

吴迪 / 著

多场耦合分析 在胶结尾砂充填中的应用初探

温度场

应力场

水化反应放热
温度影响水
化反应速率

热量通过流体
流动进行传递

水化产物的积累
改变孔隙水压力

温度变
化引起
热应力

外部载荷改变
流体渗流通道

孔隙水
响应效应



煤炭工业出版社

国家自然科学基金项目 (51404271)

中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室

开放基金项目 (SKLCRSM13KFB05)

多场耦合分析 在胶结尾砂充填中的应用初探

吴 迪 著

煤 炭 工 业 出 版 社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

多场耦合分析在胶结尾砂充填中的应用初探/吴迪著. --北京:煤炭工业出版社, 2015

ISBN 978-7-5020-4898-3

I. ①多… II. ①吴… III. ①耦合—有限元分析—应用—胶结充填法—研究 IV. ①TD853.34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 136699 号

多场耦合分析在胶结尾砂充填中的应用初探

著 者 吴 迪
责任编辑 张江成
责任校对 姜惠萍
封面设计 王 滨

出版发行 煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
电 话 010-84657898 (总编室)
010-64018321 (发行部) 010-84657880 (读者服务部)

电子信箱 cciph612@126.com

网 址 www.cciph.com.cn

印 刷 北京市郑庄宏伟印刷厂

经 销 全国新华书店

开 本 880mm × 1230mm^{1/32} 印张 5^{1/2} 字数 141 千字

版 次 2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷

社内编号 7744 定价 25.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换,电话:010-84657880

内 容 提 要

本书系统地阐述了胶结尾砂充填料浆、胶结尾砂充填体耦合模型的建立、验证及应用。主要内容包括国内外充填采矿技术发展状况、胶结尾砂充填料浆温度-反应-流变耦合模型、胶结尾砂充填体多场耦合模型、胶结尾砂充填体的热-力-化、热-流-力-化的耦合模型验证及应用。

本书可供采矿工程、岩土工程等领域的设计、生产、管理、研究与教学人员阅读参考。

前 言

充填采矿技术的发展大致经历了从干式充填到水砂充填,再到如今的胶结充填。胶结充填一般是指将水泥等胶结材料与骨料(如尾砂)水等混合制成浆体或膏体,以管道泵送或重力自流的方式输送到地下采空区进行填充。胶结充填料浆固结硬化后形成胶结充填体,起到支撑顶板岩层的作用。在胶结充填料浆的输送过程以及胶结充填体的固结硬化过程中,都涉及多场耦合问题。这些物理-化学场之间相互联系、相互依存,共同影响胶结充填料浆的流动性以及胶结充填体的稳定性、耐久性等。进行多场耦合分析,有助于理解胶结充填材料中的多场耦合作用机理,为设计和制备低成本、高强度、环境友好的胶结充填体提供理论依据和科学指导。

笔者以胶结尾砂充填料浆、胶结尾砂充填体为研究对象,分别建立了胶结尾砂充填料浆,胶结尾砂充填体耦合模型,综合实验室试验、现场测试和数值模拟等多种手段,对耦合模型进行验证和应用。

在撰写本书的过程中,引用了许多专家学者和相关研究人员的成果和论著,作者深表谢意。北京科技大学蔡嗣经教授、渥太华大学 Mamadou Fall 教授、河北联合大学孙光华副教授、董宪伟副教授,以及中国矿业大学(北京)杨宝贵副教授、本科生刘煜程等,提供了各种帮助,在此一并表示感谢。

本书的出版,还得到了国家自然科学基金项目(51404271)、中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金项目

(SKLCRSM13KFB05) 的支持。

因水平所限，书中难免有错误疏漏之处，敬请读者批评指正。

著 者

2015 年 3 月

目 录

1 绪论	001
1.1 国内外充填采矿技术发展状况	001
1.2 胶结尾砂充填中的多场耦合问题	005
1.3 胶结尾砂充填多场耦合问题研究概况	008
2 胶结尾砂充填料浆温度 - 反应 - 流变耦合模型	011
2.1 胶结尾砂充填料浆的多场耦合问题	011
2.2 温度 - 反应 - 流变耦合模型的建立	013
2.3 耦合模型的验证及模拟分析	021
3 胶结尾砂充填体多场耦合模型	041
3.1 胶结尾砂充填体的多场耦合特性	041
3.2 多场耦合模型的建立	043
4 胶结尾砂充填体热 - 力 - 化耦合模型的验证及应用	059
4.1 耦合模型的验证	060
4.2 耦合模型在预测充填体温度发展方面的应用	066
4.3 耦合模型在预测充填体强度发展方面的应用	089
5 胶结尾砂充填体热 - 流 - 力 - 化耦合模型的 验证及应用	092
5.1 耦合模型的试验验证及模拟分析	093
5.2 耦合模型在预测充填体渗流特性方面的应用	137

附图.....	142
参考文献.....	157

1 绪 论

矿产资源是国家建设和经济发展不可或缺的物质基础。随着全球工业化进程的加速,各行业对于矿产资源的需求量急剧增加,这就使矿产资源的开采量大幅提高,进而导致浅部地层的矿床逐渐减少。因此,人类不得不通过地下采矿从地球深部索取矿产资源。地下采矿在获得有用矿物资源的同时,也产生了大量的固体废弃物(例如尾矿)和地下采空区。尾矿的地表堆存不仅会污染当地的生态环境,而且尾矿库的存在还是一个安全隐患;地下采空区将引起矿区地表发生变形、塌陷,严重威胁地表建筑物的安全。

充填采矿技术,旨在利用堆存在地表的矿山固体废弃物来充填开采后留下的采空区。这一技术不仅能够有效改善矿区的地表环境,还能有效缓解甚至解决矿区地表塌陷问题。此外,充填开采技术还能有效控制矿山压力和岩层移动,维护地下采场的稳定,确保矿产资源的安全回收。虽然应用充填采矿技术的工业成本较高,但是它所带来的安全效益及环境效益不可估量,因此该采矿方法值得推广。目前充填采矿技术在全球地下采矿工业中得到广泛应用。

1.1 国内外充填采矿技术发展状况

1.1.1 国外充填采矿技术发展概况

充填采矿技术在国外发展较早:20世纪80年代初,加拿大35%~40%的地下金属矿山使用充填采矿技术;澳大利亚的地下有色金属矿山多使用充填开采技术;瑞典布利登有色金属公司70%的矿山使用充填采矿技术。1981年苏联24.2%的地下有色

金属矿山使用充填采矿技术；日本金属矿山使用充填开采技术的比例也是逐年上升的，从 1956 年的 24.5% 上升到 1970 年的 39%，再到 1982 年的 43%。表 1-1 系统总结了一些采矿业比较发达的国家在充填采矿技术方面的发展情况。

表 1-1 采矿业发达的国家充填采矿技术发展概况及应用、研究实例

国 家	技术 发展 概况	应用、研究 案例
加拿大	20 世纪 30 年代，开始使用冲积砂作为充填料； 20 世纪 40 年代，采用选厂分级尾砂作为充填料进行充填； 20 世纪 50 年代使用胶结尾砂进行充填； 20 世纪 80—90 年代使用胶结块石、高浓度浆体和膏体充填	1962 年，国际镍业公司（INCO）首次在 Frood 矿水砂充填料中使用水泥添加剂； 1994 年，INCO 公司在 Carson 矿建立了膏体充填生产车间。通过试验和生产表明，膏体充填料可通过自流方式进入井下工作面
南非	20 世纪 80 年代初期，开始应用胶结充填工艺，该充填工艺主要有废石胶结充填、脱泥尾砂胶结充填等，并开始进行高浓度管道充填和膏体充填的研究和应用	众多矿山通过改变膏体料的粒度分布来减小膏体输送阻力，采用全尾砂或分级尾砂，将水泥的添加工艺改在地表进行。结果表明，通过增加尾砂膏体的含水率制成的浆体，可产生很好的减阻效果，并减少了加压泵站的建设数量，降低了充填成本
澳大利亚	20 世纪 50 年代，一些地下矿山逐步利用水力充填技术，取代了早期的干式充填； 20 世纪 60 年代，开始进行胶结充填试验和采矿胶结充填采矿工艺研究；	1915 年，在贝莱尔矿利用采出的废石进行了采空区充填； 1966 年，芒特艾萨矿联合昆士兰大学进行充填料中添加硅酸盐水泥的研究工作；

表 1-1 (续)

国 家	技 术 发 展 概 况	应 用、研 究 案 例
澳 大 利 亚	20 世纪 60 年代, 开始应用膏体充填材料进行矿山充填, 并取得了一定的成果; 到目前为止, 在澳大利亚约有 15 座矿山采用了胶结充填技术	1969 年, 芒特艾萨矿第一次采用硅酸盐水泥胶结充填料进行充填; 1997 年, 布罗肯希尔世界矿产公司的膏体充填站成功地投入运行; 1995 年, 坎宁顿矿对尾砂样品进行了环管充填试验, 并对其进行了无侧限抗压强度试验
美 国	20 世纪 40—50 年代, 大规模采用水砂充填取代废石充填; 20 世纪 80 年代, 随着采掘设备和技术的发展, 采矿方法开始从方框支架采矿法转为上向分层充填、下向分层充填和大直径深孔嗣后充填等高效率的采矿方法。在充填混合物中应用减水剂和水化控制技术	1864 年, 美国宾夕法尼亚州的一座煤矿进行了水砂充填; 1964 年, 原美国矿业局开始进行有关水力输送方式及尾砂胶结充填的工程特性研究, 同时对水泥和尾砂制成的充填料进行了大量的试验。由于当时受输送方式的限制, 试验浆体浓度均小于 70% ; 20 世纪 80 年代, 幸运星期五矿建成了膏体充填系统; 格彻尔金矿在块石胶结充填中应用减水剂技术, 在降低水泥用量和充填成本的同时, 提高了充填体的抗压强度

1.1.2 国内充填采矿技术发展概况

20 世纪 50 年代, 充填法在我国地下金属矿山中应用较为广泛, 据统计数据显示, 充填法在黑色金属地下矿山中的使用率达到 54.8% ; 在有色金属矿山地下开采中占 38.2% 。从 50—60 年代, 干式充填采矿法得到合理应用, 并取得了较好效果, 初步解决了当时困扰一些矿山的特殊问题, 如矿体形状复杂的矿床开采回收率较低的问题。与其他采矿方法相比, 干式充填采矿法回采工艺复杂, 装

运设备落后,效率低、成本高、劳动强度大,已不能满足当时矿山生产的需要,因此使用越来越少。随着深孔潜孔钻机的推广应用,一些铜矿开始应用阶段空场法和阶段崩落法。随后,其他一些金属矿山开始广泛应用深孔和中深孔落矿的采矿方法,并取得了较好的技术经济效益。

20 世纪 60 年代初,湖南锡矿山、安徽凤凰山和湖南黄沙坪等矿山率先开始应用分级尾砂进行充填。到 60 年代中期,一些矿山已经开始应用混凝土胶结充填、尾砂充填和水砂充填等采矿方法。金属矿山特别是有色金属矿山,为减少矿石损失贫化,已普遍采用水砂充填、尾砂充填和胶结充填采矿法来开采高品位、产状和赋存条件较复杂,以及对开采有特殊要求的矿床。例如,金川镍矿和凡口铅锌矿进行了粗骨料胶结充填的试验研究。1970—1971 年,长沙矿冶研究院与金川有色金属公司合作,在龙首矿试验建成了一套机械化粗骨料胶结充填系统。1972—1975 年,金川有色金属公司与长沙矿山研究院及北京有色冶金设计研究总院合作,开展了胶结充填料和充填料管道输送的试验研究,创立了高浓度胶结充填的理论和整套工艺技术,在此基础上,于 1982 年建成充填系统并投入生产。1987—1991 年,金川有色金属公司与北京有色冶金设计研究总院合作,开展了全尾砂膏体泵送充填新工艺的试验研究。同时,凡口铅锌矿与长沙矿山研究院合作,开展了高浓度全尾砂自流输送充填新工艺的试验研究工作。

20 世纪末,膏体泵送充填工艺系统在金川镍矿二矿区和大冶有色金属公司的成功应用,标志着我国充填采矿进入膏体充填发展阶段。

进入 21 世纪,随着我国地下矿山开采深度的增加,以及提高矿石采出率和保护生态环境的需要,充填采矿法的应用将越来越广泛,并向着高效化和无废化的方向发展,充填采矿法在我国将进入一个新的发展时期。高浓度全尾砂胶结充填、泵送膏体胶结充填将有更大的发展前景,矿山无尾排放的目标将随着充填技术的进步而真正

实现。

1.2 胶结尾砂充填中的多场耦合问题

充填采矿技术经历了从干式充填到最初为不含胶结剂的水砂充填,发展到如今的胶结充填。胶结充填一般是采用以碎石、河砂或尾砂或戈壁集料为骨料,与水泥或石灰类胶结材料混合搅拌形成浆体或膏体,以管道泵送或重力自流方式输送到充填区的充填方法。与水砂充填相比,胶结充填的充填料强度大、充填速度快、充填量大、工艺简单。随着材料科学的发展,目前胶结材料的类型、品种多样;掺合料的多样化,使胶体、浆体或膏体的成分更加复杂。合理的充填材料配比加上先进的浆体泵送工艺,使胶结充填出现空前繁荣的局面。目前,胶结充填在世界各国的矿山企业,尤其是矿业发达国家得到广泛应用。

胶结尾砂充填作为胶结充填的一个重要分支,其引入和发展为充填采矿技术的应用和实施提供了有力的支持。胶结尾砂充填是以尾砂为骨料,与水泥等胶结剂及水混合,制备成胶结尾砂充填料浆(必要的情况下还会在料浆中掺入一些添加剂,例如减水剂、缓凝剂等),通过管道自流或泵送至地下采空区进行填充的方法。因此,应用胶结尾砂充填技术的关键之一是要求胶结尾砂充填料浆具备良好的流动性和可输送性。胶结尾砂充填料浆被输送至井下一段时间后会固结成胶结尾砂充填体,其重要的作用就是控制岩层移动和地表沉陷,因此胶结尾砂充填体必须具备一定的力学强度和稳定性。同时,胶结尾砂充填体还应具有良好的低渗透性,以避免从胶结尾砂充填体内渗出的水污染地下环境。胶结尾砂充填体是否能够长期发挥其支撑作用,还取决于其耐久性。只有当胶结尾砂充填体的固结效果良好时,它才能具备理想的力学稳定性、耐久性和低渗透性,这也是应用胶结尾砂充填技术的另一个关键所在。

胶结尾砂充填料浆能否被顺利输送至地下采空区,取决于料浆是否具有良好的流动性,而料浆的流动性又与其流变性(屈服应力

和黏度)有关:料浆越“黏”,其流动性越差。如果料浆的流动性不佳,常常会导致堵管等问题的发生,这样不但会影响矿山的整体运行,还会增加不必要的成本投入,比如拆洗管道等产生的费用。因此,理解并掌握胶结尾砂充填料浆的流变规律对于控制其流动性和可输送性至关重要。然而,胶结尾砂充填料浆的流变性除了与其自身的混合物组成及特性(例如,尾砂的颗粒级配、胶结剂的水化反应、料浆的浓度和密度等)相关外,还受一些外在因素的影响,例如温度和泵送压力等。这些复杂的内外部因素可用热力学、化学以及流变学等加以解释,它们共同影响充填料浆的流动性。

一些研究侧重于研究充填料浆的化学组成对其流变性的影响,而 Yin 等主要研究了充填料浆的固体组成对其流变特性的影响。上述这些研究均只考虑单一因素对充填料浆流变行为的影响,却忽略了温度等因素的影响,因此要获得更全面的结论,则需采用耦合分析的方法,对影响充填料浆流变性的各过程进行研究。

水泥等胶结剂在胶结尾砂充填体的固结过程中起着至关重要的作用:水泥经过水化反应生成水化硅酸钙(C-S-H)、钙矾石(Aft)、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等水化产物, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 经过二次水化反应又进一步生成C-S-H和Aft(图1-1)。从微观角度来看,大量的Aft晶体填充在尾砂颗粒间的孔隙中,在C-S-H的胶凝作用下,Aft、C-S-H以及尾砂颗粒紧密地交织在一起,构成骨架。反映在宏观上,即胶结尾砂充填料浆随着水化反应的进行而逐渐固结硬化成胶结尾砂充填体。水化产物的生成和积聚逐渐细化胶结尾砂充填体内部的孔隙结构,从而导致胶结尾砂充填体内孔隙水压力分布的变化。孔隙水压力的改变会进一步引起胶结尾砂充填体内应力场的变化,有效应力张量计算式如下:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} + \alpha \delta_{ij} p \quad (1-1)$$

其中, σ'_{ij} 为有效应力张量; σ_{ij} 为总应力张量; α 为Biot系数; δ_{ij} 为Kronecker符号; p 为孔隙水压力。

水泥遇水发生水化反应,在生成水化产物的同时,还会释放一

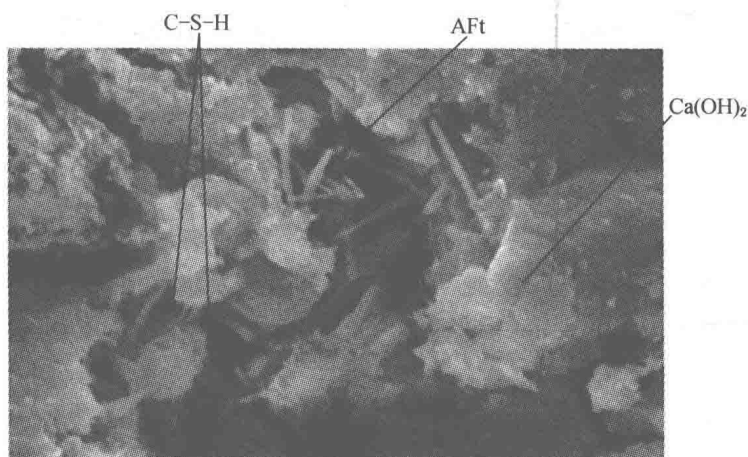


图 1-1 水化产物的微观电镜扫描结果

定的热量，从而促进胶结尾砂充填体温度的发展。温度（包括充填材料自身的温度和外界环境温度）的变化不仅会改变胶结尾砂充填体内渗流流体的密度和黏度，而且还会引起热应力和热应变，从而使胶结尾砂充填体的应力场和应变场发生改变，总应变见式（1-2）。

反之，水化反应也会受温度的影响，温度越高，则水化反应速率越大，单位时间内生成的水化产物越多，胶结尾砂充填体的强度越大，胶结尾砂充填体的渗透性越弱。此外，热量还会随着流体的流动进行传递，从而改变温度在胶结尾砂充填体中的分布。

$$\varepsilon = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^T \quad (1-2)$$

其中， ε 为总应变； ε_{ij}^e 为弹性应变增量； ε_{ij}^T 为热应变增量。

综上所述，胶结尾砂充填体固结硬化效果主要受以下过程影响：

1. 力学过程

胶结尾砂充填体在井下发挥支撑矿岩的作用,对于保护矿工以及回收矿柱都至关重要,因此充填体必须具备理想的力学强度和稳定性才能更好地发挥其作用。

2. 水化反应过程

水泥等胶结剂与水接触会发生水化反应(即化学反应),而水化反应度是用来表征胶结剂水化反应强度或程度的一个重要指标,有关研究表明,胶结剂的类型、含量以及水化反应度,在很大程度上影响了胶结尾砂充填体的强度。

3. 热传递过程

胶结尾砂充填体在固结硬化过程中,胶结剂的水化反应会释放一定的热量。此外,胶结尾砂充填体与围岩及井下环境之间还会发生热交换。这两种热源都会对胶结尾砂充填体的温度产生影响。较高的温度有利于胶结尾砂充填体早期强度的发展,但是过高的温度也会对胶结尾砂充填体结构造成不利的影响(如高温所引起的开裂),所以正确掌握胶结尾砂充填体的温度演化规律,对于分析其结构稳定性显得尤为重要。

4. 水力学过程

胶结尾砂充填体的水力学特性主要包括饱和度和渗透性等,这些特性会影响胶结尾砂充填体的强度、耐久性和环境特性。这是因为充填体的饱和度越低,其水分含量越少,强度则越高。而充填体的渗透性越差,则说明其耐久性越强,从其内部排出的酸性废水也就越少,对井下环境所造成污染也就越小。

根据上述分析讨论可以判定,胶结尾砂充填体的固结效果主要受温度场(T)、渗流场(H)、应力场(M)和化学场(C)(胶结剂的水化反应)共同作用的影响。这些场之间的耦合作用关系如图1-2所示。

1.3 胶结尾砂充填多场耦合问题研究概况

目前,岩土及核废料处理工程中的多场耦合分析是国内外的

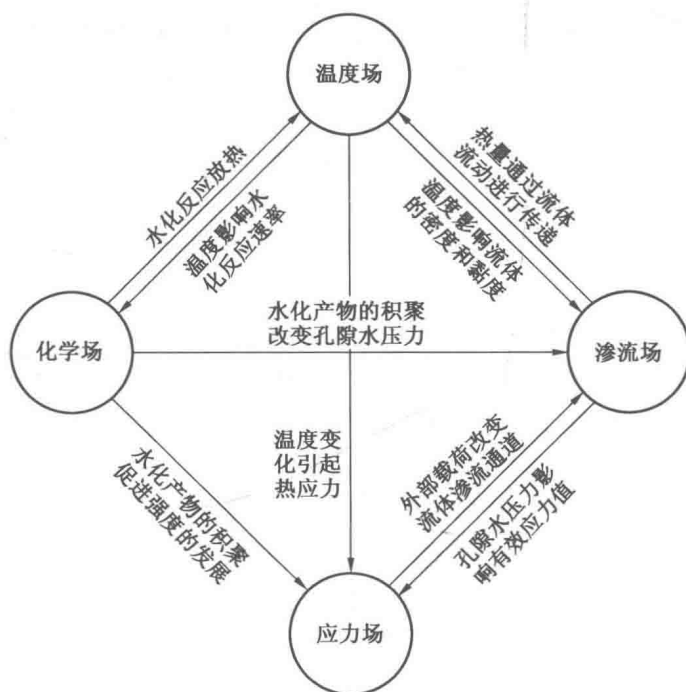


图 1-2 多场耦合作用关系示意图

研究热点。例如, Nasir 等利用数值模拟的手段研究了冰川地区的沉积岩在热(温度) - 流(渗流) - 力(应力) - 化(化学反应)耦合作用下的响应行为。Zheng 等建立了膨润土的热 - 流 - 力 - 化 (THMC) 耦合模型, 并通过实验室试验验证了模型的有效性。Chen 等利用理论分析及试验验证的手段对土体中的热 - 流 - 力 (THM) 耦合作用过程进行了研究。Taron 等利用数值模拟手段研究了工程地热储集层和可变形裂隙岩体在热 - 水 - 力 - 化耦合作用效应下的演变规律。Tong 等通过构造热力学、水力学和力学耦合模型对缓冲材料和岩体进行了研究。Jing 等通过建立热 - 流 - 力 (THM) 耦合数学模型, 对废料储存库的安全问题