

国家自然科学基金资助项目(51674248,51304208,51474208)

江苏省自然科学基金资助课题(BK20161184)

江苏高校优势学科建设工程资助项目

水—煤系

沉积岩作用基础研究

姚强岭 李兴华 赵彬 潘凡 王光 陈田 著

SHUI-MEIXI

Chenjiyan Zuoyong Jichu Yanjiu

中国矿业大学出版社

国家自然科学基金资助项目(51674248,51304208,51474208)

江苏省自然科学基金资助课题(BK20161184)

江苏高校优势学科建设工程资助项目

水—煤系沉积岩作用基础研究

姚强岭 李学华
赵 彬 潘 凡 著
王 光 陈 田

中国矿业大学出版社

内容提要

本书是论述水作用下煤系沉积岩力学性能及声发射变化特征的学术著作。系统总结了笔者近年来完成的水岩相互作用的研究成果,提出了煤岩体无损浸水和力学性质损伤特征实验方法,建立了水作用下煤岩体强度及声发射特征测试系统、煤岩损伤力学和数值计算模型。主要内容包括:水作用下煤系沉积岩物理力学性质变化及声发射特征、煤岩组合体及不同粒径类岩试样变形破坏及声发射特征和煤岩/类岩试样损伤数值计算研究等。

本书可供从事采矿工程、岩土工程等领域的科技工作者和工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

水—煤系沉积岩作用基础研究/姚强岭等著.

—徐州:中国矿业大学出版社,2016.10

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3299 - 1

I. ①水… II. ①姚… III. ①沉积岩—研究

IV. ①P588.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 239406 号

书 名 水—煤系沉积岩作用基础研究

著 者 姚强岭 李学华 赵 彬 潘 凡 王 光

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 787×960 1/16 印张 11.5 字数 219 千字

版次印次 2016 年 10 月第 1 版 2016 年 10 月第 1 次印刷

定 价 38.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

煤及煤系沉积岩为煤矿开采期间的直接对象,其稳定性是采矿工程学科研究的前沿和热点之一。煤系顶板多为黏土岩、粉砂岩、砂岩等,其中在煤层顶板之上多存在一层至数层含水砂岩。在煤层采动影响下,煤系顶板含水砂岩容易被连通,进而引起水—煤系沉积岩相互作用。不同岩性煤系沉积岩组分、微结构、力学性质等存在差异,这决定了水—煤系沉积岩作用下岩石力学性能变化特征及规律不尽相同。本著作基于提出的煤岩体力学性质无损浸水实验方法,较为系统地研究了典型水—煤系沉积岩作用下沉积岩的物理力学性质变化及声发射特征,该成果能够应用到煤矿开采过程中水—岩作用下巷道及工作面支护、地下水库边界煤岩柱留设以及防水煤岩柱稳定性评价等方面。

全书共分6章。第1章总结分析了目前水—岩相互作用研究现状;第2章介绍了本书研究内容所涉及的实验原理和方法;第3章研究了单一循环及反复浸水条件下对煤系沉积岩力学性能的影响;第4章根据典型煤系沉积岩粒径匹配特征,研究了水作用下类岩试样变形破坏规律;第5章研究了水作用下煤岩/类岩试样声发射特征;第6章利用数值计算方法研究了水作用下煤岩/类岩试样损伤基本规律。

本著作的完成得到了中国矿业大学采矿工程系多位老师的热情鼓励与帮助,在此表示由衷的感谢。

该书的出版得到了国家自然科学基金项目(51674248,51304208,51474208)、江苏省自然科学基金资助课题(BK20161184)和江苏高校

优势学科建设工程资助项目的资助,在此一并感谢。

由于作者经验与水平所限,书中难免有不妥和疏漏之处,恳请读者批评指正。

著 者

2016 年 8 月

目 录

1	概 论	1
1.1	水—岩相互作用问题的提出	1
1.2	国内外研究现状	2
1.3	本书的主要研究内容	10
2	实验方法及设计	11
2.1	试样制备	11
2.2	实验仪器设备	16
2.3	实验内容与步骤	18
3	水作用下典型煤系沉积岩力学特性	21
3.1	煤岩样吸水性试验	21
3.2	水作用下岩石变形破坏特征	28
3.3	单一吸水及反复浸水煤样变形破坏特征	34
3.4	含水煤岩组合体力学性质和裂隙发育规律	47
3.5	水作用下煤岩样单轴压缩损伤演化方程	54
4	水作用下类岩试样变形破坏特征实验研究	62
4.1	类岩试样吸水性实验	62
4.2	水对不同粒径类岩试样力学性质的影响	65
4.3	粒径对不同含水率类岩试样力学性质的影响	72
5	水作用下煤岩样损伤的声发射特征研究	78
5.1	声发射参数	78
5.2	含水砂岩声发射特征分析	79
5.3	含水煤样声发射特征	87
5.4	反复浸水煤样强度损伤及声发射特征	101

5.5	水作用下不同粒径试样单轴压缩声发射特性研究	113
6	水作用下煤岩体损伤数值计算研究	120
6.1	颗粒流数值计算	120
6.2	基于簇平行黏结模型的细观参数与宏观响应研究	124
6.3	水作用下煤岩体损伤数值计算	141
6.4	不同粒径及含水率试样力学性能及破坏特征	147
6.5	不同粒径及含水率试样 PFC 模拟声发射实验研究	160
参考文献		164

1 概 论

1.1 水—岩相互作用问题的提出

岩石作为自然界的产物,在复杂的地质构造运动影响下,使其呈现明显的不连续性、非均匀性和各向异性等特征。尽管人类对岩石的认识和利用取得了显著进步,但至今相关研究仍局限于一定的范围和条件之下,因为岩石的变形和破坏失稳性质不仅与其自身的微结构密切相关,还受到多种外在因素的影响,其中水又是最为活跃的影响因素之一。水作为自然界极其常见的流体,常常影响岩石强度及形变特征,在很多情况下会加速岩石的变形与破坏^[1,2]。水在岩石中的作用与岩石的结构特征有很大关系,主要表现在两个方面:一是水的物理化学作用,二是水的力学效应。岩石中含有大量孔隙、微裂纹以及节理裂隙等原始缺陷,这些缺陷的存在为水—岩作用提供了条件。水—岩之间发生的物理化学作用不仅会改变岩体的矿物组成与微观结构,使其产生孔隙、溶洞和溶蚀裂隙,还会影响岩石的力学和变形特性,对岩石造成损伤^[3-7]。可见,水—岩共同作用的实质其实是一种从岩石微观结构变化导致其宏观力学特性改变的过程,这种复杂作用的微观演化过程在宏观上表现为自然界岩石强度弱化直至破坏。

从具体工程实践来看,煤矿中涉及水—煤系沉积岩相互作用的主要方面一是富水巷道/工作面围岩控制或承压水上/水体下采煤防突水问题,再者是生态脆弱矿区地下水库储水或者保水开采问题,如图 1-1 所示。

富水巷道/工作面围岩控制问题主要考虑水的渗透作用影响,水—岩作用下岩石性能弱化为研究问题的重点^[8,9];承压水上/水体下采煤研究的重点是在开采影响下含水层水压力与隔水层的隔水能力之间的动态平衡问题^[10-12];而生态脆弱矿区地下水库储水或保水开采问题关注的重点在于储水坝体的稳定、采空区净化水的机理及含隔水层稳定性^[13-15]。本专著针对以上两类问题的共性问题:水—煤系沉积岩相互作用这一基础问题开展了一些研究,并探讨了研究过程中得到的一些基本规律,以期为后续的研究者提供借鉴和拓展研究思路。

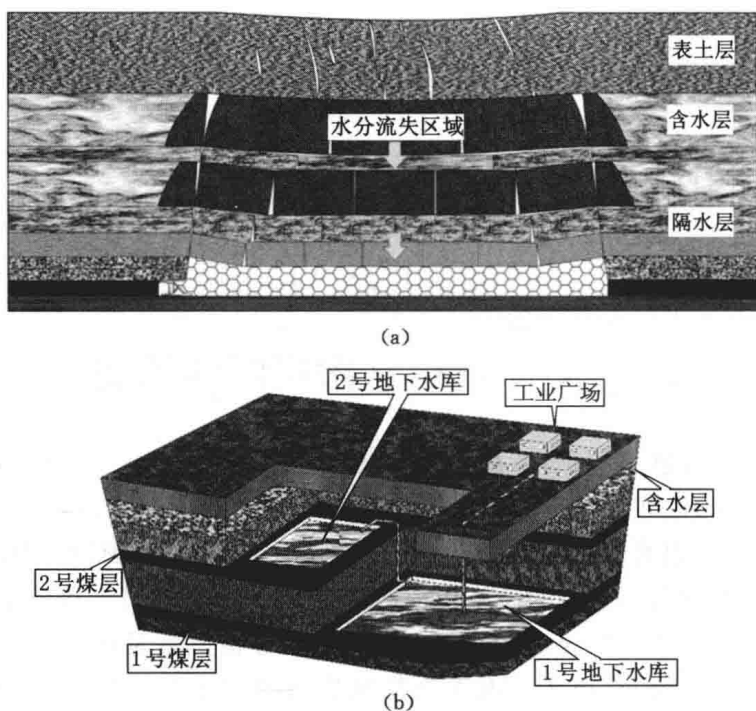


图 1-1 煤矿开采水—岩作用示意图

(a) 煤矿开采引起水—岩作用;(b) 采空区储水水—岩作用

1.2 国内外研究现状

1.2.1 水—煤岩作用基础

煤岩是一种多矿物体,不同岩石所含矿物成分也不尽相同,因而也决定其遇水软化膨胀的性态不同,大部分沉积岩含有黏土质矿物,这些矿物遇水软化、泥化,会降低岩体骨架的结合力,从而表现为各方面的软化性态。一般而言,煤和岩石遇水后强度降低,而对于遇水后强度降低的煤岩体,水是造成其损伤的一个重要原因,有时它比力学因素造成的损伤更为严重^[16]。岩石的单轴抗压强度被水的削弱程度最高可达 90%^[17],而不同的岩石削弱的程度亦相差巨大。例如, C. G. Dyke 等^[18]研究发现,当岩石由干燥状态到转为饱和状态时,其单轴抗压强度只减少 25%~30%。岩石是由颗粒或晶体相互胶结或黏结在一起的聚集体,其遇水作用之后部分矿物性态发生改变,从而影响岩石的力学性质。水对岩石性质影响的内在机理大致分两种类型:第一类是水对岩体的力学作用,主要表

现在静水压的有效应力作用、动水压的冲刷作用。第二类是水对岩体的物理与化学作用,包括软化、泥化、膨胀与溶蚀作用,这种作用的结果是使岩体性状逐渐恶化,以致发展到使岩体变形、失稳、破坏的程度。水—岩物理作用包括润滑、软化、泥化和结合水强化等^[19]。张有天^[20]进一步分析认为水对岩石的化学作用是不可逆的,而物理作用的过程一般是可逆的,力学作用在介质的弹性范围内是可逆的。周翠英等^[21]指出水是对软岩的成分和结构两方面改变共同作用而导致岩体力学性质短时间内大幅度降低。水—岩相互作用过程如图 1-2 所示。

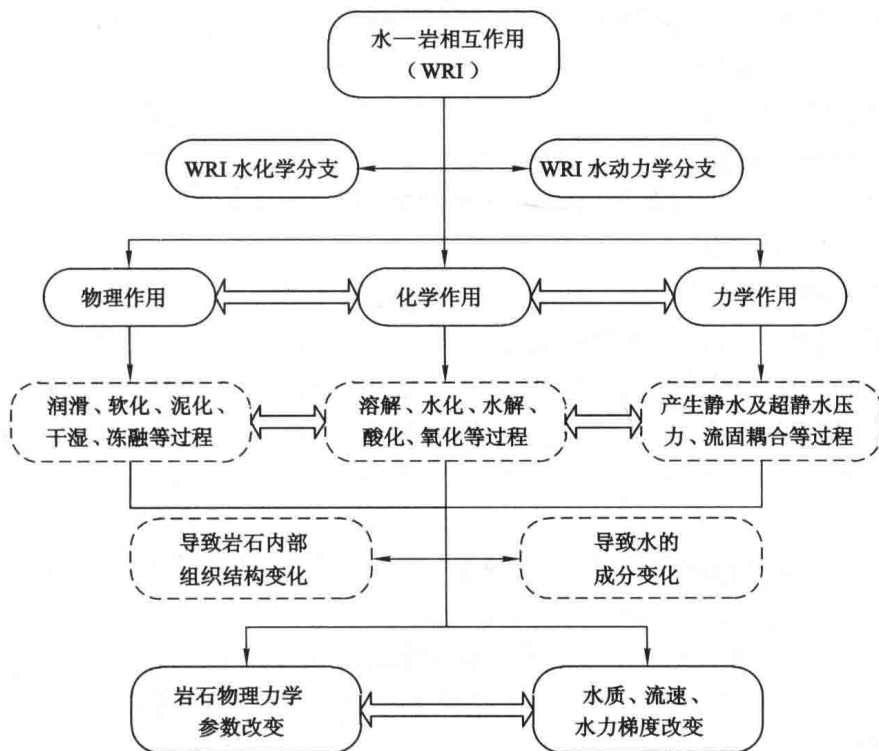


图 1-2 水—岩相互作用示意图

国内外围绕水作用下岩石强度损伤已经做了大量研究工作。国内外一些学者^[22-26]通过室内不同含水状态下岩石的单轴剪切、单轴压缩及三轴压缩试验并结合声波测试结果证实,随着水饱和度的增加,岩石各项力学性能指标都会发生不同程度的降低。刘新荣等^[27]从物理、化学和力学作用三方面入手,研究了水—岩相互作用下的岩石劣化问题,认为水对岩石的物理、化学、力学作用三者是相互影响、相互促进的过程。胡耀青等^[28]利用煤岩三轴应力渗透仪(不排水)研究了孔隙水压对煤样变形特性的影响,得到了弹性模量与孔隙水压的定量关系表达式。孟召平等^[29,30]基于含煤岩系主要几种岩石的单轴和三轴压缩试验,

分析了水对煤系岩石力学性质及冲击倾向性的影响。周翠英、侯艳娟等^[31-34]对几种典型软岩在不同饱水状态下进行单轴和三轴压缩试验,分析了不同饱水状态下软岩试样强度和变形参数的变化规律。王军^[35]在不同含水率状态下红砂岩直剪试验的基础上,对膨胀砂岩的抗剪强度与含水率的关系进行了研究等。傅晏等^[36]、姚华彦等^[37]也对砂岩试样进行了干湿循环试验,研究发现干湿循环对砂岩造成不可逆的渐进性损伤,经过不同次数的干燥—饱水交替作用后,砂岩的弹性模量、抗压强度、黏聚力、内摩擦角等都有不同程度的降低,而且经历过这些循环作用的岩体的损伤程度要比单一水—岩浸泡损伤大得多;M. L. Lin 和 P. A. Hale 等^[38, 39]也对砂岩在干湿循环作用下的力学性质变化规律进行了研究。姚强岭、李学华、潘凡、王光^[40-45]等结合水—煤系沉积岩作用引起煤矿岩石失稳工程背景开展了水—沉积煤岩/类岩试样单轴压缩变形及声发射特征,发现煤系沉积岩遇水后单轴抗压强度、弹性模量、声发射等参数随含水率的升高而降低,具有显著相关性。

水—岩化学作用引起的化学元素在岩石和水之间重新分配及岩石细微结构的改变,导致岩石力学性质的变化^[46-51]。F. G. Bell 等^[52]的研究总结了地下水对岩石和土体工程性质的影响,认为水会加速岩石的化学风化过程,同时指出硅酸盐矿物(包括长石、辉石、角闪石、云母、橄榄石)的风化过程主要是水解过程。汤连生等^[53]对常温常压下不同岩石(花岗岩、红砂岩和灰岩)在不同循环流速的水化学溶液中抗压强度的变化进行了试验研究,结果表明化学作用的劣化效应主要受岩石微结构及非均匀性、孔隙率、胶结物质、矿物成分的综合影响。陈四利等^[54]对岩石破裂特性的化学环境侵蚀进行了考查,得出与空气侵蚀条件相比,裂纹尖端的水或化学溶液使岩石的破裂韧度明显降低;并利用 CT 识别技术对化学腐蚀下的砂岩进行了三轴加载全过程的即时扫描试验,建立了基于化学腐蚀影响和 CT 数的损伤变量模型。许多学者在考虑水基础上,加入了温度等条件的影响^[55-57]。需要注意的是,与岩石发生水—岩作用的并非是纯水,而是含有多种矿物成分的水溶液,甚至是具有明显酸碱性的水溶液。即使是纯净水,在与岩体的长期接触下也会发生岩体矿物成分的离子交换作用,从而导致岩石的微观结构和组成成分发生时效性的改变,使岩石强度降低,发生软化。水—岩化学作用对岩石弹塑性力学特性影响引起了许多学者的关注和研究。R. I. Karfakis 和 M. Askram^[58]研究了化学溶液对岩石断裂韧性的影响;A. Hutchinson 和 J. B. Johnson^[59]利用 HCl, H₂SO₄ 等溶液模拟酸雨,对石灰石的腐蚀作用进行了研究;汤连生等^[60, 61]对水—岩相互作用下的力学与环境效应进行了较为系统的研究,进行了不同化学溶液作用下不同岩石的抗压强度试验及断裂效应试验,对水—岩反应的力学效应机理及量化方法进行了探讨,并将水—岩土化

学作用与地质灾害等岩土体稳定性联系起来。刘建等^[7]针对干燥、饱水、蒸馏水以及不同离子浓度和 pH 值水溶液循环流动作用至水—岩反应平衡后的砂岩试件,开展了一系列单轴压缩试验和 CT 损伤测试,分析了砂岩弹塑性力学特性的水物理化学作用效应与机制。

已有研究发现,岩石的损伤机制取决于水—岩共同作用下岩石内裂隙面物理损伤基元及其颗粒、矿物结构之间的耦合作用,岩石宏观力学性质的变化与微观上水—岩化学作用密切相关^[62,63],为此部分学者开始着眼于水—岩作用的微观研究和物化作用对岩石损伤的影响。H. Komine^[64]通过 SEM 研究发现,物化型软岩无论在聚集体内还是在聚集体间都普遍发育有各种大小不同、形状各异的微孔隙和微裂隙,并研究了其膨胀特性;M. Arnould^[65]从矿物成分及微观结构角度分析了泥岩易崩解的原因,并提出了泥岩中存在不连续网络的观点;黄宏伟等^[66]针对以高岭石为主要黏土矿物的泥岩开展了饱水试验,并基于其微观结构变化规律提出了泥岩软化的微观机制。

相对水与岩石力学特性的研究,水作用下煤体力学特性变化规律的研究相对较少。目前,关于水对煤体力学特性的影响可以概括为浸水后煤体的强度、弹性模量、内聚力等力学参数发生变化且煤体脆性降低、塑性增强。刘忠锋等^[67]进行了煤体的注水实验,得出煤体的单轴抗压强度随着注水含水率的增加而减小,煤体的弹性模量随着注水压力的增加而减小,并得到其相应的线性通式。闫立宏等^[68]通过对浸水煤样的单轴压缩试验得到随含水量的增加,煤的单轴抗压强度、抗拉强度减小;在相同载荷作用下,煤样浸水后,其变形量增加,并且初始阶段曲线上凹明显。郭怀广等^[69]通过数值计算得出煤体注水后弹性模量有一定降低,且随着含水量的增加,煤体抗压强度不断减小。潘立友等^[70]通过实验得出水对煤岩的强度特性、变形特性和冲击倾向性都有着重要的影响。煤样随含水率的增加,强度和弹性模量降低且降低程度具有明显的时间效应,孔隙率和泊松比增大。齐元学^[71]由超声波试验和单轴抗压试验得出随含水率的增加,煤样弹性模量、剪切模量和坚固性系数逐渐减小,同一应力情况下,应变增大、塑性增大、脆性减小、煤样最后塑性破坏。郭海防^[72]用不同溶液对煤样进行浸泡试验,得出不同溶剂对煤的浸润性不同,且煤岩强度和弹性模量随含水率的增加而减小,煤岩泊松比随含水率的增大而增大,并利用岩石强度变形理论推导出煤岩强度和弹性模量的弱化方程。宋维源等^[73]分析含水煤岩全程应力—应变曲线得出,过峰值后曲线较原来平缓,试件破坏时,属于逐渐缓慢破坏。韩桂武、周英^[74]认为煤岩体经过注水湿润后,会改变它原有的物理力学性质及应力分布状态,煤层的脆性和强度会随着煤层的湿润而降低,减缓应力集中。于警伟等^[75]、窦林名等^[76]、郭启明等^[77]研究认为,水进入煤体后会改变煤的物理力学性质,

使其脆性减弱、塑性增强。姚强岭、赵彬、陈田^[78,79]等研究发现,水作用下煤样单轴抗压强度、弹性模量等与含水率大致呈负线性函数关系。

1.2.2 岩石损伤力学研究现状

在环境侵蚀或外部载荷作用下,材料由于细观结构(微裂隙、微孔洞等)引起的材料或结构的不可逆的劣化过程称为损伤。目前,损伤力学研究方法主要有两种基本思路:一种是从岩石微元强度随机分布事件出发,建立损伤变量和应力—应变的关系,从而建立岩石本构关系来模拟试验结果;另外一种是以试验为基础,假设岩石材料在载荷作用下应力—应变状态和损伤变量服从某种条件关系,再用假设的模型来模拟试验后所得应力—应变关系,建立损伤本构模型。L. S. Constanin 等^[80-83]率先进行了岩石或岩体损伤弱化机理的理论和试验研究,并将损伤变量引入本构关系,以便更加全面地反映岩体结构特性(塑性变形、各向异性、剪胀效应)。20 世纪 90 年代随着岩体工程的大规模建设,国内外诸多学者^[84-86]将岩石损伤力学理论运用于复杂裂隙岩体损伤特征和本构关系取得了具有一定应用价值的研究成果。近年来,岩石损伤力学发展迅速,已成为岩石力学研究的前沿阵地,根据其研究方法的立足点和研究尺寸可分为微观、细观和宏观损伤力学。

· 微观岩石损伤力学采用量子力学和统计力学方法在分子、原子层次上研究材料的物理过程、确定损伤对微观结构的影响,进而推测宏观力学效应。由于微观岩石损伤力学理论不够完善等原因,仅能定性地解释部分损伤现象。而细观岩石损伤力学认为岩石是非均质的微细观结构,通过对颗粒、晶体、空洞等微观结构层次研究各类损伤的形态、分布及演化特征;进而建立材料的宏观损伤演化方程和本构关系,从而预测岩石的宏观力学特性。A. L. Gurson 和 S. Nemat-Nasser、Z. P. Bazant 等对细观损伤结构与力学之间的定量联系进行了研究^[87-90]。凌建明、孙钧^[91]借助扫描电镜研究了岩石的细观损伤过程,建立了脆性岩石细观损伤模型。任建喜、葛修润、杨更社等^[92-94]利用 CT 技术对岩石内部细观损伤进行识别,建立了以 CT 数为损伤变量的岩石细观损伤本构模型。此外,部分学者利用统计物理数学理论研究了岩石细观损伤的演化和发展。曹文贵、杨胜奇等人利用 Weibull 和 Sahimi 等提出的 Weibull 统计假设理论进行了岩石损伤本构模型的建模研究^[95,96]。

宏观岩石损伤力学认为,包含各类缺陷和结构的岩石是一种连续体;损伤作为一种均匀变量在其中连续分布;损伤状态由损伤变量进行描述,最后根据力学、热力学基本公式和定理推求损伤体的本构方程和损伤演化方程。K. E. Loland^[97]基于应力—应变曲线和应变等价原理建立了岩石单轴压缩损伤模

型。王金龙^[98]根据连续损伤力学原理,把裂隙的体积应变作为损伤变量定义,分析了单轴压缩状态下大理岩的损伤与断裂扩展。周光泉、沈新普等^[99,100]也基于不可逆热力学原理和连续介质损伤力学理论对岩石类材料的损伤演化进行了试验、理论和数值模拟研究。叶龄元^[101]将岩石类材料分为未损伤和损伤两种来讨论它的自由特性,并引入内蕴时理论,建立了岩石内时损伤模型。吴政等^[102]根据 Weibull 的统计理论从唯象学的角度出发,推导出了岩石单轴压缩载荷作用下的损伤模型。杨友卿^[103]根据岩石材料强度的概率统计特征并结合莫尔准则,建立了三轴压缩应力状态的岩石损伤本构模型。王军保等^[104]假定岩石微元强度服从 Weibull 分布, Hoek-Brown 强度准则作为岩石微元统计分布变量。杨圣奇等^[105]基于岩石的应变强度理论和岩石强度的随机统计分布假设,采用损伤力学理论,考虑微元体破坏及弹性模量与尺寸之间的非线性关系,建立了单轴压缩下考虑尺寸效应的岩石损伤统计本构模型。杨明辉等^[106]通过常规单轴压缩试验所得到的峰值点的应力—应变值与围压的关系进行拟合得到了任意围压下的岩石损伤软化统计本构模型,并根据岩石损伤软化统计本构模型参数与岩石软化变形破裂过程的应力—应变全曲线的特征参量的理论关系确定了模型参数。张晓君等^[107]在岩石应变软化变形全过程的损伤统计本构模型基础上,根据单轴压缩应力—应变全过程曲线,进一步明确了本构模型中分布参数的物理意义和实际意义,提出了模型参数的确定方法。杨松岩^[108]、周飞平^[109]、韦立德^[110]等在 Terzaghi 型本构模型及 Darcy 定律的基础上,把面积分数、体积分数等作为损伤变量,建立了非饱和和饱和岩石损伤统计本构模型。

1.2.3 基于声发射的岩石损伤特征

材料受外力或内力作用时,其局部因能量的快速释放而发出的瞬态弹性波现象,称为声发射(Acoustic Emission, AE)。声发射是一种常见的物理现象,大多数材料变形和断裂时都伴有声发射发生。在岩石力学与岩石工程领域,声发射作为岩石破坏过程中的一种伴生现象,蕴含着岩石内部破坏过程的许多信息,逐渐成为岩石力学特性和损伤演化规律研究的重要途径,因此得到越来越多相关学者的重视。岩石的损伤不仅与其内部的节理裂隙分布(可认为是初始损伤)有关,更为重要的是与受载后的损伤演化过程直接相关。岩石的声发射活动性反映岩石内部的损伤演化状况。声发射事件发生的位置是岩体发生损伤和变形局部化的区域,而且损伤的程度与该位置声发射的能量释放率有着必然的联系。

现代声发射技术始于德国科学家 Kaiser 的研究工作,其在博士论文中提出

的“Kaiser 效应”对声发射的发展具有重要意义。20 世纪 60 年代 Goodman 通过试验证明岩石在受载加载过程中同样存在“Kaiser 效应”,使得声发射技术在岩石力学领域快速发展。K. Mogi^[111]、P. Ganne^[112]等对岩石受压破裂过程中的声发射特征进行了研究,并总结出岩石受压破坏过程中声发射的 4 个阶段。C. Li 和 E. Nordlund^[113]用声发射测量由爆破引起的损伤,并通过起始应力曲线估算爆破干扰的影响范围。M. Cai 等^[114]提出一种利用声发射监测数据结合有限元应力分析对岩体强度参数进行反演的新方法,其反算的岩体强度参数与现场测试结果相符合。P. P. Nomikos 等^[115]对 2 种希腊大理岩进行了抗弯承载试验,通过加载过程中的声发射监测对岩石的细观损伤进行了详细分析;A. Tavallali 和 A. Vervoort^[116]在巴西测试条件下对层状砂岩进行了声发射检测,指出层状砂岩的声发射累计数示意图能够被划分为 2 个连续的半抛物线;M. C. He 等^[117]在室内对真三轴卸荷状态下石灰岩岩爆过程的声发射特性进行了研究。D. Lockner 提出了微破裂损伤与声发射一致性的重要看法,并认为虽然检测到的声发射数量不到岩石样本中实际微破裂数目的 1%,但声发射信号还是给出了包含微破裂的位置、模式、震级强弱和能量释放率等参数的重要信息^[118]。E. Eberhardt 等和 M. S. Diederichs 等基于室内岩石试样声发射时间序列确定了裂纹萌生的阈值、裂纹相互作用及岩石初始屈服的阈值,并证实了这两者所对应的应力水平正是现场岩体强度的下限和上限^[119,120]。S. H. Chang 和 C. I. Lee 应用声发射的张量分析,评估三轴压缩条件下岩石裂纹和损伤分析^[121]。D. P. Jansen 等应用声发射技术研究了岩石破裂过程中随着时间变化的三维微裂纹分布,描述岩石损伤累积、裂纹成核以及宏观裂纹扩展。声发射计数和能级表明岩样试验中裂纹断裂产生的声发射的数量和密度^[122]。B. J. Pestman 等利用声发射技术对砂岩的损伤扩展进行了研究,给出一种应力空间内损伤面的定义,损伤面上的点可由声发射活动来表示^[123]。

尽管我国声发射技术的应用研究晚于国外,但经过三十多年的努力也取得了长足的发展。李宏等^[124]对定向岩芯进行了声发射 Kaiser 效应试验,并将声发射 Kaiser 效应测量结果与水压致裂法的测量结果进行了对比,两者具有很好的一致性。彭苏萍等^[125]通过相似物理模拟实验和数值模拟技术对沉积相变岩体声波速度特征及其影响因素进行了分析。李庶林等^[126]在刚性试验机上,对单轴受压岩石破坏全过程进行声发射实验,得到了岩石破坏全过程力学特征和声发射特征,研究了声发射事件数(AE 数)、事件率与应力、时间之间的关系。余斐^[127]、李术才等^[128]研究了单轴压缩条件下岩石失稳破坏的声发射特征,并提出了相应的损伤模型。姚强岭等^[42]研究了砂岩随含水率变化的声发射特征,发现声发射计数峰值较应力峰值位置滞后,呈现出“延迟”特征,并据此提出了预

测预报该类砂岩顶板稳定的技术思路。赵兴东^[129]、张茹^[130]、蒋海昆^[131]等研究了花岗岩在不同应力状态下(拉伸、压缩和剪切)的声发射特征,并根据试验结果分析了声发射的时序特征。吴贤振等^[132]通过对不同岩性的岩石进行单轴压缩声发射试验对比了不同岩石的不同力学性质、岩石声发射序列的时域特征和声发射序列的分形特征。为更深刻地研究破裂失稳过程中岩石内部微裂纹孕育、发展的三维空间演化模式,许江^[133]、裴建良^[134]等对岩石受压破坏过程中的声发射进行了定位分析。王其胜^[135]、赵伏军^[136]等在动静组合载荷多功能试验装置上,以脆性岩石(花岗岩)为研究对象,进行不同载荷作用下的破碎试验,获得了动静组合加载下花岗岩声发射能量的变化规律。邹银辉利用煤岩损伤理论研究了煤岩的声发射机理,探讨了如何根据声发射变化特征判断岩石的破坏动态^[137]。蒋宇等研究了岩石在疲劳破坏过程中的声发射特征^[138]。高峰等应用分形理论研究了岩石的声发射特征^[139]。唐春安等提出了“声发射率与岩石的损伤变量具有一致性”的学术观点^[140-143]。席道瑛和万志军等研究了加载速率对岩石力学性质及声发射率的影响^[144,145]。

目前,声发射技术在岩石力学岩土工程中的应用愈发广泛,已有不少学者考虑到水对声发射监测结果的影响。有关研究表明,纵波在岩体中的传播速度明显地受结构面及水的影响,对于岩石来说,结构完整,对声波速度的影响主要是水及微裂隙,水的影响更为显著^[146,147]。王煜霞等^[148]分析了不同成因类型岩石的声波速度,提出了水对不同岩石声波速度的影响,从岩石孔隙及隐微裂隙的发育程度及岩石的水理性质解释了在水的作用下岩石声波变化规律;陈旭等^[149]利用智能声波仪对红砂岩、大理岩和花岗岩试样在干燥及饱和条件下进行了声波纵波透射试验,研究声波在岩石中传播的速度特征,同时利用傅立叶变换及小波变换研究声波在岩石中传播的波形、波幅衰减规律、波谱特征^[150];朱合华等^[151]试验研究了饱水对致密岩石声学参数影响,包括波速、声波主频、波速的各向异性特征等。吴刚等^[152]对4种岩石(花岗岩、细砂岩、中砂岩和石灰岩)试样在自然和饱水状态下进行了物理量的量测以及超声纵横波波速的检测,并对各种岩石在上述状态下的密度、含水率、纵横波波速以及波速比等参量进行了分析比较。文圣勇等^[153]利用微机控制电液伺服岩石三轴试验机,分别对不同含水率砂岩进行常规单轴压缩试验,分析其声发射振铃数和累计振铃数曲线后发现水对砂岩的力学特性和声发射特征有较大影响。类似的实验也应用于煤样,证明了水对煤样的声发射特性同样影响明显^[154]。陈子全等^[155]开展了砂岩在不同围压下的水—力耦合试验,发现声发射累计振铃计数和累计能量大致随着水压的增大而增大。

1.3 本书的主要研究内容

本书围绕水—岩作用引起的煤系沉积岩力学性能变化问题,开展了相关研究,主要研究内容如下:

(1) 开发了煤系沉积岩含水率无损浸水实验装置,并开展了典型煤系沉积岩无损浸水实验研究。

(2) 探讨了典型煤系沉积岩/类岩试样不同含水率条件下单轴抗压强度、弹性模量、应力—应变曲线等力学参数的变化特征;并通过声发射计数等参数分析了含水率对试样声发射特征的影响。

(3) 研究了变加载速率对含煤岩组合体峰值强度、弹性模量、应变软化模量及后峰值模量变化特征的影响规律,并利用刚度应力关系和声发射累计计数与应力—应变关系反演煤岩组合体裂隙发育的各个阶段。

(4) 运用损伤统计理论和 Lemaitre 应变等价性假说,推导出了能反映含水率影响的煤岩损伤统计模型;结合声发射及损伤理论建立了不同含水率和反复浸水下煤岩损伤演化模型。

(5) 利用 PFC^{2D} 数值计算研究了煤岩/类岩试样的单轴压缩强度及声发射特征,并探讨了含水率、粒径对岩石变形特征的影响作用。