

学术著作 · 工程安全防护理论与技术系列



岩石水热耦合损伤 及其静动力学行为

许金余 王鹏 ◎ 著

YANSHI SHUIRE OUHE SUNSHANG

JIQI JINGDONG LIXUE

XINGWEI

非
外
借

西北工业大学出版社

学术专著·工程安全防护理论与技术系列

岩石水热耦合损伤及其 静动力学行为

许金余 王 鹏 著

国家自然科学基金资助项目(51378497)

西北工业大学出版基金资助项目

西北工业大学出版社

西 安

【内容简介】 本书以岩石的准静态及冲击力学试验为基础,从物理水理特性、超声特性、宏观变形破坏、微观结构及形貌分析、能量与损伤等角度,全面分析水热耦合损伤岩石准静态及冲击荷载作用下的力学行为。通过分析岩石密度、孔隙率、纵波波速等指标经冻融循环及热冲击循环作用后的变化,研究岩石的水热耦合损伤规律;基于大直径分离式霍普金森压杆系统进行水热耦合损伤岩石的准静态压缩、劈拉、变角剪切,不同应变率条件下的压缩、劈拉试验,获取水热耦合损伤岩石试样受准静态及冲击荷载变形破坏的应力-应变数据,分析其在不同水热耦合损伤条件下的力学行为;分析水热耦合损伤岩石变形破坏过程中能量的吸收、转化及耗散规律,基于耗散能构建不同应变率加载条件下损伤岩石变形破坏过程的损伤演化机制;基于微观电镜扫描仪观测不同水热耦合损伤条件下岩石的微观结构变化及损伤岩石不同应变率荷载作用下的断裂面形貌,揭示水热损伤及应变率耦合作用下岩石的破坏机理。

本书可作为高等院校土木工程专业的教学用书,对于岩石力学相关领域的科研人员和工程技术人员也具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

岩石水热耦合损伤及其静动力学行为/许金余,
王鹏著. —西安:西北工业大学出版社,2017.11
ISBN 978-7-5612-5707-4

I. ①岩… II. ①许…②王… III. ①岩石破坏机
理—研究 IV. ①TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 259933 号

策划编辑:肖亚辉

责任编辑:李阿盟

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号

邮编:710072

电话:(029)88493844 88491757

网址:www.nwpu.com

印刷者:陕西向阳印务有限公司

开本:727 mm×960 mm

1/16

印张:15.5

字数:264 千字

版次:2017 年 11 月第 1 版

2017 年 11 月第 1 次印刷

定价:48.00 元



前 言

随着经济建设的不断发展,地下岩层空间得到越来越多的开发利用。自然岩体多赋存于多场耦合环境,对岩石力学行为影响显著,是岩石工程不得不考虑的重要因素。众所周知,地下岩体多为水-热-岩耦合系统。受自然地理条件,资源分布,国际国内政治、经济形势影响,我国东北、西北、西南等高原、寒冷地区战略地位重要。随着西部大开发、一带一路、振兴东北老工业基地等战略的实施,包括矿山开采、水电站建设、高原山地机场、铁路公路隧道、地下石油天然气储库、地下防护工程建设等各类寒区岩石工程正以前所未有的速度展开。在寒区岩石工程中,气候变化、岩体开挖形成新的裸露面、工程内部新的人工热源,以及岩体爆破衍生的高温及地下水回流冷却等均会导致工程岩体形成新的温度场。在与水环境耦合作用下,岩体内部温度场变化将导致水发生迁移、固-液-气相变等效应。这种水热耦合效应将诱发岩石发生强烈的冻融、热冲劣化损伤。另外,地下岩石工程从施工建设到使用维护的全寿命阶段,将会面临开挖爆破、地震扰动、工程内部振动源等冲击动荷载作用。为科学开展岩石工程建设,对水热耦合损伤岩石的动态力学行为进行系统的认识和研究是重要前提。本书正是笔者在深入研究这个课题的基础上,总结多年研究成果编撰完成的。

本书依托国家自然科学基金(中高应变率荷载与高温耦合作用下岩石的动力学特性及能量机制研究,51378497),以分离式霍普金森压杆试验系统,液压伺服控制万能试验机,冻融、热冲击循环系统,超声检测仪,电镜扫描仪为主要试验研究手段,进行水热耦合损伤岩石静态及冲击力学特性试验及理论研究。研究饱水岩石经冻融循环、热冲击循环作用后的物理水理特性,分析岩石密度、孔隙率、纵波波速等指标的变化规律;介绍大直径分离式霍普金森压杆系统,进行水热耦合损伤岩石的准静态压缩、劈拉、变角剪切,不同应变率条件下的压缩、劈拉试验,获取水热耦合损伤岩石试样受准静态及冲击荷载变形破坏的应力-应变数据,分析其在不同水热耦合损伤条件下的力学行为;分析水热耦合损伤岩石变形破坏过程中能量的吸收、转化及耗散规律,基于耗散能构建不同应变率加载条件下损伤岩石变形破坏过程的损伤演化机制;基于微观电镜扫描仪观测不同水热耦合损伤条件下岩石的微观结构变化及损伤岩石不同应变率荷载作用下的断裂面形貌,揭示水热损伤及应变率耦合作用下岩石的破坏机理。研究成果在防护工

程、交通运输工程、岩石力学与岩石工程、工程材料等领域具有一定的学术价值；对指导地下防护工程抗力设计及确保武器打击下的工程安全具有十分重要的军事意义；可为水利水电、资源开采、隧道交通、能源储备、核处理、防灾减灾等岩石工程的建设与运行提供科学依据，具有良好的国民经济效益和应用前景。

本书由许金余、王鹏撰写，由郑颖人院士审稿。方新宇、王佩玺、王浩宇、刘少赫、郑广辉、闻名等同志参与了本书试验研究、数据整理、结果分析的部分工作及部分内容录入、图表绘制等工作。在此谨向帮助完成此书的同志表示衷心的感谢！

由于水平有限，书中难免有不足和欠妥之处，恳切希望读者予以批评指正。

著 者

2017 年 7 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 工程背景和意义	1
1.2 岩石水热损伤及力学特性研究现状	2
1.3 相关研究问题的提出	8
1.4 本书的主要内容	9
第 2 章 岩石水热耦合损伤试验	11
2.1 引言	11
2.2 岩石室内水热耦合损伤试验准备	11
2.3 红砂岩冻融循环、热冲击循环试验	16
2.4 水热耦合损伤红砂岩超声检测及时频特性分析	27
2.5 小结	37
第 3 章 水热耦合损伤岩石静力学行为	38
3.1 引言	38
3.2 水热耦合损伤岩石静态压缩力学行为	38
3.3 水热耦合损伤岩石静态拉伸力学行为	50
3.4 水热耦合损伤岩石变角剪切力学行为	61
3.5 小结	70
第 4 章 水热耦合损伤岩石冲击力学行为	72
4.1 引言	72
4.2 岩石 SHPB 冲击加载试验概述	72
4.3 冻融循环损伤岩石冲击压缩力学行为	83
4.4 热冲击循环损伤岩石冲击压缩力学行为	93
4.5 水热耦合损伤岩石冲击劈拉力学行为	103
4.6 小结	113
第 5 章 考虑应变率的岩石水热耦合损伤劣化模型研究	114
5.1 引言	114
5.2 考虑应变率的岩石力学指标衰减模型	114
5.3 冻融及热冲击循环损伤岩石抗压强度衰减模型研究	116

5.4	冻融及热冲击循环损伤岩石变形模量衰减模型研究	124
5.5	冻融及热冲击循环损伤岩石劈裂拉伸强度衰减模型研究	132
5.6	小结	139
第6章	水热耦合损伤岩石压缩破坏能量与损伤演化机制	140
6.1	引言	140
6.2	岩石变形破坏过程中的能量转化与耗散	140
6.3	水热耦合损伤岩石压缩破坏过程能量演化规律	144
6.4	水热耦合损伤岩石压缩破坏过程各阶段能量特征指标	149
6.5	水热耦合损伤岩石压缩破坏过程各阶段能量耗散率	164
6.6	基于能量的水热耦合损伤岩石压缩破坏过程损伤演化机制	167
6.7	小结	177
第7章	岩石水热耦合损伤及应变率效应的细观机理分析	179
7.1	引言	179
7.2	基于 SEM 的岩石损伤细观特征分析方法	179
7.3	红砂岩细观结构特征	185
7.4	红砂岩水热耦合损伤细观机制	191
7.5	水热耦合损伤红砂岩受载破坏细观机制	206
7.6	小结	221
第8章	结论与展望	223
8.1	结论	223
8.2	展望	225
参考文献		226

第 1 章

绪 论

1.1 工程背景和意义

地下工程围岩及地面工程岩基常处于复杂的水热场环境^[1],且在其建设、使用的全寿命周期面临各种机械、爆破等冲击荷载作用^[2]。冻融(Freeze-Thaw, F-T)和热冲击(Thermal Shock, TS)是工程中常见的岩石水热耦合损伤形式^[3-4]。在冻融和热冲击过程中,温度和水相互耦合,对岩石力学行为影响显著,是岩石工程不得不考虑的重要因素。研究岩石水热耦合损伤及损伤岩石的冲击力学行为^[5]对岩石工程设计建设和稳定性评估具有显著的工程价值和军事意义。

随着人类文明水平的发展,寒区已逐渐被世界各国开发利用^[6]。我国东北、西北、西南等高原、寒冷地区^[7-8]分布着丰富的土地、矿产、清洁能源、生物等资源,其地理位置连通着东北亚、中亚、欧洲、南亚等方向,该地区的工程建设和资源开发对我国国民经济发展具有战略性作用。随着西部大开发、东北振兴、一带一路等战略^[9]的实施,包括矿山开采、水电站建设、高原山地机场、铁路公路隧道、地下油气储库等各类岩石工程在上述地区正以前所未有的速度展开。我国寒区岩石工程需求明显,发展迅速,但寒区工程岩石水热状态复杂多变^[10],也使得此类地区岩石工程面临着边坡基础冻融滑塌,隧洞冻胀失稳,含水岩石(甚至是冻岩)受机械、爆炸高温热冲击破坏等岩石水热耦合损伤问题^[11-14]。诸如此类工程岩体所处的温度-水环境均十分复杂,对开挖、爆炸等引发的温度急剧变化带来的扰动非常敏感,受地震、机械、爆破等冲击荷载作用影响很大^[15]。如能在实验室内实现对水热耦合损伤岩石动荷载作用下力学特性的研究,将会产生巨大的学术价值及工程效益。

在这些国民经济建设工程实践中,有两个问题值得深入研究。其一是工程岩石受冻融、热冲击等水热耦合损伤劣化,其二是工程岩体受机械、爆破、地震、设备等冲击或扰动失稳。这两个问题跟岩石所赋存的水热环境及所遭受的动力灾害密不可分。众所周知,岩体实质为水-热-岩耦合系统。在岩石工程中,气温变化、地热、岩体开挖形成新的裸露面、工程内部新的人工热源、核放射,以及岩体爆破衍生的高温及地下水回流冷却等均会导致工程岩体温度场变化,产生热应力损伤^[4,16]。在与水环境耦合作用下,岩体内部温度场变化将导致水发生迁移、固-液-气相变等

效应。这种水热耦合效应将诱发岩石发生强烈的冻融、热冲击劣化损伤。另外,岩石工程从施工建设到使用维护的全寿命阶段,将会面临开挖爆破、地震扰动、工程内部振动源等冲击动荷载作用。作为一种率敏感材料^[17],工程岩石的力学行为和工程特性受动荷载作用影响显著。

为对上述工程问题进行深入的试验和理论分析,在进行具体研究时,把“岩石所赋存的水热环境 + 所遭受的动力灾害”这一实际工程问题上升到科学层面,即为水热耦合损伤岩石的冲击动力学问题。深入研究水热耦合损伤岩石的冲击动力学行为将对科学认识水热环境下岩石的力学特性、指导岩石工程建设、保障工程结构安全产生重要作用。

基于此,本书依托国家自然科学基金项目(中高应变率荷载与高温耦合作用下岩石的动力学特性及能量机制研究,NO.51378497),瞄准岩石工程中亟待解决的“岩石水热耦合损伤 + 动力灾害”问题,针对现有研究的不足之处,选取典型岩样,以冻融、热冲击循环试验系统、超声检测仪、电镜扫描仪、电液伺服控制试验机、分离式霍普金森压杆(SHPB)系统等为主要试验研究手段,进行岩石的冻融循环损伤和热冲击循环损伤试验,损伤岩石的物理检测、静态及不同应变率下的冲击压缩及拉伸特性试验,不同状态下损伤岩石的超声检测、表面电镜扫描和破坏断口扫描试验,旨在对工程岩石水热耦合损伤演化规律,受冲击荷载作用变形破坏的强度特性、变形规律、能量机制,水热耦合损伤和受载破坏应变率效应的微细观机理等问题做出研究,对解决相关工程问题提出有益结论。研究成果在交通运输工程、岩石力学与岩石工程、工程材料等领域具有一定的学术价值;可为水利水电、资源开采、隧道交通、能源储备、核处理、防灾减灾等岩石工程的建设与运行提供科学依据,具有良好的国民经济效益和应用前景。

1.2 岩石水热损伤及力学特性研究现状

1.2.1 岩石冻结或冻融循环损伤

受温度、含水状态、岩石特性、约束等因素的复杂影响,冻结和冻融损伤^[18]岩石物理力学特性呈现出复杂的变化规律。对此,国内外学者通过试验、理论模型、数值分析等方式进行了大量的研究工作。

1. 国外研究进展

在国外,从 20 世纪 70 年代起开始出现冻岩力学问题研究。冻结或冻融对岩石物理力学特性的影响首先得到关注。Winkler 等人^[19](1968 年)做了大量冻结岩石强度试验,对孔隙冰的膨胀压力进行了测定。Prick^[20](1995 年)分析了两种

岩石冻融条件下的各向异性体积膨胀现象。Yamabe 等人^[21] (2001 年)发现在一次冻融循环下干燥和饱和岩样的轴向变形分别为弹性变形和塑性变形。Nicholson 等人^[22] (2000 年)、Inigo^[23] (2013 年)研究了多种岩石经历冻融循环后质量、颜色、超声波速等物理参数的变化特征。Khanlari 等人^[24] (2015 年)对采自伊朗的红砂岩在干湿、冻融、冷热循环条件下的物理力学性能进行了研究。Bayram^[25] (2012 年)、Kolay^[26] (2016 年)、Ghobadi 等人^[27] (2016 年)研究了多种岩石单轴压缩强度随冻融循环次数增长的衰减规律。Al - Omari 等人^[28] (2014 年)、Fener 等人^[29] (2015 年)、İnce 等人^[30] (2016 年)、Heidari 等人^[31] (2016 年)分别对其本国内多处古建筑、石窟等岩石在冻融作用下单轴抗压强度等力学参数的变化规律进行了研究。这些研究均表明,岩石在经受冻融循环后,其物理指标、强度参数和变形特性会发生不同程度的衰减劣化。

通过控制变量的方法,影响岩石冻融损伤的多种因素也得到了广泛研究。Inada 等人^[32] (1984 年)、Kodama 等人^[33] (2013 年)分析了含水率、冻结温度、加载速率等因素对冻岩力学特性的影响规律。Hall 等人^[34] (1988 年)基于页岩的冻融试验,发现岩石内部的相变温度受含水状态、盐分、冻融温度范围及冻结速率等因素的综合影响。Nicholson 等人^[22] (2000 年)基于对十种沉积岩试件的反复冻融试验,分析了岩石内部原有裂隙与其冻融破坏之间的相关性。Zakharov 等人^[35] (2014 年)研究了岩石在负温条件下冻结温度变化对破坏过程能量耗散的影响。Watanabe 等人^[36] (2002 年)、Chen 等人^[37] (2004 年)、Al - Omari 等人^[38] (2015 年)发现岩石冻融后强度损伤变化规律受其内部含水量及未结冰水含量影响。Sudisman 等人^[39] (2016 年)通过三种岩样的冻融循环和拉伸试验,分析了岩样种类、孔隙率、含水率对冻融损伤程度的影响。相关研究普遍发现,冻融温度、孔隙率、试样含水率、初始裂隙等因素对岩石的冻融损伤影响明显。

对岩石冻融损伤模型和水热耦合作用机理的研究也得到了一些学者的重视。Neaupane 等人^[40] (1999 年)构建了岩石水热力耦合系统并用于冻融循环损伤的模拟分析。Exadaktylos^[41] (2006 年)基于连续介质理论提出了一种适用于岩土类饱和和孔隙材料的冻融损伤模型。Ghoreishi - Madiseh 等人^[42] (2011 年)对寒区地下洞室回填引起的冻岩融化问题进行了仿真研究,构建了水热迁移模型。相关研究表明,从水热耦合角度研究岩石冻融问题能够有效地揭示其作用机制。

许多学者从微细观角度分析冻融损伤的机理,得到了许多有益的结论。Matsuoka 等人^[43] (1990 年)发现了岩石的内部微观结构的冻胀联合作用是导致其冻融损伤破坏的主要因素。Hori 和 Morihiro^[44] (1998 年)构建了岩石类孔隙材料冻融循环过程中的微观力学模型,分析其损伤过程。Ruiz 等人^[45] (1999 年)、Kock 等人^[46] (2015 年)、Park 等人^[47] (2015 年)运用 X - 射线衍射、SEM 及 CT 扫描技术对岩石冻融循环环境下的孔隙结构及微观损伤进行了研究。借助于微细观观

察,相关研究对揭示岩石冻融过程中的微细观损伤有重要作用。

2. 国内研究进展

在国内,随着大量寒区基础设施建设的展开,冻岩力学及工程问题的研究近年来发展迅速,成果丰富。

诸多学者对岩石在冻结和冻融状态下的物理力学特性变化进行了大量的研究。何国梁等人^[48](2004年)、杨更社等人^[49](2006年)、吴刚等人^[50](2006年)、林战举等人^[51](2011年)、Liu等人^[52](2012年)、张慧梅和杨更社^[53-54](2013年)、吴安杰等人^[55](2014年)分析了多种岩石在循环冻融过程中体积、质量、纵波波速等物理参数和抗压强度、模量、抗拉强度等力学参数的变化规律。单仁亮等人^[56](2014年)利用冻三轴试验机研究了负温条件下梅林庙矿红砂岩的力学特性与变形规律。方云等人^[57](2014年)将取自云冈石窟的砂岩岩样进行饱水和干燥条件下的循环冻融试验,模拟云冈石窟砂岩的风化过程,得到不同含水状态下云冈石窟砂岩岩样循环冻融条件下的主要物理力学特性。Gao等人^[58](2016年)对冻融和化学溶剂耦合作用下红砂岩物理力学参数的劣化进行了分析。相关研究涵盖了多种岩石材料和冻融环境,发现岩石的冻融问题具有普遍性。陈招军等人^[59](2017年)研究了两种含水率砂岩冻融循环后的加载、卸载特性。

受温度、含水状态、岩石初始状态的影响,岩石冻融损伤有所区别。徐光苗等人^[60](2005年)基于试验研究系统分析了岩性、孔隙特征、冻融周期及次数、溶液、温度范围、应力状态对岩石冻融循环损伤的影响。张继周等人^[61](2008年)对3种岩石分别进行了两种水化环境下的冻融循环试验,分析水化环境对不同岩石的损伤劣化机制。杨更社等人^[62](2010年)针对煤岩和砂岩,重点研究了围压和冻结温度等因素对冻结岩石三轴强度的影响。罗学东等人^[63](2011年)对4种典型岩样经过不同次数冻融循环的物理力学特性变化进行研究,表明冻融损伤与岩石自身强度和致密程度相关。Jia等人^[64](2016年)通过观察不同含水率岩样冻融过程中的应变情况,认为部分孔隙饱和即可造成岩石明显的冻融损伤。Qin等人^[65](2017年)通过核磁共振技术检测经液氮冻融循环后的煤岩岩样,发现煤的初始孔隙率对冻融损伤有一定影响。

岩石的冻融损伤实质上是水-热-力-岩等的多场耦合作用过程,许多学者从该过程的水热力耦合机制出发研究冻融问题,取得了丰硕的成果。徐光苗等人^[66](2004年)从连续介质力学理论和不可逆过程热力学出发,推导了冻结温度下岩体的质量守恒方程、平衡方程及能量守恒方程的最终表示形式;研究了岩体在冻结温度下冰与岩石的膨胀耦合关系。刘泉声等人^[67](2011年)基于能量守恒原理和水-冰相变理论得出了岩石冻融过程中的冻结率表达式,运用双重孔隙介质模型理论得出冻结条件下裂隙岩体的温度场-渗流场-应力场(THM)耦合控制方程。李云

鹏等人^[68](2012年)考虑冰胀力系数和热力系数建立了本构方程,分析了温度对花岗岩低温热力效应的影响。谭贤君等人^[69-70](2011年、2013年)考虑冻胀压力和冻融循环对岩体劣化损伤的影响建立了低温冻融条件下岩体 THMD 耦合模型。Kang 等人^[71-72](2013年、2014年)研究了岩体冻融环境下的水热力耦合模型,对冻胀力和原始地应力下岩样破裂准则、裂缝发展方向和断裂长度进行了研究。贾海梁等人^[73](2017年)利用疲劳损伤理论研究冻融循环条件下岩石的损伤累积,分析了冻融疲劳损伤模型在计算自然条件下岩石冻融损伤面临的问题。

在岩石冻融微细观损伤方面,杨更社等人^[74](1996年)借助 CT 扫描技术,在国内较早地开展了基于损伤力学理论的岩石冻融损伤扩展机理方面的研究。赖远明、张淑娟等人^[75-76](2000年、2004年)针对隧道围岩体,采用 CT 扫描技术研究探索了在反复冻融环境下其内部结构损伤发展特点。Zhang 等人^[77](2004年)对采自寒区隧道的岩样进行了冻融循环损伤微观检测试验,用 CT 图像和 CT 数描述了冻融损伤演化特性。周科平等^[78](2012年)对冻融循环后的花岗岩岩样进行核磁共振测量,得到了不同冻融循环次数后岩样的横向弛豫时间分布及核磁共振成像图像,显示了冻融循环后岩样的孔隙空间分布情况。

除进行实验室研究外,工程岩体冻融问题也受到许多国内学者的关注。陈天城等人^[79](2003年)、马富廷^[80](2005年)、杨艳霞等人^[81](2012年)针对边坡岩体冻融问题展开了相关研究。张丛峰等人^[82](2013年)通过高速铁路基岩的冻胀试验研究了吸水率的影响和冻融循环对基岩抗压强度的影响。贾晓云等人^[83](2015年)、Shen 等人^[84](2015年)通过测量分析了季节性冻融深度对围岩稳定性的影响规律。卢阳等人^[85](2016年)通过航拍和实地考察,在岩石切片观察和物理测试的基础上,总结了三江源区岩体冻融风化的过程和特征,分析了岩性、孔隙特征和冻融特征等主控因子对岩体冻融损伤劣化过程的影响。Li 等人^[86](2017年)通过将花岗岩的冻融损伤试验结果应用于露天矿岩体边坡稳定性分析,基于布朗经验准则计算了冻融边坡的安全系数。

1.2.2 热冲击过程中的岩石水热耦合损伤

含水岩石的热冲击问题大多是水热耦合损伤问题,其对岩石的劣化机制、损伤程度及影响因素受到许多学者的关注。

1. 国外研究进展

国外学者多将热冲击循环作为一种重要的岩石风化环境与冻融循环等损伤环境一起进行研究。大量的研究表明,在热冲击作用下,岩石的物理力学特性将发生显著的衰减。Yavuz 等人^[87-88](2006年、2011年)对经历不同次数冻融或热冲击损伤的碳酸盐岩和安山岩试样进行了物理力学参数测定,并基于试验结果推导出了

冻融及热冲击损伤方程。Lam dos Santos 等人^[89] (2011 年) 选用多种人工及天然石材, 研究了高温、热老化、热冲击对其强度、模量等的影响, 结果表明热冲击对岩石力学性能影响显著。Najari 和 Selvadurai^[90] (2014 年) 采用密封腔将花岗岩浸在水环境中并对其外露面进行热冲击处理, 研究其水-热-力耦合行为。Demirdag^[91] (2013 年)、Sengun 等人^[92] (2015 年) 对石灰华进行了冻融循环和热冲击循环试验, 研究了其物理力学特性随循环次数的变化规律。Ghobadi 和 Babazadeh^[93] (2015 年) 通过人为设定风化条件测定了冻融、盐、热冲击等对砂岩物理力学特征的影响。Didem Eren Sarici^[94] (2016 年) 对大理石制品分别进行了热老化和热冲击试验, 研究其表现状态, 结果表明热冲击的劣化效应更为显著。

热冲击作为一种岩体常见的损伤环境, 对自然环境或工程中岩石的劣化作用也很明显, 甚至会改变地貌。Hall 等人^[95-96] (1999 年、2001 年) 通过大量的实测数据, 分析了寒冷地区热疲劳、热冲击等热应力对岩石的风化效应。McKay 等人^[97] (2009 年) 对位于阿塔卡马沙漠 (位于智利) 和南极干谷的岩石温度环境进行了分析, 表明该处的温度场对岩石能产生明显的热冲击损伤, 风化作用明显。Hall 和 Thorn^[4] (2014 年) 通过对基岩受热疲劳和热冲击影响的分析, 研究了地貌的形成和产状。

2. 国内研究进展

在岩石类脆性材料热损伤相关研究中, 国内研究者并未统一使用热冲击的概念, 诸多关于岩石高温损伤研究的试验方法即为岩石热冲击损伤。另外, 常把由于反复快速冷热循环导致的材料损伤叫作热震损伤, 其实质即为热冲击循环损伤。

国内对岩石热冲击损伤的研究多针对核废料处理、破岩技术等工程实际需求开展。李华等人^[98-99] (1993 年) 针对核废物处置库设计问题研究发现, 花岗岩在热冲击环境下成为一个风化的含大量微缺陷的材料, 并对其破裂机制进行了分析。邱一平和林卓英^[100] (2007 年) 同样针对核废料存储问题, 基于大量试验数据分析了花岗岩在温度作用下的热震损伤。郜保平等人^[101-102] (2010 年、2011 年) 在研究岩体钻孔问题时发现机械摩擦及水回流导致的岩石热冲击问题, 并通过对高温花岗岩遇水冷却后的力学试验研究及热破裂劣化机制的探讨, 发现高温状态花岗岩遇水冷却过程中岩体内产生热破裂或热冲击现象, 力学性能劣化。蒋立浩等人^[103] (2011 年) 通过试验研究了花岗岩在不同温度幅值的高低温冻融循环条件下, 单轴抗压强度、弹性模量、峰值变形、应力-应变曲线随循环次数变化的规律, 该试验方法实质就是岩石遭受热冲击循环损伤。王朋等人^[104] (2013 年) 通过研究高温花岗岩在自然冷却和水中快速冷却后的力学性能, 表明水中快速冷却产生的热冲击加剧了花岗岩力学性能的劣化。杨顺吉等人^[105] (2016 年) 建立了非对称冷却条件下井底岩石的温度场的分布模型, 研究了岩石受低温热冲击作用的破坏机理。

胡琼等人^[106](2016年)研究了高温热冲击引起的岩石脆性破坏,并基于此分别讨论了热能-机械能复合破岩的可行性。

此外,近年来陶瓷类材料热冲击和热震损伤问题受到国内学者关注,相关研究对岩石热冲击损伤研究具有启发意义。唐世斌等人^[107](2008年)、涂建勇等人^[108](2009年)、苏哲安等人^[109](2012年)、陈世敏等人^[110](2013年)、张龙等人^[111](2017年)、陈泉等人^[112](2017年)分别对多种陶瓷材料的热震损伤进行了研究,发现快速温度变化会导致陶瓷发生不可逆的损伤。此类关于陶瓷材料热震损伤的研究中,反复的快速冷热循环实际即为热冲击问题,但在试验中均未涉及水的影响。

也有少数国内研究者进行了岩石热冲击过程中的水热耦合损伤分析。刘亚晨^[113](2006年)分析了核废料贮存库裂隙岩体受温度影响的开裂规律,构造了岩石介质热-液-力耦合过程的力学模型。

1.2.3 损伤岩石的冲击力学行为

工程岩体在从开挖建设到维护使用的全寿命阶段,始终经受着人为扰动、地震灾害等动力作用。此外,工程岩体均处于或可能经受一定的损伤环境,对损伤岩石冲击力学特性的研究更具有指导意义。国内外学者对岩石动力学特性的研究较为深入系统,但考虑温度、腐蚀、应力等损伤岩石的动力学研究尚处于探索阶段,涉及水热耦合损伤的岩石冲击力学行为研究更少见诸报端。在损伤岩石的冲击力学特性研究方面,国内相关研究走在了世界前列,国外相关研究则较少。

1. 温度损伤岩石的冲击力学行为

温度损伤岩石的动力学问题近年来受到了国内外学者较为广泛的关注。Zhang 等人^[114](2001年)采用短圆柱体试件研究了不同应变率冲击荷载下高温损伤岩石的断裂韧度。李夕兵、尹士兵等人^[115](2010—2013年)对温度与压力耦合作用下损伤岩石的冲击力学特性进行了相关实验研究。许金余等人^[9,115,120-124](2013—2016年)利用分离式 Hopkinson 压杆装置,对多种经历不同高温损伤的岩样进行不同加载速率下的冲击压缩试验,研究了岩石冲击力学特性与温度等级、加载速率的关系。李明等人^[125](2014年)对经 800℃ 高温损伤的砂岩试样进行不同应变率下的冲击压缩试验,对其变形破坏应力-应变曲线及破坏模式进行了研究。Huang 等人^[126](2015年)对不同等级温度损伤岩石进行了冲击压缩试验,探究了热损伤对不同应变率下岩石动力特性的影响。相关研究表明,温度对岩石的损伤作用具有一定的阈值,超过这一阈值后力学特性劣化明显。

2. 水腐蚀、风化等损伤岩石的冲击力学行为

水-化学腐蚀、自然风化环境等损伤岩石的动力学问题近年来也得到了一部分

学者的关注。曹平和汪亦显等人^[127-129](2011—2012年)对水化学腐蚀下的岩石损伤特性及冲击荷载下的损伤演化特征进行了研究。Wang 等人^[130](2013年)对完整岩样和风化损伤岩样进行了动态三轴试验,对比研究了其摩擦角和黏聚力。杨猛猛和刘永胜等人^[131-132](2014年、2015年)采用霍普金森压杆试验系统对不同离子、不同 pH 值溶液养护的岩样进行动态压缩试验,表明化学腐蚀作用下围岩的动态性能下降且化学溶液 pH 值越低影响效果越明显,并基于损伤理论建立了化学腐蚀作用下岩石的动态本构模型。

3. 应力致裂或含初始裂隙损伤岩石的冲击力学行为

应力致裂及含初始节理孔隙等损伤岩石的动力学问题近年来也得到了研究。祝文化等人^[133](2006年)对采自爆破影响区内的损伤灰岩进行了高应变率动态压缩试验,并和完整灰岩的动态压缩力学特性进行了对比,研究表明完整岩石的极限动态破坏压应力高于损伤岩石约 30%。Yin 等人^[134](2012年)采用预制裂缝的半圆柱体试件研究了高温损伤岩石的动态冲击破碎韧度。李地元等人^[135](2015年)利用预制孔洞岩样研究了含初始损伤岩石的冲击力学特性,发现孔洞大小、形状和空间位置对岩石的动态抗压强度都有一定影响,孔洞的存在降低了大理岩试样的动态抗压强度。邓正定等人^[136](2015年)基于运用霍普金森压杆装置对节理岩体动态试验得出的数据,从节理面倾角、贯通度、厚度、组数、填充物及应变率等不同方面分析各因素对含初始节理损伤岩体力学特性的影响,构造了节理岩体材料在不同应变率下动态响应的本构模型。

4. 冻融、热冲击损伤岩石的冲击力学行为

冻融及热冲击等水热耦合损伤岩石动态力学特性的相关研究目前为止还较少。Kodama 等人^[33](2015年)在研究含水量、温度、应变率等因素对冻结岩石强度及破坏特性影响时涉及了冻结岩石的动力学问题。Zhou 等人^[137](2015年)采用 SHPB 系统对冻融损伤岩石进行了冲击压缩试验,得出岩石动态强度和弹性模量随冻融循环次数增加而降低的结论。王鹏等人^[138-140](2016—2017年)采用 SHPB 系统对经受不同次数冻融循环或热冲击循环损伤的红砂岩岩样进行了不同应变率条件下的冲击加载试验。

1.3 相关研究问题的提出

根据文献搜索结果,可以发现国内外研究学者针对岩石冻融损伤问题、热冲击损伤问题、损伤岩石的冲击动力学问题均进行了一定的理论、试验研究及数值分析,取得了不少成果。但通过分析,依然发现在水热耦合损伤岩石的冲击动力学行

为研究方面存在下述不足之处。

(1)与岩石的冻融循环损伤相比,岩石热冲击循环损伤的相关研究较少。岩石在热冲击循环过程中的物理力学特性衰减规律还需要更充分的论证。特别是国内,岩石热冲击损伤的相关研究非常不充分。

(2)冻融及热冲击过程中岩石的水热耦合损伤机理有待深入分析。现有研究大多简单地将岩石冻融损伤机制归结为水的冻结作用,实际上该过程中的水岩相互作用、温度变化导致的热应力等会与水的冻结一同产生耦合效应。在有关岩石热冲击损伤的文献中,多将热冲击损伤机制归结为温度变化引起的热应力,很少有文献关注热冲击循环过程中水的作用。

(3)有关应变率对水热耦合损伤岩石力学特性影响的研究很少,其中热冲击损伤岩石的动力学研究尤其缺乏,国内外相关研究尚处于探索阶段。不同应变率冲击荷载与水热耦合损伤对岩石变形行为、承载能力、能量特征、损伤演化等的耦合效应亟待研究。与此同时,现有的岩石在长期冻融或热冲击过程中的力学指标衰减模型在应用于冲击荷载作用时,需要考虑应变率影响重新构建。

(4)采用电镜扫描技术对岩石水热耦合损伤和损伤岩石冲击破坏的微细观机制进行深入分析的研究尚不够充分,特别是关于岩石热冲击损伤微观机制的研究鲜有报道。能够将电镜扫描结果进行量化分析并应用于岩石水热耦合损伤和应变率效应机理分析的相关研究十分缺乏。

1.4 本书的主要内容

温度和水是地下工程岩石重要的赋存环境,在工程设计建设和使用过程中又必须考虑爆破、机械等冲击毁伤效应。进行水热耦合损伤岩石的冲击力学行为研究具有显著的工程价值。本书即瞄准岩石工程中常见的岩石水热耦合损伤和动力灾害问题展开研究。

针对现有研究中的不足,本书以横断山区地下工程中常见的红砂岩为研究对象,依托 $\Phi 100$ mm SHPB 系统、冻融循环及热冲击循环试验系统、超声检测仪、电镜扫描仪等设备,开展水热耦合损伤岩石的冲击动力学特性试验和理论研究,旨在为岩石工程亟须解决的水热耦合损伤和动力灾害问题提供有益支持。

本书主要研究内容有以下几方面:

(1)进行饱水红砂岩不同次数的冻融循环和热冲击循环损伤试验;研究饱水红砂岩经冻融循环及热冲击循环作用后的物理和水理特性,分析红砂岩质量、体积、密度、总孔隙率、有效孔隙率等指标随冻融循环次数、热冲击循环次数等的变化规律;对经受不同次数冻融和热冲击循环作用后的红砂岩进行超声检测,分析其超声时域(纵波波速、接收波首波波幅)和频域(接收波频谱形心频率、频谱峰度)的变化

规律。

(2)依托电液伺服控制试验机、 $\Phi 100$ mm SHPB 系统,进行水热耦合损伤红砂岩的准静态压缩、劈拉、变角剪切试验及不同应变率条件下的压缩、劈拉试验,获取经冻融循环及热冲击循环作用后红砂岩试样受准静态及冲击荷载变形破坏的应力-应变数据,分析其在不同水热耦合损伤条件下的力学行为,研究冻融循环次数、热冲击循环次数、应变率等对其力学行为的影响。

(3)分析应变率和冻融、热冲击循环次数对红砂岩动态力学特性的耦合影响。构建红砂岩力学特性指标随冻融、热冲击循环次数的衰减模型;考虑应变率效应对模型参数进行修正,根据冲击力学试验结果得到模型参数关于应变率的方程,最终获得考虑应变率的岩石冻融、热冲击循环损伤衰减模型。

(4)基于不同应变率条件下红砂岩试样变形破坏的应力-应变曲线,分析其变形破坏过程中能量吸收、耗散及弹性能释放的规律。根据不同损伤条件下红砂岩变形破坏全过程所需的总输入应变能定义了水热耦合损伤,根据变形破坏过程中耗散能的演化定义了荷载(力)损伤;考虑水热耦合损伤和荷载损伤的耦合作用,分析水热耦合损伤红砂岩受载破坏过程中的损伤演化机制。

(5)采用电镜扫描技术观测不同冻融和热冲击循环作用后红砂岩试样的表面细观形态,采用 Image-Pro Plus(IPP)软件提取岩样表面的孔隙特征参数,分析冻融和热冲击循环过程中红砂岩的水热耦合损伤细观机制;观测水热耦合损伤红砂岩试样在不同应变率荷载作用下破坏断口的细观形貌,对断口孔隙进行量化分析,研究水热耦合损伤红砂岩破坏的应变率效应细观机制。