分层废石胶结充填体的充填效果研究*

郭团结[1],黄尊英[1],刘艳[2],陈虎[2],江强强[2]

(1.华润电力(锡林郭勒)煤业有限公司, 内蒙古 锡林浩特市 026000;
2.中煤科工集团武汉设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430061)

摘要:针对废石胶结充填体在充填过程中常出现的分层现象,对分层充填体的充填效果开展了研究。对废石胶结充填体进行切片,分析了充填体不同分层的骨料分布特征。然后通过数值模拟,对比分析分层和不分层废石胶结充填体对采空区充填效果的影响。研究发现:充入分层废石胶结充填体的采空区顶板中部应力约为3.68 MPa,充入不分层废石胶结充填体的采空区顶板中部应力约为3.61 MPa,不分层充填体顶板沉降程度明显更小,可以对顶板提供更稳定的支护;不分层充填体侧帮受力均匀,位移较小,最大位移为3.76 mm;分层充填体侧帮位移上部小,向下逐渐增大,最大位移为4.46 mm;分层充填体上层细骨料分布较多,使其受压力易变形,而不分层充填体内部废石分布均匀,整体承载能力更强,形变相对较小。因此,在进行充填体配比时要尽量控制充填体的分层现象,为矿山安全生产提供重要保障。

关键词:废石胶结充填体;充填体分层;充填效果;FLAC3D

中图分类号:TD853.343 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)04-0023-08

Study on the Filling Effect of Layered Waste Rock Cemented Backfill

GUO Tuanjie[1], *HUANG Zunying*[1], *LIU Yan*[2], *CHEN Hu*[2], *JIANG Qiangqiang*[2]

(1.China Resources Power (Xilingol) Coal Industry Co., Ltd., Xilin hot, Inner Mongolia 026000, China;
2.Wuhan Design and Research Institute Co., Ltd., China Coal Science and Technology Group, Wuhan, Hebei 430061, China)

Abstract: The waste rock cemented backfill often exhibits stratification during the filling process. Therefore, a study was conducted on the filling effect of layered backfill. Slicing of waste rock cemented backfill was carried out, and the distribution characteristics of aggregates in different layers of the backfill were analyzed. Then, through numerical simulation, the influences of layered and non-layered waste rock cemented backfill on the filling effects of goaf were compared and analyzed. It is found that the stress in the middle of the roof of the goaf filled with layered waste rock cemented backfill and non-layered waste rock cemented backfill is about 3.68 MPa and 3.61 MPa, respectively. The settlement degree of the roof of the non-layered backfill is significantly smaller, which can provide more stable support for the roof. The lateral support of the non-layered backfill is uniformly stressed, with a small displacement and a maximum displacement of 3.76 mm. The lateral displacement of the layered backfill is small in the upper part and gradually increases downwards, with a maximum displacement of 4.46 mm. The distribution of fine aggregates in the upper layer of layered backfill makes it susceptible to pressure deformation, while the waste rocks distribution inside the non-layered backfill is uniform, with a stronger overall bearing capacity and relatively smaller deformation. Therefore, when carrying out the filling material proportion, it is important to control the backfill layering phenomenon as much as possible to provide important guarantees for mine safety production.

Key words: Waste rock cemented backfill, Backfill layering, Filling effect, FLAC3D

0 引言

矿产资源的开发与利用是我国经济发展的重要支撑,随着经济的快速增长和工业化进程的加快,对矿产资源的需求量不断增加[1-2]。然而,矿山开采活动带来的采空区安全问题日益突出,成为制约矿山

* **收稿日期**:2024-04-28
基金项目:国家自然科学青年基金项目(42007279);中煤科工集团武汉设计研究院有限公司自主研发项目(ZZYF202238)
作者简介:郭团结(1979—),男,山东济宁人,高级工程师,主要研究方向为矿山生产安全技术。E-mail:184184684@qq.com
通信作者:陈虎(1995—),男,湖北宜昌人,硕士,工程师,主要从事矿井充填方面的研究。E-mail:yanjiuhu@126.com

生产安全和生态环境保护的重大隐患[3-4]。采空区塌陷事故可造成严重的人员伤亡和经济损失,成为严重的地质灾害之一[5]。胶结充填采矿法通过将充填料浆注入采空区,为其提供一定的承载力,可有效预防采空区垮落[6-9]。矿山在生产过程中会产生大量掘进废石,在采用胶结充填采矿法时,为了降低矿山充填采矿成本,实现废弃物资源化利用,可以将废石作为骨料加入充填料浆进行充填[10-12]。然而废石胶结充填体由于各骨料之间密度差距大,充填体内部会出现一定程度的分层现象,充填体分层会导致充填体局部强度较低,整体性较差,易引发人工假顶脱层、片帮冒落等质量问题,严重影响采矿安全[13-14]。因此,研究废石胶结充填体的分层现象对充填效果的影响具有重要意义。

针对充填体分层现象,相关学者进行了大量研究。程爱平等[15]制作全尾砂胶结充填体,获取胶结充填体试样破坏荷载及超声波波速,探讨不同灰砂比的充填体试样超声波波速分层变化特征,结合颗粒粒级特征,揭示全尾砂胶结充填体分层机理。张小卫等[16]通过单轴抗压试验,发现分层充填体试样多表现为贯穿与半贯穿破坏,而且分层数对充填体破坏形态的影响最显著。海龙等[17]对 3 种分层类型的充填体试件进行单轴压缩试验,发现分层充填体的破坏形式主要表现为拉张破坏和共轭剪切破坏,喷砂处理能够改善力在分层面上的传递方式。YAO Nan 等[18]通过改变质量浓度,制备了不同离析分层程度的废石胶结充填体,并构建了离析分层程度与单轴抗压强度之间的关系。上述研究仅针对充填体分层后的性质,并没有对充填体分层后的充填效果进行研究。

为研究充填体分层后对采空区充填效果的影响,本文对废石胶结充填体的分层特征进行研究,分析充填体不同分层的骨料分布等性质,然后通过力学试验得到充填体不同分层的力学参数,最后通过 FLAC3D 数值模拟软件对废石胶结充填体分层与不分层的充填效果进行对比,从而得到充填体分层对采空区充填效果的影响,为废石胶结充填体的优化设计和矿山生产安全提供了参考。

1 废石胶结充填体分层特征研究

1.1 试验材料和试样制作

本次试验制备废石胶结充填体由 P·O 42.5 硅酸盐水泥、废石、速凝剂以及水按一定配比组成。废石为西一矿的巷道掘进岩碴,将废石破碎处理后制备成充填碎石。废石的基本力学参数见表 1。

表 1 废石的基本力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters of waste rock

单轴抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	孔隙率/%	吸水率/%
74.31	4.77	18.57	0.16	56.96	8.74	1.19	0.21

本次试验中试样大小为 100 mm×100 mm×100 mm,废石的最大粒径为 15 mm,方形试样的骨料级配指数为 0.5,最后根据 Talbol 级配理论确定各粒径对应的质量。废石颗粒级配曲线见图 1。

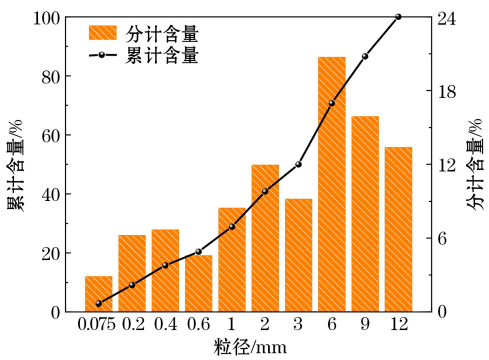


图 1 废石颗粒级配曲线

Fig.1 Particle size distribution curve of waste rock

将水泥、废石和速凝剂进行配比试验,制作边长为 100 mm 的方形试样。方形试样浇筑 8 h 后,从模具中取出,放置于温度为(25±2) ℃、相对湿度为 50%的恒温恒湿养护箱中养护 28 d。

1.2 试验过程及结果分析

将养护后的试样用岩石切割机进行纵向切割,得到废石胶结充填体的切面。将切面高清照片导入 PhotoShop 中,调整废石与浆体的颜色对比。将处理后的切面图片平均分为上、中、下三层,然后通过 Image-pro 转化为 2 值图像并计算出上、中、下三层中不同粒径骨料的数量及骨料所占面积。充填体切面图片处理过程见图 2。试样上、中、下三层的细骨料和粗骨料含量分布见图 3。

从图 3 中可以看出,废石骨料在自重应力作用下会产生离析沉降运动,试样下层骨料含量最大,上层骨料含量最小。试样上层和下层的细骨料含量大于粗骨料含量,而试样中层的细骨料含量小于粗骨

料含量。

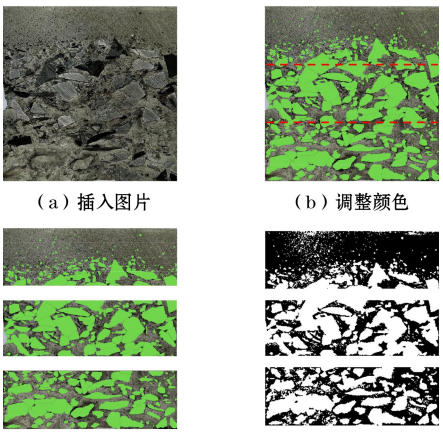


图 2　充填体切面图片的处理过程

Fig.2　Image processing of fill section

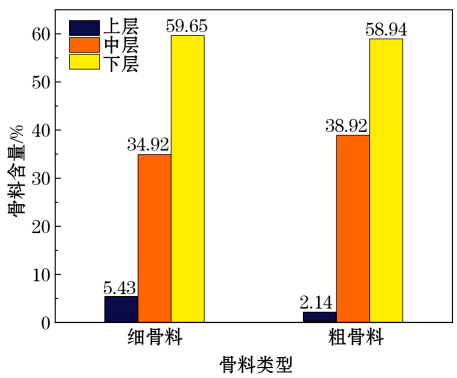


图 3　充填体试样上、中、下三层的骨料含量

Fig.3　The aggregate contents in upper, middle, and lower layers of filling samples

1.3　分层充填体力学参数测定

为获取不同分层程度废石胶结充填体的物理力学参数，在实验室内制备 300 mm×100 mm×300 mm 的废石胶结充填体试样。待试样养护 28 d 后，使用试样切割机将试样水平切成三层，然后将每层竖向切割成 3 份，共获得 9 个 100 mm×100 mm×100 mm(长×宽×高)的正方体试样。然后通过不同法向应力下的剪切试验，结合摩尔-库伦准则并运用最小二乘法得出不同分层程度的废石胶结充填体上、中、下三层的剪切强度与法向应力关系的拟合曲线，从而获取各层废石胶结充填体的力学参数。

图 4 为各层废石胶结充填体的法向应力与剪切强度的拟合曲线。通过力学试验获取的试样力学参数见表 2。

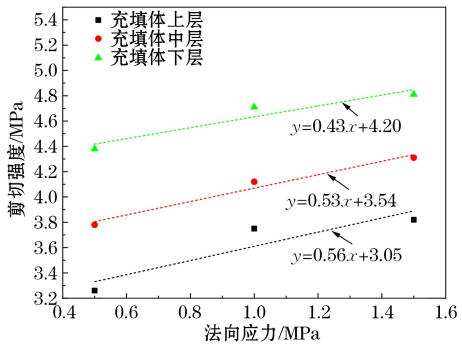


图 4　废石胶结充填体剪切强度与法向应力关系的拟合曲线

Fig.4　Fitting curves of the relationship between shear strength and normal stress waste rock cemented fill

表 2　试样力学参数

Table 2　Mechanical parameters of the specimen

材料名称	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg/m³)
围岩	8.72	54	6.28	0.21	3 000
充填体上层	3.05	45	0.88	0.25	1 014
充填体中层	3.28	45	1.23	0.27	1 428
充填体下层	3.37	46	1.62	0.26	1 729

2　废石胶结充填的数值模拟

为研究废石胶结充填体分层和不分层的采空区充填效果，采用 FLAC3D 数值模拟软件，对两种废石胶结充填体填充的采空区进行数值模拟。

2.1　模型建立

本次数值模拟以西一矿为背景，采空区埋深为 250 m 左右。为符合实际工况，使用 Rhino 犀牛三维建模工具建立长、宽、高分别为 60 m、9 m、60 m 的岩体模型。根据西一矿地下采场实际情况，在模型中心区域建宽度和高度均为 9 m 的采空区，然后对采空区进行充填，并将充填体划分为等高的三层，模拟充填体分层情况。采用 Griddle 插件网格划分功能，将模型划分成尺寸为 1 m 的单元体。最后将模型输出并导入到 FLAC3D 中进行数值模拟试验。数值模型见图 5。

对数值模型中围岩赋予 Burgers-Mohr 本构模型，对充填体赋予 Mohr-Coulomb 弹塑性模型，模拟废石胶结充填体的充填效果。在数值模型中建立监测点，监测围岩的应力和位移变化。监测点位于距离矿房顶板面和侧帮面 1 m 的围岩中，具体布置见图 6。

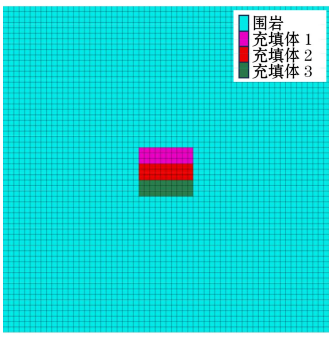


图 5 数值模型

Fig.5 Numerical model

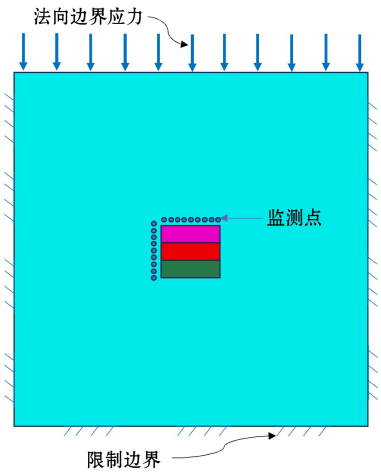


图 6 监测点位置

Fig.6 Locations of monitoring points

2.2 参数设定

围岩参数以西一矿地下 250 m 区域的岩石参数为准,具体参数见表 2。

根据上述速凝剂含量为 9%的充填体上、中、下分层特征设置充填体数值模拟模型,然后再以该分层充填体的中层特征设置另一个充填体模型作为对照组,即一个充填体模型上、中、下分层明显,而另一个充填体不分层。

根据表 2 中试样的力学参数对数值模型中各区域进行参数设置,在模型顶部施加 6.2 MPa 的法向应力模拟地应力,然后对模型边界进行限制,并对模型赋予自重应力,最后对模型进行运算。

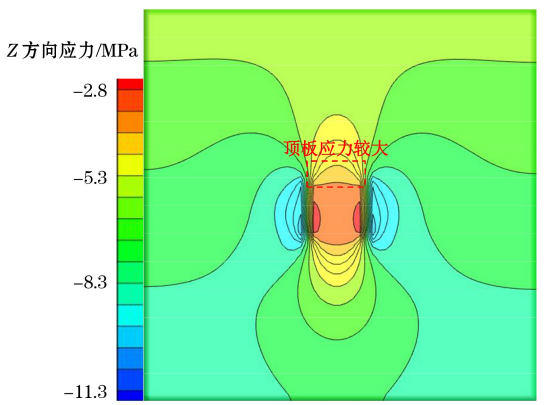
2.3 数值模拟结果与分析

2.3.1 顶板应力分布及位移特征

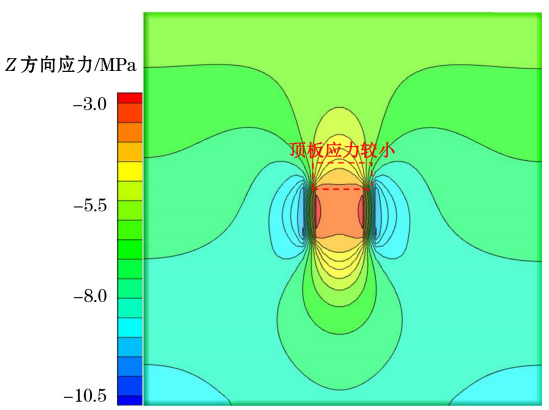
顶板安全是保障采空区安全的关键因素之一,所以分析顶板的应力和位移特征十分重要。图 7 和图 8 分别为分层充填体和不分层充填体 Z 方向上顶板应力分布和顶板位移分布。Z 方向为数值模型的竖直方向。

由图 7 和图 8 可知,充入分层废石胶结充填体的采空区顶板应力大于充入不分层废石胶结充填体的采空区顶板应力,由此可见,不分层充填体可以对顶板提供更稳定的支护。从顶板位移来看,采空区充入分层和不分层充填体后顶板位移均呈现中部位移大、两侧位移小的分布趋势。充入不分层充填体后,顶板最大沉降位移约为 5.5 mm;充入分层充填体后,顶板最大沉降位移约为 6.2 mm。与充入分层的废石胶结充填体相比,充入不分层的废石胶结充填体的矿房顶板沉降程度明显更小。同样说明不分层废石胶结充填体对顶板的支护效果优于分层废石胶结充填体。

在分层的废石胶结充填体中,充填体上层分布大量细骨料,这使得充填体上层的承载能力大幅度降低,受到压力后更容易变形。而不分层的废石胶结充填体内部废石分布比较均匀,各部位承载能力相当,整体承载能力更强,因此不分层的废石胶结充填体受到压力后发生的变形相对较小。



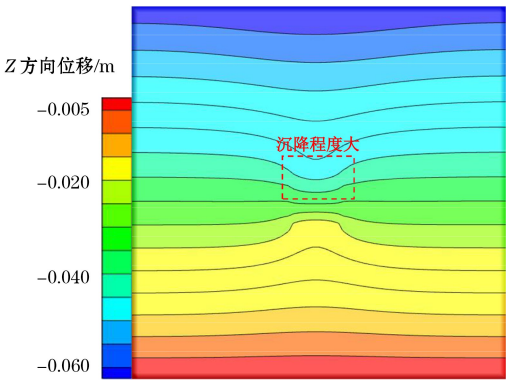
(a) 分层充填体



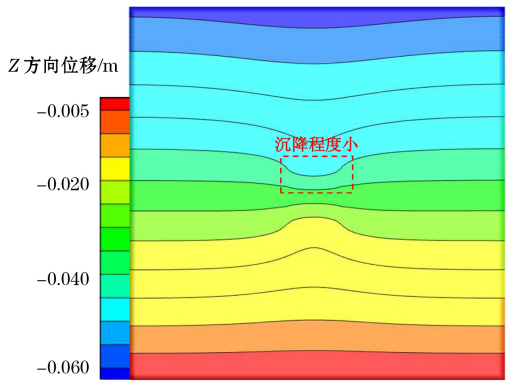
(b) 不分层充填体

图 7 顶板 Z 方向应力分布

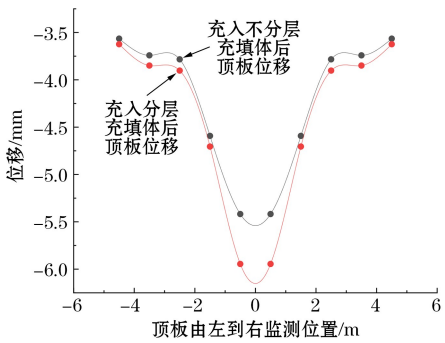
Fig.7 Distribution of Z-directional stress in the roof



（a）分层充填体



（b）不分层充填体



（c）顶板位移

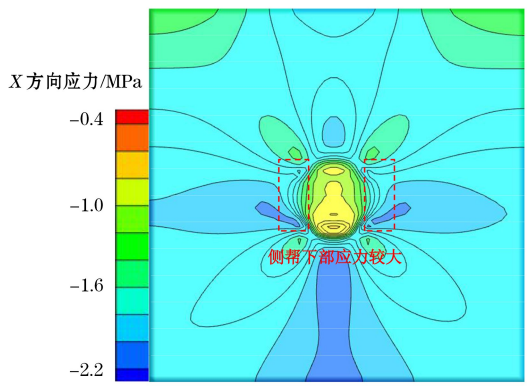
图 8　顶板 *Z* 方向位移分布

Fig.8　Distribution of *Z*-directional displacement in the roof

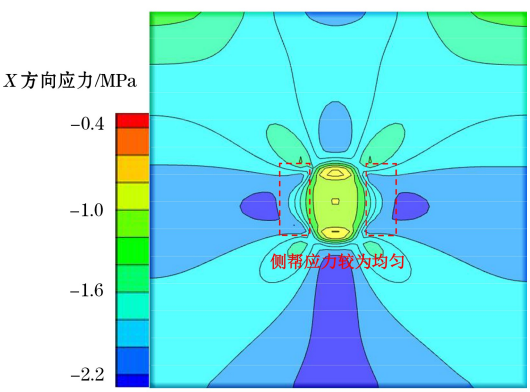
2.3.2　侧帮应力分布及位移特征

在地应力的作用下，采空区侧帮会出现应力集中现象。空区侧帮作为采空区的薄弱部分，同样是充填效果分析的重要研究对象。图 9 和图 10 分别为分层充填体和不分层充填体侧帮 *X* 方向应力分布位移分布云图。*X* 方向为数值模型的水平方向。

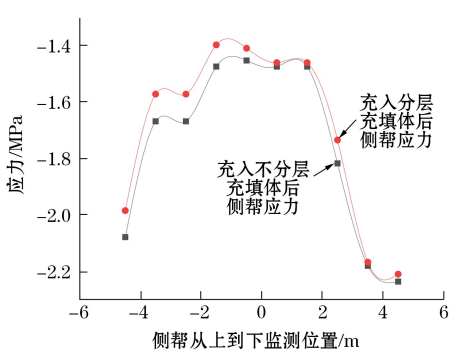
由图 9 和图 10 可见，不分层充填体的侧帮受力较为均匀，而分层充填体的侧帮位移上部小，并逐渐向下部增大。从整体来看，分层充填体的侧帮受力大于不分层充填体的侧帮受力。相应地，不分层充填体侧帮位移整体均匀，最大位移为 3.76 mm；分层充填体的侧帮位移较大，上部小，并向下部逐渐增大，最大位移为 4.46 mm。这是因为分层充填体中上层的粗骨料含量较低，主要成分为水泥砂浆和细骨料，内部结构松散，受到拉应力时容易发生变形，相应的侧帮位移较大；充填体中层和下层的粗骨料含量高，内部结构较为密实，受到应力不容易发生变形。不分层充填体在应力作用下不易发生变形，减少了空区侧帮的作用力，可为采空区提供更稳定的支护。



（a）分层充填体



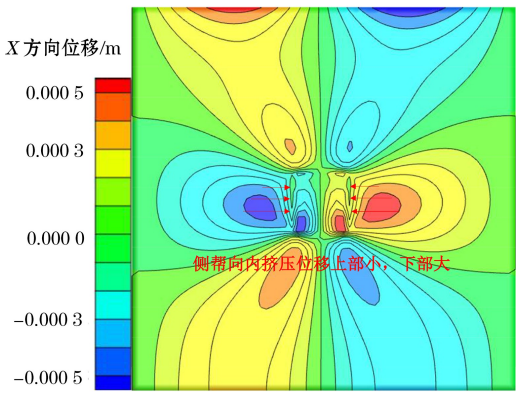
（b）不分层充填体



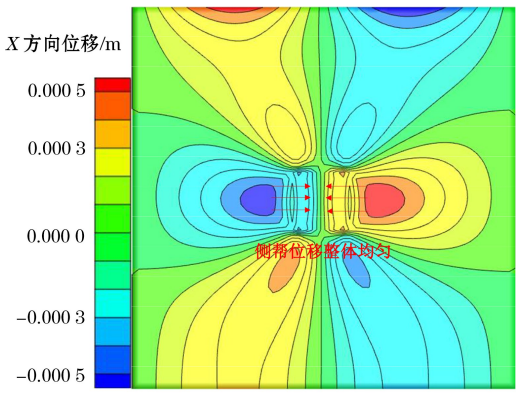
（c）侧帮应力

图 9　侧帮 *X* 方向应力分布

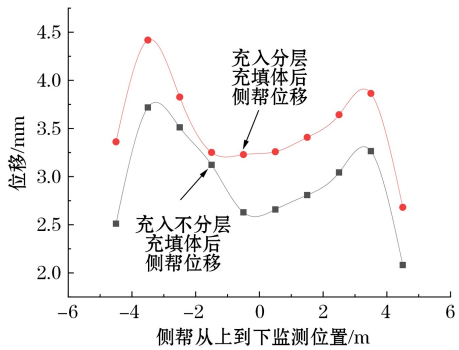
Fig.9　Distribution of *X*-directional stress in the sidewalls



（a）分层充填体



（b）不分层充填体



（c）侧帮位移

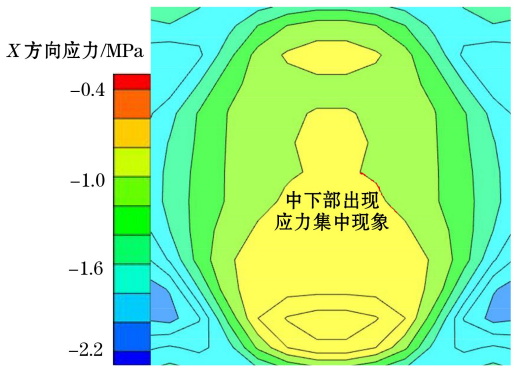
图 10 侧帮 *X* 方向位移分布

Fig.10 Distribution of *X*-directional displacement in the sidewalls

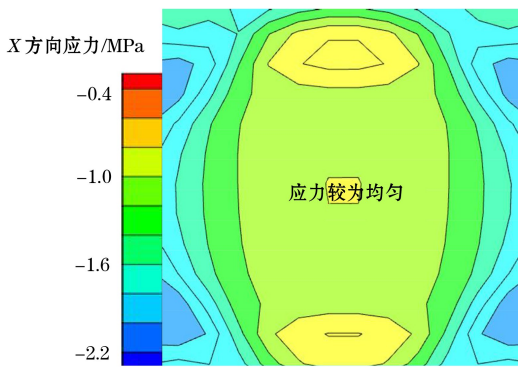
2.3.3 充填体内部应力场及位移场分布特征

图 11 为分层和不分层废石胶结充填体内部 *X* 方向的应力云图，图 12 为分层和不分层废石胶结充填体内部 *Z* 方向的应力云图。图 13 为分层和不分层废石胶结充填体内部 *X* 方向的位移云图。

由图 11、图 12 和图 13 可知，分层充填体内部受到的 *Z* 方向应力较不分层充填体更大，这说明不分层充填体对顶板有更好的支撑效果。充填体内部发生由两侧向中间的位移，分层充填体内部从上到下发生的位移逐渐增大。这是由于在地应力的作用下，越靠近充填体下部受到的地应力作用越大，而分层充填体的力学参数差异较大，其内部的应力分布及位移特征呈现较强的分层规律，结构较为松散，三层充填体的共同承载效果和稳定性较差。不分层充填体内部在 *X* 方向和 *Z* 方向受力均较为均匀，且在 *X* 方向应力作用下充填体整体的位移较小，且其内部发生的位移基本相似，这是因为不分层充填体整体结构较为稳定，可为采空区提供更优的充填效果。



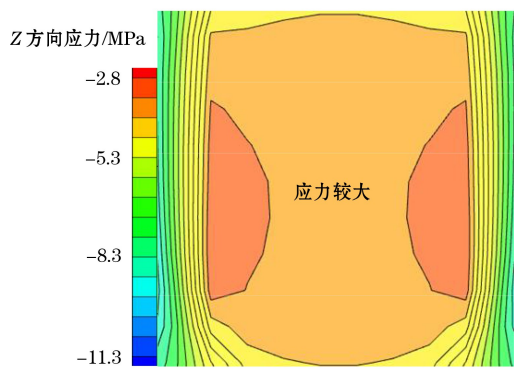
（a）分层充填体



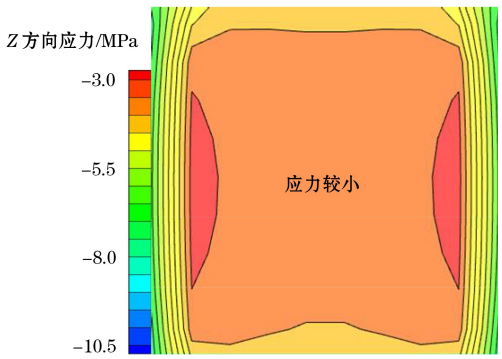
（b）不分层充填体

图 11 充填体内部 *X* 方向的应力云图

Fig.11 Stress contour maps in the *X*-direction inside the fill



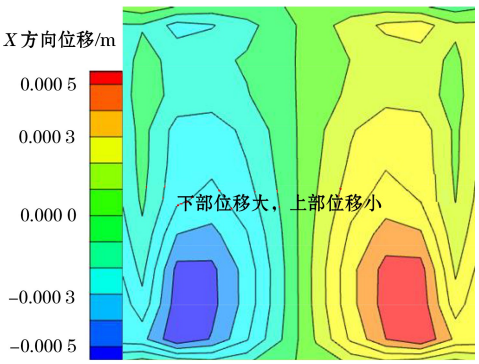
（a）分层充填体



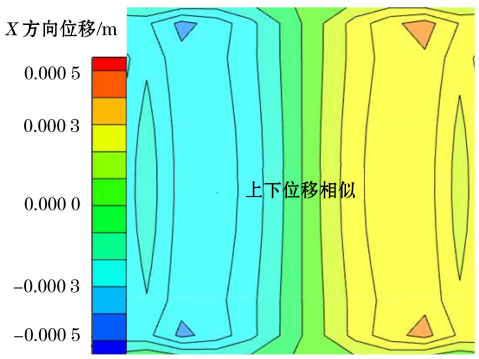
（b）不分层充填体

图 12　充填体内部 *Z* 方向的应力云图

Fig.12　Stress contour maps in the *Z*-direction inside the fill



（a）分层充填体



（b）不分层充填体

图 13　充填体内部 *X* 方向的位移云图

Fig.13　Displacement contour maps in the *X*-direction inside the fill

3　结论

本文通过试验分析和数值模拟研究废石胶结充填体的分层现象对采空区充填效果的影响，探讨了分层充填体和不分层充填体在矿山工程中的应用，分析了充填体分层对顶板、侧帮以及内部充填体的应力和位移特征的影响。通过对充填体的力学参数和充填效果进行综合分析，揭示了分层充填体与不分层充填体在矿山工程中的差异，得到了以下结论。

（1）充入分层废石胶结充填体的采空区顶板中部应力约为 3.68 MPa，充入不分层废石胶结充填体的采空区顶板中部应力约为 3.61 MPa；充入分层废石胶结充填体的采空区顶板两侧应力约为 7.18 MPa，充入不分层废石胶结充填体的采空区顶板两侧应力约为 7.35 MPa，不分层充填体表现出更均匀的支撑效果，提供更稳定的顶板支护。不分层废石胶结充填体的顶板沉降程度明显更小，显示出对顶板的支护效果优于分层充填体。在侧帮受力和位移方面，不分层充填体的侧帮受力较分层充填体更均匀，且位移更小。充填体分层时侧帮最大位移为 4.46 mm，充填体不分层时侧帮最大位移为 3.76 mm。

（2）分层充填体上层细骨料含量高，使其承载能力降低，易受压力变形；而不分层充填体内部废石分布均匀，整体承载能力更强，形变相对较小。不分层充填体对顶板支撑效果更好，*Z* 方向应力更小；分层充填体内部应力更大，位移逐层增大，稳定性较差。

（3）不分层废石胶结充填体在顶板支护效果、顶板沉降、侧帮受力和内部稳定性等方面较分层废石胶结充填体更好，能提供更稳定的支护效果，减小顶板沉降，降低侧帮受力，保障矿山作业安全。因此在进行充填体配比时应尽量控制其分层离析现象。

参考文献(References)：

[1]　朱斌，高通，涂艾林，等.下向进路倾斜分层胶结充填体稳定性研究[J].矿业研究与开发，2024，44(1)：1-12.
ZHU Bin，GAO Tong，TU Ailin，et al. Study on stability of inclined layered cemented backfill in downward drift[J]. Mining Research and Development，2024，44(1)：1-12.

[2]　李小强，汪小平，高子泷，等.下向分层充填采矿法充填体质量提升研究[J].世界有色金属，2023(6)：63-65.
LI Xiaoqiang，WANG Xiaoping，GAO Zilong，et al. Study on massimprovement of filling body by downward layered filling mining method[J]. World Nonferrous Metals，2023(6)：63-65.

[3]　SHANG Yuqi，ZHANG Lin，KONG Dezhong，et al. Overlying strata failure mechanism and gas migration law in close distance outburst coal seams：a case study[J]. Engineering Failure Analysis，2023(148)：107214.

[4]　谭丽龙，于德宁，陈成，等.阶段空场嗣后充填采矿法生产能力分析与研究[J].采矿技术，2023，23(5)：211-214.
TAN Lilong，YU Dening，CHEN Cheng，et al. Analysis and research on production capacity of stage void filling mining method after stope abandonment[J]. Mining Technology，2023，23(5)：211-214.

[5] 张金来,王建栋,韩斌,等.金川三矿区下向进路胶结充填采矿法采场结构参数优化[J].矿业研究与开发,2022,42(11):1-7.
ZHANG Jinlai, WANG Jiandong, HAN Bin, et al. Optimization on stope structure parameters of downward drift cemented filling mining in the third area of Jinchuan [J]. Mining Research and Development,2022,42(11):1-7.

[6] 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 method and their application[J].Gold,2019,40(10):24-29.

[7] 曹文钢.铜绿山矿分段空场嗣后充填采矿法工业试验研究[J].现代矿业,2023,39(12):90-93.
CAO Wengang. Industrial experiment on sublevel open-stope and subsequent filling mining method in Tonglushan Mine[J]. Modern Mining,2023,39(12):90-93.

[8] CAI Weiyi, CHANG Zechao, ZHANG Dongsheng, et al. Roof filling control technology and application to mine roadway damage in small pit goaf[J]. International Journal of Mining Science and Technology,2019,29(3):477-482.

[9] CHEN Guan, YE Yicheng, YAO Nan, et al. A critical review of prevention, treatment, reuse, and resource recovery from acid mine drainage[J]. Journal of Cleaner Production,2021,329:129666.

[10] 刘德峰,崔晨冉,郑彦涛,等.废石颗粒级配优化对充填材料性能的影响机制[J].有色金属(矿山部分),2024,76(5):93-102.
LIU Defeng, CUI Chenran, ZHENG Yantao, et al. Influence mechanism of optimization of waste stone particle gradation on the performance of filling materials [J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2024,76(5):93-102.

[11] 邓国梁,梁炳金,史文豪,等.废石胶结充填体配比优化及与围岩合理匹配研究[J].矿业研究与开发,2023,43(7):12-18.
DENG Guoliang, LIANG Binjin, SHI Wenhao, et al. Study on proportion optimization of waste rock cemented filling body and reasonable matching with surrounding rock[J]. Mining Research and Development,2023,43(7):12-18.

[12] 谭伟,高忠,黄明清,等.废石胶结充填相似模拟试验及其强度异质分布[J].矿业研究与开发,2023,43(6):45-50.
TAN Wei, GAO Zhong, HUANG Mingqing, et al. Similar simulation test of waste rock cemented filling and its intensity heterogeneous distribution[J].Mining Research and Development,2023,43(6):45-50.

[13] 鲍荣涛.分层尾砂胶结充填体力学特性及优化试验研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2023.
BAO Rongtao. Experimental study on the physical properties of layered tailing sand cemented fill and optimization [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2023.

[14] 樊锴,孙伟,李金鑫,等.分层特性对充填体强度及破坏模式的响应特征分析[J].有色金属(矿山部分),2023,75(3):90-96.
FAN Kai, SUN Wei, LI Jinxin, et al. Response characteristics of delamination characteristics to backfill strength and failure mode[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2023,75(3):90-96.

[15] 程爱平,董福松,戴顺意,等.全尾砂胶结充填体分层特性试验研究[J].金属矿山,2020(8):13-19.
CHENG Aiping, DONG Fusong, DAI Shunyi, et al. Experimental study on delamination characteristics of full tailings cemented backfill[J]. Metal Mine,2020(8):13-19.

[16] 张小卫,焦华喆,张文祥,等.分层因素作用下充填体力学特性变化规律及破坏特征分析[J].有色金属(矿山部分),2023,75(3):20-29.
ZHANG Xiaowei, JIAO Huazhe, ZHANG Wenxiang, et al. Analysis on the change law and failure characteristics of mechanical properties of filling under the action of stratification factors [J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2023,75(3):20-29.

[17] 海龙,鲍荣涛,谭世林,等.分层尾砂胶结充填体力学特性及优化试验研究[J].黄金科学技术,2023,31(5):763-772.
HAI Long, BAO Rongtao, TAN Shilin, et al. Experimental study on the mechanical properties of layered tailing sand cemented backfill and optimization[J]. Gold Science and Technology,2023,31(5):763-772.

[18] YAO Nan, LIU Yiding, WANG Qihu, et al. Experimental study on delamination and strength characteristics of cemented waste rock backfill[J]. Construction and Building Materials,2023(365):130058.