



综合机械化单元密实充填采煤充填体强度确定

刘鹏亮 王晓卿

引用本文：

刘鹏亮, 王晓卿. 综合机械化单元密实充填采煤充填体强度确定[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 373–382.
LIU Pengliang, WANG Xiaoqing. Method and verification of strength determination for dense filling coal mining filling body in comprehensive mechanized unit[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 373–382.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2025-0380>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

煤矿固体充填采煤技术发展回顾与展望

Review and prospect of development of coal mine solid filling technology
煤炭科学技术. 2020, 48(9): 27–38 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/773505ed-eb50-4f27-a626-fda242764a07>

矿山绿色充填开采发展现状及展望

Present situation and prospect of green filling mining in mines
煤炭科学技术. 2020, 48(9): 48–55 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d9c85a30-5f8d-4a8c-abef-e217e8224d49>

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>

深井充填体传热计算模型及其解析解

Calculation model and analytical solution of heat transfer in filling body of deep mines
煤炭科学技术. 2020, 48(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e66bfb2-a956-412a-8257-2340336e078a>

回收大巷煤柱工作面过空巷围岩破坏机理和控制技术

Failure mechanism and control technology of the surrounding rock of the coal pillar crossing abandoned roadway
煤炭科学技术. 2022, 50(4): 67–75 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/117dd122-3da8-4988-956a-c1b22ffb7c19>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

刘鹏亮,王晓卿.综合机械化单元密实充填采煤充填体强度确定[J].煤炭科学技术,2025,53(6):373-382.
LIU Pengliang, WANG Xiaoqing. Method and verification of strength determination for dense filling coal mining filling body in comprehensive mechanized unit[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 373-382.

综合机械化单元密实充填采煤充填体强度确定

刘鹏亮^{1,2},王晓卿^{1,2}

(1. 中煤科工开采研究院有限公司,北京 100013; 2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部,北京 100013)

摘要: 综合机械化单元密实充填采煤技术兼具岩层移动控制和固废处置的功能,且具有采充平行、工艺灵活、投资较少等优势,充填体强度合理设计关系承载效果和经济效益,但仍缺乏针对性科学依据。以3轮采充为例,理论分析得出综合机械化单元密实充填采煤工作面呈现“煤柱-充填体”分轮转移承载特征,可分为“煤柱全面承载”“充填体参与承载”“充填体全面承载”3个阶段,并根据朗肯土压力理论得出了支巷充填体三向受力状态侧压力计算公式;根据等价采高和地表水平变形计算公式推导建立了充填体弹性模量与地表水平变形最大值之间的关系;实验室试验得出单轴抗压强度1~5 MPa的9组膏体试块在三轴围压 $p=0, 0.5, 1.0, 1.5$ MPa 条件下的弹性模量,建立了充填体单轴抗压强度与三轴条件下弹性模量的关系。由此建立了基于地表水平变形指标的充填体单轴抗压强度计算式。以某矿浅埋深特厚煤层51106首采工作面为工程背景建立数值模型,研究表明前2轮采充后工作面“煤柱-充填体”上方垂直应力曲线呈陡峭的波浪状分布,地表下沉和水平变形轻微,第3轮采充后该应力曲线呈平缓的波浪状,地表下沉和水平变形明显增加,验证了“煤柱-充填体”分轮转移承载特征,同时,数值模拟和工程实践表明充填体单轴抗压强度确定方法是合理和准确的,可为综合机械化单元密实充填采煤工作面充填体强度设计提供参考。

关键词: 综合机械化单元密实充填采煤;充填体强度;分轮转移承载特征;等价采高;地表水平变形

中图分类号: TD713 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2025)06-0373-10

Method and verification of strength determination for dense filling coal mining filling body in comprehensive mechanized unit

LIU Pengliang^{1,2}, WANG Xiaoqing^{1,2}

(1. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Coal Mining and Design Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: The comprehensive mechanized unit dense filling coal mining technology combines the functions of rock movement control and solid waste disposal, and has advantages such as parallel mining and filling, flexible process, and low investment. The reasonable design of filling body strength is related to bearing effect and economic benefits, but there is still a lack of targeted scientific basis. Taking three rounds of mining and filling as an example, theoretical analysis shows that the comprehensive mechanized unit dense filling coal mining face presents a “coal pillar filling body” phased transfer bearing characteristic, which can be divided into three stages: “coal pillar comprehensive bearing”, “filling body participating in bearing”, and “filling body comprehensive bearing”. Based on the Rankine earth pressure theory, the calculation formula for the lateral pressure of the filling body in the three directions of the support roadway is obtained; The relationship between the elastic modulus of the filling material and the maximum horizontal deformation of the surface was derived and established based on the equivalent mining height and the calculation formula for surface horizontal deformation; The laboratory experiment

收稿日期:2025-03-21 策划编辑:朱恩光 责任编辑:李雅楠 DOI: 10.12438/cst.2025-0380

基金项目:中国煤炭科工集团公司科技创新创业资金专项资助项目(2022-2-ZD004, 2023-TD-ZD004);天地科技股份有限公司开采设计事业部科技创新基金面上基金资助项目(KCYJY-2022-MS-01)

作者简介:刘鹏亮(1980—),男,河北元氏人,研究员,博士。E-mail: 274966405@qq.com

通讯作者:王晓卿(1988—),男,河北高邑人,副研究员,博士。E-mail: 84028372@163.com

obtained the elastic modulus of 9 sets of paste specimens with uniaxial compressive strength of 1-5 MPa under triaxial confining pressures of 0, 0.5, 1.0, and 1.5 MPa, respectively. The relationship between the uniaxial compressive strength of the filling material and the elastic modulus under triaxial conditions was established. Thus, a calculation formula for the uniaxial compressive strength of the filling material based on the surface horizontal deformation index was established. A numerical model was established based on the first mining face of the 51106 shallow buried and thick coal seam in a certain mine. The study showed that the vertical stress curve above the “coal pillar filling body” of the working face showed a steep wave like distribution after the first two rounds of mining and filling, with slight surface subsidence and horizontal deformation. After the third round of mining and filling, the stress curve showed a gentle wave like shape, with a significant increase in surface subsidence and horizontal deformation. This verified the characteristic of the “coal pillar filling body” transfer bearing in stages. At the same time, numerical simulation and engineering practice showed that the method for determining the uniaxial compressive strength of the filling body is reasonable and accurate, which can provide reference for the strength design of the filling body of the comprehensive mechanized unit dense filling coal mining working face.

Key words: comprehensive mechanized unit dense filling coal mining; strength of filling material; transfer carrying characteristics in stages; equivalent mining height; surface horizontal deformation

0 引言

煤矿绿色充填开采是控制地表沉陷、解放压煤资源、处理固体废弃物和促进安全生产的重要技术手段,在推动煤炭行业绿色低碳发展的当下和未来,以矸石、粉煤灰等煤基固废为主体材料的井下充填已成为各大矿区重点技术推广方向^[1-3]。伴随着采煤方法的革新、充填材料和工艺的发展,充填开采技术在我国煤矿的应用和发展已经走过了60多年的历程,目前基本形成了以综采充填和综合机械化单元密实充填采煤(原“连采连充”)为主的2种工作面采充模式。综采充填工作面按照“采煤-充填”工序交替循环(一般2~3刀煤的距离)向前推进,充填时通过充填支架控制工作面后方一定范围顶板不冒落,采用辅助工艺措施将固体或膏体充填材料充入充填空间^[4];综合机械化单元密实充填采煤则是以连采工艺装备为基础,通过在工作面运输巷和回风巷之间布置支巷,掘巷出煤、逐巷充填,实现充填体对煤炭资源的分轮置换。2种方式相比较,综合机械化单元密实充填采煤具有采充平行作业、工作面设备投资小和工艺简单灵活等优势,在山东新汶、陕西榆林和内蒙古乌海等地多个煤矿进行了现场应用^[5-7],取得了较好的经济、环境和社会效益,具有广阔的应用前景。

采用充填开采的场景一般为建(构)筑物下或水体下压煤^[8-11],确保受护体的安全正常使用是重要目标和关注焦点,而选取合理的充填体参数是关键。抗压强度是力学参数最直观的表现,充填体强度偏低,可导致岩层移动控制效果不好;强度过高,将导致充填成本增大。邓雪杰等^[12]揭示了胶结充填体强度对充实率的影响作用机制,研究了多场景胶结充填目标充实率计算原理,形成了煤矿采空区充实率

控制导向的胶结充填体强度需求动态设计方法;刘光生等^[13]借鉴土力学应力拱理论,分析了金属矿两步骤采充时序过程中的相邻采场充填体空间接触关系,获取了最优的一步骤采场胶结充填体强度需求三维解析模型与方法。显然,充填体力学强度的确定应结合具体的采充状态和力学环境进行分析,多位学者针对综合机械化单元密实充填采煤技术特点研究了充填体承载与地表移动变形特征^[14-16]。王炼康^[17]分析了承载充填体发生渐进破坏与突变失稳的应变能转化特征,构建了承载充填体破坏失稳的尖点突变数学模型,得到了承载充填体突变失稳的临界蠕变变形量判据;李永亮等^[6]研究了综合机械化单元密实充填采煤过程采场围岩应力动态迁移规律,基于影响充填采场围岩变形的“三量”特征,提出了充填采场覆岩移动“三度”控制原则;赵兵朝等^[18]开展了侧限条件下的充填体-煤柱耦合承载压缩试验,研究不同充填体强度及充实率条件下煤柱的力学特性及其相互作用机制;马立强等^[19]采用实验室物理模拟和现场工业性试验等方法,研究壁式连采连充“采充并行”保水采煤条件下隔水层与地表变形特征;侯晨^[20]开展了金属矿不同条件下矿柱-充填体协作支撑单元的极限承载力研究。上述研究丰富和发展了综合机械化单元密实充填采煤岩层移动控制理论,但均未从岩层移动控制需求给出充填体强度确定方法。

笔者分析支巷采充过程中煤柱和充填体发挥的承载作用和应力状态,采用朗肯土压力理论给出充填体侧压力计算公式;根据等价采高和地表水平变形计算公式推导建立充填体弹性模量与地表水平变形最大值之间的关系;建立充填体单轴抗压强度与不同围压条件下弹性模量的关系式,由此得出基于地表水平变形的充填体单轴抗压强度计算式。以某

矿 51106 首采面为背景建立数值模拟模型进行分析验证, 以验证工程应用的预期效果。研究成果可为综合机械化单元密实充填采煤工作面充填体强度设计提供参考, 并进一步丰富充填开采岩层移动控制理论。

1 综合机械化单元密实充填采煤工艺及力学分析

1.1 工艺特点

综合机械化单元密实充填采煤系统由井下工作面和充填系统两部分构成, 如图 1 所示。工作面采

用单翼或双翼支巷作业, 在形成负压通风系统前提下, 以掘进支巷方式出煤, 对掘出的支巷及时充填。

1) 工作面自运输巷向回风巷划分为多条支巷, 支巷长度和宽度一般分别为 100~200 和 4~6 m, 采用掘进机、连续采煤机或掘锚一体机回采并支护。每个支巷回采完毕后随即在顶板吊挂充填管道, 两端支设密闭挡墙形成充填空间, 尽快实施充填作业;

2) 充填材料采用以矸石、粉煤灰、胶结料和矿井水配制的浓度 80% 左右的膏体, 充填系统位于地面或井下, 制备的膏体料浆通过管道输送至工作面支巷, 28 d 左右可凝固成为力学性能参数稳定的固结体;

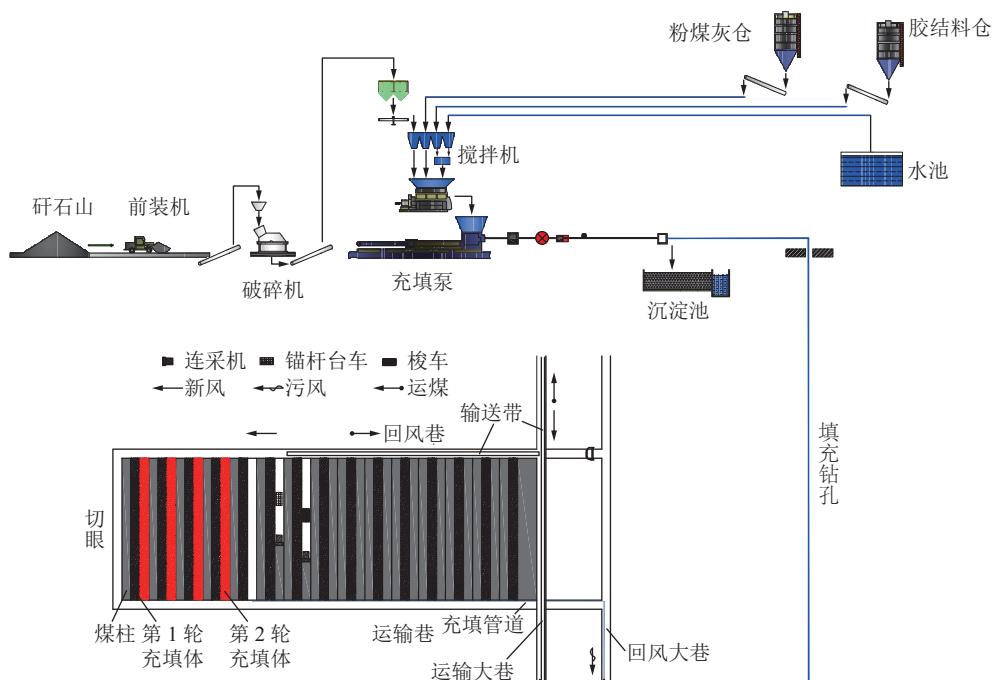


图 1 综合机械化单元密实充填采煤系统工艺示意

Fig.1 Process diagram of comprehensive mechanized unit dense filling coal mining system

3) 为了既满足支巷内充填体凝固时间, 又保证掘巷出煤作业的连续进行, 需统筹工作面支巷掘进和充填作业的空间、时间协调, 一般将工作面支巷分为 2~4 轮间隔采充, 由此实现: ① 每一轮采充的相邻支巷之间均间隔 1~3 个支巷宽度的煤柱(或充填体柱), 可为本支巷充填提供有利的围岩条件; ② 每一轮支巷的采充总时间安排不应低于 28 d, 以确保进行下一轮支巷掘进时前一轮充填体强度达标。

1.2 “煤柱-充填体”分轮转移承载特征

从综合机械化单元密实充填采煤过程可以看出, 工作面为巷道式间隔采充, 呈现“煤柱-充填体”分轮转移承载特征。承载过程可分为“煤柱全面承载”“充填体参与承载”“充填体全面承载”3 个阶段, 以三轮采充为例, 如图 2 所示。

1) 煤柱全面承载。第 1 轮支巷的掘采是在两侧

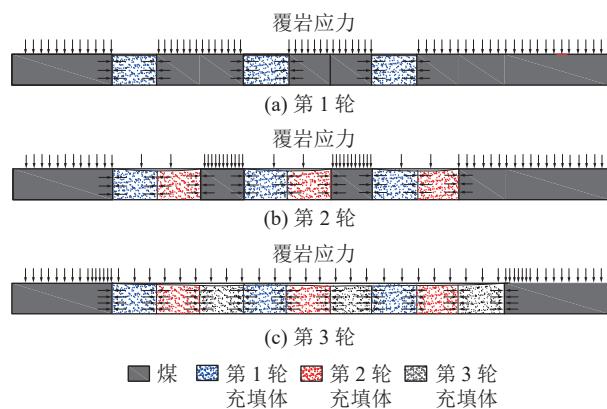


图 2 三轮采充煤柱及充填体承载应力状态示意

Fig.2 Schematic diagram of the bearing stress state of coal pillars and filling bodies after three rounds of mining and filling

均为支巷2倍宽度煤柱的条件下进行,由于支巷宽度小且顶板两帮进行锚杆索支护,在能够及时充填的前提下,第1轮顶板几乎无下沉。充填体充入支巷后,基本不发挥承载顶板作用,但对两侧煤体提供侧压力。

2)充填体参与承载。当第1轮支巷内充填体凝固且力学性能参数达到设计要求后,第2轮支巷开始掘采,此时支巷一侧为第1轮充填体,另一侧为宽度缩小为与一条支巷相同的煤柱,即掘采形成的范围成为2倍支巷宽度,而煤柱支撑顶板的面积减小50%。结合顶板岩性、支护强度等因素,掘采范围顶板出现不同程度的下沉,若充填体接顶程度好,可阻止顶板进一步下沉,承担部分覆岩荷载;若充填率过低,未与顶板接触,则不发挥承载作用。

3)充填体全面承载当第2轮支巷内充填体力学性能参数稳定且达标后,第3轮支巷即最后的煤柱开始掘采,支巷两侧分别为第1轮和第2轮的充填体,当本轮第1条支巷掘通后,掘采宽度由2条支巷宽度增加为5条支巷宽度,尺寸从8~12m增至20~30m,此时顶板下沉迅速增加,充填体与之接触并承载。当第2,3,...,n条支巷依次掘采后,顶板下沉范围进一步扩大,覆岩载荷最终全部作用在充填体上。当第3轮支巷全部采充完成后,工作面逐渐达到新的应力平衡状态。

1.3 充填体受力分析

如图2所示,箭头的密疏示意应力大小。结合上述“煤柱-充填体”分轮转移承载过程分析,充填体应力可分为2个状态:前期未承载覆岩时,竖直方向仅自身重力,水平方向为自重作用下对两侧煤柱(或充填体)产生的侧压力;后期承载覆岩时,竖直方向为自身重力与承担的覆岩压力之和,水平方向为竖直压力作用下对两侧煤柱(或充填体)的侧压力,同样,充填体也受到相同大小侧压力的作用。这说明充填体进入支巷后自始至终处于三向受力状态,而力的大小随两侧采充状态的变化而变化。充填体竖直应力是由自身重力逐渐增至自身重力与覆岩压力之和的过程,而充填体侧压力即围压变化影响其应力环境,进而影响充填体的弹性模量和承载能力,对岩层移动控制效果具有重要作用。但尚未检索到综合机械化单元密实充填采煤过程充填体侧压力的计算方法。

土木工程中挡土墙能够承受墙后土体、地下水、地面建筑物及其他形式的荷载对墙背产生的侧向压力,在建筑行业有着广泛的应用^[21]。充填体充入支

巷后,两侧的煤柱(或充填体)相当于挡土墙,因此侧压力的求取可参照朗肯土压力理论。充填体的充入未导致两侧煤柱(或充填体)发生明显的移动,因此按照静止侧压力计算。即

$$\sigma_0 = K_0(\sigma + \sigma') = K_0(\gamma h + \gamma' h') \quad (1)$$

式中: σ_0 为充填体侧压力, MPa; K_0 为侧向压力系数, $K_0=1-\sin\varphi$; φ 为充填体内摩擦角, ($^\circ$); σ' 、 σ 为充填体及覆岩竖直应力, MPa; γ 为上覆岩层容重, MN/m³; h 为煤层埋深, m; γ' 为充填体容重, MN/m³; h' 为充填体高度, m。

从式(1)可以看出,充填体侧压力大小与自身力学性能和所受的竖直应力有关:随内摩擦角的增加而减小,随竖直应力增加而增加。实验室测试结果表明^[4,13,17,18,22-23],充填体内摩擦角随配比变化而变化,但一般在30°左右,因此侧向应力系数 $K_0=0.5$,竖向应力则以覆岩应力为主,则最终各支巷充填体之间的侧压力 $\sigma_0=0.5\gamma h$ 。

2 基于地表水平变形的充填体强度确定

2.1 等价采高概念与计算

为分析充填开采工作面矿山压力及地表移动变形,张吉雄等^[19]提出了等价采高理论,基本思路是,实施充填开采相当于降低实际采出的煤层厚度,等价采高 M_d 为工作面采高 M 减去采空区充填体压实后的高度,包括由于客观条件和工艺原因未充填高度 β 和充填体的压缩量 λ 。其中,未充填高度 β 包括充填前顶底板移进量 δ 和欠接顶量 ζ 。由此,等价采高 M_d 可表示为

$$M_d = \beta + \lambda = \delta + \zeta + \lambda \quad (2)$$

式中:压缩量 λ 为充填体高度($M-\delta-\zeta$)与压缩率(应变) ε 之积;而压缩率(应变) ε 为充填体覆岩竖直应力 σ 与弹性模量 E 的比值,因此,将式(2)转换为

$$M_d = \delta + \zeta + (M - \delta - \zeta)\varepsilon = \delta + \zeta + (M - \delta - \zeta)\frac{\gamma h}{E} \quad (3)$$

式(3)建立了等价采高与覆岩竖直应力、充填体弹性模量的关系。若建立充填体单轴抗压强度与岩层移动控制指标的关系,则需首先结合地质采矿条件根据岩层移动控制指标确定等价采高及充填体弹性模量,然后分析充填体在工作面的侧压力大小,再通过实验得出不同单轴抗压强度充填体在不同围压下的弹性模量,最后根据对充填体相应围压下的弹性模量要求选取合理的充填体单轴抗压强度。

2.2 基于地表水平变形的充填体单轴抗压强度确定

地表移动变形指标包括下沉、倾斜、曲率和水平

变形等, 大多数建(构)筑物对地表水平变形最为敏感, 因此将其作为岩层移动控制的代表性指标。地表最大下沉值、主要影响半径和地表水平变形最大值计算式分别为

$$W_{cm} = qM \cos \alpha \quad (4)$$

$$r = \frac{h}{\tan \beta} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{cm} = \pm 1.52b \frac{W_{cm}}{r} \quad (6)$$

式中: W_{cm} 为地表最大下沉值, mm; q 为地表下沉系数; α 为煤层倾角, ($^{\circ}$); r 为主要影响半径, m; $\tan \beta$ 为主要影响角正切; ε_{cm} 为地表水平变形最大值, mm/m; b 为水平移动系数。

将式(5)、式(6)代入式(4), 将等价采高 M_d 替换 M , 得到 M_d 与地表水平变形最大值 ε_{cm} 的关系

$$M_d = \frac{h\varepsilon_{cm}}{1.52bq\tan \beta} \quad (7)$$

将式(7)代入式(3), 并设充填体弹性模量 E 与单轴抗压强度 σ_c 的关系式为 $E=f(\sigma_c)$, 得到

$$E = f(\sigma_c) = \frac{(M - \delta - \xi)\gamma h}{\frac{h\varepsilon_{cm}}{1.52bq\tan \beta} - \delta + \xi} \quad (8)$$

从式(8)可以看出, 若得出不同围压条件下充填体弹性模量与单轴抗压强度的关系式 $E=f(\sigma_c)$, 并将其余参数代入式(8), 可通过地表水平变形最大值求

取充填体单轴抗压强度。

3 围压条件下充填体力学性能

3.1 试验材料与测试方法

试验膏体充填材料由矸石、粉煤灰、水泥和水配合而成。矸石、粉煤灰分别取自国能榆林郭家湾煤矿和神东电力有限责任公司郭家湾电厂, 矸石粒径均小于 10 mm 并主要集中在 5 mm 以下, 其堆积密度和真密度分别为 1.48 和 2.57 g/cm³, 孔隙率为 0.43, 主要矿物成分为高岭石和石英等; 粉煤灰粒径主要集中在 10~100 μm, 含水率为 2.75%, 堆积密度为 0.57 g/cm³, 主要矿物成分为石英和方解石等。水泥为 PO42.5R 普通硅酸盐水泥。

通过调整原材料配比, 配制龄期 28 d 单轴抗压强度 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5 和 5.0 MPa 的充填体 9 组, 配比见表 1, 将充填体试块加工成直径 50 mm、高 100 mm 的圆柱形试块待用。压缩试验在 TAW-2000 电液伺服试验机进行, 如图 3 所示。该试验机具有轴压、围压、孔隙水压和温度独立闭环控制系统。主机采用美国 MTS 三轴主机结构, 刚度大于 10 GN/m, 轴压 2 000 kN, 围压最大可达 100 MPa, 孔隙水压 60 MPa, 温度 -50~200 °C, 最小采样时间间隔为 1 ms, 采用微机控制, 实时显示试验全过程。

表 1 表 1 压缩试验所用膏体充填材料配比及试验结果

Table 1 Mix ratio and test results of paste filling materials used in compression testing

配比 方案 编号	质量分数/%				抗压强度/MPa				弹性模量/MPa			
	料浆	矸石	粉煤灰	水泥	单轴 压缩	三轴压缩 (p=0.5MPa)	三轴压缩 (p=1.0MPa)	三轴压缩 (p=1.5MPa)	单轴 压缩	三轴压缩 (p=0.5MPa)	三轴压缩 (p=1.0MPa)	三轴压缩 (p=1.5MPa)
I	76	54	21	1	1.0	1.6	2.7	4.2	25	66	112	164
II	76	54	20	2	1.5	2.2	3.3	4.8	42	86	135	194
III	77	55	18	4	2.0	2.7	3.7	5.1	60	109	159	223
IV	77	55	16	6	2.5	3.0	4.1	5.7	80	131	189	253
V	77	55	14	8	3.0	3.7	4.7	6.3	105	155	218	286
VI	78	55	12	11	3.5	4.1	5.1	6.7	130	185	248	311
VII	78	55	10	13	4.0	4.6	5.7	7.2	150	214	279	339
VIII	78	55	8	15	4.5	5.0	6.2	7.7	180	244	299	361
IX	78	55	6	17	5.0	5.5	6.6	8.3	210	268	321	383

单轴压缩试验依据国家标准进行, 三轴压缩试验步骤^[22]如下:

1) 采用应力控制的方式按静水压力条件以 0.005 MPa/s 的速率施加 $\sigma_1=\sigma_3$ 至初始围压 3 种不同

预定值(围压 $p=0.5, 1.0, 1.5$ MPa);

2) 待围压加载至预定值后, 保持围压 p 恒定, 以 0.05 mm/min 的位移速率在轴向方向上施加应力(σ_1), 直至膏体充填体试件发生破坏。

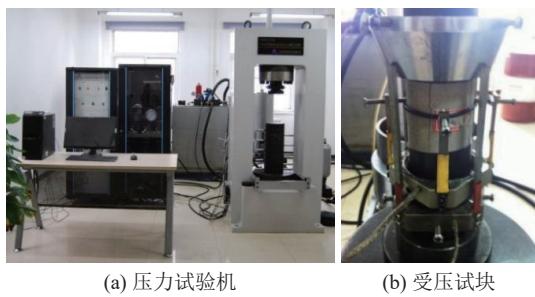


图3 TAW-2000 岩石三轴试验机及试块压缩

Fig.3 TAW-2000 Rock Triaxial Testing Machine and test blocks compression

根据试验得到的应力应变曲线,求取割线弹性模量^[24],得出的三轴抗压强度及弹性模量如表1所示。

3.2 围压条件下充填体力学性能

根据得到的试验数据,绘制充填体单轴抗压强度与单轴、三轴弹性模量关系曲线(图4),采用乘幂相关的统计形式对所得结果进行分析,得出了充填体单轴抗压强度与单轴、三轴状态弹性模量之间的乘幂相关关系(决定系数 R^2 均在0.99以上),关系式如下:

$$E=24.513\sigma_c^{1.3210}, R^2=0.9990, p=0 \quad (9)$$

$$E=61.189\sigma_c^{0.8913}, R^2=0.9926, p=0.5 \text{ MPa} \quad (10)$$

$$E=104.79\sigma_c^{0.6684}, R^2=0.9932, p=1.0 \text{ MPa} \quad (11)$$

$$E=157.93\sigma_c^{0.5423}, R^2=0.9963, p=1.5 \text{ MPa} \quad (12)$$

可以看出,相同围压条件下,充填体弹性模量随单轴抗压强度的增大而增大,说明单轴抗压强度与弹性模量关系密切,且前者是后者的直接决定因素;不同围压条件下,充填体弹性模量随围压的增加而增大,说明围压对充填体承载和抗压缩性能具有重要影响。

将式(9)—式(12)代入式(8)并进行转换,得到不同围压充填体单轴抗压强度的计算式

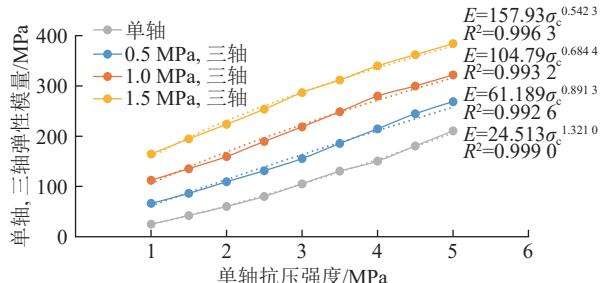


图4 充填体单轴抗压强度与单轴/三轴弹性模量的关系
Fig.4 Relationship curves between uniaxial compressive strength of filling material and elastic modulus

$$\sigma_c = \begin{cases} 1.321 & \frac{(M-\delta-\xi)\gamma h}{24.513\left(\frac{h\varepsilon_{cm}}{1520bqtan\beta}-\delta-\xi\right)}, p=0 \\ & \end{cases} \quad (13)$$

$$\sigma_c = \begin{cases} 0.8913 & \frac{(M-\delta-\xi)\gamma h}{61.189\left(\frac{h\varepsilon_{cm}}{1520bqtan\beta}-\delta-\xi\right)}, p=0.5 \text{ MPa} \\ & \end{cases} \quad (14)$$

$$\sigma_c = \begin{cases} 0.6684 & \frac{(M-\delta-\xi)\gamma h}{104.79\left(\frac{h\varepsilon_{cm}}{1520bqtan\beta}-\delta-\xi\right)}, p=1.0 \text{ MPa} \\ & \end{cases} \quad (15)$$

$$\sigma_c = \begin{cases} 0.5423 & \frac{(M-\delta-\xi)\gamma h}{157.93\left(\frac{h\varepsilon_{cm}}{1520bqtan\beta}-\delta-\xi\right)}, p=1.5 \text{ MPa} \\ & \end{cases} \quad (16)$$

4 工程验证

4.1 工程背景

榆林某矿综合机械化单元密实充填采煤区位于井田西南部一盘区内,面积约为3.0 km²,主采5#煤,煤厚5.65~8.25 m,埋深35~89 m,属典型的浅埋深、特厚煤层条件。区域内煤层倾角 $\alpha=1^\circ$,煤层结构简单,水文地质条件中等。

51106首采面煤层采高 $M=6.0$ m,上覆岩层容重 $\gamma=0.025$ MPa/m,埋深 $h=38.6$ m,按照图5所示进行设置:两翼交替分3轮采充,一进两回,运输巷宽8 m,回风巷宽5.4 m,采、运主要设备采用智能掘锚机+连续运输系统,支巷长度100 m,支巷宽度6 m,支巷与运输巷夹角45°。

地面充填站制备的膏体料浆,容重 $\gamma=0.018$ MPa/m,通过管道沿回风大巷、工作面回风巷进入支巷进行充填。现场实测,充填前支巷顶板下沉量 $\delta=0.05$ m,充填后欠接顶量 $\zeta=0.065$ m,最终形成的充填体高度 $h=5.89$ m。

51106首采面对应地表主要有煤厂、活性炭厂、搅拌站及其他非集聚性房屋等,根据建(构)筑物的类型和结构,确定水平变形控制指标^[12]: $\varepsilon_{cm}=2.0$ mm/m。根据矿方在其他工作面开采获得的观测数据得到,水平移动系数 $b=0.32$,下沉系数 $q=0.65$,主要影响角正切 $\tan\beta=1.9$ 。

4.2 充填体强度确定

将 $h=38.6$ m、 $\varepsilon_{cm}=2.0$ mm/m、 $b=0.32$ 、 $q=0.65$ 和 $\tan\beta=1.9$ 代入式(7),得到51106工作面最大等价采高 $M_d=129$ mm。将 $q=0.65$ 、 $M_d=129$ mm和 $\alpha=1^\circ$

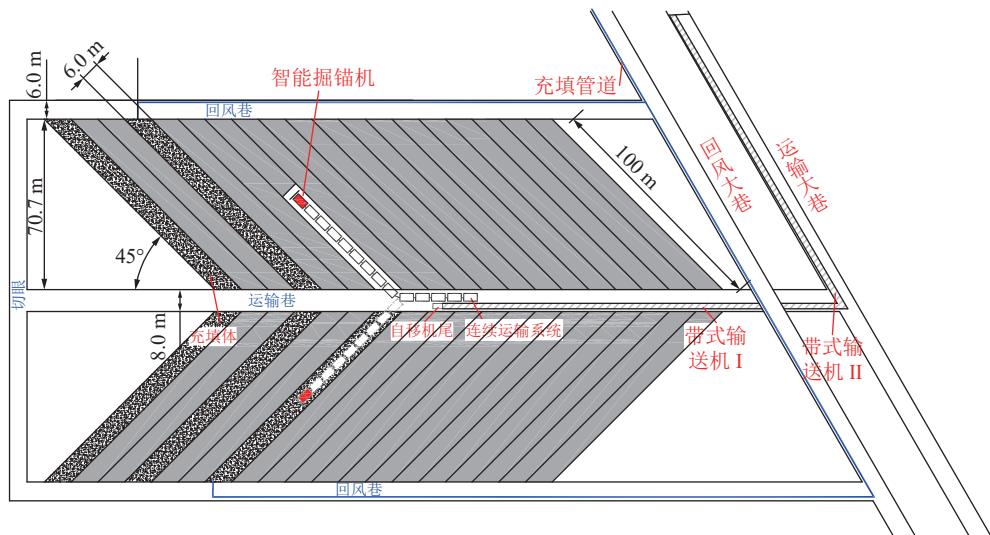


图 5 综合机械化单元密实充填采煤工作面布置
Fig.5 Layout of continuous mining and filling working face

代入式(4), 得到地表最大下沉 $W_{cm}=84 \text{ mm}$ 。

将 $h=38.6 \text{ m}$ 、 $\gamma=0.025 \text{ MPa/m}$ 、 $h'=5.89 \text{ m}$ 、 $\gamma'=0.018 \text{ MPa/m}$ 和 $\varphi=30^\circ$ 代入式(1), 得到充填体侧压 $\sigma_0=0.5 \text{ MPa}$ 。因此, 将参数代入围压 0.5 MPa 对应的式(14), 得出 $\sigma_c=3.9 \text{ MPa}$, 即 51106 工作面充填体 28 d 单轴抗压强度要求不低于 3.9 MPa 。

4.3 数值模拟分析

根据 51106 首采面地质采矿条件建立 FLAC^{3D} 6.00 数值模拟模型, 如图 6 所示。工作面单翼支巷数量为 15 个, 两翼合计 30 个, 开采范围为 160.2 m (长) $\times 127.3 \text{ m}$ (宽), 根据与煤层埋深(38.6 m)的关系, 达到充分采动。自下至上分别为中粒砂岩(4.4 m)、粉砂岩(3.6 m)、5-1 煤(6.0 m)、中粒砂岩(2.5 m)、细粒砂岩(7.5 m)、中粒砂岩(15.0 m)、粉砂岩(1.6 m)、黄土(6.0 m), 直至地表。模型尺寸为 $290 \text{ m} \times 200 \text{ m} \times 45 \text{ m}$, 采用三角形网格划分, 在煤层处加密, 网格数量共计 202 万。模型侧面及底面固定相应方向位移, 坚直应力为自重应力, 水平应力按照侧压系数为 1.2 施加。使用莫尔库伦本构模型, 采用 Rock-Lab 软件通过岩块参数折减得到各岩层的力学参数(GSI 取 50), 充填体采用 $\sigma_c=3.9 \text{ MPa}$ 对应的力学参数, 见表 2。

按照上述方案进行模拟, 获得 51106 首采面三轮采充过程覆岩应力和位移云图。取工作面一翼、平行于运输巷和回风巷且位于两者中间位置的剖面 A-A(图 6b), 各轮采充后 A-A 剖面上的坚直应力和坚直位移云图分别如图 7 和图 8 所示, 根据云图绘制的煤层底板位置各轮采充后坚直应力曲线和地表下沉、水平变形曲线分别如图 9 和图 10 所示。

根据各应力、位移云图及曲线可以看出:

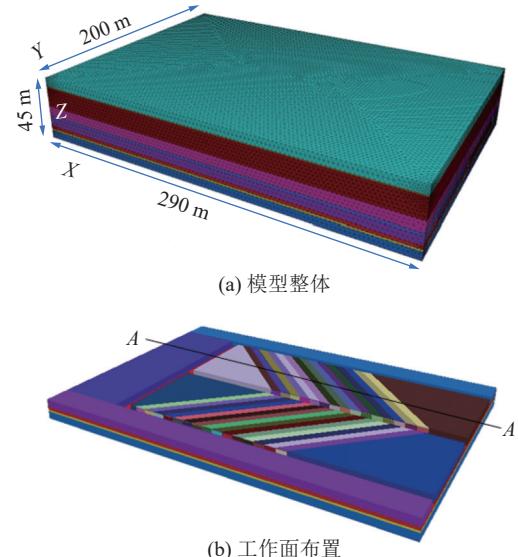


图 6 51106 工作面数值模型
Fig.6 Numerical model of 51106 working face

表 2 煤岩力学参数

Table 2 Coal rock mechanical parameters

煤岩层	弹性模量/ GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	抗拉强度/ MPa	密度/ (kg · m ⁻³)
粉砂岩	5.434	0.25	1.082	35	0.025	2 600
中砂岩	3.861	0.25	1.035	35	0.024	2 600
细砂岩	7.550	0.20	1.473	35	0.034	2 650
煤	1.437	0.25	0.863	33	0.028	1 400
充填体	0.148	0.30	0.835	30	0.019	1 800
黄土	0.500	0.40	0.127	30	0.010	1 000

1) 第 1 轮支巷采充后, 支巷间煤柱中最大坚直应力为 1.11 MPa , 应力集中系数 1.15, 充填体最大坚直应力 0.11 MPa , 为自身重力, 表明第 1 轮充填体未

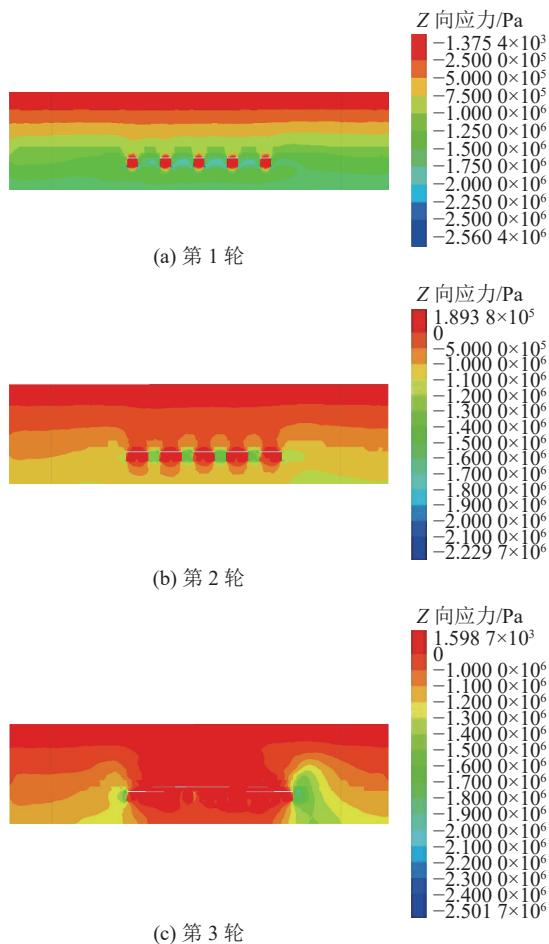


图7 三轮采充A-A剖面竖直应力云图

Fig.7 Vertical stress cloud map of A-A profile for three wheel mining and filling

与顶板接触,未发挥承载作用,最大侧压力0.05 MPa、地表最大下沉值4 mm、水平变形0.1 mm/m。

2)第2轮支巷采充后,支巷间煤柱中最大竖直应力为1.30 MPa,应力集中系数1.35,充填体最大竖直应力0.21 MPa,可见除充填体自身重力外增加了一定的覆岩压力,表明充填体与顶板发生接触,最大侧压力增至0.11 MPa,地表最大下沉值增至12 mm,水平变形0.3 mm/m。

3)第3轮支巷采充后,充填体竖直应力为0.78~0.91 MPa,接近于覆岩应力,应力曲线呈微波状分布,第1轮充填体上方应力较大,最后一轮充填体上方应力较小;最大侧压力增至0.46 MPa;边界煤体最大竖直应力为1.40 MPa,应力集中系数1.45;地表下沉大幅增加,最大下沉值81 mm,水平变形1.94 mm/m。

综上分析可知,第1轮支巷采充过后,工作面充填体和煤柱上方竖直应力曲线呈陡峭的波浪状,第2轮过后,应力波浪线陡峭程度增加,第3轮过后,应

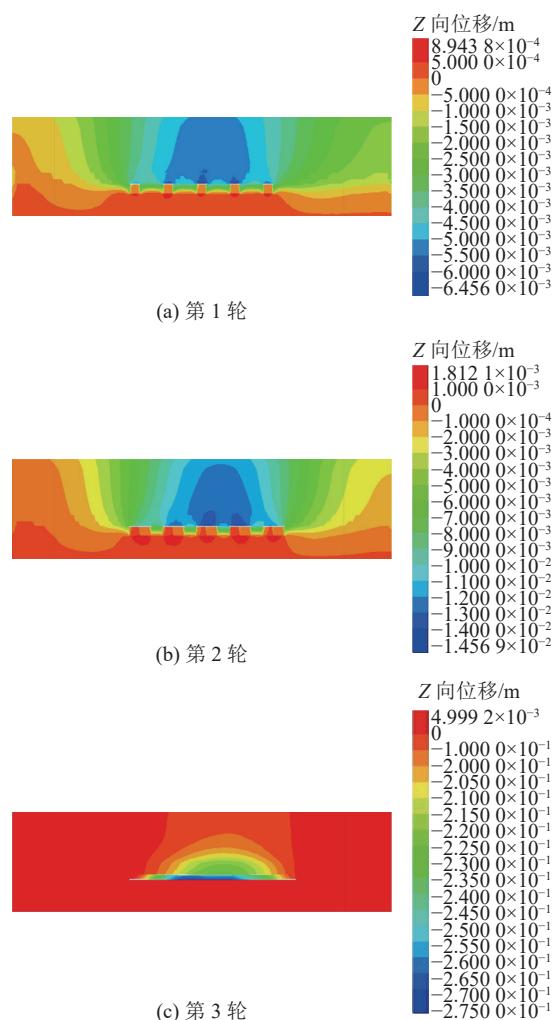


图8 三轮采充A-A剖面竖直位移云图

Fig.8 Vertical displacement cloud map of A-A profile for three rounds of mining and filling

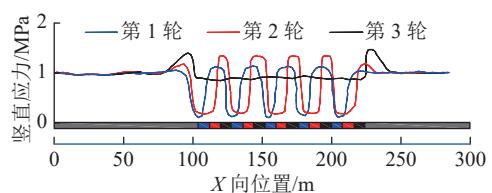


图9 三轮采充A-A剖面煤柱及充填体竖直应力分布

Fig.9 Vertical stress distribution curves of coal pillar and filling body in the A-A profile of three wheel mining and filling

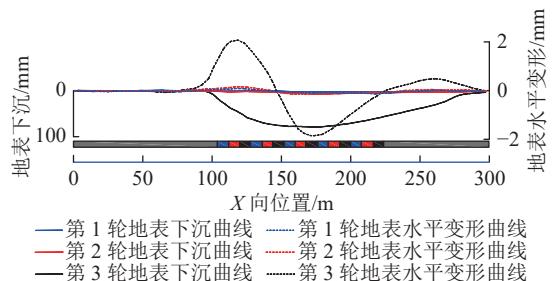


图10 三轮采充A-A剖面地表下沉曲线

Fig.10 Surface subsidence curves of A-A profile during three rounds of mining and filling

力曲线成为轻缓的波浪状。波浪状应力曲线从陡峭突然转为平缓,与地表最大下沉和水平变形曲线的变化相符;第1、2轮采充过后,地表下沉和水平变形不明显,第3轮采充过后,两者急剧增加。印证了工作面承载结构由煤体向充填体分轮转换的特征,同时发现充填体全面承载之际岩层运动较剧烈,应加强工作面支巷支护工作。

4.4 应用效果

研石膏体充填站于2023年10月建成试运转,充填能力 $250\text{ m}^3/\text{h}$,按照28 d单轴抗压强度3.9 MPa的指标要求试验得到了研石膏体材料配比: $m(\text{研石}) : m(\text{粉煤灰}) : m(\text{水泥}) : m(\text{水}) = 55 : 12 : 11 : 12$,质量分数为78%,并应用于充填施工。51106首采工作面长850 m,共布置支巷162条,自2024年1月底开始生产,2024年11月底结束,累计采出煤炭76.0万t,充填膏体料浆约57.6万 m^3 。采前对应地表布置A、B 2条地表移动观测线(图11),工作测点数目74个,控制点3个AK1~AK3,采动影响稳定后测得地表最大下沉值82 mm,最大水平变形1.83 mm/m,均在允许范围内,未影响地面建(构)筑物的正常安全使用。说明得出的充填体单轴抗压强度确定方法合理适用。



图11 51106工作面地表移动观测线

Fig.11 51106 working face surface movement observation line

5 结 论

1)综合机械化单元密实充填采煤过程呈现“煤—充填体”分轮转移承载特征,以三轮采充为例,可分为“煤柱全面承载”“充填体参与承载”“充填体全面承载”3个阶段。支巷充填体处于三向受力状态,根据朗肯土压力理论提出了充填体侧压力计算公式。

2)根据等价采高和地表水平变形计算公式推导得出了基于地表水平变形最大值要求的充填体弹性模量。实验室试验得出单轴抗压强度1~5 MPa的9组膏体试块在三轴围压分别为0.5、1.0和1.5 MPa条件下的弹性模量,建立充填体单轴抗压强度与三轴条件下弹性模量的关系。从而得到充填体单轴抗压强度与地表水平变形最大值之间的计算式。

3)某矿51106首采面浅埋深特厚煤层综合机械化单元密实充填采煤数值模拟和工程实践,验证了“煤—充填体”分轮转移承载特征以及充填体单轴抗压强度确定方法是合理和准确的。

参考文献(References):

- [1] 胡炳南,刘鹏亮,崔锋,等.我国充填采煤技术回顾及发展现状[J].煤炭科学技术,2020,48(9):39~47.
HU Bingnan, LIU Pengliang, CUI Feng, et al. Review and development status of backfill coal mining technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 39~47.
- [2] 杨科,魏祯,赵新元,等.黄河流域煤电基地固废井下绿色充填开采理论与技术[J].煤炭学报,2021,46(S2):925~935.
YANG Ke, WEI Zhen, ZHAO Xinyuan, et al. Theory and technology of underground green filling mining of solid waste in coal-fired power base of the Yellow River Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 925~935.
- [3] 刘鹏亮,张华兴,崔锋,等.风积砂似膏体机械化充填保水采煤技术与实践[J].煤炭学报,2017,42(1):118~126.
LIU Pengliang, ZHANG Huaxing, CUI Feng, et al. Technology and practice of mechanized backfill mining for water protection with aeolian sand paste-like[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 118~126.
- [4] 贾林刚,张华兴,刘鹏亮.充填步距对地表移动变形特征的控制影响[J].中国矿业大学学报,2022,51(4):642~650.
JIA Lingang, ZHANG Huaxing, LIU Pengliang. The control impact of filling pace on surface movement and deformation characteristics[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(4): 642~650.
- [5] 耿华峰,王新,王东生,等.短壁联采充填工艺提效措施研究与应用[J].煤炭科学技术,2020,48(S2):240~244.
GENG Huafeng, WANG Xin, WANG Dongsheng, et al. Research and application of efficiency improvement measures for short-wall combined mining and filling technology[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(S2): 240~244.
- [6] 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.
- [7] 路彬,张新国,李飞,等.短壁研石胶结充填开采技术与应用[J].

- 煤炭学报, 2017, 42(S1): 7–15.
- LU Bin, ZHANG Xinguo, LI Fei, et al. Study and application of short-wall gangue cemented backfilling technology[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1): 7–15.
- [8] 胡炳南, 张华兴, 申宝宏. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采指南 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017.
- [9] 张吉雄, 缪协兴, 郭广礼. 砾石(固体废物)直接充填采煤技术发展现状[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(4): 395–401.
- ZHANG Jixiong, MIAO Xiexing, GUO Guangli. Development status of backfilling technology using raw waste in coal mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(4): 395–401.
- [10] 王云搏, 张强, 孟国豪, 等. 基于固体充填开采的充填材料选择设计方法[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(3): 80–89.
- WANG Yunbo, ZHANG Qiang, MENG Guohao, et al. Methods of selecting filling materials for solid filling mining[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(3): 80–89.
- [11] 孙广京, 王平, 冯涛, 等. 深井矸石充填综采工作面覆岩活动规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(3): 562–570.
- SUN Guangjing, WANG Ping, FENG Tao, et al. Strata movement characteristics of the deep well gangue filling on the fully mechanized mining face[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(3): 562–570.
- [12] 邓雪杰, 刘浩, 王家臣, 等. 煤矿采空区充实率控制导向的胶结充填体强度需求[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4250–4264.
- DENG Xuejie, LIU Hao, WANG Jiachen, et al. Strength demand of cemented backfill guided by backfilling ratio control in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4250–4264.
- [13] 刘光生, 杨小聪, 郭利杰. 阶段空场嗣后充填体三维拱应力及强度需求模型[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1391–1403.
- LIU Guangsheng, YANG Xiaocong, GUO Lijie. Models of three-dimensional arching stress and strength requirement for the backfill in open stoping with subsequent backfill mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1391–1403.
- [14] 刘鹏亮. 砾石充填材料应力应变特征实验研究[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(4): 13–16.
- LIU Pengliang. Experiential study on stress and strain characteristic of gangue filling material[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2019, 46(4): 13–16.
- [15] 张晓, 王东林, 张明鹏, 等. 砾石充填间隔巷采及对地表移动变形影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(12): 33–38.
- ZHANG Xiao, WANG Donglin, ZHANG Mingpeng, et al. Study on influence of gangue filling and interval roadway excavation to surface movement and deformation[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(12): 33–38.
- [16] 郭亚奔, 张晓, 史久林, 等. 煤柱–充填体联合控制地表变形规律研究[J]. 中国矿业, 2022, 31(12): 138–145.
- GUO Yabben, ZHANG Xiao, SHI Jiulin, et al. Study on surface deformation law of coal pillar-filling combined control[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(12): 138–145.
- [17] 王砾康. 连采连充承载充填体蠕变及覆岩渗透率演化规律 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- WANG Shuokang. Evolution laws of filling body creep and overlying strata permeability by using continuous excavation and continuous backfilling[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [18] 赵兵朝, 王京滨, 张晴, 等. 侧限条件下充填体–煤柱耦合承载协同作用机理[J]. 煤炭学报, 2023, 48(12): 4380–4392.
- ZHAO Bingchao, WANG Jingbin, ZHANG Qing, et al. Synergistic mechanism of coupling bearing of backfill-coal pillar under lateral confinement condition[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(12): 4380–4392.
- [19] 马立强, 许玉军, 张东升, 等. 壁式连采连充保水采煤条件下隔水层与地表变形特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(1): 30–36.
- MA Liqiang, XU Yujun, ZHANG Dongsheng, et al. Characteristics of aquiclude and surface deformation in continuous mining and filling with wall system for water conservation[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(1): 30–36.
- [20] 侯晨. 矿柱与胶结充填体相互作用及其协作支撑机理研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- HOU Chen. Interaction between pillar and cemented tailings backfill and their cooperative support mechanism[D]. Shenyang: Northeastern University, 2018.
- [21] 许惠德. 土质学及土力学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995.
- [22] 刘炜震, 郭忠平, 黄万朋, 等. 不同温度养护后胶结充填体三轴卸围压力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(11): 2268–2282.
- LIU Weizhen, GUO Zhongping, HUANG Wanpeng, et al. Experimental study on mechanical characteristics of cemented backfill under triaxial unloading confining pressure after cured at different temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(11): 2268–2282.
- [23] 常庆粮, 袁崇亮, 王永忠, 等. 膏体充填综采台阶煤壁稳定性半凸力学分析[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(1): 46–55.
- CHANG Qingliang, YUAN Chongliang, WANG Yongzhong, et al. Semiconvex mechanical analysis on stability of step coalwall in fully mechanized mining with paste filling[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(1): 46–55.
- [24] 李文臣, 侯运炳, 韩帅. 硫酸盐对胶结充填体单轴抗压强度与弹性模量关系影响研究[J]. 中国煤炭, 2016, 42(1): 102–105.
- LI Wenchen, HOU Yunbing, HAN Shuai. Research of sulphate effects on correlation between uniaxial compressive strength of cemented filling and modulus of elasticity[J]. China Coal, 2016, 42(1): 102–105.