

岩土体热力特性与工程效应系列专著

岩土体传热过程及 地下工程环境效应

王义江 周国庆 周扬 著



科学出版社

岩土体热力特性与工程效应系列专著

岩土体传热过程及地下工程 环境效应

王义江 周国庆 周扬 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者基于多年研究积累和成果撰写而成。全书共分6章：第1章介绍深部矿山围岩传热及降温技术的研究现状；第2章介绍采用分形方法研究孔隙岩体传热过程和规律；第3章介绍地下干燥和含湿巷道围岩热湿传递规律；第4章介绍巷道内风流流动和对流换热规律；第5章介绍巷道壁面全断面和非全断面隔热后的传热规律；第6章介绍地下巷道壁面隔热用轻质地聚合物混凝土的物理力学性质。

本书可作为能源资源、土木、环境、地质等工程与科学领域的工程技术人员、研究生等的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

岩土体传热过程及地下工程环境效应/王义江,周国庆,周扬著. —北京:科学出版社, 2019.6

(岩土体热力特性与工程效应系列专著)

ISBN 978-7-03-061244-1

I. ①岩… II. ①王… ②周… ③周… III. ①地下工程-环境效应-研究 IV. ①TU94

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第095230号

责任编辑:周丹 曾佳佳/责任校对:杨聪敏

责任印制:师艳茹/封面设计:许瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京画中画印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年6月第一版 开本:787×1092 1/16

2019年6月第一次印刷 印张:8 1/2

字数:200 000

定价:99.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“岩土体热力特性与工程效应系列专著”序

“岩土体热力特性与工程效应系列专著”汇聚了 20 余年来团队在寒区冻土工程、人工冻土工程和深部岩土工程热环境等领域的主要研究成果，共分六部出版。《高温冻土基本热物理与力学特性》《岩土体传热过程及地下工程环境效应》重点阐述了相变区冻土体、含裂隙（缝）岩体等特殊岩土体热参数（导热系数）的确定方法； $0\sim-1.5^{\circ}\text{C}$ 高温冻土的基本力学特性；深部地下工程热环境效应。《正冻土的冻胀与冻胀力》《寒区冻土工程随机热力分析》详细阐述了团队创立的饱和冻土分离冰冻胀理论模型；揭示了冰分凝冻胀与约束耦合作用所致冻胀力效应；针对寒区，特别是青藏工程走廊高温冻土区土体的热、力学参数特点，首次引入随机有限元方法分析冻土工程的稳定性。《深部冻土力学特性与冻结壁稳定》《深厚表土斜井井壁与冻结壁力学特性》则针对深厚表土层中的矿山井筒工程建设，揭示了深部人工冻土、温度梯度冻土的特殊力学性质，特别是非线性变形特性，重点阐述了立井和斜井井筒冻结壁的受力特点及其稳定性。

除作序者外，系列专著材料的主要组织者和撰写人是平均年龄不足 35 岁的 13 位青年学者，他们大多具有在英国、德国、法国、加拿大、澳大利亚、新加坡、中国香港等国家和地区留学或访问研究的经历。团队成员先后有 11 篇博士、22 篇硕士学位论文涉及该领域的研究。除专著的部分共同作者外，别小勇、刘志强、夏利江、阴琪翔、纪绍斌、李生生、张琦、朱锋盼、荆留杰、李晓俊、钟贵荣、魏亚志、毋磊、吴超、熊玖林、鲍强、邵刚、路贵林、姜雄、陈鑫、梁亚武等的学位论文研究工作对系列专著的贡献不可或缺。回想起与他们在实验室共事的日子，映入脑海的都是阳光、淳朴、执着和激情。尚需提及的是，汪平生、赖泽金、季雨坤、林超、吕长霖、曹东岳、张海洋、常传源等在读博士、硕士研究生正在进行研究的部分结果也体现在了相关著作中，他们的论文研究工作也必将进一步丰富与完善系列专著的内容。

团队在这一领域和方向的研究工作先后得到国家“973 计划”课题（2012CB026103）、“863 计划”课题（2012AA06A401）、国家科技支撑计划课题（2006BAB16B01）、“111 计划”项目（B14021）、国家自然科学基金重点项目（50534040）、国家自然科学基金面上项目和青年项目（41271096、51104146、51204164、51204170、51304209、51604265）等 11 个国家级项目的资助。

作为学术团队的创建者，特别要感谢“深部岩土力学与地下工程国家重点实验室”，正是由于实验室持续支持的自主创新研究专项，营造的学术氛围，提供的研究环境和试验条件，团队才得以发展。

期望这一系列出版物对岩土介质热力特性和相关工程问题的深入研究有所助益。文中谬误及待商榷之处，敬请海涵和指正。



2016年12月

前 言

煤炭是我国的主体能源，在经济社会发展中具有重要的战略地位，其埋深在千米以下的储量有 2.95 万亿 t，占我国煤炭资源总量的 53%。随着矿产资源的长期大规模开发，埋藏于浅部的高品位矿产资源日益枯竭，大批矿山过渡到深部开采（一般采深超过 700m 即为深部）。此外，我国相继有部分金属矿山进入深部开采，如铜陵狮子山铜矿采深达 1100m，山东玲珑金矿超过 1300m，红透山铜矿达 900~1100m，弓长岭铁矿达到 750~1000m。我国煤矿开采深度平均每年以 8~12m 的速度递增，深部开采的趋势不可避免。南非绝大多数金矿的开采深度都在 1000m 以上，其中 AngloGold 有限公司的西部深水平金矿采深超过 3700 m。印度 Kolar 金矿区的 3 个矿山达到 2400m 深度，其中钱皮恩里夫矿还超过 3260m。俄罗斯的克里沃罗格铁矿区有 8 座矿山回采准备深度达 910m，开拓深度达到 1570m。加拿大、美国、澳大利亚许多金属矿山的采深也超过了 1000m。

地温升高是深部矿山井下工作条件恶化的重要原因，持续的高温将对人员的健康和工作能力造成极大的伤害和影响，使劳动生产率大大下降，使生产事故大大增加，同时还降低井下设备的工作性能，缩短设备使用寿命。矿井降温最有效的方法就是人工制冷降温，即对井下工作环境进行空气调节。方法主要有：机械制冷水降温（德国 August Victoria 煤矿、新汶华丰煤矿、淮南新集一矿），机械制冰降温（南非东兰德矿山、英美矿业 Mponeng 金矿），空气压缩式制冷（Sophia Jacoba GmbH 煤矿、Emil Mayrisch 煤矿），天然冷源（恒温水）空调系统，热管降温技术，深井 HEMS 降温系统，热-电-乙二醇降温冷却技术（河南平煤四矿）。从当前各矿井空调降温系统及运行数据看，由于矿井冷负荷大导致矿井空调系统普遍制冷量高，降温系统的耗能不断攀升。当前，国家能源发展面临新的机遇和挑战，清洁低碳、安全高效的现代能源体系的可持续发展战略逐步确立。因此，深部矿山降温有必要借鉴被动式建筑设计理念，大幅度降低空调系统设计制冷量，从而使空调系统初投资和运行费用显著下降，这是值得研究的问题。

本书是作者基于多年研究积累和成果撰写而成。全书共分 6 章：第 1 章绪论，介绍深部地下空间热环境及控制技术研究现状和意义；第 2 章孔隙岩体导热机理分形研究，介绍采用分形方法研究孔隙介质传热过程和规律；第 3 章地下巷道围岩传热试验，介绍地下干燥和含湿巷道非稳态传热传质规律；第 4 章地下巷道围岩及风流传热理论分析，介绍地下巷道围岩非稳态传热方程及解析解、巷道内风流流动与对流传热方程及准则方程；第 5 章地下巷道壁面隔热分析，介绍全断面、非全断面隔热后巷道围岩、风流的温度和对流散热量变化规律；第 6 章地下巷道隔热材料物理力学性质，介绍轻质地聚合物基混凝土的抗压强度、导热系数和吸水性能的变化规律。

除系列专著序中列出的资助项目外，本书研究成果还得到中国博士后科学基金项目（2011M500974，2011M500969）资助，在此作者表示感谢。

应该指出，地下空间环境控制问题涉及多学科、多领域，是一个非常复杂的热湿传递和流固耦合过程，有许多理论和实际问题需要进一步研究与探索。由于作者水平及经验有限，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

作者

2019年2月

目 录

“岩土体热力特性与工程效应系列专著”序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 地下工程环境问题研究概况	2
1.2.1 孔隙介质传热机理	2
1.2.2 地下巷道围岩传热规律分析	4
1.2.3 地下巷道风流对流传热分析	4
1.2.4 地下隔热材料物理力学特性	6
第 2 章 孔隙岩体导热机理分形研究	8
2.1 概述	8
2.2 分形理论与维数	9
2.2.1 分形维数定义	9
2.2.2 分形维数计算方法	9
2.2.3 经典结构维数	11
2.3 破碎煤岩体导热研究	12
2.3.1 微观结构分析	12
2.3.2 分形维数计算	13
2.3.3 有效导热系数	14
2.4 孔隙岩体导热模拟	16
2.4.1 等效导热系数计算	16
2.4.2 导热系数分析	19
第 3 章 地下巷道围岩传热试验	20
3.1 概述	20
3.2 相似准则	20
3.2.1 风流流动准则	20
3.2.2 围岩导热准则	20
3.2.3 巷道与风流对流换热准则	21
3.3 模拟试验	22
3.3.1 试验模化设计	22

3.3.2	试验系统与方案	22
3.4	干燥围岩瞬态传热	24
3.4.1	围岩无量纲温度	24
3.4.2	风流焓值	27
3.4.3	对流换热准则式	29
3.5	含湿围岩热湿传递	30
3.5.1	瞬态围岩温度及风流焓值	30
3.5.2	周期性围岩温度及风流参数	35
第4章	地下巷道围岩及风流传热理论分析	38
4.1	概述	38
4.2	巷道围岩非稳态传热	38
4.2.1	控制方程	38
4.2.2	方程求解	39
4.3	非稳态传热规律	41
4.3.1	无量纲壁面温度	41
4.3.2	无量纲换热系数	43
4.3.3	正规状况阶段	44
4.4	巷道风流流动特性	47
4.4.1	流动状态	47
4.4.2	静压力及切应力	48
4.4.3	紊流沿程阻力	49
4.4.4	截面速度分布	50
4.5	巷道风流对流换热分析	52
4.5.1	能量方程	52
4.5.2	温度分布	53
4.5.3	准则方程	57
第5章	地下巷道壁面隔热分析	59
5.1	概述	59
5.2	稳态热阻及热流密度	60
5.2.1	单隔热层	60
5.2.2	双隔热层	62
5.3	非稳态全断面隔热分析	65
5.3.1	控制方程	65
5.3.2	方程求解	66
5.3.3	待定系数	68

5.4 巷道全断面隔热效果分析	72
5.4.1 结果验证	72
5.4.2 热扰动层厚度	73
5.4.3 围岩温度演变	75
5.4.4 隔热层对隔热效果的影响	77
5.4.5 围岩参数对隔热效果的影响	80
5.5 巷道非断面隔热效果分析	84
5.5.1 围岩温度变化	84
5.5.2 等值线图	85
5.5.3 隔热层参数影响	89
5.5.4 围岩参数影响	92
5.6 巷道隔热风流温度场演变规律	95
5.6.1 模型建立	95
5.6.2 径向及轴向风流温度分布	96
5.6.3 隔热前、后风流温度变化	98
第6章 地下巷道隔热材料物理力学性质	102
6.1 概述	102
6.2 试验材料及方案	103
6.2.1 试验材料	103
6.2.2 试验方案	104
6.3 抗压强度变化规律	105
6.3.1 NaOH 添加量	105
6.3.2 干密度	107
6.3.3 骨料	109
6.3.4 纤维	110
6.4 导热性能变化规律	112
6.4.1 NaOH 添加量	112
6.4.2 干密度	113
6.4.3 骨料	113
6.4.4 纤维	115
6.5 吸水性能变化规律	116
6.5.1 骨料	116
6.5.2 纤维	117
6.5.3 憎水剂	118
参考文献	120

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

煤炭一直是我国主要的能源资源,占化石能源消费量的95%以上。随着经济社会发展对能源需求的不断增加,我国煤炭产量和消费量在世界上一直居首位,导致浅部煤炭资源日趋枯竭^[1]。此外,在我国现有5.57万亿t的煤炭资源中,埋深在1000m以下的有2.95万亿t,占煤炭资源总量的53%^[2]。2013年统计数据显示,我国已有43个矿区进入深部开采,近200处矿井开采深度超过800m,其中千米深井47处,平均采深为1086m。从能源利用现状及保障能源安全角度来说,深部开采不可避免^[3-6]。

在深部开采条件下,地温升高是井下工作条件恶化的重要原因,持续的高温将对人员的健康和工作能力造成极大的伤害和影响,工人在热湿的空气环境中较长时间地劳动,会发生中暑、湿疹等疾病,使劳动生产率大大下降,使生产事故大大增加,同时高温还会降低井下设备的工作性能,缩短设备使用寿命。随着采矿工作面采掘机械化程度的提高,空气自身压缩热、机械设备散热量显著增加,这些因素都使得井下空气温度升高。

据南非金矿统计资料,在矿内气温为27℃时,每年每1000人的工伤频数为0,29℃时为150,31℃时为300,32℃时为450。据日本北海道7个矿井的调查资料,工作面事故发生率,30℃以上比30℃以下高1.5~2.3倍。此外在高温高湿环境下,矿工的劳动生产率将下降。有关资料表明在风速2m/s、温度为30℃时,劳动生产率降低为72%,温度为32℃时降低为62%。采掘工作面的气温每超过规定指标(26℃)1℃,劳动生产率将降低6%~8%。

国外在深部开采方面的研究起步较早^[7-11],如南非深部开采已有30余年经验。南非绝大多数金矿的开采深度都在1000m以上,其中AngloGold有限公司的西部深水平金矿开采深度超过3700m,West Driefontein金矿的埋深在600m以下,并一直延伸到6000m。印度Kolar金矿区的3个矿山达到2400m深度,其中钱皮恩里夫矿还超过3260m。俄罗斯的克里沃罗格铁矿区有8座矿山回采准备深度达910m,开拓深度达到1570m。加拿大、美国、澳大利亚许多金属矿山采深也超过了1000m。

深部开采中地压、水压、瓦斯压力和地温等都相应增加,造成开采条件不断恶化,各种灾害的复杂性和治理的难度也将增加。特别值得注意的是,深部开采中由于地温梯度引起的工作环境温度不断升高,成为深部开采无法回避的灾害问题,严重制约了深部开采的发展。

对于高温深井来说,井下围岩、各类机电设备等均为与空气直接接触的开放性热源,

要使采掘工作面温度满足规范要求值, 空调系统的设计冷负荷会很大, 相应的制冷机组等设备体积大、能耗高、投资大、成本回收时间长。如采用冷冻水或冰降温方式, 系统总投资约为 5000 万元, 年运行维护费用为 500 万~800 万元, 虽然可争取相关优惠政策, 但对于煤矿企业来说, 仍是一笔不小的经济负担。

“十二五”规划纲要明确提出了单位国内生产总值 (GDP) 能耗和二氧化碳排放量降低、主要污染物排放总量减少的约束性目标。在国家节能减排政策的引导下, 各类公共建筑在设计时已充分考虑了节能措施, 同时对已有公共建筑进行节能改造工作, 如墙体采用空心砖、外围护结构加铺隔热材料、单层玻璃更新为双层玻璃等, 主要目的是降低建筑的夏天吸热量以及冬天散热量, 从而降低空调系统的冷、热负荷及运行费用。对于深部矿井来说, 减少围岩体与风流间的传热传质量, 可从源头上改善深部热环境, 也可大幅降低空调系统冷负荷以及运行费用。

1.2 地下工程环境问题研究概况

1.2.1 孔隙介质传热机理

笼统地说, 大部分材料都属于多孔介质, 目前对多孔介质各种特性的确定性还没有准确定义。Bear^[12]曾提出多孔介质具有以下特点: ①部分空间充满多相物质, 至少有一相是非固态的, 可以是液态或气态的。固相部分称为固相基质, 多孔介质内部除了固相基质外的空间称为孔隙空间; ②固相基质分布于整个多孔介质, 在每个代表性初级单元均应有固相基质; ③至少有一些孔隙空间应该是相连通的。

多孔介质传热传质学已经渗透到许多学科和新技术领域, 在人类生产活动和自然界中广泛存在, 如土壤学和地下水文学是研究多孔介质最早的学科。人们将生产中排出的有害废水注入地下或排入江河湖泊, 由于地下含水层中存在温度梯度而产生的自然对流, 引起了污染源在地下含水层中的扩散, 从而直接或间接地对人类健康和生存带来严重的危害; 地下岩层中的石油、天然气和水是自然界多孔介质中一种复杂的多元体系, 研究油、气的开采特别是石油的热采技术, 促使石油工程学对多孔介质的传热传质进行系统的研究; 地热资源的勘测评估和开发利用以及利用土壤岩层作为蓄热蓄冷介质, 也需应用类似的理论与技术。所有这些表明多孔介质传热传质的研究, 在能源、资源、环境和生物以及工农业生产有着重要的应用前景^[13,14]。

多孔介质纯导热过程是理论上的一种常见能量传递过程, 主要假设固体颗粒紧密接触且不移动, 多孔介质温度不高, 无相变且孔隙流体处于静止状态或流动甚微, 不考虑多孔介质中的辐射、对流和固体颗粒之间的接触热阻对传热的影响。与单一均质物体中的导热过程相比要复杂, 包括以下 3 个过程: ①固体骨架中的导热; ②孔隙气体介质中的导热; ③孔隙和骨架之间的耦合传热。多孔介质导热过程的经典模型^[15-18]基本分为四类: 容积平均模型、局部结构模型、统计模型和半经验模型。如 Buonanno 和 Carotenuto^[19]

采用体积平均法对两相系统稳态传热及有效传热系数进行了求解,采用经验方法对土体及颗粒连接体进行了计算,考虑颗粒形状、粗糙度及土体传导率等性质后对间歇规律排列的圆柱传热问题进行了求解,对理论解和实验解做了定性分析。这些经典算法在描述多孔介质中能量、动量和物质迁移的物理模型时,均采用连续介质模型,针对具体研究对象定义微元控制体积,然后对其列出守恒方程,加上初值和边值条件进行求解,求解中多孔介质的宏观特性如渗流速率、有效输运系数等都采用与微观量对应的平均值。连续介质模型在实际工程中有很多应用,但遇到的问题也越来越多,由于多孔介质结构变化很大,过于简化后的模型即使求解也可能得不到有价值的解,因此不再详细介绍。

自 Mandelbrot^[20]提出分形的思想后,大量研究者采用分形理论来描述多孔介质的结构,Katz 和 Thompson^[21]发现多孔介质的孔隙空间具有分形特征,采用扫描电镜证明了砂石孔隙空间在一定尺度范围内有自相似性,并且采用分形统计学预测了精确的孔隙度。Thovert 等^[22]较早开始将分形方法用于研究无规则介质的导热系数,对 Sierpinski 地毯结构(Sierpinski carpet, SC)、Ben Avraham & Havlin (BAH) 地毯结构、分形泡沫(fractal foam, FF)和 Menger 海绵(Menger Sponge, MS)结构等进行了分形描述,指出对于地质材料大多符合未经过理论证明的 Archie 定律,虽然计算过程和计算方法十分复杂而不适合实用,但在确定分形维数及相关计算方面给出了很好的探索。

施明恒等^[23-27]认为多孔介质中热量传递与其内部几何结构有密切关系,提出了多孔介质导热的分形模型。对于每个局部区域来说,多孔介质内部通道呈现出不规则性,但是从较大范围来看,其剖面骨架面积分布或孔隙分布又具有相似特征。郁伯铭等^[28,29]根据多孔介质的微结构,把多孔介质看成由非接触的颗粒和连接在一起的弯弯曲曲的颗粒链组成,而后者服从分形分布规律,推导了双弥散多孔介质等有效导热率的分形模型,并从实验测量角度验证了理论预测的可行性。淮秀兰等^[30,31]对经典的三种分形结构有效导热系数 k_c 、基质导热系数 k_s 和孔隙流体导热系数 k_f 以及孔隙率 ε 之间的关系进行了研究,得出了与经验公式相一致的结论,即 k_c 与 k_s 、 k_f 大致呈幂函数关系, k_c 与 ε 呈指数函数关系,研究结论对经验公式提供了一种数值验证方法。只是研究当中采用的是经典的分形结构,并未考虑实际多孔介质当中孔隙尺寸及分布等影响,而这些因素对 k_c 的影响也不可忽视,因此还需要进行更深入的研究以建立适应性更好的关系式。

以上均是对常规多孔介质导热问题相关机理的研究,可见分形理论在多孔介质导热过程中有着广泛应用。需要指出的是分形理论在导热研究中的预测与现有理论相比并未有明显改进,而且与实验测量结果相比具有几乎同等的精度,故对分形理论和方法的作用应有恰当的认识。虽然如此,相比多数学者把深部岩体或煤体直接当成固体导热过程来说,分形分析方法更能体现导热的微观过程。实际上围岩体在结构上属于分形多孔介质,可以通过实验计算其相应的分形维数,研究有效导热系数与基质、孔隙之间的关系,这样从微观角度进行深入研究,对了解导热机理提供新的思路,本书对于围岩体导热过程的研究正是基于这种考虑。

1.2.2 地下巷道围岩传热规律分析

围岩体内部热量最终通过与巷道内风流之间的热交换过程释放出来,围岩与井下风流的热交换是一个复杂的不稳定过程,在采掘过程中,当岩体新暴露出来时,暴露的围岩以较高的交换系数向风流传热,随着岩壁逐渐被风流冷却,两者间换热量逐渐减少,最后壁温趋近于风流的温度。

Roy 和 Singh^[32]采用 CLIMA 程序对地下巷道的环境改变进行了分析,采用有限差分模式对巷道干球温度和湿球温度进行了计算。在计算湿球温度时,采用边界条件增加水分蒸发汽化潜热项,获取了围岩温度变化曲线。对于风流与围岩之间的不稳定换热系数,特别对新掘进巷道,其对流换热的不稳定系数差异较大,应该予以考虑。舍尔巴尼^[33]指出,不稳定换热系数表示巷道围岩深部未冷却岩体与空气之间的温差为 1℃时,每小时从 1m²巷道内壁上向(或从)空气放出(或吸收)的热量,并给出了不稳定换热系数的解析式。但舍尔巴尼没有提供理论解公式,而且近似计算式中有的关系系数难以选准,难于使用。日本平松良雄^[34]在 1961 年提出与不稳定换热系数相关的间接式。平松良雄只给出了曲线图,计算起来比较烦琐。

可见虽然不稳定换热系数有各种定义方式,但实质相同,即均为 Bi 和 Fo 的函数。岑衍强等^[35]从理论推导方式求解了巷道围岩非稳态热传导方程的解析解,并通过简化分析的方法获得了不稳定换热系数的变化规律。秦跃平等^[36]分析了巷道围岩不稳定温度场的导热微分方程及无量纲形式,采用有限差分法计算了不稳定换热系数随 Fo 的变化曲线。孙培德^[37,38]采用拉普拉斯变换的方法推导了不稳定换热系数的表达式及近似解,并分析了不稳定换热系数随 Fo 的变化关系。Yakovenko 和 Averin^[39]采用拉普拉斯变换法对巷道与风流间热交换方程及边界条件、初始条件进行了求解,指出在小 Fo 数($0 < Fo < 0.3$)下无量纲岩体壁温和平均风流温度可由收敛数列表示。通过理论分析确定小 Fo 数下巷道壁温收敛,对于了解 $Fo < 0.3$ 时内壁温变化有重要意义。Starfield 等^[40-42]采用准稳态的计算方法对圆形巷道截面中传热传质过程进行了推导计算。从稳态导热方程中推导出了“冷却深度”的概念,即通风对巷道温度的影响深度是时间的函数;采用准稳态方法求出单位时间、单位长度巷道的传热量和传湿量,分别与围岩温度和风流温度差值、饱和空气水蒸气分压力 and 实际空气水蒸气分压力差值成正比。

从上述文献不难发现,对巷道围岩非稳态传热问题大都采用理论推导和数值计算的方法进行研究,均未有相关试验来验证结论,因此本书在理论分析基础上,采用自行设计的模拟试验系统对理论解进行验证分析。

1.2.3 地下巷道风流对流传热分析

对于热害矿井来说,受高温围岩体以及各种热源的影响,工作空间如巷道内的风流参数将会发生变化,对于研究者以及工程计算人员来说,风流参数的变化是最受关注的,

而且当前所有的矿井降温措施都针对降低热害矿井风流的温度和相对湿度,因此巷道内风流的对流传热及传质机理应受到重视。

矿井风流传热传质机理多采用管内对流传热传质模型开展研究,关于巷道内风流温度预测等大多借鉴经验公式来计算。周西华等^[43,44]从守恒原理出发,推导了描述矿井回采工作面风流紊流流动和温度分布微分方程。在工作面或掘进面空间中风流压力变化很小,可视为定压;温度引起的密度变化对运动方程影响采用 Boussinesq 近似,密度变化产生的体积力在重力项中保留。Barrow 和 Pope^[45]采用圆管紊流中温度与速度分布类比关系,通过编程计算了铁路隧道内列车通过时隧道与气流的换热情况,虽然计算对象与矿井巷道传热不同,但计算思路值得借鉴。邓先和与邓颂九^[46]从三大方程出发,结合紊流混合长度关联式,通过积分方法求解了光滑圆管中恒定物性流体对流传热的近似理论解,通过简化给出误差较小的对流传热准则方程。Redjem-Saad 等^[47]采用数值模拟方法,计算了圆管紊流中不同 Pr 数流体的流动特性以及换热特性,获得的速度分布与试验结果较吻合,还讨论了不同流体的 Karman 常数的变化,对于 Pr 数较大的流体来说, Karman 常数在圆管中不同位置的变化非常小,对确定流体在圆管中的速度分布提供了参考。Piller^[48]也采用数值模拟的方法对圆管湍流流动及传热特性进行相关研究。Obot 等^[49-51]采用试验的方法,对不同 Pr 数的流体如空气、水以及乙二醇等在层流、过渡流以及紊流三种流动状态下的传热和压力损失进行了分析,通过实测数据获得了 Nu 数与 Re 数之间的变化,同时得出了 Nu 数与 Pr 数之间也满足 $Nu \propto Pr^n$ 的关系,通过实测数据得出各个常数值。

Noureddine 和 Sassi^[52]基于多个假设前提,采用有限差分法对矩形通道内流体的传热传质进行了研究,分析了界面参数及辐射率不同时对界面温度和蒸发浓度的影响,显示温度在 373.15~773.15K 变化时,考虑辐射的影响要比不考虑辐射时的温度要高,最显著的区别是在蒸发浓度上;还分析了其他如有效传热、传质系数,平均传热、传质系数,以及平均 Nu 数和 Sh 数的变化。虽然文章采用的假设不适宜分析巷道围岩传热传质,但其基于假设建立的模型和对各种因素对传热传质影响的分析有很好的启示作用。后来 Smolsky 和 Sergeyev^[53]发现在含湿的毛细多孔介质中上述经验公式不再适用,并引入 Gu 数来描述蒸发过程中传热传质同时存在的特性。为解释 Gu 数的影响提出了很多假设,其本质是小液滴从自由流体表面渗入边界层中,而温度的波动又会使这种渗入过程更加复杂,可以看出含湿风流和液体表面的相互作用是引起液滴运移的主要因素。Chow 和 Chung^[54]采用数值和实验的方法,研究了水分蒸发到干空气、湿空气和过热蒸汽中的过程,特别关注了自由气流中的蒸发速率和转化温度。当高于转化温度时水分蒸发率随蒸汽浓度增加而变大,当低于转化温度时将出现相反情形,但获得的转化温度范围变化很大,主要取决于试验条件。Kondjoyan 和 Daudin^[55]采用湿度测量法考察了受迫对流中气体和固体表面间传热传质系数,这种方法对测量管内流动传热传质系数非常适合。

对于含湿巷道内风流与壁面间的传质问题,主要受边界条件决定。如果巷道壁面的

含水率能够维持不变,那么风流与壁面间的传质可按照稳态传质来分析,可以给出传质的准则方程。如果巷道壁面的含水率随着通风时间变化,那么风流与壁面间传质则属于非稳态问题,需要采用 Fick 第二定律来分析,相关内容将在第 5 章展开分析。

而对于矿井巷道中风流流动以及换热来说,多数学者并没有给出合适的计算模型,主要因素是矿井巷道内风流流动受的干扰因素较多,但在适当假设后采用圆管紊流模型来分析巷道风流的流动特性以及对流传热,相比通过实测数据获取的经验公式来说更能了解其中的机理。

1.2.4 地下隔热材料物理力学特性

目前,隔热材料多用于建筑物墙体保温隔热,泡沫隔热材料以其良好的特性在建筑领域得到了广泛应用。由于综合考虑到矿井机械制冷降温的不利因素,针对矿井使用的隔热材料要满足一定强度、低导热系数、憎水性良好等基本要求。近年来,有关矿井用隔热材料的研究也越来越受到国内外学者的重视。

苏联采用掺入锅炉渣的混凝土作为隔热材料喷涂岩壁,以减少围岩放热。还有些国家采用聚乙烯泡沫、硬质氨基甲酸泡沫、膨胀珍珠岩以及其他憎水性能较好的隔热材料喷涂岩壁,一层 10mm 厚聚氨酯泡沫塑料,就能产生一定的隔热效果,但成本较高。还有一些国家在热源巷道中进行过保温珍珠岩砂浆等无机材料和一些有机材料隔热降温方面的试验,虽取得了一定的研究成果,但总体来说在巷道新型隔热材料的方面研究相对较少^[56],而且文献中没有进行系统的研究和报道。

我国在矿井巷道隔热材料的研制方面做了相关研究。王冲^[57]、朱成坦^[58]和张源^[59]等基于主动隔绝井巷主要热源的方法,以水泥、蛭石等为主要原料配制了导热系数为 $0.37\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 左右的矿用隔热材料并分析了各因素对导热系数的影响规律,发现在巷道全服务期内阻热圈可降低巷道内 29%~40%的热量,但是导热系数相对还比较大。杨长辉等^[60]以矿渣水泥为原材料,采用压缩空气发泡的方式制备出了容重 $250\sim 600\text{kg}/\text{m}^3$ 、导热系数在 $0.07\sim 0.139\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、抗压强度为 $0.6\sim 3.5\text{MPa}$ 的泡沫混凝土。与普通水泥基泡沫混凝土相比,碱矿渣泡沫混凝土具有相近的导热系数,而其抗压强度更高,一定程度上解决了泡沫混凝土密度与强度和保温隔热性能的矛盾,但是效果并不理想。

郭文兵等^[61]以水泥石灰作为胶凝材料,通过添加粉煤灰、硅灰石、膨胀珍珠岩以及增强剂、发泡剂、减水剂、憎水剂等,研制出了一种适合于高温矿井的新型巷道隔热材料,巷道隔热材料的密度为 $0.727\text{g}/\text{cm}^3$,抗压强度为 1.63MPa ,导热系数为 $0.170\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,在矿井围岩温度大于 35°C 条件下的进风巷道内应用该隔热材料的效果较明显,可使巷道内的温度最大降低 $3\sim 4.5^\circ\text{C}$,采掘工作面温度可降低 $2\sim 3^\circ\text{C}$,该巷道保温隔热材料对高温矿井热害治理、改善工作面工作环境起到了积极作用,但是试验所添加的憎水剂使得材料的导热系数增加,降低了材料的隔热性能,而且文中没有对材料的憎水性能进行评价。陈兵和刘睫^[62]研究发现添加微硅粉和聚丙烯纤维可以显著提高泡沫混凝土(表观密

度 $800\sim 1500\text{kg/m}^3$) 抗压强度, 且掺入纤维后还可提高劈裂抗拉强度并降低干缩率。也进行过矿用水泥基泡沫混凝土隔热材料试验, 通过添加聚丙烯纤维得到了抗压强度 1.5MPa 、导热系数 $0.1\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 左右的试样, 并分析了水灰比、纤维长度、骨料含量等因素对物理力学性质的影响规律, 聚丙烯纤维的添加对材料强度的贡献率较大, 有效改善了多孔材料的压缩性能, 但材料的憎水性质有待进一步研究。

李国富^[63]研发了以水泥为基础、砂为骨料、添加纤维与添加剂混合制得玻化微珠喷浆隔热材料和玻化微珠注浆管隔热材料, 提出注浆和喷浆两种巷道隔热方式, 计算发现隔热后 2000m 长的巷道风流温度较未隔热时低 3°C , 降温幅度及经济效益显著, 为施工提供了有效试验数据。其中自行设计的抗渗试验装置为后续隔热材料的憎水性能研究提供了借鉴。李春阳^[64]对新型矿用隔热防水材料——聚氨酯材料的隔热和防水性能进行了测试。通过向模拟巷道内壁面填涂聚氨酯隔热防水材料, 测得在风流与巷道之间的热量交换中, 显热负荷减少 10% , 潜热负荷减少 80% , 说明聚氨酯隔热防水材料对巷道与风流之间的传湿影响较大, 同时热量交换大大减少。但试验工况设定局限, 入口风流状态没有加以控制, 该方法只在模拟巷道中实施, 实际巷道中材料填涂方法有待进一步研究。基于井下巷道的特殊环境, 泡沫隔热材料强度主要与干密度、水灰比、骨料类型及含量、外掺料、添加泡沫种类、泡孔直径及形状、养护方法等诸多因素有关^[65,66]。姚嵘^[67]通过正交试验研究制得煤矿巷道隔热材料, 发现生石灰掺量、水灰比、硅灰石掺量、粒度及发泡剂是影响材料强度的主要因素。隔热材料的强度随生石灰、硅灰石的掺量的增加而增加, 随水灰比的增加而减小; 隔热材料容重随粉煤灰的增加而减小。