,仵彦卿.CT 扫描技术应用于岩石实验动态观测的新进展[J].冰川冻土,2000,22(3):218-222.  
DING Weihua, WU Yanqing. New progressing real-time detecting of Geotechnical experiment by use of X-ray Computed tomography [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22 (3):218-222.
- [42] 丁卫华,仵彦卿,蒲毅彬,等.基于 X 射线 CT 的岩石内部裂纹宽度测量[J].岩石力学与工程学报,2003, 22 (9): 1421-1425.  
DING Weihua, WU Yanqing, PU Yibin, et al. Measurement of crack width in rock interior based on X-ray CT [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9):1421-1425.
- [43] 丁卫华,仵彦卿,蒲毅彬,等.低应变率下岩石内部裂纹演化的 X 射线 CT 方法[J].岩石力学与工程学报,2003, 22 (11): 1793-1797.  
DIN Weihua, WU Yanqing, PU Yibin, et al. X-ray CT approach on rock - interior crack evolution under low strain rate [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (11):1793-1797.
- [44] JOHNS R A, STEUDE J S, CASTANIER L M, et al. Non-destructive measurements of fracture aperture in crystalline rock cores using X-ray computed tomography [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1993, 98(B2):1889-1900.
- [45] 陈蕴生,韩信,李宁,等.非贯通裂隙介质单轴受力条件下的损伤本构关系探讨[J].岩石力学与工程学报,2005, 24 (S2):5926-5926.  
CHEN Yunsheng, HAN Xin, LI Ning, et al. Discussion on damage constitutive relation of non-interpenetrated crack media under uniaxial stress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (S2):5926-5926.
- [46] 朱赛楠,李滨,冯振.三峡库区侏罗系泥岩 CT 损伤特性试验研究[J].水文地质工程地质,2016,43(1):72-78.  
ZHU Sainan, LI Bin, FENG Zhen. Research on CT damage characteristics of the Jurassic mudstones in the Three Gorges reservoir area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(1):72-78.
- [47] 刘小红,晏鄂川,朱杰兵,等.三轴加卸载条件下岩石损伤破坏机理 CT 试验分析 [J]. 长江科学院院报, 2010, 27 (12):42-46.  
LIU Xiaohong, YAN echuan, ZHU Jiebing, et al. CT test analysis on rock breakage mechanism under triaxial loading-unloading condition [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(12):42-46.
- [48] 赵淑萍,马巍,郑剑锋,等.基于 CT 单向压缩试验的冻结重塑兰州黄土损伤耗散势研究 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34 (11):2019-2025.  
ZHAO Shuping, MA Wei, ZHENG Jianfeng, et al. Damage dissipation potential of frozen remolded Lanzhou loess based on CT uniaxial compression test results [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(11):2019-2025.
- [49] 刘增利,张小鹏,李洪升.基于动态 CT 识别的冻土单轴压缩损伤本构模型 [J]. 岩土力学, 2005, 26(4):542-546.  
LIU Zengli, ZHANG Xiaopeng, LI Hongsheng. Damage constitutive model for frozen soils under uniaxial compression based on CT dynamic distinguishing [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26 (4):542-546.
- [50] 张全胜,杨更社,任建喜.岩石损伤变量及本构方程的新探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1):30-34.  
ZHANG Quansheng, YANG Gengshe, REN Jianxi. New study of damage variable and constitutive equation of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (1):30-34.
- [51] 代高飞,尹光志,皮文丽.单轴压缩荷载下煤岩的弹脆性损伤本构模型 [J]. 同济大学学报:自然科学版, 2004, 32(8):986-989.  
DAI Gaofei, YIN Guangzhi, PI Wenli. Research on damage constitutive model and evolution equation of coal under uniaxial compression [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(8):986-989.