



窄条带充填料浆流动扩展解析几何模型及接顶优化

朱梦博 罗屹骁 刘浪 巫侯琴 何军 屈慧升 蔚保宁 何伟

引用本文:

朱梦博, 罗屹骁, 刘浪, 等. 窄条带充填料浆流动扩展解析几何模型及接顶优化[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 226–239.
ZHU Mengbo, LUO Yixiao, LIU Lang. Analytical geometry model of narrow strip backfill slurry flow and roof-contact optimization[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 226–239.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0599>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

房柱式采空区矸石似膏体充填料浆流动沉降规律

Flow settlement law of gangue paste-like filling slurry in room-and-pillar goaf
煤炭科学技术. 2025, 53(4): 202–219 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1969>

建筑物下特厚煤层镁渣基全固废连采连充开采技术与实践

Mining technology and practice of full-solid waste cemented backfilling in narrow strip of extra-thick coal seam under buildings
煤炭科学技术. 2024, 52(4): 83–92 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0188>

红土膏体充填材料及其物理特性试验研究

Experimental study on red clay paste backfilling material and its physical characteristics
煤炭科学技术. 2021, 49(2): 61–68 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.008>

我国充填采煤技术回顾及发展现状

Review and development status of filling coal mining technology in China
煤炭科学技术. 2020, 48(9): 39–47 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/56528201-9015-409f-b9b4-6d7384a984e0>

“三下”采煤膏体充填开采技术研究

Research on paste backfilling mining technology of coal mining under buildings, water bodies and railways
煤炭科学技术. 2021, 49(1): 218–224 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.017>

基于不同浓度氯盐作用下充填膏体时效性特征研究

Research on the time-dependent stability of filling paste under the action of different concentrations of chloride salts
煤炭科学技术. 2025, 53(5): 114–126 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0189>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

朱梦博, 罗屹骁, 刘浪, 等. 窄条带充填料浆流动扩展解析几何模型及接顶优化[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 226–239.

ZHU Mengbo, LUO Yixiao, LIU Lang, *et al.* Analytical geometry model of narrow strip backfill slurry flow and roof-contact optimization[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 226–239.

窄条带充填料浆流动扩展解析几何模型及接顶优化

朱梦博^{1,2}, 罗屹骁¹, 刘浪^{1,2}, 巫侯琴³, 何军⁴, 屈慧升^{1,2}, 蔚保宁⁵, 何伟¹

(1. 西安科技大学能源与矿业工程学院, 陕西西安 710054; 2. 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室, 陕西西安 710054;

3. 西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川绵阳 621002; 4. 榆林市榆阳区常兴煤矿, 陕西榆林 719099; 5. 西安弗尔绿创矿业科技有限责任公司, 陕西西安 710054)

摘要: 充填体的接顶率对充填体整体质量及采空区稳定性有重要影响。充填体接顶率欠佳, 在采空区顶部形成的欠接顶区域会带来许多安全隐患, 如易引发顶板冒顶、片帮, 地表沉降, 有害气体集聚等问题。为探究欠接顶区域的成因及影响因素, 优化充填接顶工艺, 基于多点分层充填工艺下充填料浆的扩展规律进行解析几何分析, 并对窄条带多点分层充填工艺进行分析。量化表征了充填料浆触顶前及充填料浆触顶后的流动扩展规律, 同时根据成因将充填料浆触顶后的封闭区划分为“Ⅰ型封闭区”和“Ⅱ型封闭区”, 建立了欠接顶区的判别式。在窄条带充填料浆扩展解析几何模型研究基础上, 建立了窄条带多点分层充填分析模型并开展近水平窄条带充填模拟试验, 得到不同工艺下的封闭区长度; 合理的下料点间距及接顶充填高度对提高充填接顶率具有重要影响。针对充填封闭区, 提出了全域排气/排水方法, 该管道单向透水/透气不透浆。搭建了特厚煤层窄条带充填物理相似试验台, 开展充填多点分层充填试验和全域排水/排气试验。同时, 采用地质雷达探测某充填矿井窄条带欠接顶区的分布规律, 开展全域排水/排气优化接顶现场试验。物理模拟试验、现场试验欠接顶区分布规律与窄条带多点分层充填分析模型结果一致, 全域排水/排气方法可以有效提高窄条带充填接顶效果。

关键词: 欠接顶; 充填膏体; 巷式开采; 充填工艺; 接顶优化

中图分类号: TD823

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)08-0226-14

Analytical geometry model of narrow strip backfill slurry flow and roof-contact optimization

ZHU Mengbo^{1,2}, LUO Yixiao¹, LIU Lang^{1,2}, WU Houqin³, HE Jun⁴, QU Huisheng^{1,2}, WEI Baoning⁵, HE Wei¹

(1. College of Energy and Mining Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mines and Hazard Prevention, Ministry of Education of China, Xi'an 710054, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621002, China; 4. Yulin Yuyang District Changxing Coal Mine, Yulin 719099, China; 5. Xi'an Fill Green-innovation Mining Technology Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: Roof-contact rate of backfilling greatly affects the overall quality of backfilling and the stability of goaf. The roof-contact rate of the backfill is insufficient, the lack roof-contact area formed at the top of the goaf will bring many safety hazards, such as roof collapse, sheet wall, surface settlement, harmful gas accumulation and other problems. In order to explore the causes and influencing factors of the under-contacted roof area and optimize the backfill and roof-contact process, this paper analyzed the expansion law of the backfill slurry based on the multi-point stratified backfill technology, and analyzed the narrow strip multi-point stratified backfilling process. The flow and expansion laws of the backfill slurry before and after roof-contact were quantitatively characterized. Meanwhile, based on the formation mechanisms, the enclosed area after the backfill slurry reaches the roof was classified into “Type I enclosed area” and “Type II en-

收稿日期: 2024-05-07

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 宫在芹

DOI: 10.12438/cst.2024-0599

基金项目: 中国工程院战略研究与咨询资助项目(2024-XZ-24); 国家自然科学基金资助项目(52378264); 陕西省重点研发计划—“两链”融合重点专项资助项目(2023-LL-QY-07)

作者简介: 朱梦博(1991—), 男, 湖北浠水人, 副教授, 博士。E-mail: mbzhu@xust.edu.cn

通讯作者: 刘浪(1985—), 男, 陕西靖边人, 教授, 博士。E-mail: liulang@xust.edu.cn

closed area”, and a criterion for the non-roof-contact area was established. On the basis of the research on the analytical geometric model of backfill slurry expansion in narrow strips, an analytical model for multi-point and multi-layer backfilling in narrow strips was developed, and a near-horizontal narrow-strip backfilling simulation test was conducted to obtain the length of the enclosed area under different processes. The rational spacing of the material-feeding points and the roof-contact backfilling height significantly influence the improvement of the roof-contact rate of backfilling. For the backfilling enclosed area, a full-range exhaust/water-pipe method was proposed. This pipe is unidirectionally permeable to water and air but impermeable to the backfill slurry. A physical similarity test bench for backfilling was constructed. Multi-point and multi-layer backfilling tests and full-range drainage/gas tests were carried out. Meanwhile, geological radar was utilized to detect the distribution pattern of the non-roof-contact area in narrow strips of a backfilled mine, and a field test for optimizing roof-contact with full-range drainage/gas was carried out. The distribution pattern of the non-roof-contact area in the physical simulation test and the field test highly coincides with the results of the analytical model for multi-point and multi-layer backfilling in narrow strips. The full-range drainage/gas method can effectively enhance the roof-contact effect of narrow-strip backfilling.

Key words: lack roof-contact; cemented paste backfill; roadway mining; backfilling process; roof-contact optimization

0 引 言

充填开采是实现煤炭行业绿色低碳发展的重要代表性途径之一^[1-3], 在实现煤炭资源的高效回收并显著降低开采扰动地质灾害风险的同时, 可以规模化处置煤基固废^[4-7]。充填体质量的含义包括充填体“强度质量”和充填体“整体质量”2 个层面^[8], 而充填区接顶率极大影响着充填体整体质量及采空区稳定性, 接顶率越高, 充填区围岩稳定性越高, 地表沉陷越小。但是在实际充填过程中, 由于顶板凹凸不平、充填料浆中骨料沉降堆积、充填材料泌水、充填体养护收缩等原因, 充填区普遍存在或大或小的欠接顶区^[9-10]。

充填接顶效果欠佳, 会使采场顶板暴露面积过大, 动载作用下易引发顶板冒落、围岩片帮、充填体垮塌等灾害, 危及作业安全^[11-13]。充填接顶率越高, 充填体与顶板相接触的面积越大, 充填体支撑顶板的效果越好, 进路回采时的安全程度越大^[14-15], 朱鹏瑞等^[16]通过数值模拟软件, 分析了不同接顶率与顶板稳定性的关系。在充填作业时, 由于采场顶板凹凸不平、充填下料顺序不协调, 同时充填体由于其泌水性及流动性的影响, 会在凝固时存在一定的收缩与分层, 易在充填体顶部形成欠接顶积水区, 并且欠接顶量随泌水率增加而增大^[17], 对于欠接顶量而言, 需保证采空区的充实度, 实现密实充填, 限制顶板活动空间, 减少顶板破坏范围, 使其保持完整状态^[18]。目前充填接顶调控技术主要有 2 种: 充填下料强制接顶技术和无沉缩-膨胀充填接顶技术^[19]。

充填下料强制接顶技术是根据采场条件及充填料浆性能通过合理设置充填下料工艺以提高充填接顶率^[20]。冯国瑞等^[21]针对山西元宝湾煤矿充填效果较差且充填高度未达标准的局部区域, 进一步提出

了底板空洞二次充填和加固处理方法。刘浪等^[22]提出特厚煤层镁渣基连采连充开采技术, 使用前后管道交替下料进行充填接顶并成功应用于麻黄梁煤矿。邵小平等^[23]针对上河煤矿 3216 工作面条带采空区, 采用 3 次充填下料, 在顶板开倾斜凹槽并在凹槽内捆绑塑料管进行注浆接顶。张小瑞等^[24]开展进路顶板充填管槽+多点下料分次充填的充填接顶技术研究, 更好地实现进路采场的充填接顶。崔栋梁等^[25]针对新城金矿上向分层充填工艺中接顶问题, 提出了分次充填、异形顶板、透水挡墙及强制接顶方案。江宁等^[26]针对草楼铁矿阶段空场嗣后充填接顶问题, 提出分次、分区充填及多点排料充填接顶工艺。充填排料强制接顶技术仍存在一部分问题, 现有充填技术增加了工作面生产工序, 降低了采煤效率^[27], 而料浆加压接顶无法处置充填管道内的大量料浆; 强化排水方法中设备能耗大, 成本高; 多点排料布置的下料口位置及数量分布等参数仍需进一步研究。

无沉缩-膨胀充填接顶技术, 即通过提高料浆浓度, 降低充填体泌水, 控制沉缩率或使充填体发生膨胀进而主动接顶。贺强等^[28]基于浅埋煤层开采下的地表沉陷控制理论及控制方法, 认为在充填材料中加入膨胀剂能提高充填体的接顶率。陈嘉栋等^[29]研究表明, 在充填料浆中掺入适量膨胀剂后, 充填料浆在采场形成的固态充填体体积与充填料浆的体积基本相当, 而且不影响充填料浆的输送性能和充填体强度。于清军等^[30]应用化学发泡剂发明了一种泡沫膨胀性充填材料, 通过在充填料浆中添加发泡剂使得充填体膨胀, 从而改善充填接顶的效果。兰文涛等^[31]研制出适用于井下充填的 HPG 凝胶水膨胀充填复合材料, 并对其形成机制进行了研究。充填体的膨胀会使得强度产生损失, 影响充填体的稳定性^[32], 应用安全的膨胀技术和合理的膨胀参数仍是

研究的关键,现阶段膨胀性充填材料还处于初步研究阶段。此外,膨胀性充填材料不能完全解决因顶板起伏形态、充填材料泌水等原因引起的欠接顶问题。

笔者基于窄条带充填过程中,欠接顶空腔的成因及影响因素进行分析,对多点分层充填方法下充填料浆的拓展规律进行解析几何分析,包括触顶前流动拓展、积水/积气区判别、触顶后流动拓展和充填量计算和欠接顶区判别;利用充填分析程序对窄条带多点分层充填进行分析优化,提出了窄条带充填全域排水/排气方法。以期为煤矿窄条带充填安全高效接顶和井下空间利用提供方法和技术支撑^[33-34]。

1 窄条带分层充填方法与欠接顶现象

1.1 多点分层充填方法

目前常采用多点分层下料工艺进行窄条带充填,即在采空区上端布设多个下料口,分段并分层逐次下料至充填体完成接顶。以榆林市常兴煤矿为例,简述该充填方法。

榆阳区常兴煤矿初期上采用房柱式采煤法,回采的 3 号煤层走向东偏北,倾向南偏东,倾角 $0.5^{\circ} \sim 1.5^{\circ}$ 。2012 年 6 月,榆林市榆阳区被列入国家水保重点建设工程,常兴煤矿调整采用刀柱式采煤方法。后续为同时兼顾保水采煤和煤炭资源回收,常兴煤矿从 2018 年开始研究窄条带充填开采技术,并获批成为榆林市充填开采试点煤矿。近年来经过技术探索,常兴煤矿已建立了窄条带充填开采工艺技术体系,具有一定的代表性。试验矿井 3103 与 3105 工作面采用窄条带充填开采工艺回采,条带长度 100 ~ 150 m、宽 8 m、高 5 m。其采空区接顶工艺如图 1 所示,在距离条带左、右两侧 15 ~ 25 m 处及中部布置 3 个下料口与 3 段排水/排气管路,分 3 次下料进行充填体接顶。图 1a 为充填体接顶前状况,此时充填体顶部距离采空区顶板,即接顶高度 0.3 ~ 0.6 m。由于料浆本身的流动性及采空区角度影响,充填料浆在下料后易堆积形成中间高两侧低的“漏斗状”结构,当仅一个下料口进行充填时难以充实采空区左右两侧,常兴煤矿设计为 3 部分下料口进行充填:右侧下料口先进行下料,注浆至右侧排气管返浆,并间隔 8 h,待排气管停止排水且料浆初步凝结后,重复上述操作 2 次,分层充填至右侧充填区域接顶以提高右侧充实率,如图 1b 所示。随后进行中部区域与左侧区域的接顶,方法与右侧区域相同,注浆至排气管返浆并重复 2 次完成接顶,如图 1c 和图 1d 所示。

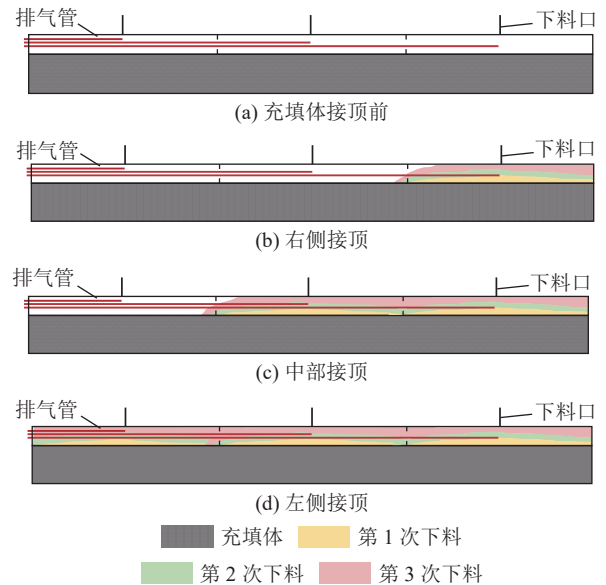


图 1 充填接顶工艺

Fig.1 Roof contacting of backfilling

1.2 欠接顶现象及影响因素

回采充填体相邻条带煤柱过程中常揭露出或大或小的欠接顶区,图 2 为试验矿井条带煤柱回采揭露的欠接顶区,欠接顶区常呈扁平不规则状。

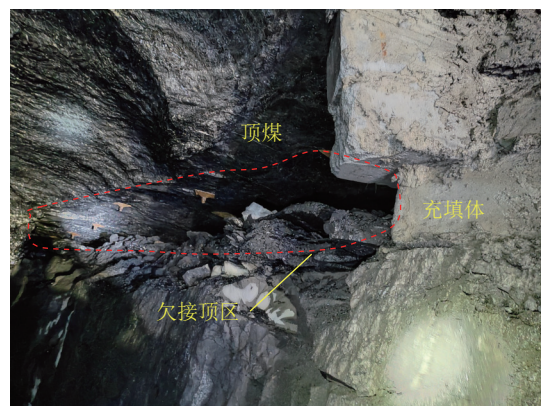


图 2 窄条带式充填欠接顶现象

Fig.2 Lack roof-contacted of narrow strip backfill

窄条带式充填接顶率的主要影响因素包括充填材料特性、条带采空区空间形态和充填工艺:① 充填材料特性。料浆流动性越好,其自流坡度越小,条带采空区中分层充填越平整,越不容易形成欠接顶区^[35];泌水率越低,充填空间越不易形成积水区,接顶率越高。② 条带采空区空间形态。当条带采空区(煤层)倾角大于料浆自流坡度时,采用图 1 中所示的窄条带分层充填方法由低位至高位充填,料浆从低位至高位渐次注满采空区,此时一般不会形成欠接顶区。而当条带采空区倾角小于料浆自流坡度,至近水平时,受料浆自流坡面影响,接顶充填时相邻下料口中部处可能形成封闭积气区或积水区,进而

形成欠接顶区,充填现场也发现了这一现象。此外,当采空区顶板起伏不平时,顶板局部高点处易形成封闭区,导致欠接顶。③ 接顶充填工艺。下料口布置及各下料口充填方量设计不合理时,接顶充填可能形成封闭区,导致欠接顶,本文将重点论述充填工艺(下料顺序及下料量)对接顶质量的影响。

2 窄条带充填料浆扩展解析几何模型

2.1 充填料浆坡面及已充填区顶界面概念

综合现阶段分层充填工艺及窄条带式采空区尺寸,将窄条带充填简化为以长-高坐标系下的平面解析几何问题。相关研究表明,充填料浆在采空区中流动扩展过程中骨料率先在下料点下方附近区域沉降堆积,骨料粒径随到着地点的水平距离变大而变小^[35]。随着料浆向远端流动,料浆中骨料占比减小,尤其是大颗粒骨料,料浆质量浓度降低,形成的料浆坡面近似呈正态分布状曲线,料浆自流坡度一般为 $0^\circ \sim 5^\circ$ ^[32]。基于上述分析,可以将分层充填各下料口的充填料浆简化为堆积体,堆积角度为充填料浆的自流坡度。

在构建窄条带分层接顶充填解析几何模型之前,首先引入充填料浆坡面和已充填区顶界面概念。充填料浆坡面是指某一下料点完成一次分层充填下料后料浆受充填区空间形态(顶底板、两端挡墙、已充填区范围)和骨料-灰分-水离析等因素影响而呈现出的料浆顶界面形态。充填料浆坡面在 XOZ 坐标系下的解析几何方程为充填料浆坡面函数。图 3a 为首层第 1 下料点充填,土黄色区为已充填区,料浆最高堆积点 B 位于第 1 下料点正下方,料浆向左扩展至 A 点,向右扩展至右侧挡墙并交于 C 点,折线段 $AB-BC$ 为首层充填第 1 下料点完成下料阶段(CT_1)对应的充填料浆坡面。图 3b 为第 2 层充填第 2 下料点完成下料情况,充填顺序为首层充填的 CT_1 、 CT_2 、 CT_3 ,第 2 层充填的 CT_4 、 CT_5 , CT_5 所对应的充填料浆坡面为折线段 $BC-CD-DE$ 。图 3c 为第 2 层充填完毕的情况,由于料浆自流坡度小于采空区顶底板倾角, CT_6 充填过程中,料浆在右端面 D 点首次触顶后沿顶板扩展至 C 点处, CD 段接顶,折线段 $AB-BC-CD$ 为 CT_6 充填阶段对应的充填料浆坡面。

已充填区顶界面是指窄条带采空区多点分层充填某一状态下已充填空间的上边界。已充填区顶界面在 XOZ 坐标系下的解析几何方程为已充填区顶界面函数。如图 3a 所示,首层第 1 下料点充填阶段(CT_1),充填料浆坡面与已充填区顶界面重合。如图 3b 所示, CT_4 充填料浆覆盖了 CT_3 充填料浆坡面

部分区域, CT_4 阶段已充填区顶界面为折线段 $OA-AB-BC-CD-DE$ 。如图 3c 所示, CT_6 充填料浆完全覆盖了 CT_1-CT_5 充填阶段的已充填区顶界面,此时已充填区顶界面为 CT_6 充填料浆坡面,即折线段 $AB-BC-CD$ 。

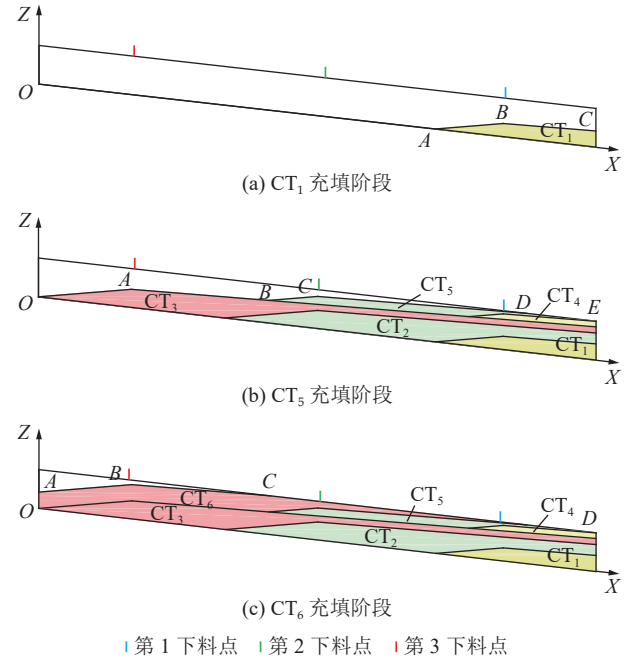


图 3 充填料浆坡面及已充填区顶界面概念
Fig.3 Concept of backfill slurry slope and top interface of backfill area

窄条带多点分层充填各下料点完成下料后,当前阶段充填料浆对已充填区局部或全部区域进行覆盖,已充填区范围更新一次,已充填区顶界面随之更新。

2.2 充填料浆触顶前流动扩展

2.2.1 充填料浆着地-堆积-扩展规律

受连续采煤机不均匀截割和煤层起伏变化影响,条带采空区底板可能存在一定程度的起伏变化,充填料浆着地后向低处扩展,因此料浆不一定率先在下料口正下方堆积,同时料浆沿底板流动扩展也受到底板形态的影响。

图 4a 和图 4b 分别展示了下料点正下方下陷区和隆起区 2 种情况下料浆流动扩展情况。如图 4a 所示,料浆在下陷区着地后,由于料浆着地点两侧坡面存在差异,料浆不等量地向两侧扩展,形成两侧坡面,并与底板相交。随着充填量的增加,料浆顶部从 A_1 上升至 A_4 ,下料点右侧坡面与充填边界交点由 B_1 向 B_4 扩展,下料点左侧坡面与充填边界交点由 C_1 向 C_4 扩展。当充填料浆在落地点堆积时,充填料浆坡面可以通过以下方式确定:以垂直线 A_1A_4 上一点 A 建立无约束料浆坡面函数,计算坡面函数与充填区

右边界和左边界第 1 个交点, 分别记为 B 和 C , 则料浆坡面为折线段 $BA-AC$ 。如图 4b 所示, 下料点正下方对应底板隆起区的最高点, 充填料浆在底板着地后顺隆起区两侧坡面流动至低洼区, 该过程可以看作以隆起区两侧坡面一点(如图 4b 中 A_{11} 和 A_{12} 所示)作为下料点单侧流动扩展状态。持续充填后, 当料浆坡顶上升至隆起区最高点 A , 充填料浆将隆起区两侧凹陷区完全充满, 形成了图 4a 所示情况, 以 A 点为顶点的料浆坡面函数与充填空间边界的交点构成了料浆坡面形态。如图 4c 所示, 当采空区倾角大于充填料浆的自流坡度时, 料浆着地后在重力作用下向采空区最低点流动, 并在采空区最低点开始堆积, 持续充填过程中料浆沿底板最低点逐步扩展至下料点正下方 A_3 , 随后基于 A_3 点向上堆积, 如折线段 $C_4A_4-A_4B_4$ 。

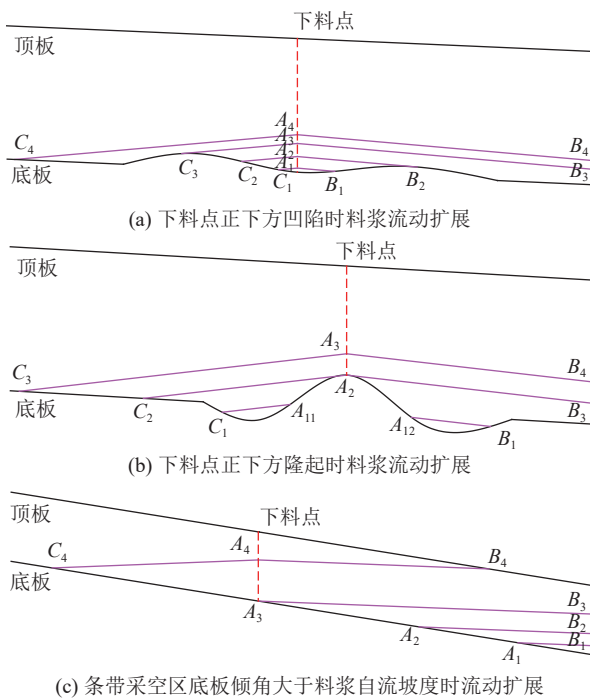


图 4 充填料浆着地-堆积-扩展状态

Fig.4 Backfill slurry landing, stacking, and expanding state

由此可建立料浆触顶前料浆坡面形态的分析方法, 具体如下: ① 根据底板起伏形态确定充填料浆着地后的初始堆积点, 当料浆着地点底板斜率小于料浆自流坡度且非隆起区顶点, 料浆在着地点开始堆积, 否则充填料浆流动至距离着地点最近且底板斜率小于料浆自流坡度的点或端面挡墙处, 并在该点开始堆积; ② 比较料浆着地堆积点两侧底板斜率与充填料浆自流坡度的大小关系, 确定料浆流动方向; ③ 由充填料浆自流坡度和当前阶段所充填料浆的最高点, 确定充填料浆坡面形态, 建立充填料浆坡面函数。

2.2.2 触顶前充填料浆坡面函数

不同采空区形态及多点分层充填不同下料量下, 充填料浆与“已充填区坡面-顶底板-两侧挡墙”围成的采空区空间相交关系不同。建立描述充填料浆流动扩展状态的解析几何模型, 可以解算出不同条件下充填料浆坡面函数, 进而为欠接顶区判定和充填工艺优化建立基础。

基于窄条带充填区 XOZ 坐标系, 记条带采空区顶、底板曲线方程为 $z = f_1(x)$ 和 $z = f_2(x)$, $x \in [0, L]$, L 为条带采空区的长度。记第 1、2、3 下料管口空间坐标分别为 (x_1, z_1) 、 (x_2, z_2) 和 (x_3, z_3) , 3 个下料点位于顶板上, 即 $(x_1, z_1) \in f_1(x)$, $(x_2, z_2) \in f_1(x)$, $(x_3, z_3) \in f_1(x)$ 。

记第 i 层第 j 个下料口充填的料浆堆积体最高点为 $(x_{i,j}, z_{i,j})$, 当充填料浆未触顶且向着地点两侧流动时, 充填料浆坡面函数 $z = f_3(x)$ 表达式为

$$f_3(x) = \begin{cases} x \tan \theta + (z_{i,j} - x_{i,j,l} \tan \theta), & x_{i,j,l} \leq x \leq x_{i,j} \\ x \tan(-\theta) + (z_{i,j} + x_{i,j,r} \tan \theta), & x_{i,j} < x \leq x_{i,j,r} \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ 为料浆自流坡度, ($^\circ$)。 $x_{i,j,l}$ 和 $x_{i,j,r}$ 分别为充填料浆坡面与窄条带采空区边界或已充填区顶界面的左、右交点的横坐标。

充填料浆自流坡度 θ 一般 $< 5^\circ (0.087 \text{ rad})$, 由三角函数基本性质可知 $\theta \approx \tan \theta$,

因此, 式(1)可以简化为

$$f_3(x) = \begin{cases} \theta x + (z_{i,j} - \theta x_{i,j,l}), & x_{i,j,l} \leq x \leq x_{i,j} \\ -\theta x + (z_{i,j} + \theta x_{i,j,r}), & x_{i,j} < x \leq x_{i,j,r} \end{cases} \quad (2)$$

当充填料浆仅向左流动时, 充填料浆坡面函数表达式为 $f_3(x) = \theta x + (z_{i,j} - \theta x_{i,j,l})$, $x_{i,j,l} \leq x \leq x_{i,j}$ 。同理, 当充填料浆仅向右侧流动时, 充填料浆坡面函数表达式为 $f_3(x) = -\theta x + (z_{i,j} + \theta x_{i,j,r})$, $x_{i,j} \leq x \leq x_{i,j,r}$ 。

由式(2)可知, 除了确定第 i 层第 j 个下料口充填的料浆堆积体最高点坐标 $(x_{i,j}, z_{i,j})$ 之外, 还需解算出左、右交点 $(x_{i,j,l}, z_{i,j,l})$ 和 $(x_{i,j,r}, z_{i,j,r})$, 才能确定充填料浆坡面函数的表达式。下面以左侧坡面为例, 论述左、右交点的解算方法。首先, 分别判别充填料浆坡面与已充填区顶界面、底板及左侧挡墙的交点。联立左侧坡面函数 $f_3(x)$ ($x \leq x_{i,j}$) 和已充填区顶界面函数 $f_4(x)$ ($0 \leq x \leq L$), 解算左侧坡面线与已充填区顶界面的交点:

$$\begin{cases} z = \theta x + (z_{i,j} - \theta x_{i,j,l}), & x \leq x_{i,j}; i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3 \\ z = f_4(x), & 0 \leq x \leq L \end{cases} \quad (3)$$

记式(3)左侧交点坐标为 $(x_{i,j,n}, y_{i,j,n})$ 。联立左侧坡面函数 $f_3(x)$ ($x \leq x_{i,j}$) 与底板函数 $f_2(x)$ ($0 \leq x \leq L$), 解算得到交点坐标 $(x_{i,j,n}, y_{i,j,n})$; 联立左侧坡面线

$f_3(x)(x \leq x_{i,j})$ 与左侧挡墙 $x = 0$, 得到交点坐标 $(x_{i,j,13}, y_{i,j,13})$ 。充填料浆由堆积点向左侧扩展过程中, 料浆坡面线与已充填区顶界面、底板及左侧挡墙的第 1 个交点为料浆向左侧流动扩展的终点, 即 $\{x_{i,j,11}, x_{i,j,12}, x_{i,j,13}\}$ 中的最大值为当前第 i 层第 j 个下料口充填料浆坡面的左侧边界,

$$x_{i,j,l} = \max\{x_{i,j,11}, x_{i,j,12}, x_{i,j,13}\} \quad (4)$$

记 $x_{i,j,r1}$ 、 $x_{i,j,r2}$ 和 $x_{i,j,r3}$ 分别为右侧坡面函数 $z = f_3(x)(x \geq x_{i,j})$ 与已充填区顶界面 $f_4(x)(0 \leq x \leq L)$ 、底板 $z = f_2(x)(0 \leq x \leq L)$ 和右侧挡墙 $x = L$ 的交点横坐标。同理, 当前阶段充填料浆坡面的右侧边界为

$$x_{i,j,r} = \min\{x_{i,j,r1}, x_{i,j,r2}, x_{i,j,r3}\} \quad (5)$$

2.2.3 触顶前已充填区顶界面函数

已充填区空间形态直接影响着充填料浆在剩余可充空间中的流动扩展路径, 顶界面函数可以用于表征已充填区的空间形态。通过沿底板逐点比较本阶段充填料浆坡面函数和已充填区顶界面函数值的大小, 更新已充填区函数顶界面。对于 $x = x_0(x_0 \in [0, L])$, 当 $f_4(x_0) > f_3(x_0)$, 表明本阶段第 i 层第 j 个下料口充填料浆未扩展至 $x = x_0$ 处; 当 $f_4(x_0) \leq f_3(x_0)$, 表明本阶段充填料浆已扩展至 $x = x_0$ 处, 并在该处对上一阶段的充填体进行覆盖。基于上述分析, 可以建立已充填区顶界面更新的数学表达式:

$$f_4(x) = \begin{cases} f_4(x), & \text{if } f_4(x) > f_3(x) \\ f_3(x), & \text{if } f_3(x) \geq f_4(x) \end{cases}, x = 0, \frac{L}{n}, \frac{2L}{n}, \dots, L \quad (6)$$

式中: n 为在 $0 < x < L$ 区间等间距设定 n 个判别点。

2.3 料浆触顶后封闭区判别

受充填管及排水/排气管空间布置、分层充填方量、顶板起伏变化等因素影响, 充填料浆流动扩展形成的堆积坡面可能与顶板形成封闭区, 并最终演变成欠接顶区。

2.3.1 I 型封闭区

如图 5a 所示, 第 3 下料点 A 和右侧挡墙端面之间存在隆起区, $CT_{7,2}$ 区域充填过程中, 料浆顶部从 A 点向右侧扩展至 B 点, 此时料浆坡面线 BD 与隆起区在 C 点相交, 顶板 BC 段与料浆坡面构成封闭区, 右侧坡面线包括顶板段 AB 、料浆坡面 BCD ; 料浆顶部从 A 点向左扩展至 B' 点, 底部扩展至 C' 点, 左侧坡面线包括顶板段 AB' 、料浆坡面 $B'C'$ 。如图 5b 所示, $CT_{7,2}$ 区域继续充填, A 点右侧区域除隆起区之外完全充满, 顶板 BC 段与料浆坡面仍然构成封闭区, 右侧坡面线包括顶板段 AB 、料浆坡面 BC 、顶板段 CD ; $CT_{7,2}$ 区域充填完毕, $CT_{7,3}$ 区域充填一定量后, 料

浆坡面线 $B'D'$ 与左侧下陷区在 C' 点相交, 左侧坡面线包括顶板段 AB' 、料浆坡面 $B'C'D'$ 。如图 5c 所示, $CT_{7,3}$ 区域继续充填, 料浆顶部由 C' 点扩展至 D' 点, 料浆底部对应扩展至 E' 点, 右侧坡面线保持不变, 包括顶板段 AB 、料浆坡面 BC 、顶板段 CD , 左侧坡面线包括顶板段 AB' 、料浆坡面 $B'C'$ 、顶板段 $C'D'$ 、料浆坡面 $D'E'$ 。经过上述料浆流动扩展过程, 接顶充填过程中在图 5 中局部隆起区、下陷区处形成封闭区。

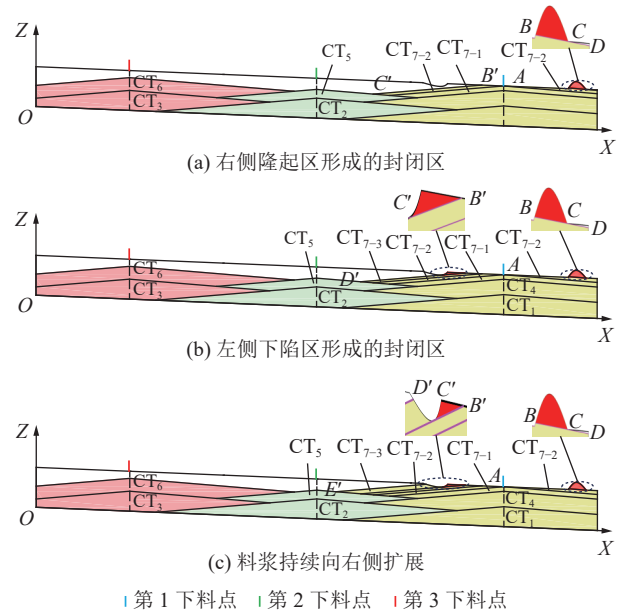


图 5 顶板局部隆起/下陷区形成的封闭区

Fig.5 Closed area formed by local uplift/subsidence of the roof

由上述分析可知, 接顶充填料浆流动扩展过程中, 当料浆自流坡面在一侧与顶板线同时存在 2 个以上交点时, 前 2 个交点区域的顶板线即形成封闭区。基于上述分析, I 型封闭区的判别可以分为左、右侧 2 种情形。当料浆触顶后沿顶板线向右侧扩展至坐标为 (x_{Ti}, z_{Ti}) 的点, 由式(7)计算料浆坡面与顶板线的交点:

$$\begin{cases} z = -\theta(x - x_{Ti}) + z_{Ti} \\ z = f_1(x) \end{cases} \quad (7)$$

当式(7)存在 2 个及以上解时, 前 2 个解对应的中间区域为 I 型封闭区。

同样, 当料浆触顶后沿顶板线向左侧扩展至坐标为 (x_{Ti}, z_{Ti}) 的点, 由式(8)计算料浆坡面与顶板线的交点:

$$\begin{cases} z = \theta(x - x_{Ti}) + z_{Ti} \\ z = f_1(x) \end{cases} \quad (8)$$

当式(8)存在 2 个及以上解时, 前 2 个解对应的中间区域为 I 型封闭区。

2.3.2 II 型封闭区

如图 6 所示窄条带采空区的充填顺序依次为: 首层充填的 CT_1 、 CT_2 、 CT_3 , 第 2 层充填的 CT_4 、 CT_5 、 CT_6 , 接顶充填 CT_{7-1} 、 CT_{7-2} 、 CT_{7-3} 、 CT_{8-1} 、 CT_{8-2} 、 CT_{9-1} 和 CT_{9-2} 。第 2 层充填时, 第 1、3 下料口充填方量较大, 第 2 下料口充填方量较小时, 待接顶充填区的空间特征为两端小、中间大。如图 6c 所示, 接顶充填第 2 下料口下料, 当下料口正下方料浆首次触顶时, 充填区 CT_{8-1} 、 CT_{7-3} 和顶板合围形成封闭区, 即第 1、2 下料口之间的蓝色区域。同理, CT_{8-2} 、 CT_{9-1} 和顶板合围形成封闭区, 即第 2、3 下料口之间的蓝色区域。由上述分析可知, 相邻 2 个下料点先后接顶充填过程中, 当相邻 2 个下料口料浆均在下料点正下方触顶, 顶板线 $z=f_1(x)$ 与已充填区顶界面 $z=f_4(x)$ 不重合区构成 II 型封闭区。由图 6 可知, 第 1 下料点接顶充填阶段的 CT_{7-3} 和第 2 下料点接顶充填阶段的 CT_{8-2} , 两者的充填方量决定了料浆在下料点正下方接顶后继续沿顶板向左可以扩展的距离, 最终影响第 1、2 下料点之间和第 2、3 下料点之间 II 型封闭区的大小。 CT_{7-3} 和 CT_{8-2} 充填量越大, 2 个封闭区越小, 但是需要的泵压就越大。另一方面, 对于图 6 所示的缓倾斜条带, 目前窄条带多点分层下料充填工艺中, 排气/排水管与下料管布置在同一处, 下料管正下方接顶后, 该处的排气/排水管随之被料浆堵塞, 进而

无法排除封闭区的积水/积气。

2.4 料浆触顶后流动扩展

由前面关于封闭式积水/积气区的论述可知, 料浆触顶后顶板空间起伏形态对充填料浆流动扩展形成新约束。下面根据料浆自流坡度和充填区顶底板倾角的关系, 进行分类讨论。

2.4.1 料浆自流坡度大于充填区顶底板倾角

如图 6 所示, 当料浆自流坡度大于充填区顶底板倾角时, 料浆堆积体最高点率先触顶(下料点处), 对应的本阶段充填区为 CT_{7-1} , 当前阶段充填料浆坡面的右侧边界位于右侧挡墙上。右挡墙顶部留设有风窗及泄水孔, 在泵压作用下料浆继续向两侧扩展, 直至右侧挡墙处完全接顶, 并形成图 6a 中的充填区 CT_{7-2} 。为简化问题, 假设此条件下料浆平均地向两侧扩展, 即第 1 下料点处虚线将 CT_{7-2} 等分。当持续加压泵送时, 由于右侧料浆已完全接顶, 右侧挡墙处已完全封闭, 料浆只能向左侧扩展, 形成图 6b 中的充填区 CT_{7-3} , 其大小由最大泵压和充填时间决定。如图 6c 所示, 第 2 下料口接顶充填时料浆触顶, 形成充填区 CT_{8-1} , 第 1、2 下料口之间形成封闭区(蓝色区域), 继续下料充填, 料浆仅能向左侧扩展, 形成充填区 CT_{8-2} 。如图 6d 所示, 第 3 下料口接顶充填时料浆触顶, 形成充填区 CT_{9-1} , 第 2、3 下料口之间形成封闭区(蓝色区域)。继续下料充填, 料浆向左侧扩展, 直至左侧完全接顶, 形成充填区 CT_{9-2} 。

基于上述分析, 充填区顶底板倾角小于料浆自流坡度时, 料浆触顶后流动过程可简化如下:

① 第 1 下料口下料, 充填料浆在下料点正下方形成堆积顶点, 随着持续充填下料, 堆积顶点率先触顶。

② 第 1 下料口继续下料, 料浆向左、右两侧挡墙继续扩展, 扩展至顶板局部隆起区或下陷区时形成 I 型封闭区, 直至右侧挡墙处注满。对于已接顶充填的区域, 料浆顶界面为顶板段, 当存在封闭区时, 料浆顶界面为斜率 $\pm\theta$ 的直线段。记第 1 下料口左侧充填料浆坡面分别与顶板和已充填区顶界面相交于 $(x_{T,12}, z_{T,12})$ 和 (x_{12}, z_{12}) 。首先通过式(7)和式(8)分别计算得到第 1 下料口左、右两侧的 I 型封闭区的分布区域。左侧 I 型封闭区域可以描述为

$$\left\{ (x, z) \left| \begin{array}{l} x \in (x_{T,1}, x_{T,2}) \cup (x_{T,3}, x_{T,4}) \cup \dots \cup (x_{T,2n-1}, x_{T,2n}) \\ f_4(x) \leq z \leq f_1(x) \end{array} \right. \right\} \quad (9)$$

式中: $x_{T,1}, x_{T,2}, \dots, x_{T,2n}$ 为左侧各封闭区边界的横坐标, 且 $x_{T,1} < x_{T,2} < \dots < x_{T,2n} < x_1$ 。

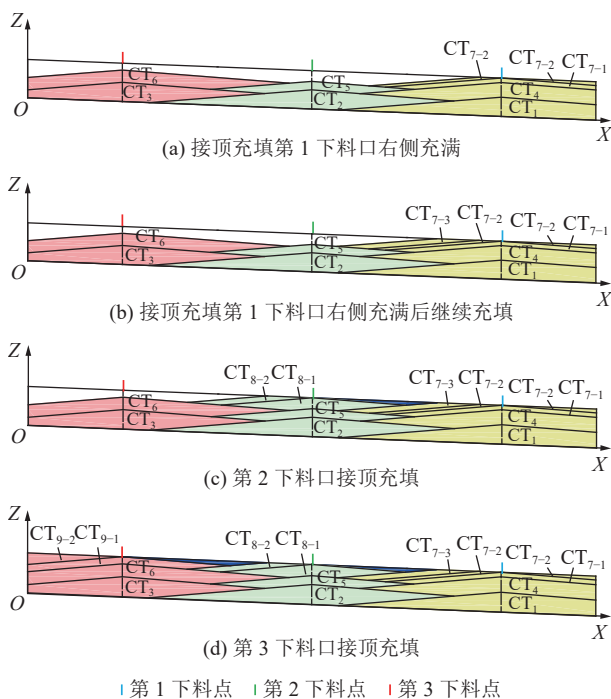


图 6 缓倾斜下料浆触顶后流动扩展及封闭区形成

Fig.6 Flow expansion state and closed water/gas zone formed after roof contacting in case of small dip angle

第一下料口右侧 I 型封闭区域为

$$\left\{ (x, z) \left| \begin{array}{l} x \in (x_{T,2n+1}, x_{T,2n+2}) \cup (x_{T,2n+3}, x_{T,2n+4}) \cup \dots \cup (x_{T,2m-1}, x_{T,2m}) \\ f_4(x) \leq z \leq f_1(x) \end{array} \right. \right\} \quad (10)$$

式中: $x_{T,2n+1}, x_{T,2n+2}, \dots, x_{T,2m}$ 为右侧各封闭区边界的横坐标, 且 $x_1 < x_{T,2n+1} < x_{T,2n+2} < \dots < x_{T,2m}$

由以上分析可知, 可以建立充填料浆坡面函数 $f_3(x)$ 表达式:

$$f_3(x) = \begin{cases} \theta(x - x_{T,12}) + z_{T,12}, & x \in (x_{12}, x_{T,12}) \\ \theta(x - x_{T,i}) + z_{T,i}, i = 1, 3, \dots, n, & x \in (x_{T,1}, x_{T,2}) \cup (x_{T,3}, x_{T,4}) \cup \dots \cup (x_{T,2n-1}, x_{T,2n}) \\ -\theta(x - x_{T,j}) + z_{T,j}, j = 1, 3, \dots, m & x \in (x_{T,2n+1}, x_{T,2n+2}) \cup (x_{T,2n+3}, x_{T,2n+4}) \cup \dots \cup (x_{T,2m-1}, x_{T,2m}) \\ f_1(x), & x \in [x_{T,12}, x_{T,1}] \cup [x_{T,2}, x_{T,3}] \cup \dots \cup [z_{T,2n}, x_{T,2n+1}] \cup \dots \cup [z_{T,2n+2}, x_{T,2n+3}] \cup \dots \cup [x_{T,2m}, L] \end{cases} \quad (11)$$

③ 第 2 下料口下料至料浆触顶, 第 1、2 下料口中间形成封闭区。第 2 下料口料浆触顶时, 料浆坡面函数表达式: $f_3(x) = \theta(x - x_2) + z_2$, 当 $x \leq x_2$; $f_3(x) = -\theta(x - x_2) + z_2$, 当 $x_2 < x \leq L$ 。此时在区间 $[x_2, x_{T,12}]$ 形成封闭区。

④ 在泵压作用下第 2 下料口继续下料, 料浆向左侧扩展, 更新充填料浆坡面函数, 同式(11)一致。

⑤ 第 3 下料口下料至料浆触顶, 第 2、3 下料口中间形成封闭区。

⑥ 第 3 下料口继续下料, 在泵压作用下料浆将左侧挡墙处充满完毕。

在上述过程中, 每完成一次下料充填, 根据充填料浆坡面函数, 更新已充填区顶界面函数。

2.4.2 料浆自流坡度小于充填区顶底板倾角

如图 4c 所示, 当充填区顶底板倾角大于料浆自流坡度时, 料浆流动扩展过程如下: 第 1 下料点充填料浆向右侧挡墙扩展, 料浆坡面与右侧挡墙相交, 当扩展至 B_3 点时料浆坡面与底板相交于第 1 下料点正下方; 继续充填, 料浆开始同时向左、右两侧扩展, 直至右侧料浆坡面坡底沿右侧挡墙上升至最高点 B_4 ; 继续充填, 料浆开始触顶, 从 B_4 点扩展至 B_5 点, 此时充填料浆坡面由左侧坡面线 C_5A_5 、右侧坡面线 A_5B_5 和顶板段 B_5B_4 共同构成。

由上述分析可知, 当料浆着地点底板斜率大于料浆自流坡度, 料浆流动至距离着地点最近且底板斜率小于料浆自流坡度的点或端面挡墙处, 并在该点开始堆积。由充填料浆自流坡度和当前阶段充填料浆的最高点, 可以确定充填料浆坡面形态, 建立充填料浆坡面函数。确定充填料浆堆积体最高点坐标 $(x_{i,j}, z_{i,j})$ 后, 对于非接顶段, 充填料浆坡面函数推导同式(2)。当料浆最高点沿底板还未扩展至下料点正下方时, 即 $x_{i,j} < x_j$, 非接顶段的充填料浆坡面函数表达式为 $f_3(x) = -\theta(x - x_{i,j}) + z_{i,j} (x_{i,j} < x < L)$; 当料浆最高点沿底板扩展至下料点正下方时, 开始下料点正下

方堆积, 并在此处形成料浆堆积体的最高点, 此时充填料浆坡面函数同式(2)。对于接顶区, 按照前述方法确定接顶区的 I 型封闭区空间位置, 然后按照式(11)推导方法确定接顶段料浆坡面函数。

2.4.3 欠接顶区判别

窄条带接顶充填下料阶段, 充填材料泌出水经由排水管排出, 直至排水管返高浓度浆体后停止下料, 此时完成接顶充填。在后续充填材料养护阶段, 充填材料伴随着轻微收缩, 同时顶板发生下向变形, 两者协调作用, 直至充填体对顶板实现完全承载。因此, 接顶充填完毕后, 忽略充填材料微收缩对接顶的影响, 可以得到最终的已充填区顶界面。已充填区顶界面和顶板不重合部分即为欠接顶区, 对应的判别式为

$$\left\{ (x, z) \left| \begin{array}{l} 0 \leq x \leq L \\ f_4(x) \leq z \leq f_1(x) \end{array} \right. \right\} \quad (12)$$

3 窄条带多点分层充填接顶优化

3.1 窄条带多点分层充填分析模型

在窄条带充填料浆扩展解析几何模型研究基础上, 建立了如图 7 所示的窄条带多点分层充填分析模型。

3.2 近水平窄条带充填模拟试验

相比于倾角较大的窄条带采空区, 近水平窄条带采空区形成欠接顶的可能性更大, 且欠接顶区空间更大。为此, 本节继续以前述常兴煤矿窄条带充填为背景, 采用窄条带多点分层充填分析程序开展近水平窄条带充填接顶模拟试验。其中, 条带采空区长 100 m、宽 8 m、高 5 m, 顶、底板倾角 1.5° , 以窄条带采空区左端面底板点为坐标原点, 建立 XOZ 直角坐标系。

3.2.1 不同下料点布置

如图 8 所示, 将第 1、3 下料点分别布置在距离右、左端面 16.67 m 的地方, 第 2 下料点设置在顶板

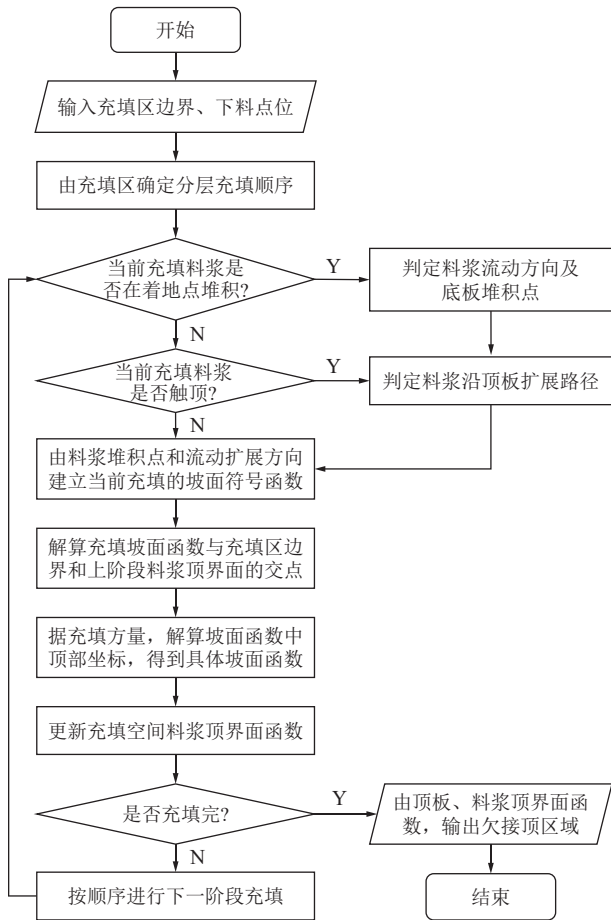
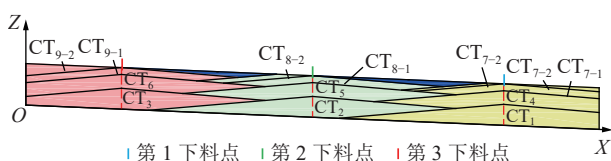


图 7 窄条带多点分层充填模拟流程

Fig.7 Flow chart of narrow strip multi-point and layered backfill simulation

线中部。图 8 中蓝色区域为欠接顶区(Ⅱ型封闭区)。第 1 层充填各下料点下方料浆堆积高度均为 2.4 m, 第 2 层充填各下料点下方料浆堆积高度为 1.5 m, 接顶充填阶段, 各下料点到正下方已充填区顶界面高度均为 0.6 m。第 1 下料点接顶充填分 CT_{7-1} 和 CT_{7-2} 2 个阶段, CT_{7-1} 为料浆首次触顶。触顶后继续充填 (CT_{7-2}), 根据第 2 节分析将料浆流动过程简化为向左右两侧均匀扩展, 当第 1 下料点至右侧挡墙完全充满结束下料, 此时充填料浆从第 1 下料点处沿顶板线向左扩展 3.6 m。第 2 下料点接顶充填, 料浆触顶后在第 1、2 下料点之间形成第 1 个Ⅱ型封闭区, 继续充填, 在泵压作用下, 充填料浆从第 2 下料点处

图 8 下料点间距较大情况下窄条带多点分层充填
Fig.8 Narrow strip multi-point layered backfill under the condition of large spacing of blanking points

沿顶板线向左扩展 6.3 m。第 3 下料点接顶充填, 料浆触顶后在第 2、3 下料点之间形成第 2 个Ⅱ型封闭区, 继续充填, 直至第 3 下料点至左侧挡墙区域完全充填。上述多点分层充填情况下, 第 1、2 个Ⅱ型封闭区长度分别为 27 m 和 33 m。

如图 9 所示, 将第 1、3 下料点分别布置在距离右、左挡墙均为 25 m 的地方, 第 2 下料点设置在顶板线中部。图 9 中蓝色区域为欠接顶区(Ⅱ型封闭区)。同图 8 所示充填条件一样, 第 1 层充填各下料点下方料浆堆积高度均为 2.4 m, 第 2 层充填各下料点下方料浆堆积高度为 1.5 m, 接顶充填阶段, 各下料点到正下方已充填区顶界面高度均为 0.6 m。第 1 下料点充填触顶后 (CT_{7-1}), 继续充填 (CT_{7-2}), 当第 1 下料点至右侧挡墙完全充满结束下料, 此时充填料浆从第 1 下料点处沿顶板线向左扩展 8.5 m。第 2 下料点接顶充填, 料浆触顶后在第 1、2 下料点之间形成第 1 个Ⅱ型封闭区, 继续充填, 在泵压作用下, 充填料浆从第 2 下料点处沿顶板线同样向左扩展 6.3 m。第 3 下料点接顶充填同图 8 所示情况一致。上述多点分层充填情况下, 第 1、2 个Ⅱ型封闭区长度分别为 18.7 m 和 16.6 m。

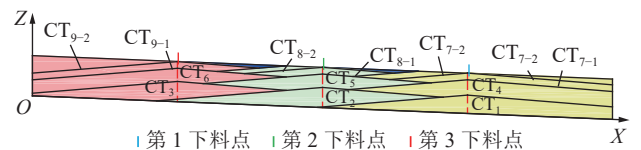
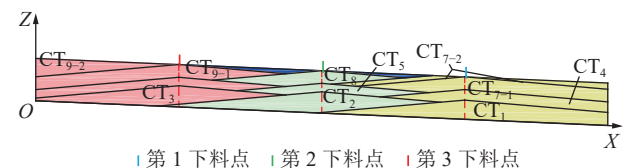


图 9 下料点间距较小情况下窄条带多点分层充填

Fig.9 Narrow strip multi-point layered backfill under the condition of small spacing of blanking points

3.2.2 不同充填方量

图 10 是在图 9 所示充填情况下, 将第 2 层充填高度减小至 0.9 m, 第 3 层接顶充填高度增加至 1.2 m。第 1 下料点接顶充填情况同图 9 所示情况一致, 即右侧挡墙处完全接顶后停止下料。第 2 下料点接顶充填不同于图 9, 接顶充填后即停止下料, 以模拟不同充填量情况。第 3 下料点接顶充填情况同图 9 所示情况一致。该条件下, 第 1、2 个Ⅱ型封闭区长度分别为 25 m 和 19.4 m。

图 10 不同充填量情况下窄条带多点分层充填
Fig.10 Multi-point layered backfill of narrow strip under different backfill amounts

3.2.3 近水平窄条带充填接顶工艺优化

在近水平窄条带充填模拟试验结果的基础上,结合现场充填工作经验,充填接顶可以从以下 4 个方面进行优化:

① 窄条带采空区布设充填管和排水/排气管阶段,需要确定巷顶是否存在局部隆起区,并优先将下料管和排水/排气管布置在局部隆起区,避免形成 I 型封闭区。

② 相邻下料点间距宜控制在 25 ~ 30 m,当条带空区较长时,可以增加 1 ~ 2 个下料点,可以避免充填过程中现成的 II 型封闭区过大。

③ 接顶充填过程中,本下料点充填触顶后,在泵压可控及挡墙可承载的情况下宜继续下料,使充填料浆从本下料点沿顶板线尽可能远地扩展至下一个下料点处,减小相邻下料点之间 II 型封闭区的规模,甚至避免形成 II 型封闭区。

④ 接顶充填高度宜控制在 0.3 ~ 0.6 m,避免接顶充填阶段相邻下料点之间形成较大规模的 II 型封闭区。

3.3 窄条带充填全域排水/排气方法

充填过程中,充填料浆与顶板形成 I、II 型封闭区后,封闭区的积水和空气难以被压缩,最终形成欠接顶区。对于 I 型封闭区,目前常在局部高点布置下料点和排水/排气管,确保完全接顶。但是识别局部高点依赖现场工人的经验,并带有一定主观性。此外,目前窄条带充填普遍将下料管和排水/排气管布置在一处,这种情况下更易形成范围更大的 II 型封闭区。从料浆流动扩展的角度分析,欠接顶区形成的主要原因是顶板上布置的排水/排气管无法将窄条带中全部 I、II 型封闭区中的积水/积气排出充填区。而在实际充填过程中,不可能无限多地布置排水/排气管。

针对以上问题,提出了窄条带充填全域排水/排气方法。如图 11 所示,在巷顶布置有透水/透气孔眼的管路,并用土工布包裹孔眼裹,使整个排水/排气管具有全域透水/透气且不透浆的特性。接顶充填阶段,在泵压及料浆沉降的双重作用下, I、II 型封闭区中的水气透过土工布,经由孔眼进入排水/排气管,排出充填区,从而将封闭区转变为开放区,提高接顶率。全域排水/排气管可以根据采空区顶板形态灵活布置,保证全面覆盖潜在的封闭区。相比于现阶段普遍采用的 1 根下料管配 3 根排水/排气管且仅端口排水/排气的接顶充填方法,全域排水/排气管均分布有孔眼,排水/排气效率更高,同时可以大幅度减少管路挂设工作量和管道用量,降低充填成本。

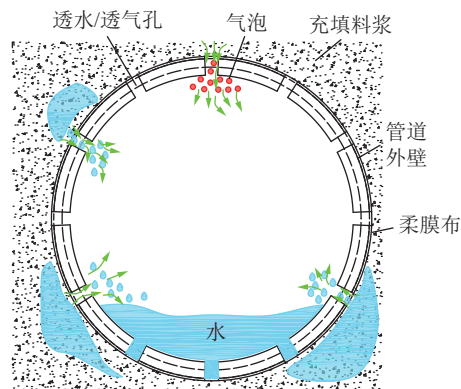


图 11 窄条带充填全域排水/排气管工作原理

Fig.11 Working principle of narrow strip filling global drainage/gas pipe

4 窄条带充填接顶试验

4.1 窄条带充填接顶物理相似模拟试验

4.1.1 试验台设计与制作

煤矿窄条带充填首先在巷顶布置充填及排水/排气管路,其次在条带两端构筑挡墙,最后进行多点分层充填。挡墙构筑后,人员不再进入充填区,充填过程中充填区总体处于黑箱状态,现场试验难以直观展示欠接顶区形成机制与接顶优化效果。为此,设计窄条带充填接顶物理相似模拟试验装置,开展室内试验研究。本次试验重点是观测欠接顶现象,为放大充填欠接顶现象,以榆林市麻黄梁煤矿特厚煤层窄条带充填开采为工程背景,开展窄条带充填接顶物理相似模拟试验。条带尺寸 120 m×8 m×10 m (长×宽×高),按照 40 : 1 的相似比,模拟采场尺寸为 3 m×0.2 m×0.25 m (长×宽×高),下料管径 $\phi 40$ mm。如图 12 所示,试验平台由模拟采场、下料系统、排水/排气管道、监测系统组成,主视面为透明钢化玻璃,顶板用透明 PVC 板替代,便于记录观察;下料系统由下料仓和下料管组成,同时在下料管外接输送泵以模拟采场泵送下料;监测系统使用高清摄像机于主视面记录下料过程。

4.1.2 试验方案设计

基于窄条带充填物理相似模拟试验平台,开展常规充填试验和全域排水/排气优化接顶充填试验,以验证窄条带充填料浆流动解析几何模型和全域排水/排气优化接顶方法,具体实验方案见表 1 所示。采用多点分层充填工艺进行充填试验,具体如下: ① 各层充填时,下料顺序为“右侧→中间→左侧”,中间下料点位于密封槽,中间右中下料点和中左下料点间距均为 75 cm; ② 常规充填试验和优化接顶充填试验均分 6 次下料,设计第 1—5 下料点堆积高度分别

为 35、85、135、185、235 mm,第 6 次下料为接顶充填,接顶充填高度 15 mm,按照相似比计算,对应实际接顶充填高度为 0.6 m。

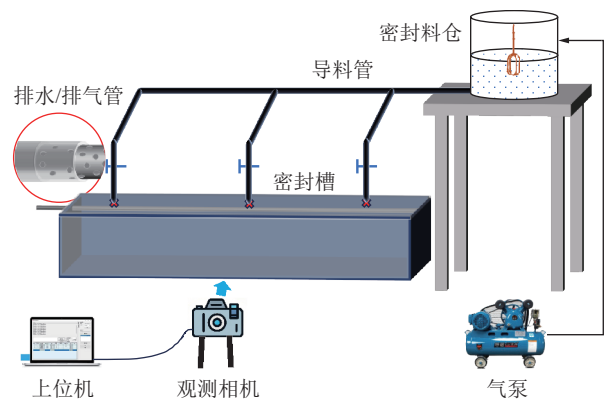


图 12 物理相似模拟平台结构示意图

Fig.12 Physical similarity simulation platform structure diagram

表 1 充填接顶物理相似模拟试验方案

Table 1 Roof contacting physical similarity simulation test plan

试验	观测对象	试验目的
常规充填试验	料浆流动顶面线	验证窄条带充填料浆流动
	封闭区的形成	解析几何模型
优化接顶试验	接顶情况	验证全域排水/排气优化接顶方法

在进行充填试验过程中,采用工业相机观测每一层充填阶段下钢化玻璃上的料浆液面。另一方面,采用窄条带多点分层充填分析模型计算各充填阶段下的料浆液面。对比物理相似模拟试验结果和分析模型预测结果,评价分析模型的可靠性。同时,对比常规充填工艺和全域排水/排气充填工艺的接顶效果,直观验证全域排水/排气优化接顶方法的可用性。

4.1.3 常规多点分层下料充填试验

常规充填试验各层料浆顶界面如图 13 中红色虚线所示,在相邻两个下料口之间存在明显的积水区,模拟条带两端存在明显的料浆坡面。本次试验所用充填材料的平均流动角为 3°,基于第 3 节的窄条带多点分层充填分析模型和各层充填阶段下料高度,计算了各层充填阶段的理论料浆顶界面,如图 13 绿色实线。充填料浆实际顶面(红色虚线)与充填料浆流动分析模型结果(绿色实线)在起伏形态上高度一致,相邻下料点之间存在明显的倒三角形积水区,接顶充填完成后演变为欠接顶区(图 14)。

图 14 为充填完成后顶板部分区域接顶情况,由于该相似模拟平台为水平无倾角,可以看出在相邻

两个下料口间出现明显的欠接顶区,这些欠接顶区位置特征均与 2.3 节所述 II 型封闭区相吻合。

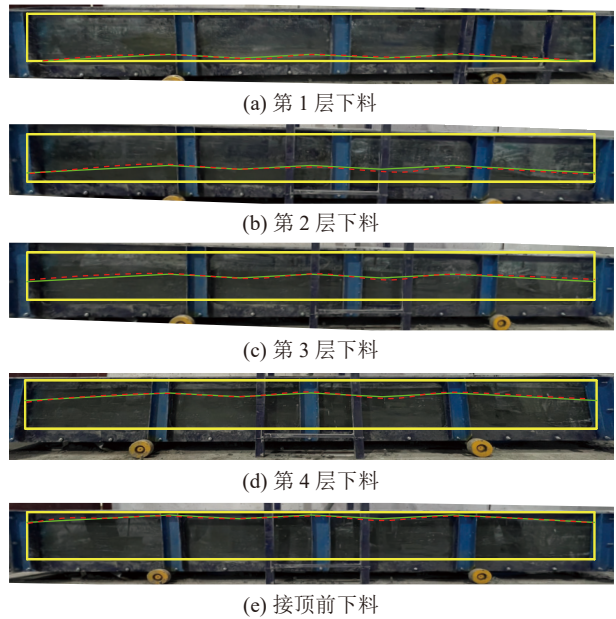


图 13 充填料浆顶界面对比

Fig.13 Comparison of top interface of backfilling slurry

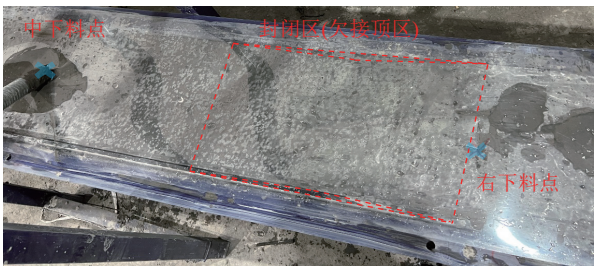


图 14 常规充填工艺形成的封闭三角区

Fig.14 Closed triangle area formed by conventional backfilling process

4.1.4 全域排水/排气优化接顶试验

基于物理相似模拟试验平台,开展全域排水/排气优化接顶试验,并与常规下料下欠接顶区进行对比,验证全域排水/排气优化效果。该试验同样依照煤矿的充填工艺,进行分层分次下料,不同于常规下料下欠接顶区特征试验,该试验将制作好的全域排水/排气管固定于顶板(PVC 板)下方,利用防水胶隔绝平台内部与外界的空气流通,并在密封料仓外接气泵以模拟泵送压力。待充填接顶后,继续泵送料浆,使得积水/气通过管路排出以实现完全接顶。如图 15 所示,对比常规下料充填试验,全域排水/排气实施后原相邻下料点之间的封闭区基本消除,充填接顶效果良好。

4.2 窄条带充填接顶现场试验

4.2.1 欠接顶区形成与空间分布特征验证

试验矿井曾回采某条带煤柱时,两侧已充填条

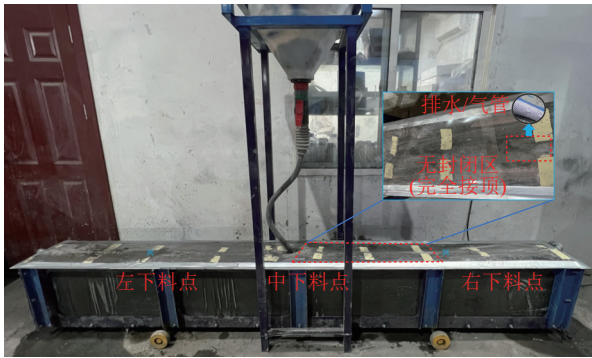


图 15 全域排水/排气充填料浆接顶

Fig.15 Roof contacting by using universal drainage/air pipe

带均揭露较大范围的欠接顶区(长 15~30 m, 高 0.5~1.0 m), 存在大面积悬顶风险, 为此采用地质雷达探测欠接顶区的分布规律。2022 年 7 月 2 日, 采用探地雷达探测 3105 条带工作面 22 号充填体中的欠接顶区。如图 16 所示, 沿着 23 号 A 采空区与 23 号充填体的壁面顶界线探测 22 号充填体中的欠接顶区, 探测距离 16~24 m。图 16 中 22 号充填体中从右至左 3 个红色点分别为第 1、2、3 下料点。探测过程中共计标记了 7 处异常, 如图 16 中的①—⑦。根据异常标记, 解释了 22 号充填体中的 3 处欠接顶区, 如图 17 中的浅黄色区域, 3 处欠接顶区均经回采验证, 并在回采阶段进行了补浆。

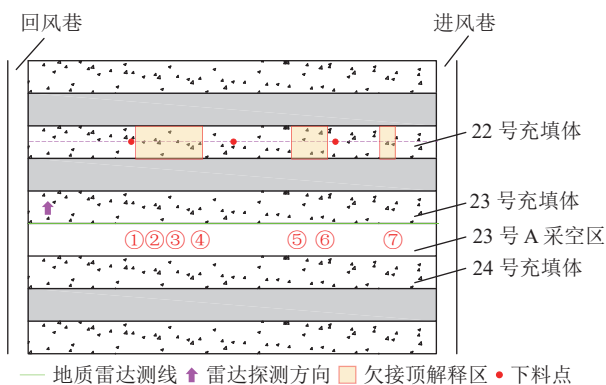


图 16 3105 工作面 23A 条带空区地质雷达探测

Fig.16 Geological radar surveying of No.23A strip goaf in 3105 longwall panel

22 号充填体中的欠接顶区主要分布在相邻下料点中间区域, 尤其是①②③④构成的欠接顶区, 空间分布规律与前述近水平窄条带充填模拟试验中的第 2 个 II 型封闭区分布范围吻合。异常⑦处回采揭露的欠接顶区如图 17 所示, 为典型的 I 型封闭区, 即顶板局部隆起导致的欠接顶。2 号充填区的欠接顶区空间分布及类型与前述料浆流动扩展分析结果一致, 验证了窄条带充填料浆流动扩展解析几何模型的合理性。

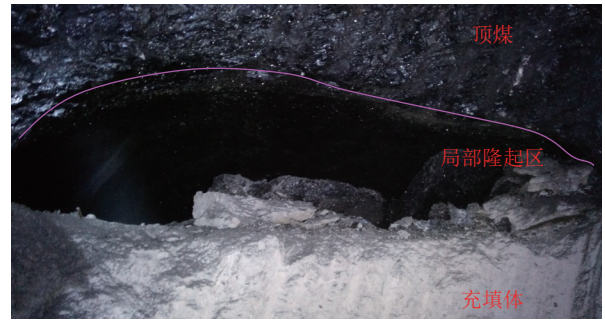


图 17 顶板局部隆起区形成的欠接顶区

Fig.17 Lack roof-contact area formed by local uplift area of the roof

4.2.2 全域排水/排气现场应用

为改善接顶效果, 常兴煤矿 2023 年 6 月开展窄条带充填全域排水/排气现场试验, 用 10 mm(钻头)的电钻在 $\phi 50$ mm 的 PE 管上打孔, 孔间距 200 mm, 管周布孔 3 个, 采用单层土工布包裹含孔管路, 制作了全域排水/排气管, 并沿巷顶长度方向中线将排水/排气管固定在锚网上。经现场多次试验, 全域排水/排气方法显著提高了接顶充填阶段排水效率, 充填试验区邻近煤柱回采阶段未揭露欠接顶区(图 18), 解决了近水平窄条带充填接顶难题。



图 18 窄条带全域排水/排气优化接顶效果

Fig.18 Roof-contact optimization of global drainage/air in narrow strip

现场试验表明, 窄条带充填料浆流动扩展解析几何模型可以准确描述窄条带多点分层充填过程中料浆流动扩展状态, 预测一定充填工艺下的欠接顶区分布, 并指导窄条带充填下料工艺优化。同时, 窄条带充填全域排水/排气方法可以避免接顶充填阶段封闭区的形成, 显著提高接顶率。

5 结 论

1) 利用解析几何方法建立窄条带充填料浆扩展模型, 描述了充填料浆触顶前、后流动扩展规律。根据充填过程中封闭区形成机制不同, 将充填料浆触顶后的封闭区划分为“I 型封闭区”和“II 型封闭

区”,给出了欠接顶区的判别式。

2) 建立了窄条带多点分层充填分析流程以优化充填工艺,开展窄条带充填模拟试验,分析不同充填工艺下形成的封闭区长度,研究表明合理的下料点间距及接顶充填高度对提高充填接顶率具有重要影响。

3) 在分析封闭区形成机理的基础上,提出了全域排气/排水优化接顶方法,管道表面透水透气不透浆,可以对充填区全域进行排水/排气,有效避免封闭区的形成。

4) 开展了窄条带充填物理相似模拟试验和现场试验,分层充填料浆顶界面形态及欠接顶区分布与模型分析结果吻合度高,试验结果均验证窄条带充填料浆流动解析几何模型和全域排水/排气优化接顶方法的可靠性。

参考文献(References):

- [1] 刘浪,朱梦博,王双明,等.煤基固废规模化绿色低碳利用研究进展与创新路径[J].煤炭科学技术,2025,53(6):82-103.
LIU Lang, ZHU Mengbo, WANG Shuangming, et al. Research progress and innovative pathways for the large-scaled green and low-carbon utilization of coal-based solid wastes[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 82-103.
- [2] 朱梦博,刘浪,王双明,等.煤矿采空区间隔条带充填 CO₂ 矿化封存及其关键技术[J].煤田地质与勘探,2025,53(6):143-155.
ZHU Mengbo, LIU Lang, WANG Shuangming, et al. Backfill-strip mining and CO₂ mineralization sequestration in coal mine goaves: A synergetic method and its key technologies[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(6): 143-155.
- [3] 张吉雄,张强,周楠,等.煤基固废充填开采技术研究进展与展望[J].煤炭学报,2022,47(12):4167-4181.
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, ZHOU Nan, et al. Research progress and prospect of coal based solid waste backfilling mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4167-4181.
- [4] 吴爱祥,杨莹,程海勇,等.中国膏体技术发展现状与趋势[J].工程科学学报,2018,40(5):517-525.
WU Aixiang, YANG Ying, CHENG Haiyong, et al. Status and prospects of paste technology in China[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(5): 517-525.
- [5] 吴爱祥,王勇,王洪江.膏体充填技术现状及趋势[J].金属矿山,2016(7):1-9.
WU Aixiang, WANG Yong, WANG Hongjiang. Status and prospects of the paste backfill technology[J]. Metal Mine, 2016(7): 1-9.
- [6] 郭文兵,胡玉杭,胡超群,等.我国“三下”采煤技术体系与工程实践[J].煤炭科学技术,2025,53(1):19-38.
GUO Wenbing, HU Yuhang, HU Chaoqun, et al. System and engineering practice of coal mining technology under buildings, water bodies and railways in China[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 19-38.
- [7] 罗文,王庆雄.浅埋强富水区下绿色高效保水开采技术[J].煤炭科学技术,2024,52(9):31-47.
LUO Wen, WANG Qingxiong. Green and efficient water conservation mining technology in shallow and strongly water-rich areas[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 31-47.
- [8] 邵亚建.采场内膏体料浆流动特性及充填接顶技术研究[D].北京:北京科技大学,2021.
SHAO Yajian. Flow characteristics of paste slurry in the underground stope and control technology of backfilling roof-contact[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.
- [9] LU H J, ZHANG S L. Design of roof-contacted filling ratio and filling holes in the sublevel open stoping with subsequent filling method[J]. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 2017, 8(4): 265.
- [10] BELEM T, BENZAAZOUA M. Design and application of underground mine paste backfill technology[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, 26(2): 147-174.
- [11] 王树海,李启月,赵国彦.提高充填接顶率的技术措施研究[J].矿冶工程,2011,31(1):13-15,18.
WANG Shuhai, LI Qiyue, ZHAO Guoyan. Research on technical measures for raising the rate of supporting pit roof[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2011, 31(1): 13-15, 18.
- [12] 刘奇,欧任泽,林卫星,等.接顶率对充填体稳定性的影响研究[J].矿冶工程,2020,40(1):22-26.
LIU Qi, OU Renze, LIN Weixing, et al. Effect of roof-contact rate on stability of backfill[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(1): 22-26.
- [13] ZHU Mengbo, ZHAO Liusheng, LIU Lang, et al. Deamination mechanism of modified magnesium slag using wet aging and its performance evolution as backfill material[J]. Journal of Environmental Management, 2025, 37: 124219.
- [14] 高玉倩,胡亚军,赵淑芳.采空区不同充填接顶率的充填体稳定性研究[J].矿业研究与开发,2020,40(3):140-144.
GAO Yuqian, HU Yajun, ZHAO Shufang. Stability research of filling body with different roof-contacted filling rates in goaf[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(3): 140-144.
- [15] 姜立春,陈鹏,吴爱祥.基于不同充填接顶率的采空区顶板拱架自稳效应[J].中国有色金属学报,2019,29(1):187-193.
JIANG Lichun, CHEN Peng, WU Aixiang. Roof self-stabilizing arching effect of goaf based on different roof-contacted filling rate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(1): 187-193.
- [16] 朱鹏瑞,王东旭,宋卫东,等.充填接顶率对采场顶板稳定性影响的数值模拟研究[J].矿业研究与开发,2015,35(5):39-42.
ZHU Pengrui, WANG Dongxu, SONG Weidong, et al. Numerical simulation research for the influence of roofcontacted filling rate on the stability of stope roof[J]. Mining Research and Development, 2015, 35(5): 39-42.
- [17] 徐斌,杨仁树,李永亮,等.煤矿胶结充填开采覆岩移动三量关系及其控制原则[J].煤炭学报,2022,47(S1):49-60.

- XU Bin, YANG Renshu, LI Yongliang, et al. Relationship between three quantities of overlying strata movement and its control principle in coal mine cemented filling mining[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(S1): 49–60.
- [18] 李永亮, 路彬, 杨仁树, 等. 煤矿连采连充式胶结充填采煤技术与典型工程案例[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1055–1071.
- LI Yongliang, LU Bin, YANG Renshu, et al. Cemented backfilling mining technology with continuous mining and continuous backfilling method for underground coal mine and typical engineering cases[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1055–1071.
- [19] CHEN F B, LIU J G, ZHANG X W, et al. Review on the art of roof contacting in cemented waste backfill technology in a metal mine[J]. Minerals, 2022, 12(6): 721.
- [20] DU X J, FENG G R, ZHANG M, et al. Influence of backfilling rate on the stability of the “backfilling body-immediate roof” cooperative bearing structure[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(6): 1197–1206.
- [21] 冯国瑞, 朱卫兵, 李竹, 等. 浅埋深蹬空底板煤柱群动态失稳机理及防治[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 200–209.
- FENG Guorui, ZHU Weibing, LI Zhu, et al. Dynamic collapse mechanism and prevention of shallow-buried pillar group underlying working seam floor in mined-out area[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 200–209.
- [22] 刘浪, 罗屹骁, 朱梦博, 等. 建筑物下特厚煤层镁渣基全固废连采连充开采技术与实践[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 83–92.
- LIU Lang, LUO Yixiao, ZHU Mengbo, et al. Mining technology and practice of full-solid waste cemented backfilling in narrow strip of extra-thick coal seam under buildings[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 83–92.
- [23] 邵小平, 陶叶青, 刘二帅, 等. 陕北浅埋煤层似膏体充填条带开采参数研究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(7): 63–70.
- SHAO Xiaoping, TAO Yeqing, LIU Ershuai, et al. Study and application of paste-like filling mining parameters of shallow buried coal seam in Northern Shaanxi[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(7): 63–70.
- [24] 张小瑞, 侯俊, 程文文, 等. 进路式充填采矿法充填接顶技术及应用[J]. 黄金, 2019, 40(10): 24–29.
- ZHANG Xiaorui, HOU Jun, CHENG Wenwen, et al. Filling roof connection techniques in approach filling mining method and their application[J]. Gold, 2019, 40(10): 24–29.
- [25] 崔栋梁, 赵国彦, 李夕兵, 等. 新城金矿采矿方法和充填接顶工艺探讨[J]. 金属矿山, 2006(3): 22–24, 76.
- CUI Dongliang, ZHAO Guoyan, LI Xibing, et al. Discussion on mining method and roof-contacted filling technique for Xincheng gold mine[J]. Metal Mine, 2006(3): 22–24, 76.
- [26] 江宁, 邓代强, 姚中亮. 草楼铁矿充填接顶新工艺[J]. 矿业研究与开发, 2010, 30(3): 18–19, 84.
- JIANG Ning, DENG Daiqiang, YAO Zhongliang. New roof-contacted filling technics in Caolou iron mine[J]. Mining Research and Development, 2010, 30(3): 18–19, 84.
- [27] 魏江波, 王双明, 刘浪, 等. 基于多场信息融合的采动覆岩宏-细观损伤演化及“两带”发育位置判识[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(4): 128–140.
- WEI Jiangbo, WANG Shuangming, LIU Lang, et al. Multi-field information fusion-based analysis of the macroscopic and mesoscopic damage evolution and location identification of caving and water-conducting fracture zones for mining overburden[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(4): 128–140.
- [28] 贺强, 韩兴华. 不同采-留-充开采方法下地表沉陷控制研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(3): 32–36, 42.
- HE Qiang, HAN Xinghua. Study of mining subsidence control under different mining-filling methods[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(3): 32–36, 42.
- [29] 宋嘉栋, 王长军, 柳小胜. 充填外加剂发展前景的探讨[J]. 矿业研究与开发, 2016, 36(8): 12–15.
- SONG Jiadong, WANG Changjun, LIU Xiaosheng. Discussion on the development prospects of filling admixtures[J]. Mining Research and Development, 2016, 36(8): 12–15.
- [30] 于清军, 徐帅, 李元辉, 等. 泡沫膨胀充填材料膨胀性能研究[J]. 金属矿山, 2018(5): 1–6.
- YU Qingjun, XU Shuai, LI Yuanhui, et al. The expansion properties study of bubble expansion backfill material[J]. Metal Mine, 2018(5): 1–6.
- [31] 兰文涛, 吴爱祥, 王贻明. 凝水膨胀充填复合材料的配比优化与形成机制[J]. 复合材料学报, 2019, 36(6): 1536–1545.
- LAN Wentao, WU Aixiang, WANG Yiming. Formulation optimization and formation mechanism of condensate expansion and filling composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(6): 1536–1545.
- [32] 屈慧升, 索永录, 刘浪, 等. 改性煤气化渣基矿用充填材料制备与性能[J]. 煤炭学报, 2022, 47(5): 1958–1973.
- QU Huisheng, SUO Yonglu, LIU Lang, et al. Preparation and properties of modified coal gasification slag-based filling materials for mines[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 1958–1973.
- [33] 朱梦博, 刘浪, 王双明, 等. 短-长壁工作面充填无煤柱开采方法研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(6): 1116–1124.
- ZHU Mengbo, LIU Lang, WANG Shuangming, et al. Short-and long-walls backfilling pillarless coal mining method[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(6): 1116–1124.
- [34] 吕超, 吕文玉, 孙强, 等. “双碳”目标下煤矿地下空间响应式增强型储热充填系统理论与技术探索[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(4): 104–113.
- LYU Chao, LYU Wenyu, SUN Qiang, et al. Theoretical and technical concept of cemented backfill material for flexible enhanced thermal energy storage in coal underground space[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(4): 104–113.
- [35] 邱华富, 刘浪, 孙伟博, 等. 采空区充填体强度分布规律试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(10): 2584–2592.
- QIU Huaifu, LIU Lang, SUN Weibo, et al. Experimental study on strength distribution of backfill in goaf[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(10): 2584–2592.