



您可能感兴趣的文章、专题：

盘点《煤炭学报》2020 年热点论文

《煤炭学报》2021 年第 1 期

“新锐科学家”专题

“深部岩体力学与开采理论”专题

“煤加工与洁净化工技术”专题

“黄河流域矿区生态保护与可持续发展”专题

“煤矿热动力灾害防控技术与装备”专题

“煤矿快速智能掘进理论与技术”专题

“煤系天然气聚集理论与勘探开发技术”专题

“低品质煤浮选过程强化”专题

固体充填开采“三效”关系及其优化控制方法

武中亚^{1,2}, 张 强^{1,2}, 张 昊^{1,2}, 郑庆学³, 刘宏军³, 田秀国⁴

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 开滦(集团)有限责任公司, 河北 唐山 630006; 4. 开滦能源化工股份有限公司, 河北 唐山 630006)

摘 要: 充填效果、充填效率和充填效益(简称“三效”)3 者之间的关系是充填开采理论设计及工程实施过程中难以回避的问题,但目前尚未形成“三效”关系的定量表征方法。针对固体非密实充填和密实充填,提出了“三效”的内涵,给定了“三效”的表征原理,阐释了“三效”优化控制的概念。以充填体在机械夯实作用和采空区覆岩压实作用下逐渐密实的过程为纽带,构建了基于固体密实充填“三效”与充填工艺、充填材料参数和充填体密实状态关系的分析模型。采用理论分析方法阐述了充填效果、充填效率与充填效益之间的相互关系,给出了“三效”的量化表征方法、求解流程和计算公式。基于单因素变量分析方法,研究了夯实次数、单次夯实时间、单个支架落料时间和堆料高度 4 个充填工艺关键因素以及自然安息角和夯实前容重 2 个充填材料关键因素对“三效”的影响规律,得到了 4 种“三效”关系类型。根据“三效”关系变化规律并结合充填开采关键参数设计流程进一步提出了针对固体密实充填的“三效”优化控制方法。针对唐山矿 T₃292 充填工作面的“三效”分析表明:充填开采过程中实施了富余的夯实次数,降低了充填效率和效益,建议优化充填材料并减少夯实次数,从而在保证充填效果的同时实现较高的充填开采效率和效益。

关键词: 固体充填; 充填效果; 充填效率; 充填效益; 充填工艺; 精准控制

中图分类号: TD821

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2021)10-3148-10

Backfilling quality-efficiency-benefit relation and its optimal control method for solid backfilling mining

WU Zhongya^{1,2}, ZHANG Qiang^{1,2}, ZHANG Hao^{1,2}, ZHENG Qingxue³, LIU Hongjun³, TIAN Xiuguo⁴

(1. School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Kailuan (Group) Limited Liability Corporation, Tangshan 063006, China; 4. Kailuan Energy Chemical Co., Ltd., Tangshan 063006, China)

Abstract: The relationship between backfilling quality-efficiency-benefit (referred to as “BQEB”) is a problem that is difficult to avoid in the theoretical design and engineering implementation in backfilling mining. Also, a quantitative characterization method of the BQEB relationship has not yet been established. In this study, for solid non-dense backfilling and dense backfilling mining, the concept, characterization theory and optimal control method of BQEB has been put forward. Take the process of gradual compaction of the backfill under the action of mechanical tamping and the compaction of the overlying rock in the gob as the link, an analysis model based on the relationship be-

收稿日期: 2020-06-30 修回日期: 2020-11-21 责任编辑: 常 琛 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.1120

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0604704); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51704273); 国家自然科学基金面上资助项目(52174134)

作者简介: 武中亚(1994—), 男, 安徽阜阳人, 博士研究生。E-mail: zhongyayu@126.com

通讯作者: 张 强(1986—), 男, 湖北宣恩人, 副教授, 博士。E-mail: leafkky@163.com

引用格式: 武中亚, 张强, 张昊, 等. 固体充填开采“三效”关系及其优化控制方法[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3148-3157.

WU Zhongya, ZHANG Qiang, ZHANG Hao, et al. Backfilling quality-efficiency-benefit relation and its optimal control method for solid backfilling mining[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3148-3157.



移动阅读

tween the solid dense backfilling BQEB, backfilling process, backfill parameters and compact state of the backfill is constructed. The relationship among BQEB is expounded, the meaning, solving process and calculating formula of BQEB are presented with theoretical analysis method. Based on the single factor variable analysis method, the influencing laws of four backfilling process factors, namely tamping times, single tamping times, dumping time of single backfilling shield and stack height, as well as two backfill factors, namely angle of repose and initial packing density of backfill, are studied, and four types of BQEB relationships are obtained. According to the BQEB relationship law and combined with the key parameter design process of backfilling mining, a BQEB optimal control method is proposed. The BQEB analysis of the T₃292 backfilling face in Tangshan Mine shows that the surplus tamping times were implemented during the backfilling mining, thereby the backfilling efficiency and benefit were reduced. It is recommended to optimize the backfilling materials and reduce the tamping times, so as to ensure the backfilling effect and achieve a better mining efficiency and benefits.

Key words: solid backfilling; backfilling quality; backfilling efficiency; backfilling benefit; backfilling process; precise control

固体充填开采技术发展至今,经历了抛研充填、综合机械化固体密实充填、综合机械化固体充填与垮落式协同开采、采选充一体化及“采选充+X”等阶段^[1-3]。固体充填材料特性测试及优化方法、采充工艺、充填开采岩层控制理论、投料装备及技术、充填设备选型配套等已经发展较为成熟^[4-6]。

在固体充填开采中,通常用充实率理论设计值来给定岩层控制的要求并反馈最终的岩层控制效果^[7-8],其表征着充填体的抗变形能力,顶底板岩层的运移过程与最终状态均与之密切相关^[9-10]。充实率受充填液压支架、充填材料、充填工艺、煤岩体特性等因素影响^[11-15]。高充实率对装备投入、充填材料及充填工艺的要求较高,充填效率和采煤效益较低,而低充实率的相应要求较低,但难以保证岩层控制效果,因此设计合理的充实率显得十分重要。充实率受充填工艺的影响较为显著,而不同充填工艺参数下的充填效率和充填效益存在差异,研究充填工艺与充填效果、效率和效益(简称“三效”)的定量关系是充填开采理论设计及工程实施中难以规避的问题。

固体密实充填开采除了割煤工序以外,还需要进行充填材料的运输、落料和夯实作业,导致固体充填开采效率和效益明显低于垮落法开采。充填效率和效益一直是制约充填开采的关键因素,实现矸石等固废高效处理、提高充填效益和实现充填开采参数的精准设计是充填开采的重要发展方向^[16-17],因此“三效”量化分析及优化控制显得十分重要。

在固体充填效果控制方面,学者们提出了充填材料的测试及优化方法,改进了充填液压支架及夯实机构结构,提出了充实率、充填率、顶板提前下沉量、夯实离顶距等表征充填效果的指标及其计算方法^[7,18];在充填效率提升方面,学者们提出了全采局充、局采

局充等新型充填开采技术和通过充填开采自动化来提升充填效率的设想^[19-20];但目前鲜有针对充填效益的相关研究。综上所述,目前对于固体充填开采“三效”的研究还不够全面,未形成“三效”的定量表征方法和优化控制方法。

笔者拟对充填开采“三效”的定量表征和优化控制方法进行研究,可为充填工艺参数合理设计提供指导,能够保证充填效果并提高充填效率和效益,对充填开采岩层精准控制具有理论指导意义。

1 充填开采“三效”关系构建

1.1 “三效”表征原理

固体充填开采按照充填的密实程度可分为密实充填和非密实充填。其中,非密实充填对岩层的控制效果要求较低,为了高效处理固体废弃物,一般仅落料不夯实。而密实充填一般用于“三下”开采,需要对卸落的充填材料进行夯实以保证充填体密实度。因此,密实充填和非密实充填在充填效果、充填效率和充填效益的表征方法上存在巨大差异。

(1)非密实充填。以固体废弃物处理为需求的非密实充填,其“三效”关系主要以充填量为纽带进行构建。充填效果取决于充填量与采煤量的比值,即充采比;充填效率主要受到充填量和落料时间影响;充填效益主要与充填效率、采煤效率及吨煤利润相关。

(2)密实充填。固体密实充填的“三效”关系以散体充填材料夯实为致密充填体的过程为纽带,与充填工艺及充填体致密状态紧密相关。如图 1 所示,在给定的开采条件下,充填效果主要受充填工艺和充填材料特性的影响,充填效率主要与充填材料充入量及充填工艺用时相关,而充填效益可通过结合充采质量

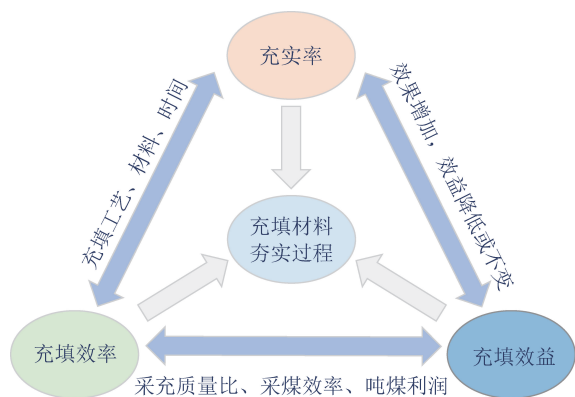


图 1 “三效”内在联系

Fig. 1 Internal relationship of BQEB

比、采煤效率、吨煤利润及矸石处理节约费等表征。

“三效”的内涵具体如下：

(1) 充填效果。充填效果具有多种表征方法,包括地表变形、基本顶破断状态和导水裂隙带发育范围等^[7,15,18]。本文采用充实率表示充填效果,即充分采动后,采空区内的充填物料在覆岩充分沉降后被压实的最终高度与采高的比值。

(2) 充填效率。与采煤效率表示煤炭的采出效率类似,充填效率是指充填体的充入效率,笔者利用单位时间充入的充填材料质量来表征。这种表征方式可以消除不同工作面采高、面长、截深等开采参数差异造成的影响,可以实现不同布置参数充填面和同一充填面不同开采阶段的充填效率对比。

(3) 充填效益。充填效益表示充填工作面采煤、固体废弃物处理及生态环境保护等综合效益。笔者仅利用充填工作面采煤效益来表征充填效益进行分析,即单位时间内采出煤炭产生的效益。充填效益与充填效率之间的联系在于,单位时间内充入的充填材料质量和采煤量之间存在一个比值,即充采质量比。

“三效”之间的关系可通过以下方法求解:① 求解充填效果与充填工艺的函数关系;② 求解充填工艺参数与充填时间的关系;③ 计算单位时间内充入的充填材料质量,即充填效率;④ 结合采充质量比、充填效率和吨煤利润等求解充填效益。

1.2 “三效”表征方法

由于以固体废弃物处理为需求的非密实充填一般对充填效果没有要求,而主要侧重充填效率和效益,后文中“三效”表征及定量分析均基于固体密实充填方法进行展开。

固体密实充填的充填工艺流程为:通过充填液压支架后部悬挂的多孔底卸式刮板输送机将充填物料卸落至采空区,然后利用充填液压支架上的夯实机构将卸落的充填材料夯实密实。每架充填液压支架单

个循环步距对应的可充填空间是一定的,此空间内充入的固体充填材料越多,则密实度越好,工作面的充实率也越大。

首先利用充填材料夯实前后的质量守恒原理构建恒等式,通过三维仿真或积分的方法求解充填工艺、充填体参数与夯实作用体积的关系,可求得充填材料夯实后容重的表达式。然后通过充填材料压实试验并利用充填实测数据对试验结果进行修正,可以得出充填材料夯实后容重与充实率的关系,至此实现了充填效果的表征。最后利用“三效”之间的关系,可以得出充填效率和充填效益的表达式。

(1) 充填效果。对于固体密实充填而言,充填效果(充实率)的求解流程主要分为 2 部分:首先求解夯实后容重,然后通过夯实后容重求解充实率。其中,求解夯实后容重的步骤为^[21-23]:① 通过夯实前后质量守恒定律构建等式;② 确定夯实后容重影响因素及取值范围;③ 求解单因素与夯实后容重的关系;④ 回归分析得出多因素与夯实后容重的关系。

充填体夯实后容重的表达式为

$$\rho_0 V_s(h_d, \beta, n) = \rho V = \rho(h - h_l) dk \quad (1)$$

式中, ρ_0 为充填材料夯实前容重; ρ 为充填材料夯实后容重; V_s 为单个支架充填区域夯实作用总体积; V 为单个支架可充填空间体积; h_l 为充填区域顶板提前下沉量; β 为充填材料自然安息角; h_d 为堆料高度; n 为夯实次数; h 为采高; d 为充填步距; k 为支架宽度。

利用夯实后容重求解充实率的步骤:① 通过实验室测试并结合实测经验修正,得出充填体应力与应变的关系,进而推导出充填体容重与充填体弹性地基系数的关系式;② 通过充实率与充填体应变的关系,得出充实率与充填体弹性地基系数的关系式;③ 联合上述公式得出充实率与充填体夯实后容重的关系式。

充实率与夯实后容重的关系式为

$$\varphi = \varphi[k_{g0}(\rho), \sigma_{\max}] \quad (2)$$

式中, φ 为充实率; k_{g0} 为夯实后充填体的弹性地基系数; $\sigma_{\max}$ 为充分采动时充填体所受的最大垂直应力,可通过充填体应力监测计或计算求得。

(2) 充填效率。充填效率通过单位时间内充入的充填体质量表示,具体步骤:① 以夯实作用总体积和落料速度求落料时间;② 以单次夯实时间和夯实次数求夯实时间;③ 根据落料和夯实工艺协同系数和开采参数影响系数,求单个支架一个步距的充填时间;④ 计算单位时间内单个支架一个步距内的充填体质量,得出充填效率:

$$\eta = \frac{V\rho}{c_2(T_1 + c_1T_2 + T_3) \frac{(h - h_1)dk\rho}{c_2 \left[\frac{V_s(h_d, \beta, n)}{v\Delta v} + c_1t_1n + T_3 \right]}} \quad (3)$$

式中, η 为充填效率; T_1 为单个支架落料时间; T_2 为单个支架夯实时间; T_3 为单个支架宽度对应的采煤机割煤时间; v 为多孔底卸式输送机链速; Δv 为单位长度多孔底卸式输送机上充填材料体积; t_1 为单次夯实时间; c_1 为落料和夯实工艺协同系数, $c_1 \leq 1$; c_2 为开采参数影响系数(如倾角、粒径、顶板条件等), $c_2 \geq 1$ 。

(3) 充填效益。充填效益通过单位时间内采出煤炭利润来表征, 具体步骤: ① 计算单位时间内单个支架对应区域的出煤量, 具体通过充填效率和充采质量比得出; ② 结合单位时间内的出煤量与吨煤利润得出充填效益。

$$s = \eta_c p = \eta \frac{p}{r} = \eta \frac{pp_c hdk}{\rho(h - h_1)dk} \quad (4)$$

式中, s 为充填效益; η_c 为采煤效率; r 为充采质量比; p 为吨煤利润; ρ_c 为煤的容重。

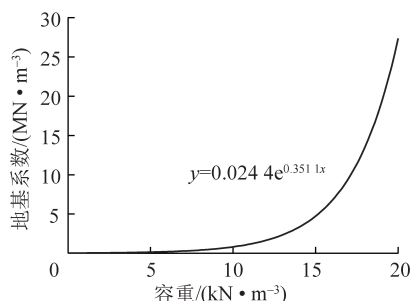
2 充填开采“三效”影响因素

2.1 关键影响因素选取

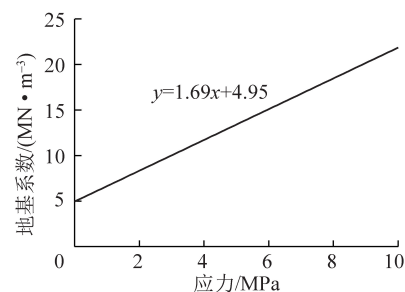
影响“三效”的因素包括地质条件、工作面布置、充填设备、充填工艺、充填材料等。其中, 工程地质条件、工作面布置、充填设备一旦确定以后均不再改变, 而充填物料特性以及充填工艺的实施可人为控制。因此, 本文主要分析充填工艺和充填材料参数对“三效”的影响。

研究的充填材料参数包括: 自然安息角、充填材料夯实前容重; 研究的充填工艺参数包括: 夯实次数、单次夯实时间、单个支架落料时间、堆料高度。采用单因素变量法分析“三效”的变化规律, 各参数取值为: 采高 h 为 3.5 m, 支架宽度 k 为 1.5 m, 充填材料夯实前容重 ρ_0 为 15 kN/m³, 顶板提前下沉量 h_1 为 100 mm, 充填步距 d 为 0.5 m, 充填体所受最大垂直应力 $\sigma_{\max}$ 为 20 MPa, 单个支架落料时间 T_1 为 2 min, 单次夯实时间 t_1 为 0.5 min, 单个支架宽度对应的采煤机割煤时间 T_3 为 3 min, 落料与夯实协同系数 c_1 为 0.5, 开采参数影响系数 c_2 为 1.2, 吨煤利润 p 为 500 元, 煤的容重 ρ_c 为 14.8 kN/m³, 夯实次数 n 为 4 次, 充填材料自然安息角 β 为 46°, 堆料高度 h_d 为 2.4 m。

充填材料的容重与弹性地基系数关系及充填材料的应力与弹性地基系数关系如图 2 所示。



(a) 容重与弹性地基系数



(b) 应力与弹性地基系数

图 2 充填材料压实特性

Fig. 2 Compression characteristic of backfilling material

基于以上开采条件, 得出了“三效”的具体公式。其中, 充实率、充填效率和充填效益的公式分别为

$$\begin{cases} \varphi = 1 - 0.108 5 \left(1 - \frac{k_{g0}}{1.69\sigma_{\max} + 4.95} \right) + \\ 0.042 8 \ln(\sigma_{\max} - 1.202 3) \\ k_{g0} = 0.024 4e^{0.351 1p} \\ \rho = \rho_0 \frac{5.314 + 2.33h_d - 0.18\beta + 0.12n}{(h - h_1)dk} \end{cases} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{(h - h_1)dk\rho}{c_2 \left(\frac{5.314 + 2.33h_d - 0.18\beta + 0.12n}{v\Delta v} + c_1t_1n \right)} \quad (6)$$

$$s = \frac{(h - h_1)dk\rho}{c_2 \left(\frac{5.314 + 2.33h_d - 0.18\beta + 0.12n}{v\Delta v} + c_1t_1n \right)} \times \frac{pp_c hdk}{\rho(h - h_1)dk} \quad (7)$$

2.2 充填工艺参数影响规律

2.2.1 夯实次数

由图 3 可知, 以夯实次数 4 次为基准, 夯实次数为 1 时充填效果降低了 5.5%, 但充填效率和充填效益分别提高了 34.0% 和 53.6%; 夯实次数为 7 次时充填效果提高了 12.4%, 但充填效率和充填效益分别下降了 16.4% 和 25.9%。

随着夯实次数的提高充填效果不断提高, 但充填效率和充填效益均下降十分明显。因此, 在满足充填

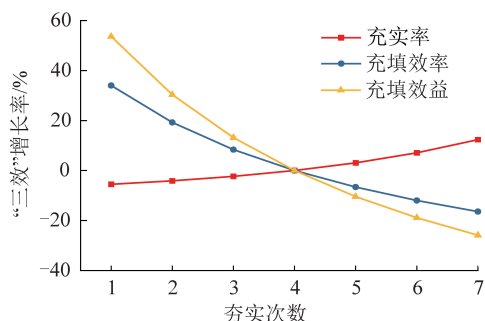


图3 夯实次数与“三效”关系

Fig. 3 Relation between tamping times and BQEB

效果的前提下,应选择较低的夯实次数,以提高充填效率和效益。

2.2.2 单次夯实时间

由图4可知,以单次夯实时间为0.5 min为基准,单次夯实时间为0.2 min时充实率不变,充填效益和充填效率均上升了27.1%;单次夯实时间为1.2 min时的充实率不变,充填效益和充填效率均降低了33.3%。

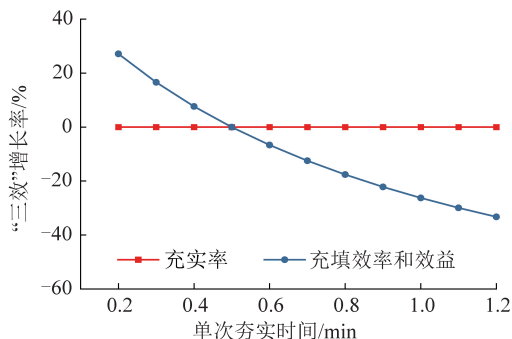


图4 单次夯实时间与“三效”关系

Fig. 4 Relation between single tamping time and BQEB

随着单次夯实时间的提高,充实率不变,但充填效率和充填效益不断减小。因此,可通过提高夯实机构供液流量和压力、减小夯实机构伸缩级数等方法提高夯实速度,以提升充填效率和效益。

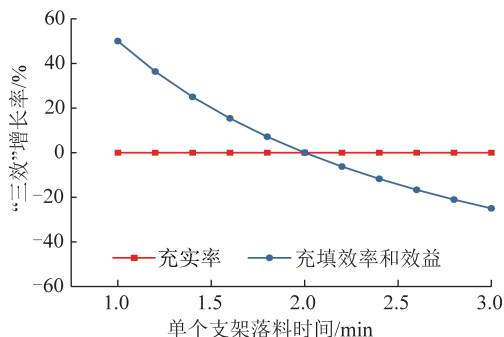


图5 落料时间与“三效”关系

Fig. 5 Relation between dumping time and BQEB

2.2.3 单个支架落料时间

由图5可知,以单个支架落料时间为2 min为基

准,单个支架落料时间为1 min时充实率不变,充填效益和充填效率均提高了50%;单个支架落料时间为3 min时充实率不变,充填效益和充填效率均降低了25%。

随着单个支架落料时间的提高,充实率不变,但充填效率和效益不断减小。因此,可以通过提高多孔底卸式输送机链速和优化卸料孔布置等方式提高落料速度,从而实现充填效率和效益的提升。

2.2.4 堆料高度

考虑到多孔底卸式输送机悬挂和支架后顶梁厚度,堆料高度的取值范围设定为2.0~2.8 m。

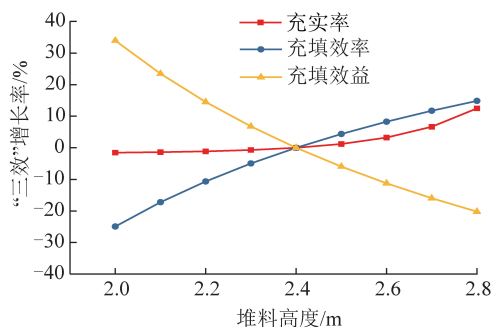


图6 堆料高度与“三效”关系

Fig. 6 Relation between stack height and BQEB

由图6可知,以堆料高度2.4 m为基准,堆料高度为2 m时充实率和充填效率分别下降了1.5%和24.9%,但充填效益上升了33.9%;堆料高度为2.8 m时的充实率和充填效率分别升高了12.5%和14.8%,但充填效益下降了20.2%。

随着堆料高度的增加,充实率和充填效率不断提高,但充填效益快速下降。因此,应选择合理的堆料高度来保证充实率和充填效益。

2.3 充填材料参数影响规律

2.3.1 自然安息角对“三效”的影响

考虑到常见充填材料的特性,选择的自然安息角范围为43°~50°。

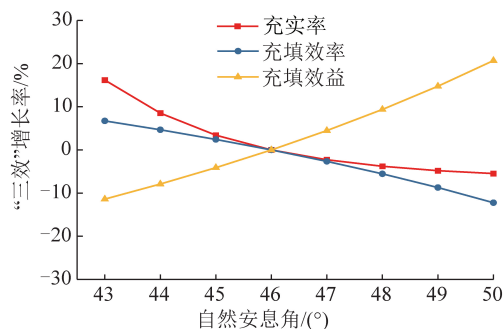


图7 充填材料自然安息角与“三效”关系

Fig. 7 Relation between angle of repose and BQEB

由图7可知,以自然安息角46°为基准,自然安

息角为 43° 时充实率和充填效率分别提高了 16.2% 和 6.7%, 但充填效益下降了 11.4%; 自然安息角为 50° 时的充实率和充填效率分别降低了 5.5% 和 12.2%, 但充填效益提高了 20.7%。

随着自然安息角增大, 充实率和充填效率不断下降, 但充填效益不断增加。这是因为在堆料高度一定的情况下, 随着自然安息角增加, 充填体料堆会更加细高, 因此单次夯实作用体积和落料总体积均会不断减小; 但是夯实次数不变, 因此单位时间内夯实的充填材料减小, 即充填效率和充实率会变差; 但由于落料总量减小, 落料时间变短, 工作面循环时间变短, 充填效益提高。

2.3.2 充填材料夯实前容重

根据实际, 充填材料夯实前容重范围设定在 $13 \sim 17 \text{ kN/m}^3$, 对于同一种充填材料而言, 通常夯实前容重越大, 其充实率越好^[24]。

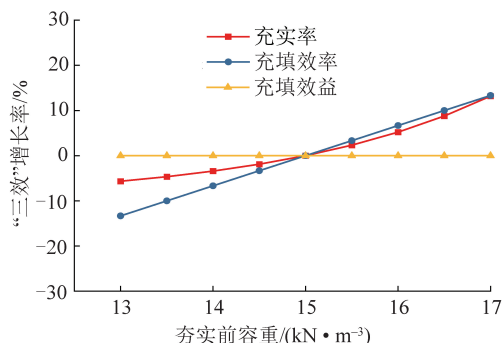


图 8 充填材料夯实前容重与“三效”关系

Fig. 8 Relation between initial packing density and BQEB

由图 8 可知, 以充填材料夯实前容重 15 kN/m^3 为基准, 充填材料夯实前容重为 13 kN/m^3 时充实率和充填效率分别下降了 5.6% 和 13.3%, 但充填效益不变; 充填材料夯实前容重为 17 kN/m^3 时的充实率和充填效率分别升高了 13.2% 和 13.3%, 但充填效益不变。

随着充填材料夯实前容重的提高, 充实率和充填效率增加, 但充填效益不变。这是因为夯实前容重增加后, 单位时间内落料和夯实作用体积不变, 但充入充填体的质量增加, 即充填效率和效果增加, 而单个支架的充填时间不变, 即充填效益不变。

3 充填开采“三效”优化控制方法

3.1 “三效”关系求解

通过上述分析可知, “三效”受不同充填采煤工艺参数影响时的变化规律不同, 可分为 4 种类型:

(1) 类型 1: 效果提高, 效率-效益下降。

这种“三效”类型出现在为提高充实率而增加夯

实次数的情况下, 该类型“三效”关系曲线如图 9 所示。

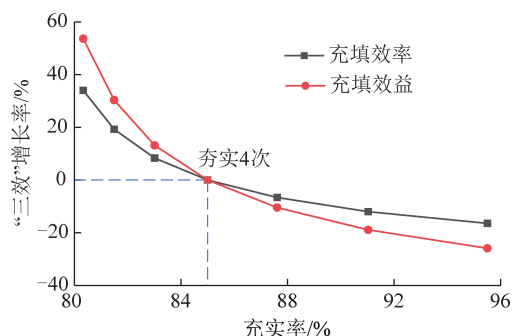


图 9 “三效”关系 (类型 1)

Fig. 9 BQEB Relation (type A)

“三效”内涵关系可解读如下:

充实率由 85% (夯实次数为 4) 提高至 95.5% (夯实次数增加为 7) 时, 充填效率和充填效益分别下降 16.4% 和 25.9%; 当充实率降低至 79.4% (夯实次数为 1) 时, 充填效率和充填效益分别增加 34.0% 和 53.6%。

(2) 类型 2: 效果不变, 效率-效益提高。

这种“三效”类型出现在通过优化多孔底卸式输送机落料性能和充填液压支架夯实性能, 或对充填采煤设备进行自动化改造导致单个支架落料时间减小和单次夯实时间减小的情况下, 该类型“三效”关系曲线如图 10 所示。

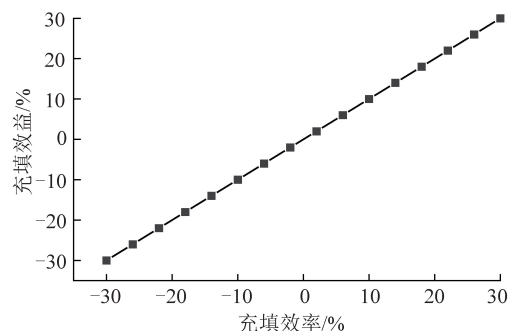


图 10 “三效”关系 (类型 2)

Fig. 10 BQEB Relation (type B)

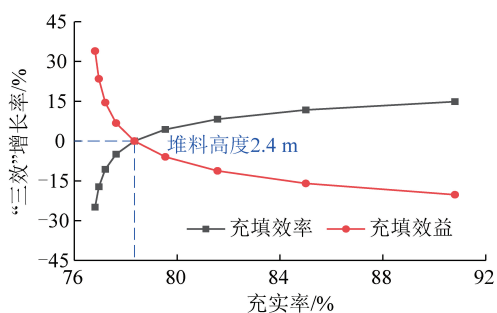
“三效”内涵关系可解读如下:

充实率不发生变化, 充填效益随着充填效率提高呈线性提高。

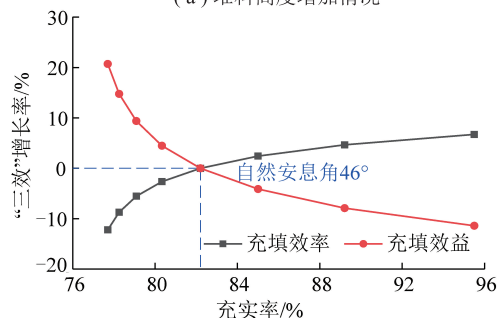
(3) 类型 3: 效果-效率提高, 效益下降。

这种类型出现在增加堆料高度和减小自然安息角的情况下。其中, 增加最大堆料高度可通过减小多孔底卸式输送机悬挂高度来实现, 而减小自然安息角主要通过优化充填体粒径级配和湿度来实现, 该类型“三效”关系曲线如图 11 所示。

“三效”内涵关系可解读如下:



(a) 堆料高度增加情况



(b) 自然安息角减小情况

图 11 “三效”关系(类型 3)

Fig. 11 BQEB Relation (type C)

如图 11(a) 所示, 充实率由 78.3% (堆料高度为 2.4 m) 提高至 90.8% (堆料高度增高至 2.8 m) 时, 充填效率增加了 14.8%, 充填效益降低了 20.2%; 当充实率降低至 76.8% (堆料高度降低至 2 m) 时, 充填效率降低了 24.9%, 充填效益增加了 33.9%。

如图 11(b) 所示, 充实率由 82.2% (自然安息角为 46°) 提高至 95.5% (自然安息角减小至 43°) 时, 充填效率增加 6.7%, 充填效益减小了 11.4%; 当充实率降低至 77.7% (自然安息角增大至 50°) 时, 充填效率下降了 12.2%, 充填效益提高了 20.7%。

(4) 类型 4: 效果-效率提高, 效益不变。

这种类型出现在通过优化充填材料粒径级配导致充填材料夯实前容重增加的条件下, 该类型“三效”关系曲线如图 12 所示。

充实率由 85% (夯实前容重为 15 kN/m^3) 提高至 96.2% (夯实前容重增加至 17 kN/m^3) 时, 充填效率增加了 13.3%, 充填效益不变; 当充实率降低至 80.2% (夯实前容重减小至 13 kN/m^3) 时, 充填效率降低了 13.3%, 充填效益不变。

3.2 “三效”优化控制方法

由前面分析可知, 充填工艺参数和充填材料参数均会对“三效”产生不同的影响, 生产过程中通常需要设定合理的充填工艺参数来保证“三效”关系最优。固体密实充填“三效”优化控制的内涵为: 通过

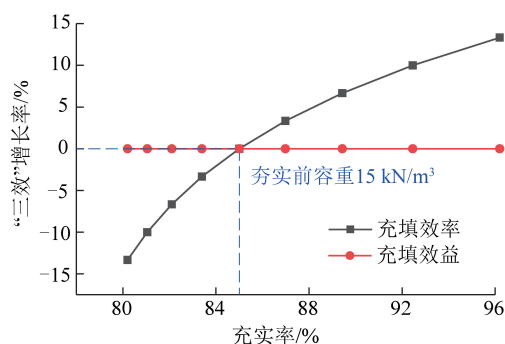


图 12 “三效”关系(类型 4)

Fig. 12 BQEB Relation (type D)

设计合理的充填工艺参数来满足矿井对充实率、充填效率和充填效益的要求, 其基本原则是在满足充实率的前提下, 实现充填效益的最优。

通过上述分析可知, 在保证充实率不降低的前提下, 提高充填效益的方法有: 提高充填材料夯实前容重 (优化粒径级配), 减小夯实时间和落料时间。

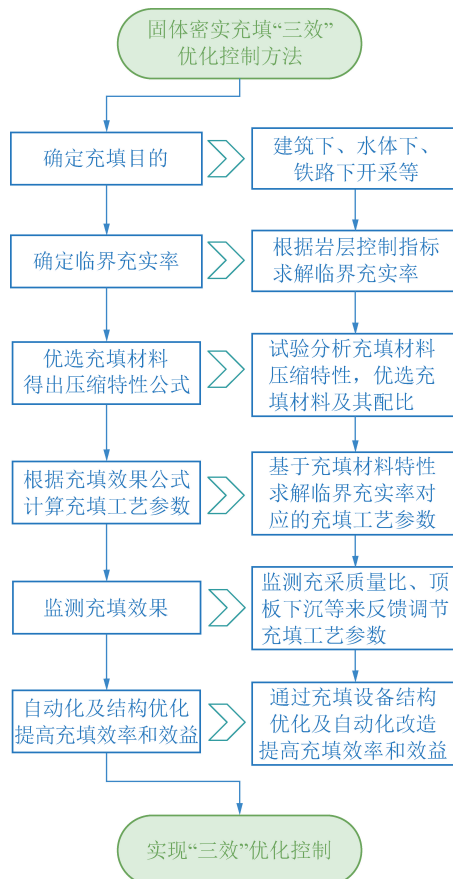


图 13 “三效”优化控制方法

Fig. 13 BQEB optimal control method

如图 13 所示, 固体密实充填工作面“三效”优化控制设计流程为: ① 根据开采区域地质条件和地表情况, 分析充填开采目的; ② 根据岩层控制指标求解满足充填要求的临界充实率; ③ 试验测试优选

充填材料及其级配,得出充填体容重、应变及弹性地基系数的关系,构建临界充实率与充填工艺参数的关系式;④ 基于临界充实率求解充填效益最优条件下的夯实次数及对应的堆料高度等充填工艺参数;⑤ 计算并监测采充质量比、顶板下沉等参数来反馈调节充填工艺;⑥ 对充填采煤设备进行自动化改造和结构优化,以减小夯实时间、落料时间及充填和采煤工艺干扰时间,提高充填效率和效益。

表 1 T_3292 充填工作面概况Table 1 General situation of T_3292 backfilling face

工作面长度/m	采高/m	支架宽度/m	煤层容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	设计充实率/%	充填步距/m	堆料高度/m
90	3.5	1.5	14.8	80	0.5	2.4

4.2 “三效”分析及优化

(1) 开采参数。

T_3292 工作面充填材料为粒径小于 50 mm 的分选矸石,采高 h 为 3.5 m,支架宽度 k 为 1.5 m,充填材料夯实前容重 ρ_0 为 15 kN/m^3 ,顶板提前下沉量 h_i 为 100 mm,充填步距 d 为 0.5 m,充填体所受最大垂直应力 $\sigma_{\max}$ 为 20 MPa,单个支架落料时间 T_1 为 2 min,单次夯实时间 t_1 为 0.5 min,单个支架宽度对应的采煤机割煤时间为 3 min,落料与夯实协同系数 c_1 为 0.5,开采参数影响系数 c_2 为 1.2,吨煤利润 p 为 500 元,煤的容重 ρ_c 为 14.8 kN/m^3 ,夯实次数 n 为 5 次,充填材料自然安息角 β 为 45° ,堆料高度 h_d 为 2.4 m。

(2) “三效”分析。

针对此工作面的具体开采条件,计算得出满足地表建筑物保护要求的临界充实率为 80%。在充填材料参数、充填设备参数和堆料高度(以岩层控制为目的的固体密实充填工作面堆料高度一般设计为最大堆料高度)已经确定的情况下,“三效”的优化途径主要为改变夯实次数。不同夯实次数条件下 T_3292 工作面的“三效”变化规律如图 14 所示。

由图 14 可以看出,在夯实次数为 3 次时充实率为 81.1%,已经满足了设计要求。工作面实际夯实次数为 5 次,与夯实次数为 3 次相比,充实率提高了 84%,充填效率和充填效益分别降低了 13.8% 和 20.8%。

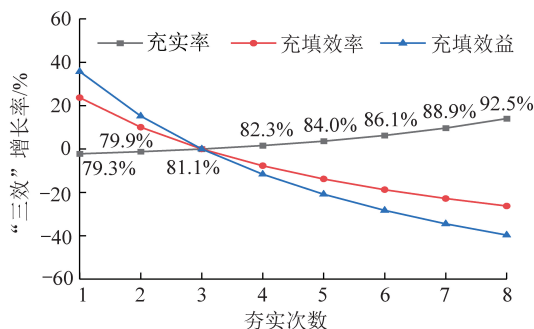
(3) “三效”优化建议。

T_3292 工作面充填材料为 50 mm 以下的分选矸石,未精准配比矸石粒径,建议后续充填面优化粒级级配,以提高充填材料夯实前容重和抗压缩特性。同

4 唐山矿充填开采“三效”分析

4.1 充填工作面概况

T_3292 工作面位于唐山矿铁三区,开采 9 号煤层,煤层倾角平均 12° 。工作面基本顶为砂岩,厚度 5~15.5 m;直接顶为泥岩,厚度 0~1.5 m;直接底为砂质泥岩,厚度 1 m;基本底为泥岩,厚度 4.6 m。 T_3292 工作面地表存在密集建筑物,需要保证地表建筑物在 I 级采动影响程度以内,工作面基本参数见表 1。

图 14 T_3292 工作面“三效”与夯实次数关系Fig. 14 Tamping times and BQEB in T_3292 working face

时,由于 T_3292 工作面因侧重充实率,实际夯实次数较多,建议减小夯实次数至 3 次,实现充填效率和充填效益的提升。

5 结 论

(1) 提出了“三效”的表征方法、求解流程和计算公式。利用充实率来表征充实率,利用单位时间内充入的充填材料质量来表征充填效率;利用单位时间内采出的煤炭净利润表征充填效益。

(2) 建立了典型“三效”关系曲线。分析了“三效”关键影响因素,研究了夯实次数、单次夯实时间、单个支架落料时间、堆料高度、自然安息角和充填材料夯实前容重对“三效”的影响规律,得到 4 种典型的“三效”关系曲线。

(3) 提出了“三效”优化控制方法。针对固体密实充填开采提出了求解“三效”优化方法的设计流程,其基本原则是在保证临界充实率的前提下尽量提高充填效益。

(4) 基于唐山矿 T_3292 工作面采矿地质条件和开采参数,分析了“三效”指标,提出了“三效”优化控

制的改进建议。研究成果对于充填开采岩层精准控制具有理论指导意义。

参考文献 (References):

- [1] 张吉雄, 缪协兴, 郭广礼. 固体密实充填采煤方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 17-40.
- [2] 张吉雄, 张强, 巨峰, 等. 深部煤炭资源采选充绿色化开采理论与技术[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 377-389.
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, JU Feng, et al. Theory and technique of greening mining integrating mining, separating and backfilling in deep coal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 377-389.
- [3] 殷伟, 包旭, 刘恒凤, 等. 协同综采面过渡区域覆岩结构与矿压控制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(1): 86-93.
YIN Wei, BAO Xu, LIU Hengfeng, et al. Research on overlying strata structure and ground control in transition area of fully mechanized mining working face[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018, 35(1): 86-93.
- [4] HUANG Yanli, LI Junmeng, MA Dan, et al. Triaxial compression behaviour of gangue solid wastes under effects of particle size and confining pressure[J]. Science of the Total Environment, 2019, 693: 12.
- [5] 巨峰. 固体充填采煤物料垂直输送技术开发与工程应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
JU Feng. Development and engineering applications of solid materials vertical transportation system in backfill coal mining technology[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.
- [6] 张强, 武中亚, 杜二宝, 等. 充填采煤液压支架工作阻力设计方法研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 118-127.
ZHANG Qiang, WU Zhongya, DU Erbao, et al. Working resistance design method of backfilling shield[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2020, 37(1): 118-127.
- [7] 张强, 张吉雄, 巨峰, 等. 固体充填采煤充实率设计与控制理论研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 64-71.
ZHANG Qiang, ZHANG Jixiong, JU Feng, et al. Backfill body's compression ratio design and control theory research in solid backfill coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 64-71.
- [8] 张强, 张吉雄, 王佳奇, 等. 充填开采临界充实率理论研究与工程实践[J]. 煤炭学报, 2017, 42(12): 3081-3088.
ZHANG Qiang, ZHANG Jixiong, WANG Jiaqi, et al. Theoretical research and its engineering practice on critical backfill ratio in backfill mining[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(12): 3081-3088.
- [9] 刘迅, 纪欣卓, 苗凯军. 深部充填沿空巷道护巷煤(岩)体受力特征及稳定性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 32-39.
LIU Xun, JI Xinzhuo, MIAO Kaijun. Stress characteristics and stability analysis of coal(rock) body in deep back-filling gob side entry[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2020, 37(1): 32-39.
- [10] 闫浩, 张吉雄, 鞠杨, 等. 上保护层开采下充实率控制裂隙发育规律及瓦斯抽采研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(6): 1262-1268.
- [11] YAN Hao, ZHANG Jixiong, JU Yang, et al. Fracture development rules controlled by backfill body's compression ratio and gas drainage technology under upper protective layer mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018, 35(6): 1262-1268.
- [12] LI Meng, MENG Guohao, ZHANG Jixiong, et al. Sensitivity analysis of key factors influencing compression-induced deformation of waste rocks for backfilling to reduce environmental pollution[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(14): 16707-16717.
- [13] 黄鹏, 张兴军, 郭宇鸣, 等. 充填体协同支架控顶效应研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 128-135.
HUANG Peng, ZHANG Xingjun, GUO Yuming, et al. Study on control effect of roof based on backfilling body cooperating with support[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2020, 37(1): 128-135.
- [14] 李猛, 张卫清, 李艾玲, 等. 矸石充填材料承载压缩变形时效性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 147-154.
LI Meng, ZHANG Weiqing, LI Ailing, et al. Experimental study on time-dependent compressive deformation of gangue backfilling materials[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2020, 37(1): 147-154.
- [15] 殷伟, 张强, 韩晓乐, 等. 混合综采工作面覆岩运移规律及空间结构特征分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 388-396.
YIN Wei, ZHANG Qiang, HAN Xiaole, et al. Overlying strata movement law and spatial structure analysis of fully mechanized mixed mining of backfilling and caving[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 388-396.
- [16] 陈洋, 李东, 姜福兴, 等. 深井特厚煤层充填开采防冲机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(5): 969-976.
CHEN Yang, LI Dong, JIANG Fuxing, et al. Prevention mechanism of rock burst in backfill mining in extra-thick coal seam with deep shaft[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2020, 37(5): 969-976.
- [17] 孙希奎. 矿山绿色充填开采发展现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 48-55.
SUN Xikui. Present situation and prospect of green backfill mining in mines[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 48-55.
- [18] 冯国瑞, 杜献杰, 郭霄霞, 等. 结构充填开采基础理论与地下空间利用构想[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 74-84.
FENG Guorui, DU Xianjie, GUO Yuxia, et al. Basic theory of constructional backfill mining and the underground space utilization concept[J]. Journal of the China Coal Society, 2019, 44(1): 74-84.
- [19] 周跃进, 陈勇, 张吉雄, 等. 充填开采充实率控制原理及技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(3): 351-356.
ZHOU Yuejin, CHEN Yong, ZHANG Jixiong, et al. Control principle and technology of final compression ratio of backfilling materials[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2012, 29(3): 351-356.
- [20] 张吉雄, 巨峰, 李猛, 等. 煤矿矸石井下分选协同原位充填开采方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 131-140.
ZHANG Jixiong, JU Feng, LI Meng, et al. Method of coal gangue

- separation and coordinated in-situ backfill mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 131-140.
- [20] 赵立胜. 固体充填液压支架自动控制系统研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- ZHAO Lisheng. Research on automatic control system of solid filling hydraulic support[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020.
- [21] 张强. 固体充填体与液压支架协同控顶机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- ZHANG Qiang. Roof control mechanism by coordination with back-filled body and backfill support in solid backfill mining technology [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [22] 张强, 张吉雄, 邵阳, 等. 充填采煤液压支架夯实离顶距影响因素研究[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(5): 757-764.
- ZHANG Qiang, ZHANG Jixiong, TAI Yang, et al. Study of factors influencing the gap between backfill hydraulic support and roof [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(5): 757-764.
- [23] 张强, 张吉雄, 吴晓刚, 等. 固体充填采煤液压支架合理夯实离顶距研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(8): 1325-1330.
- ZHANG Qiang, ZHANG Jixiong, WU Xiaogang, et al. Roof gap rationality research of backfilling-coal mining hydraulic support[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(8): 1325-1330.
- [24] 李猛. 矸石充填材料力学行为及控制岩层移动机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- LI Meng. Mechanical behaviour of gangue backfill material and control mechanism of strata movement [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.