



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

朱世彬,王晓东,许刚刚,等.堆积角对采空区充填墩柱承载力影响试验研究[J].煤炭科学技术,2021,49(7): 38-44. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.07.005

ZHU Shibin, WANG Xiaodong, XU Ganggang, *et al.* Experimental study on influence of stacking angle on bearing capacity of filling piers in gob [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49 ( 7 ): 38 - 44. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.07.005

## 堆积角对采空区充填墩柱承载力影响试验研究

朱世彬,王晓东,许刚刚,苗贺朝

(中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710000)

**摘 要:**高浓度浆液具有环保、节能、减排、安全、高效等特点,正逐步被认可与应用,其注入到采空区后通常形成支撑圆台,不同堆积角度圆台对上覆岩层的支撑效果不同,掌握堆积角度对圆台承载力影响规律至关重要。为研究堆积角度对圆台承载力的影响规律,利用 3D 打印技术进行模具制作。选取水泥为胶结材料,标准砂为骨料,胶结料和骨料质量比为 1 : 3,水和水泥质量比为 0.56 的高浓度浆液。将高浓度浆液浇筑到模具中,制作不同堆积角度圆台试样。高浓度浆液在模具中静置 1 d 后脱模,随后将试样放在水中进行养护,待龄期为 7 d 时,利用 WAW-300 微机控制电液伺服万能试验机,进行单轴抗压试验。结果表明:圆台直径和高度相同时,堆积角越小,极限承载能力越强。堆积角 30°、45°和 60°的受力-变形曲线上升阶段与经典受压应力-应变曲线一致,破坏过程均可分为 I 短暂弹性阶段、II 裂隙扩展阶段、III 维护结构失效阶段。不同堆积角圆台试样受压破坏过程相似,由于周围材料对受力核心区起到了提供围压的作用,使得堆积角越小,围压越大,圆台试样越不易被破坏。随着堆积角度的增大,试样单位体积承载力增大。不考虑墩柱的排布设计,只考虑其承载力算数和时,同一注浆量下,堆积角越大,承载效果越好。

**关键词:**大空洞采空区;高浓度浆液;充填墩柱;堆积角

**中图分类号:**TD315 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2021)07-0038-07

### Experimental study on influence of stacking angle on bearing capacity of filling piers in gob

ZHU Shibin, WANG Xiaodong, XU Ganggang, MIAO Hechao

(Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** High-concentration slurry has the characteristics of environmental protection, energy saving, emission reduction, safety, and high efficiency. It is gradually being recognized and applied. After being injected into the gob, the supporting truncated cone is usually formed. Different stacking angles have different supporting effects on overlying strata. And it is important to grasp the influence of the stacking angle on the bearing capacity of the truncated cone. In order to study the effect of the stacking angle on the bearing capacity of the truncated cone, 3D printing technology was used to make the mold. The cement was selected as the cementing material, standard sand as the aggregate, and the high-concentration slurry with the mass ratio of the cement and the aggregate of 1 : 3, and the mass ratio of the water to the cement of 0.56 was prepared. The high-concentration slurry was poured into the mold to prepare truncated cone samples of different stacking angles. The high-concentration slurry was released after being allowed to stand in the mold for 1 day, and then the samples were placed in water for curing. When the 7 days was reached, the uniaxial compression test was carried out by a WAW-300 microcomputer controlled electro-hydraulic servo universal testing machine. The test results show that when the diameter and height of the circular truncated cone are the same, the smaller the stacking angle, the stronger the ultimate bearing capacity. The ascending phases of the force-deformation curves with accumulation angles of 30°, 45° and 60° are consistent with the stress-strain curve during the classical compression.

**收稿日期:**2020-12-25; **责任编辑:**朱恩光

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51404295);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2016JM5056);中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金资助项目(2019XAYZD05, 2017XAYZD04)

**作者简介:**朱世彬(1987—),女,安徽五河人,助理研究员,博士。Tel:029-85576504, E-mail: zhushibin@cctegxian.com

sion process. The failure process can be divided into I transient elastic phase, II fracture expansion phase, III maintenance structure failure phase. The pressure failure process of the cone-shaped specimens with different stacking angles are similar. Due to the surrounding material's protection of the core area, the confining pressure is provided, so that the smaller the stacking angle, the larger the confining pressure, and the more difficult it is for the cone-shaped sample to be damaged. As the packing angle increases, the bearing capacity per unit volume of the sample increases. Regardless of the layout design of the piers, only the arithmetic sum of bearing capacities of all piers is considered. Under the same amount of grouting, the larger the stacking angle, the better the bearing effect.

**Key words:** large hollow gob; high concentration slurry; filled pier; stacking angle

## 0 引言

煤矿资源一直作为我国的主要资源被人们广泛开采与利用,受不同年代技术水平的限制,煤矿开采后遗留大量采空区,一方面严重影响矿井安全高效生产<sup>[1-3]</sup>,另一方面,随着现代化进程加快,很多桥梁、铁路、建筑等工程需要经过采空区,这些尚未治理的大空洞采空区成为威胁人们生活的主要因素,亟待治理<sup>[4-5]</sup>。实践证明,全充填注浆法是当前采空区治理的常用方法,具有施工简便、可根治、适用范围广等优势<sup>[6-9]</sup>,但由于全充填浆液浓度较低,流动性较强,所注浆液既充填采空区空洞,又充填采空区裂隙,且浆液经常通过裂隙流走,注浆方量巨大,浪费大。为进一步降低成本,高浓度浆液正逐步进入科研人员的视野<sup>[10-14]</sup>。高浓度浆液具有浓度高、黏度大、扩散距离有限等特点,因此,用其充填采空区既可防止浆液沿裂隙流走,又可以通过控制浆液配比和浓度等因素控制其扩散距离和堆积形态,并按设计需求对采空区进行局部支撑。目前,关于高浓度浆液输送性能方面已有大量研究。于润沧等<sup>[15]</sup>将流体参数和流变参数共同引入浆体颗粒的微观受力分析,建立了临界流态浓度的数学模型,提出了“临界流态浓度”的概念;王洪江等<sup>[16]</sup>研究了饱和率、泌水率、全尾砂级配对充填膏体性质的影响,发现当颗粒半径超过 70  $\mu\text{m}$  时,颗粒基本不具有保水性能,粒度为 20~98  $\mu\text{m}$  的尾砂颗粒对浆体的泌水性能影响较大;吴爱祥等<sup>[17-18]</sup>发现膏体充填料浆呈结构流流动,管道阻力损失随流速增大呈先减小再增大趋势,最佳流速受浆体流变性质和管道直径影响较大,添加泵送剂可改变膏体中颗粒之间的相互作用有效改善膏体浆液的流变性能;王新民等<sup>[19]</sup>提出一种基于变权重理论和 TOPSIS 的综合评价指标体系对全尾砂、移动式泵送及全尾砂废石 3 种胶结充填方式进行综合评判优选;张小瑞等<sup>[20]</sup>研究了不同浆液配比下 28 d 龄期标准试样充填体单轴抗压强度,发现黄磷渣与磷石膏最优质量比为 1:4, CaO 质量占比 5%,磷石膏膏体质量浓度为

67%~68%;程海勇等<sup>[21]</sup>通过标准单轴抗压试验对不同硫含量的膏体强度进行研究,发现含硫尾矿在一定程度上促进膏体早期强度增长抑制后期强度发育,硫含量越高,膏体后期强度劣化越显著。综上,对于高浓度浆液的研究主要集中在材料的优化配比<sup>[22-24]</sup>、浆料在管道中的流动特性<sup>[25-26]</sup>和高浓度浆液的标准抗压强度<sup>[20]</sup>方面,受浆液自身材料特性和注浆工艺等条件的影响,浆液注入到大空洞采空区后将形成不同堆积角度支撑圆台<sup>[27]</sup>,该圆台支撑效果受堆积角影响显著。而目前关于堆积角对圆台试样承载性能影响研究还比较少。因此,笔者利用 3D 打印技术制模,制作不同堆积角高浓度水泥砂浆圆台试样,进行无侧限抗压强度试验,研究不同堆积角对圆台承载力影响规律,为实际高浓度浆液充填采空区后形成的充填墩柱承载力研究和间距设计提供一定的试验依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验材料中胶结料为 PC325 复合型硅酸盐水泥,骨料为 ISO 试验标准砂,水为室内自来水,试验中胶结料和骨料质量比为 1:3,试验中水和水泥的质量比为 0.56。

### 1.2 试验方法

试验研究堆积角对高浓度浆液充填圆台强度的影响规律,利用 3D 打印技术,打印制作圆台试验模具来模拟不同堆积角充填圆台,模具为圆台形套筒,顶部内径为 50 mm,高度为 50 mm,模具堆积角度分别为 30°、45°、60°和 90°。按照浆液配比,配制高浓度浆液,将浆液倒入模具内,静置 1 d 后,脱模,将试样放在水中进行养护,待龄期为 7 d 时,利用 WAW-300 微机控制电液伺服万能试验机,进行单轴抗压试验,制成的试样照片如图 1 所示。每组试验制作 3 个平行试样,试验结果取平均值。

## 2 堆积角对充填墩柱承载力影响分析

### 2.1 堆积角对极限破坏力的影响

图 2 为不同堆积角对应的极限破坏力,由图 2

可知,堆积角对试样的单轴压缩极限破坏力影响较大,随着堆积角的减小,试样的极限破坏力增加。堆积角为  $90^\circ$  的圆柱样极限力最小,堆积角为  $60^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $30^\circ$  圆台样的极限破坏力分别为圆柱样极限破坏力的 2.3、3.3、4.5 倍左右。

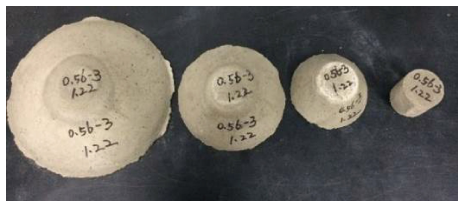


图 1 不同堆积角试样

Fig.1 Samples of different stacking angles

根据试验观察(图 3),圆台试样均存在 1 个圆柱形受力核心区,由于竖向加压,圆柱形受力核心区以外的试样受到拉应力作用,使得受力核心区与周围

(a) 堆积角  $60^\circ$ (b) 堆积角  $45^\circ$ (c) 堆积角  $30^\circ$ 

图 3 不同堆积角试样破坏

Fig.3 Samples damages of different stacking angles

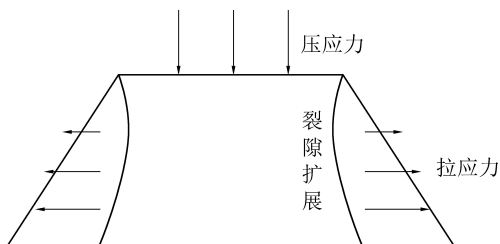


图 4 抗压过程破坏模式

Fig.4 Failure mode of compressed process

## 2.2 圆台试样破坏发展过程分析

堆积角  $90^\circ$  试样变形和受力关系如图 5 所示,由图 5 可知,当高浓度浆液充填墩柱试样堆积角为  $90^\circ$  时,即圆柱试样,其抗压过程中受力和变形曲线与典型的受压应力-应变曲线相近。

图 6 为典型的受压应力-应变曲线,  $x$  和  $y$  分别为

$$x = \varepsilon / \varepsilon_c \quad (1)$$

$$y = \sigma / f_c \quad (2)$$

其中:  $f_c$  为抗压强度;  $\varepsilon_c$  为与  $f_c$  对应的峰值应变;  $\sigma$  为强度;  $\varepsilon$  为应变。此典型曲线的几何特性可用数学条件描述:①  $x = 0, y = 0$ ;②  $0 \leq x < 1$ ,  $d^2y/dx^2 < 0$ , 即上升段曲线  $dy/dx$  单调减小,无拐

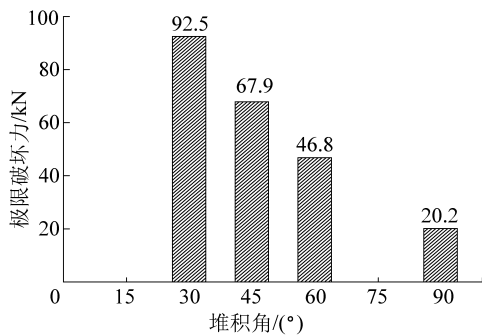
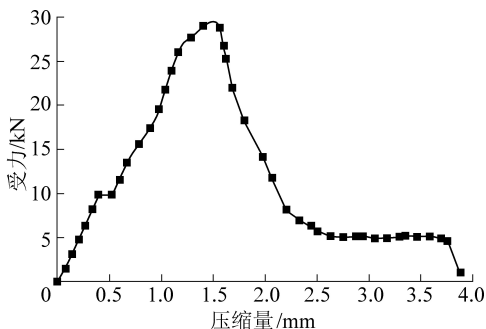


图 2 不同堆积角对应极限破坏力

Fig.2 Ultimate collapsing force of different stacking angles

材料分离,最终造成试样破坏。同时,正是由于周围材料对受力核心区提供围压,使得堆积角越小,围压越大,圆台试样的极限破坏力就越大。该过程的破坏模式,如图 4 所示。

图 5 堆积角  $90^\circ$  试样变形和受力关系Fig.5 Deformation and force relationship of sample with stacking angle of  $90^\circ$ 

点;③  $C$  点  $x = 1$  处,  $dy/dx = 0$  和  $y = 1$ , 曲线单峰;④  $D$  点  $d^2y/dx^2 = 0$  处坐标  $x_D > 1$ , 即下降段曲线上有一拐点;⑤  $E$  点  $d^3y/dx^3 = 0$  处坐标  $x_E (\geq x_D)$  为下降段曲线上曲率最大点;⑥ 当  $x \rightarrow \infty$  时,  $y \rightarrow 0$ ,  $dy/dx \rightarrow 0$ ;⑦  $x \geq 0, 0 \leq y \leq 1$ 。堆积角为  $90^\circ$  试样满足上述条件①③⑥⑦, 即曲线包括上升阶段、下降阶段和收敛阶段。上升阶段包括固有微裂隙几乎不变的短暂弹性阶段;荷载超过极限应力的 30% 后,微裂隙开始扩展并增大阶段;荷载超过极限应力的 70%~90% 后,微裂隙显著扩展并迅速增加,砂浆裂缝与黏着裂缝贯穿,应力达到峰值阶段。下降阶段



可见裂隙贯穿。收敛阶段,截面内裂缝之间的咬合力 and 摩擦力承受外力<sup>[29]</sup>。

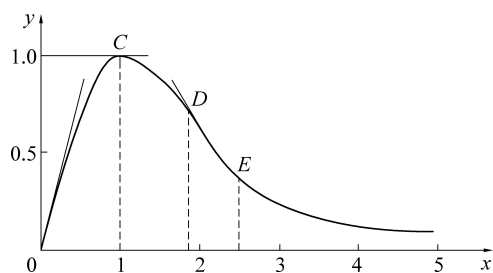


图6 典型的受压应力-应变全曲线<sup>[28]</sup>

Fig.6 Typical compressive stress-strain curve

堆积角 30° 试样变形和受力关系如图 7 所示,由图 7 可知,堆积角 30° 试样的受力和变形不完全满足经典受压应力-应变关系。第 1 个峰值之前,曲线与经典受压应力-应变曲线一致,说明:圆台试样在受压过程中与圆柱试样相同,同样要经过固有微裂隙几乎不变的短暂弹性阶段;微裂隙开始扩展并增大阶段;微裂隙显著扩展并迅速增加,砂浆裂缝与黏着裂缝贯穿,应力达到峰值阶段。此过程可从该试样变形和受力随时间变化关系(图 8)和该试样在不同时间节点下破坏图片(图 9)得到证实。同时,根据图 8 和图 9,可将堆积角 30° 试样的破坏过

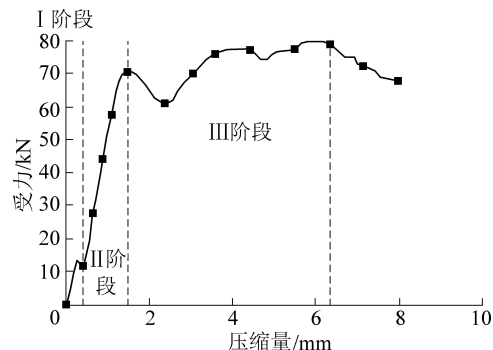


图7 堆积角 30° 试样变形和受力关系

Fig.7 Deformation and force relationship of sample with stacking angle of 30°

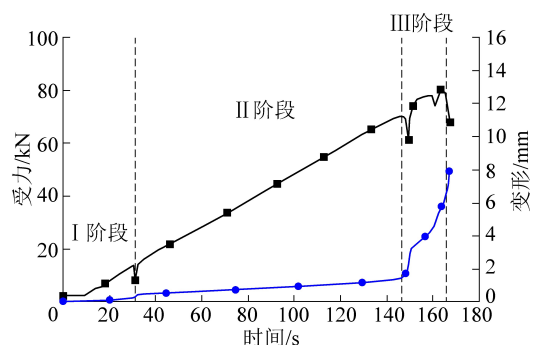


图8 堆积角 30° 试样变形和受力随时间变化

Fig.8 Relations of time with deformation and force of specimen with stacking angle of 30°

程分为 3 个阶段: I 短暂弹性阶段; II 裂隙扩展阶段; III 维护结构失效阶段。

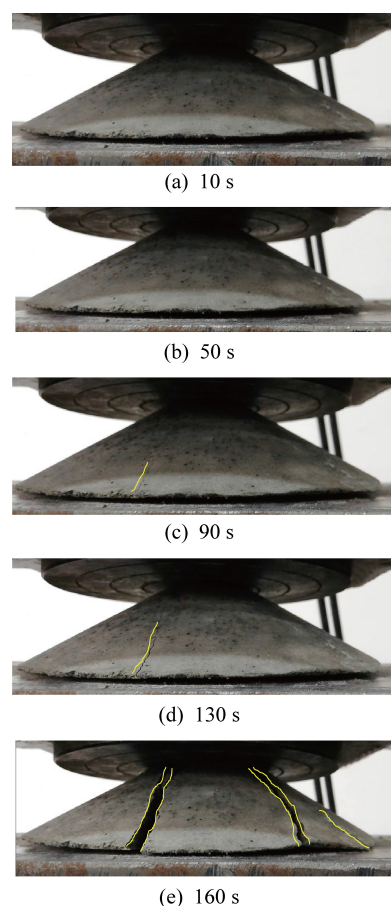


图9 堆积角 30° 试样在不同时间节点下破坏

Fig.9 Sample destruction at different time points with stacking angle of 30°

不同堆积角试样变形和受力关系汇总曲线如图 10 所示。

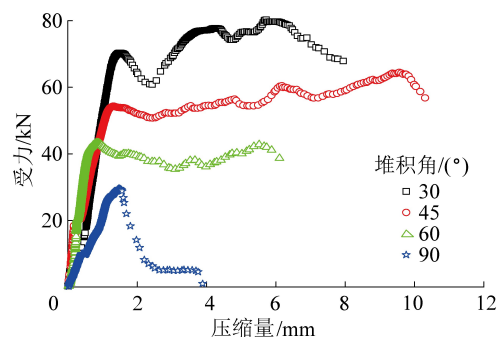


图10 不同堆积角试样变形和受力关系

Fig.10 Deformation and force relationship curves of different stacking angle specimens

可见,堆积角 30°、45° 和 60° 规律相似,即曲线上升阶段与经典受压应力-应变曲线一致,破坏过程均为 I 短暂弹性阶段; II 裂隙扩展阶段; III 维护结构失效阶段。随着堆积角减小,曲线第 1 个峰值变

大,受力也整体增加。说明:不同堆积角圆台试样受压破坏过程相似,由于周围材料对受力核心区提供围压,使得堆积角越小,围压越大,圆台试样越不易被破坏。

3 应用性分析

不同堆积角对应的极限抗压结果表明,角度越小,极限承载能力越强。顶面直径和高度相同时,堆积角为 60°、45°和 30°圆台试样的极限破坏力以圆柱试样极限破坏力为基准成倍增长。工程项目设计中需要根据承载需求和经济成本选择适合的高浓度浆液充填堆积角进行采空区充填。对试样体积和试样所承受极限破坏力进行归一化处理,将不同堆积角对应的试样体积分别除以堆积角为 90°时的试样体积,将不同堆积角试样的极限破坏力分别除以堆积角为 90°时的试样极限破坏力,结果见表 1。可见,堆积角越小,试样体积越大,所需材料越多,且堆积角为 60°、45°和 30°的体积分别是堆积角 90°(圆柱)试样的 2.60、4.33、8.46 倍。虽然 60°、45°和 30°圆台试样的极限破坏力也以堆积角 90°(圆柱)试样为基准成倍增长至 2.32、3.36、4.58 倍,但其增长速度远小于材料消耗速度。

表 1 试样体积和极限破坏力归一化统计

Table 1 Normalization statistics of sample volume and ultimate destructive force

堆积角/(°)	30	45	60	90
归一化体积	8.46	4.33	2.60	1.00
归一化极限破坏力	4.58	3.36	2.32	1.00

利用公式(3)计算试样的单位体积承载力,不同角度试样单位体积承载力  $\kappa$  见表 2。

$$\kappa = F/V \tag{3}$$

式中:  $F$  为试样所承受的极限破坏力, kN;  $V$  为试样体积,  $m^3$ 。

表 2 试样单位体积承载力归一化统计

Table 2 Normalized statistics of sample unit volume bearing capacity

堆积角/(°)	30	45	60	90
单位体积承载力/ ( $10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1.11	1.60	1.84	2.06
归一化承载力	0.54	0.78	0.89	1.00

由表 2 可知,随着堆积角度的增大,试样单位体积承载力增大。对试样单位体积承载力进行归一化处理,将不同堆积角对应的试样单位体积承载力分别除以堆积角为 90°时的试样单位体积承载力,明显发现堆积角 30°、45°和 60°圆台样的单位体积承

载力仅为 90°(圆柱)试样单位体积承载力的 0.54、0.78 和 0.89。说明,堆积角越大,试样内部材料性能发挥越好。假设注浆量为  $1 \text{ m}^3$ ,计算可形成不同堆积角试样数量,以及对应的最大承载力算数和,具体见表 3。由表 3 可知,不考虑墩柱的排布设计,只考虑其承载力算数和时,同一注浆量下,堆积角越大,承载效果越好。

表 3 不同堆积角试样数量和最大承载力算术和

Table 3 Number of samples with different stacking angles and arithmetic sum of maximum bearing capacity

堆积角/(°)	30	45	60	90
试样数量/个	1 203	2 350	3 923	10 185
承载力/kN	111 277.5	159 565.0	183 596.4	205 737.0

因此,在进行工程设计,考虑节约成本,控制注浆量时,采空区内充填墩柱应尽量注成堆积角度较大的情况。同时,根据圆台试样受力变形关系结果,即应力达到峰值后圆台试样核心受力圆柱迅速被剥离出来,该圆柱成为塑性体,受力曲线不再收敛,在进行充填柱体设计时,应考虑给承载力乘以一定的系数,防止充填柱体到达极限荷载时突然成为塑性体,失去承载能力,造成地表大规模变形。

4 结 论

1)圆台直径和高度相同时,堆积角越小,极限承载能力越强。

2)堆积角 30°、45°和 60°的受力-变形曲线上升阶段与经典受压应力-应变曲线一致,破坏过程可分为 I 短暂弹性阶段; II 裂隙扩展阶段; III 维护结构失效阶段。不同堆积角圆台试样受压破坏过程相似,由于周围材料对受力核心区提供围压,使得堆积角越小,围压越大,圆台试样越不易被破坏。

3)随着堆积角度的增大,试样单位体积承载力增大。不考虑墩柱的排布设计,只考虑其承载力算数和时,同一注浆量下,堆积角越大,承载效果越好。

参考文献(References):

[1] 李春元,王泓博,石瑶玉. 上覆遗留区段煤柱对下伏煤层开采扰动影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(3):232-239.  
LI Chunyuan, WANG Hongbo, SHI Yaoyu. Study on disturbing influence of overlying remaining coal pillars on underlying coal seam mining[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(3): 232-239.

[2] 贺安民. 神东矿区旺采采空区失稳危险分级方法研究[J]. 煤矿开采, 2013, 18(1):70-72.  
HE Anmin. Classification method of wongawilli gob unstability danger in Shendong Mining Aera[J]. Coal Mining Technology,

- 2013, 18(1):70-72.
- [3] 刘成勇. 房柱式采空区对下分层复采矿压显现的影响规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(5):41-49.  
LIU Chengyong. Study on influence law of room and pillar gob on pressure behavior of lower seam mining[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(5):41-49.
- [4] 胡炳南, 郭文砚. 我国采煤沉陷区建筑利用关键技术及展望[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4):67-74.  
HU Bingnan, GUO Wenyan. Key technologies and expectation of building utilization in coal mining subsidence areas in China[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4):67-74.
- [5] 朱德福, 屠世浩, 王方田, 等. 浅埋房式采空区煤柱群稳定性评价[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2):390-397.  
ZHU Defu, TU Shihao, WANG Fangtian, *et al.* Stability evaluation on pillar system of room and pillar mining in goaf at shallow depth seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2):390-397.
- [6] 童立元, 刘松玉, 邱钰, 等. 高速公路下伏采空区问题国内外研究现状及进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7):1198-1202.  
TONG Liyuan, LIU Songyu, QIU Yu, *et al.* Current research state of problems associated with mined-out regions under expressway and future development[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7):1198-1202.
- [7] 苟德明, 田娇, 李佳佳, 等. 高速公路隧道下伏小煤窑采空区洞内注浆处治技术[J]. 林业工程学报, 2018, 3(5):152-159.  
GOU Deming, TIAN Jiao, LI Jiajia, *et al.* Grouting treatment technology of small coal mine goaf beneath expressway tunnel[J]. Journal of Forestry Engineering, 2018, 3(5):152-159.
- [8] 朱宜生, 刘松玉, 童立元, 等. 高速公路下伏富水多层采空区注浆处理技术研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(4):37-40.  
ZHU Yisheng, LIU Songyu, TONG Liyuan, *et al.* Study on grouting technique for treating multilayered underground mining openings filled with water under highway[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, 23(4):37-40.
- [9] 李西凡, 熊祖强, 孙亚鹏, 等. 薄煤层充填开采动态监测及工艺参数优化研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(6):37-41.  
LI Xifan, XIONG Zuqiang, SUN Yapeng, *et al.* Dynamic monitoring and optimization of technological parameters in thin coal seam filling mining[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(6):37-41.
- [10] 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.
- [11] 邓喀中, 谭志祥, 张宏贞. 长壁开采老采空区带状注浆设计方法[J]. 煤炭学报, 2008, 33(2):153-156.  
DENG Kazhong, TAN Zhixiang, ZHANG Hongzhen. Design method of strip grouting for old long wall mining goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(2):153-156.
- [12] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 资源与环境协调(绿色)开采[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1):1-7.  
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Green mining of coal resources harmonizing with environment[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1):1-7.
- [13] 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, 45(7):1-9.  
WU Aixiang, WANG Yong, WANG Hongjiang. Status and prospects of the paste backfill technology[J]. Metal Mine, 2016, 45(7):1-9.
- [14] 周爱民, 古德生. 基于工业生态学的矿山充填模式[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2004, 35(3):468-472.  
ZHOU Aimin, GU Desheng. Based on industrial ecology mine filling mode[J]. Journal of Central South University of Technology(Natural Science), 2004, 35(3):468-472.
- [15] 于润沧. 我国胶结充填工艺发展的技术创新[J]. 中国矿山工程, 2010, 39(5):1-3.  
YU Runcang. Development and innovation of cemented filling technology in China[J]. China Mine Engineering, 2010, 39(5):1-3.
- [16] 王洪江, 李辉, 吴爱祥, 等. 基于全尾砂级配的膏体新定义[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2014, 45(2):557-562.  
WANG Hongjiang, LI Hui, WU Aixiang, *et al.* New paste definition based on grading of full tailings[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(2):557-562.
- [17] 杨鹏, 吴爱祥, 王洪江, 等. 泵送剂对膏体料浆流动性能作用的微结构模型[J]. 有色金属(矿山部分), 2015, 67(1):59-64.  
YANG Peng, WU Aixiang, WANG Hongjiang, *et al.* Microstructure model of paste slurry rheological properties with pumping admixture[J]. Nonferrous Metals(Mine Section), 2015, 67(1):59-64.
- [18] 吴爱祥, 刘晓辉, 王洪江, 等. 结构流充填料浆管道输送阻力特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(12):4325-4330.  
WU Aixiang, LIU Xiaohui, WANG Hongjiang, *et al.* Resistance characteristics of structure fluid backfilling slurry in pipeline transport[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(12):4325-4330.
- [19] 王新民, 李天正, 陈秋松, 等. 基于变权重理论和TOPSIS的充填方式优选[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(1):198-203.  
WANG Xinmin, LI Tianzheng, CHEN Qiusong, *et al.* Filling way optimization based on variable weight theory and TOPSIS[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(1):198-203.
- [20] 张小瑞, 赵国彦, 李地元, 等. 磷石膏膏体充填材料强度优化配比试验研究[J]. 矿冶工程, 2015(4):9-11.  
ZHANG Xiaorui, ZHAO Guoyan, LI Di yuan, *et al.* Experimental study on optimization of phosphogypsum plaster mix proportion for backfill strength[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2015(4):9-11.

- [21] 程海勇, 吴爱祥, 王洪江, 等. 高硫膏体强度劣化机理实验研究[J]. 工程科学学报, 2017(10):34-38.  
CHENG Haiyong, WU Aixiang, WANG Hongjiang, *et al.* Experimental study on the strength deterioration of sulfidic paste backfill [J]. Chinese Journal of Engineering, 2017(10):34-38.
- [22] 刘同有, 周成浦, 金铭良, 等. 充填采矿技术与应用[M]. 北京:冶金工业出版社, 2001.
- [23] 王新民, 古德生, 张钦礼. 深井矿山充填理论与管道输送技术[M]. 长沙:中南大学出版社, 2010.
- [24] 王洪江, 王 勇, 吴爱祥, 等. 从饱和率和泌水率角度探讨膏体新定义[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(6):85-89.  
WANG Hongjiang, WANG Yong, WU Aixiang, *et al.* Research of paste new definition from the viewpoint of saturation ratio and bleeding rate[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(6):85-89.
- [25] WU A, WANG Y, WANG H, *et al.* Coupled effects of cement type and water quality on the properties of cemented paste backfill [J]. International Journal of Mineral Processing, 2015, 143: 65-71.
- [26] 王 勇, 吴爱祥, 王洪江, 等. 从屈服应力角度完善膏体定义[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(7):855-860.  
WANG Yong, WU Aixiang, WANG Hongjiang, *et al.* Further development of paste definition from the viewpoint of yield stress [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(7):855-860.
- [27] 朱世彬. 高浓度胶结材料在空洞型采空区中的堆积扩散规律试验研究[J]. 能源与环保, 2018, 272(8):77-81.  
ZHU Shibin. Experimental study on accumulation and diffusion laws of high concentration cementitious materials in gobbs of large caverns[J]. China Energy and Environmental Protection, 2018, 272(8):77-81.
- [28] 曹居易. 混凝土的应力应变关系[J]. 四川建筑科学研究, 1979(1):4-14.  
CAO Juyi. Stress-strain relationship of concrete[J]. Sichuan Architectural Science Research, 1979(1):4-14.
- [29] 李义强, 王新敏, 陈士通. 混凝土单轴受压应力-应变曲线比较[J]. 公路交通科技, 2005, 22(10):75-78.  
LI Yiqiang, WANG Xinmin, CHEN Shitong. Comparison of stress-strain curves for concrete under uniaxial stresses[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(10):75-78.