掺粗骨料膏体充填料浆输送性能与充填体强度优化研究*

李创起[1],祝鑫[2,3],赖伟[2,3],彭亮[2,3],王英乐[2,3],李文波[2,3]

(1.平顶山工业职业技术学院, 河南 平顶山市 467001;
2.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
3.金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012)

摘要:膏体充填料浆输送性能与充填体强度是充填工艺的重要内容,为探究某矿山掺粗骨料膏体充填料浆输送性能和充填体强度演化规律,运用响应面分析方法开展了充填料浆流动性试验和充填体强度配比试验,基于响应面试验结果分析了粗骨料掺量、灰砂比、质量浓度等单因素及多因素交互作用对充填料浆输送性能及充填体强度的影响。研究结果表明:在单一因素影响下,对于充填体强度而言,敏感度因素从大到小依次为灰砂比、质量浓度、粗骨料掺量,对于充填料浆坍落度而言,敏感度因素从大到小依次为粗骨料掺量、质量浓度、灰砂比;基于响应面法建立了充填料浆坍落度和充填体强度配比的响应回归模型,模型预测值与试验值有较好的线性关系,模型的拟合度高、可靠性高;质量浓度和灰砂比交互作用对充填体强度影响最为显著,粗骨料掺量和质量浓度交互作用对料浆坍落度影响最为显著;对充填体强度和充填料浆坍落度进行了参数优化,最终得到优化后的参数为:粗骨料掺量30.7%、灰砂比1∶6、质量浓度82%,该参数下充填体强度和料浆坍落度试验值与预测值误差均在5%以内,验证了应用响应面分析法对充填体强度和充填料浆坍落度进行优化是可靠的。

关键词:粗骨料;料浆输送性能;充填体强度;响应面法;交互作用

中图分类号:TD853.34 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)07-0109-09

Study on Transport Performance of Paste Filling Slurry with Coarse Aggregate and Optimization of Backfill Strength

LI Chuangqi[1], *ZHU Xin*[2,3], *LAI Wei*[2,3], *PENG Liang*[2,3], *WANG Yingle*[2,3], *LI Wenbo*[2,3]

(1.Pingdingshan Polytechnic College, Pingdingshan, Henan 467001, China;
2.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
3.State Key Laboratory of Metal Mine Safety Technology, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: The transport performance of paste filling slurry and the backfill strength are important contents of filling process. In order to explore the transport performance of paste filling slurry with coarse aggregate and the evolution law of backfill strength in a mine, the response surface method was used to carry out the fluidity test of filling slurry and strength ratio experiment of backfill. Based on the response surface test results, the effects of single factor and multiple factors interaction such as proportion of coarse aggregate, cement-sand ratio and mass concentration on the transport performance of the filling slurry and the strength of the backfill were analyzed. The results are shown as follows. Firstly, under the influence of a single factor, the sensitivity factors of backfill strength from large to small are cement-sand ratio, mass concentration and proportion of coarse aggregate; for the slump of filling slurry, the sensitivity factors from large to small are the proportion of coarse aggregate, mass concentration and cement-sand ratio. Secondly, based on the response surface method, the response regression model of the slump of filling slurry and backfill strength was established. The predicted value of the model has a good linear relationship with the test value, and the model has high fitting degree and high reliability. Thirdly, the interaction between mass concentration and cement-sand ratio has the most significant influence on backfill strength, the interaction of proportion of

* **收稿日期**:2024-09-11
基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2904003,2023YFC2907203);湖南省高新技术产业科技创新引领计划项目(2022GK4057);湖南省自然资源厅科技项目(2022-40)
作者简介:李创起(1984—),男,河南襄城人,硕士,副教授,主要从事矿山安全、矿井通风技术等相关教学与科研工作。E-mail:0510010123@163.com
通信作者:祝鑫(1995—),男,湖北十堰人,硕士,工程师,主要从事金属矿山开采及充填系统技术研究。E-mail:1056986271@qq.com

slump and mass concentration has the most significant effect on the slump of filling slurry. Finally, the parameters of backfill strength and slump of filling slurry has been optimized as follows, proportion of slump of 30.7%, cement-sand ratio of 1∶6, and mass concentration of 82%. Under this condition, the errors between the experimental values and the predicted values of the backfill strength and the slump of filling slurry are within 5%, which verifies that the application of the response surface analysis method in optimizing backfill strength and filling slurry slump is reliable.

Key words:Coarse aggregate, Transport performance of slurry, Backfill strength, Response surface method, Interaction

0 引言

充填采矿法具有高回采率、低贫化率、有效保障矿山井下作业安全[1-2]、维护地表环境等优点[3-4],近年来成为越来越多金属矿山乃至非金属矿山的首选采矿方法[5-8]。膏体充填料浆输送与强度是充填工艺的重要内容[9-10],直接影响充填料浆能否顺利到达采场以及能否满足正常采矿作业的强度要求。

为了探究膏体充填料浆输送性能和充填体强度特性,国内外众多学者做了大量的研究工作。常英杰等[11]开展了管径、弯管角度、弯径比等多因素变化下充填料浆输送对充填管道磨损的试验,指出交互作用下管道的弯径比和管径对磨损起决定性作用。邓高岭等[12]为解决长距离输送面临的停泵问题,提出了水泥与非胶结料浆分流输送、间断制备的工艺,实现了长距离低阻力、低能耗、稳定输送。许宏图等[13]以煤矸石、脱硫石膏、粉煤灰等为原料制备复合充填骨料,研究了不同煤矸石细骨料掺量、粉煤灰掺量等对复合充填料浆的流动性能和流变性能的影响。孙凯华等[14]采用正交试验,探究了质量浓度、级配、静置时间等因素对煤矸石充填料浆流变特性的影响,给出了适用于某煤矿的最优配比为质量浓度72%、颗粒级配4.74~1.18 mm。李涛等[15]运用极差分析、方差分析等多种试验方法,发现了影响煤基固废充填料浆流变特性的显著性影响因素,并建立了料浆输送的固体颗粒沉降模型,提出了长距离输送过程中稳定浆体的方法。于泰鹏等[16]以湖南某矿山为例,采用全面法设计,在相同灰砂比情况下,使用胶固粉的充填体强度较使用水泥时提高1倍,可以很好地适应采矿方法的要求。李坤等[17]基于矿山尾砂基本性质,指出添加20%碎石砂在灰砂比提高时,能有效提升充填体强度,尤其是早期充填体强度。盛宇航等[18]采用全尾砂、分级尾砂、底流浓密后的尾砂进行多组配比,开展了不同粒径组成的充填料浆流变性能和充填体强度试验,指出细粒级尾砂最优含量为44%,此时料浆流动性能及充填体强度达到最优。蔡发雄等[19]对不同质量浓度、灰砂比和养护龄期的充填体开展巴西劈裂试验,揭示了充填体强度随灰砂比的增加而增加,充填体能量耗散随龄期的增长而增大的规律。郝建帅等[20]将脱硫石膏、水泥熟料、矿粉、粉煤灰等进行配比组合,研发了基于钢渣基的胶凝材料,能够大幅提高充填体后期强度,可以有效防控煤矿岩爆的威胁。

上述研究成果丰富了膏体充填料浆输送性能和充填体强度的研究进展,但多数成果聚集于研究单一尾砂或者煤矸石等对料浆流动特性和充填体强度的影响,未考虑多种充填材料及其混合比例在多因素交互作用下的变化规律。因此,本文在先前学者的研究基础上,试验研究粗骨料掺量、灰砂比、质量浓度等多因素交互耦合作用对膏体充填料浆的输送性能和充填体强度的影响,以期为矿山生产实际提供参考。

1 矿山概况

某矿山主要开采矿种为铁矿,采选规模为350万t/a,矿山已开采多年,遗留了大量的采空区,总空区规模超过200万m^3。矿山建设有充填系统,总体流程为选厂15%~20%的尾矿浆通过管道泵送至膏体充填制备站浓密机中,在途中设计一段加压接力泵站。进入充填站的尾砂由浓密机浓缩成质量浓度大于68%的高质量浓度料浆,再通过渣浆泵由管道输送至一段卧式搅拌机;选厂在矿石预分选工序中产生的废石经颚式破碎-中碎-筛分-干磁选-细碎-筛分后形成粒度较均匀的粗骨料,由卡车运输至充填站,经缓冲仓及大倾角皮带机输送至骨料仓,再经圆盘给料机、皮带秤给料、计量后输送至一段搅拌机;粉煤灰通过罐车运输至充填站,采用气力输送至粉煤灰仓,仓底设微粉秤控制给料,再输送至一段搅拌机;散装水泥经气力输送至水泥仓,仓底设微粉秤控制给料,再输送至一段搅拌机。上述所有

物料在一段搅拌机内搅拌混合后,再进入二段双螺旋搅拌机进一步活化搅拌;拌合均匀后的物料经充填工业泵、充填孔及管道充填至井下空区。

2 充填材料

充填骨料包含选厂全尾砂、破碎废石(8 mm 以下),根据室内试验结果,全尾砂真密度为 2.97 g/cm^3,松散容重、密实容重分别为 1.43 g/cm^3、1.68 g/cm^3,松散孔隙率、密实孔隙率分别为 51%、43%。尾砂粒级整体偏细,粒径小于 74 μm 的颗粒占比约 83%,50%含量以下的全尾砂粒径在 26.07 μm 以下,且全尾砂中 20 μm 以下的颗粒含量较高,约占 44%,采用全尾砂作为骨料能够保证充填料浆长距离输送,同时,后续加入一定比例的粗骨料,充填料浆依然能够满足长距离稳定输送。根据化学成分分析,全尾砂主要组成元素为 Si、Fe、Ca、Mg 等,SiO_2 含量约为 54%,利于充填体强度发展。图 1 展示了全尾砂粒径的分布情况。

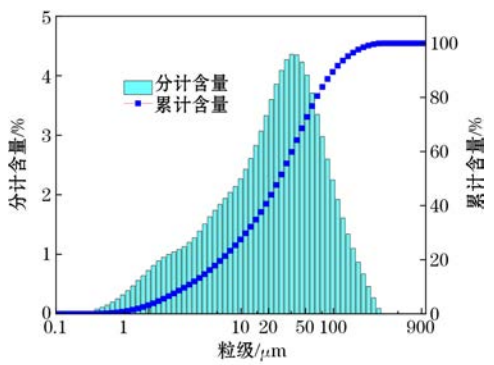


图 1 全尾砂粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of unclassified tailings

3 试验方案及结果

3.1 试验方法

(1) 坍落度测试。坍落度测试是了解充填料浆和易性和输送性能的重要试验,能够掌握充填料浆的流动性能,对于充填料浆保水性和黏聚性也可以做出判断。测定充填料浆坍落度时,首先称取尾砂、粗骨料、水泥等物料,然后将其混合使用搅拌机搅拌均匀,观察料浆性状,再将料浆放入标准的坍落度筒内,摇晃振实料浆,再快速拔出,料浆由于自重塌落,最后测定坍落度筒顶部至料浆顶部的距离,即为坍落度值。

(2) 试块制作与测试。按照试验设计方案对尾砂、粗骨料、水泥、水等充填材料进行计量,计量后导入搅拌桶内搅拌均匀,然后倒入标准三联试块模具,待其初凝后进行脱模处理,放入养护箱进行养护,养护至测定龄期(7 d),则利用 NYL-300D 型压力试验机测定其单轴抗压强度,多次测量后取平均值。

3.2 试验设计及结果

以粗骨料掺量、灰砂比、充填料浆质量浓度为影响因素,以充填体强度、坍落度为评价指标,分别测试单因素以及多因素交互作用下的坍落度和充填体强度。粗骨料掺量设计为 15%、25%、35%,灰砂比设计为 1∶6、1∶10、1∶20,充填料浆质量浓度设计为 78%、80%、82%,试验设计及结果见表 1。

表 1 试验设计及结果

Table 1 Experimental design and results

序号	粗骨料掺量/%	灰砂比	质量浓度/%	充填体强度/MPa	坍落度/cm
1	25	1∶20	78	0.30	27.2
2	25	1∶20	82	0.42	25.0
3	35	1∶10	78	1.11	27.4
4	25	1∶6	82	4.00	25.0
5	15	1∶10	82	1.62	16.0
6	35	1∶10	82	1.81	26.8
7	25	1∶10	80	1.28	27.0
8	25	1∶10	80	1.28	27.0
9	15	1∶20	80	0.44	21.0
10	35	1∶6	80	2.95	27.5
11	15	1∶10	78	1.04	27.0
12	25	1∶10	80	1.28	27.0
13	15	1∶6	80	3.52	20.1
14	25	1∶10	80	1.28	27.0
15	25	1∶6	78	1.87	28.2
16	15	1∶20	80	0.56	21.6

3.3 试验模型及方差分析

对充填体强度和充填料浆坍落度试验结果进行分析,分别建立了强度 Y_1 和坍落度 Y_2 与不同粗骨料掺量(A)、灰砂比(B)、质量浓度(C)的回归方程:

$$Y_1=1.28-0.023A-1.33B+0.441C+0.173AB+0.03AC-0.503BC+0.168A^2+0.42B^2-0.0523C^2$$

$$Y_2=27+2.4A-0.75B-2.13C-1.7AB+2.6AC+0.25BC-3.25A^2-1.2B^2+0.55C^2$$

为了验证所建立模型的可靠性,对充填体强度和充填料浆坍落度分别进行方差分析,结果见表 2 和表 3。

表 2 充填体强度方差分析

Table 2 Variance analysis of backfill strength

来源	平方和	均方	F 值	P 值
模型	17.62	1.96	60.74	<0.000 1*
A	0.004 5	0.004 5	0.14	0.721 1
B	14.1	14.1	437.3 2	<0.000 1
C	1.56	1.56	48.32	0.000 4
AB	0.119	0.119	3.69	0.103 1
AC	0.003 6	0.003 6	0.111	0.749 6
BC	1.01	1.01	31.33	0.001 4
A^2	0.112 2	0.112 2	3.48	0.111 3
B^2	0.705	0.705	21.89	0.003 4
C^2	0.011	0.011	0.342	0.58
残差	0	0	—	—

注:* 表示影响显著,下同。

表 3 充填料浆坍落度方差分析

Table 3 Variance analysis of slump of filling slurry

来源	平方和	均方	F 值	P 值
模型	174.77	19.42	14.41	0.002 1*
A	46.08	46.08	34.20	0.001 1
B	4.5	4.5	3.34	0.117 4
C	36.13	36.13	26.81	0.002 1
AB	11.56	11.56	8.58	0.026 3
AC	27.04	27.04	20.7	0.004 2
BC	0.25	0.25	0.185	0.681 7
A^2	42.25	42.25	31.35	0.001 4
B^2	5.76	5.76	4.27	0.084 2
C^2	1.21	1.21	0.89	0.379 9
残差	0	0	—	—

由表 2、表 3 可以看出,两个回归模型的 F 值较大,分别为 60.74 和 14.41,P 值较小,分别为<0.000 1 和 0.002 1,回归模型显著性高,且两个模型的拟合度 R^2 分别为 0.97 和 0.91,表明模型的拟合度高,因此,两个回归模型的可靠性高。

3.4 模型误差分析

图 2、图 3 分别展示了由 Design Expert 软件绘制的充填体抗压强度和充填料浆坍落度的实际值与预测值之间的关系曲线。

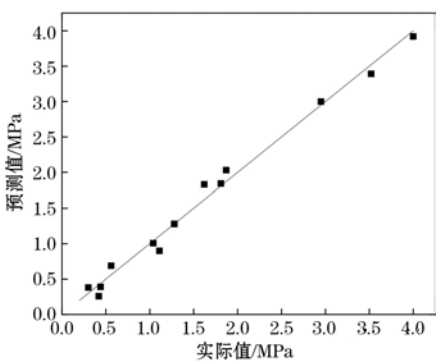


图 2 充填体强度模型预测值与实际值

Fig.2 Predicted value and actual value of backfill strength

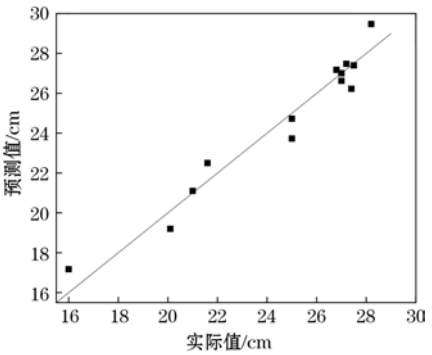


图 3 料浆坍落度模型预测值与实际值

Fig.3 Predicted value and actual value of slurry slump

由图 2、图 3 可以看出,充填体强度和充填料浆坍落度的实际值与模型预测值相近,呈现较好的线性关系,表明两者的误差较小,因此,验证了所建立的模型具有良好的指导作用。

4 试验结果分析

4.1 单因素影响规律

图 4 展示了在不同粗骨料、不同灰砂比、不同质量浓度下充填体强度和充填料浆坍落度的变化情况。

由图 4(a)和图 4(b)可以看出,在质量浓度为 80%、灰砂比 1∶10 时,粗骨料掺量从 15%增加至 35%,充填体强度不断增加,充填料浆坍落度也不断增加,流动性增强;由图 4(c)和图 4(d)可以看出,在粗骨料掺量为 25%、质量浓度为 80%时,灰砂比从 1∶20 增加至 1∶6,充填体强度不断增加,充填料浆坍落度不断降低,流动性减弱;由图 4(e)和图 4(f)可以看出,在粗骨料掺量为 25%、灰砂比1∶10时,质量浓度从 80%增加至 82%,充填体强度不断增加,充填料浆坍落度不断降低,流动性也减弱。

同时由表 2 和表 3 的充填体强度和充填料浆坍落度方差分析结果可以看出,对于充填体强度而言,灰砂比对应的 F 值最大,粗骨料掺量对应的 F 值最小,即充填体强度对灰砂比的变化最为敏感,对粗骨料掺量的变化最不敏感,敏感度从大到小依次为灰砂比、质量浓度、粗骨料掺量;对于充填料浆坍落度而言,粗骨料掺量对应的 F 值最大,灰砂比对应的 F 值最小,即充填料浆坍落度对粗骨料掺量的变化最为敏感,对灰砂比的变化最不敏感,敏感度从大到小依次为粗骨料掺量、质量浓度、灰砂比。

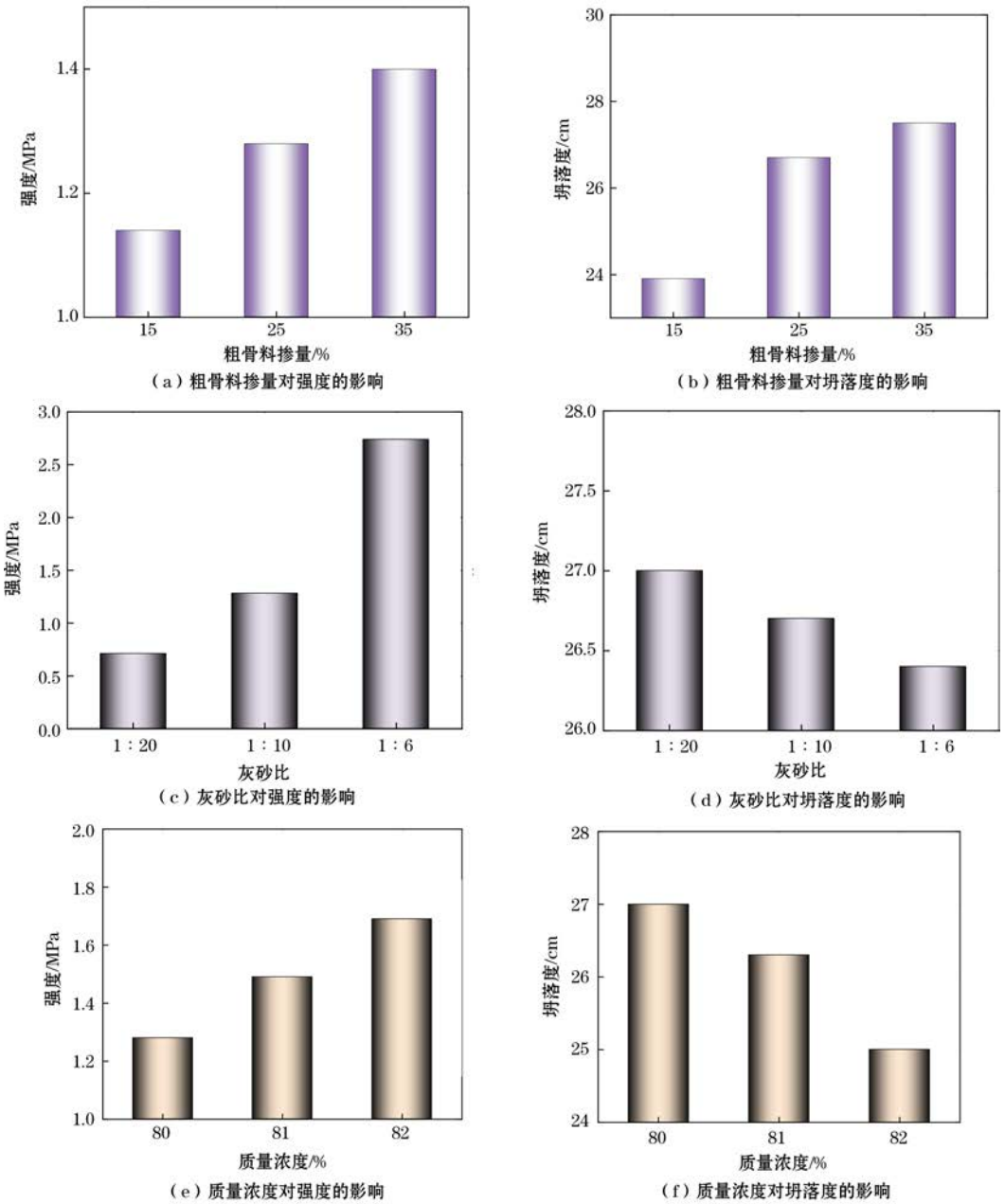


图 4 单因素作用下充填体强度和料浆坍落度变化情况

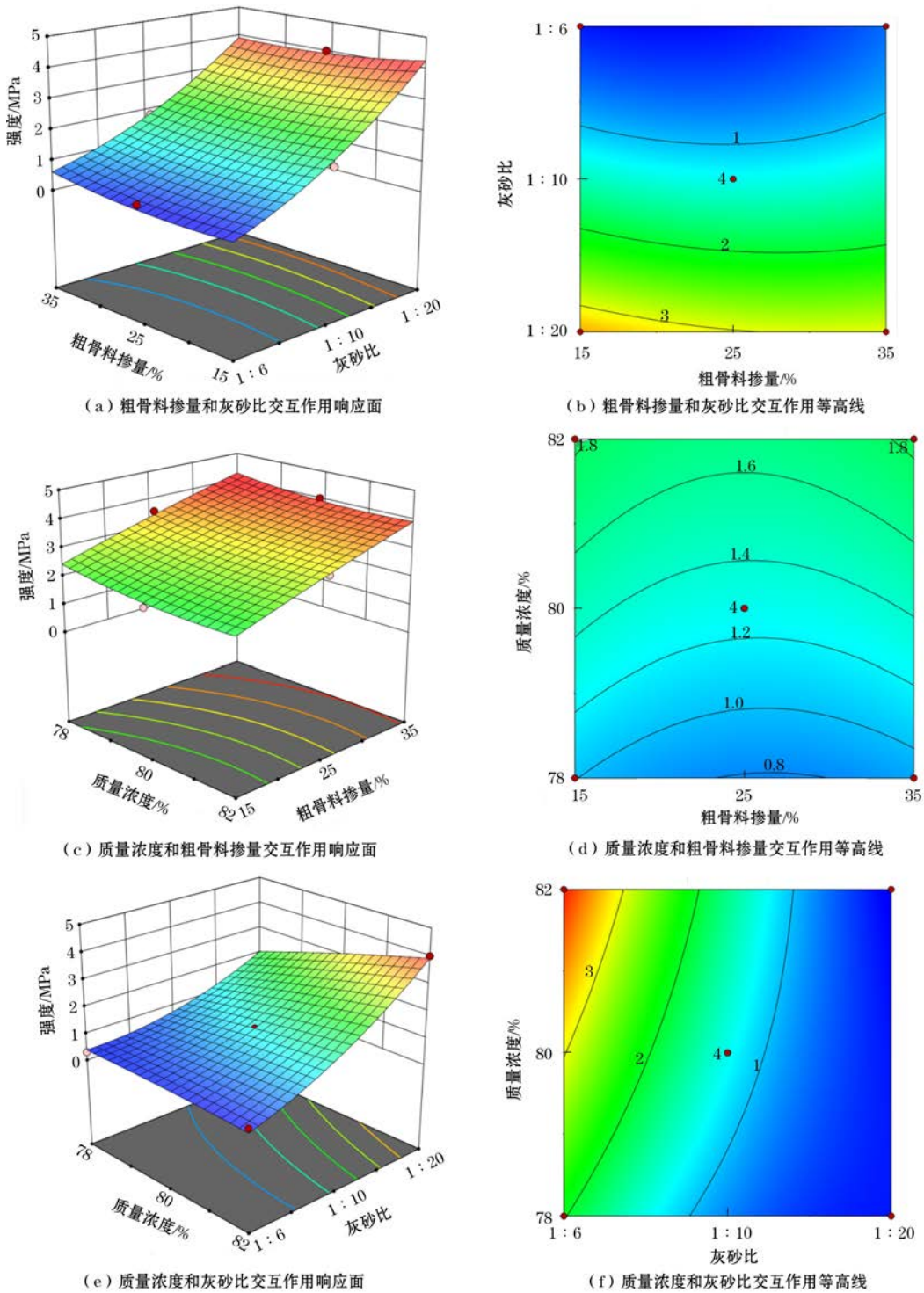
Fig.4 Changes of backfill strength and slurry slump under single factor

4.2 多因素交互作用影响规律

4.2.1 交互作用对充填体强度影响变化规律

图 5 展示了充填体强度在粗骨料掺量、灰砂比、质量浓度交互作用下的响应面变化曲线。由图 5 可以看出,对于充填体强度而言,质量浓度和灰砂比交互作用响应面最陡,其次为粗骨料掺量和灰砂比交互作用响应面,最后为质量浓度和粗骨料掺量交互作用响应面。由表 2 充填体强度方差分析结果也可以看出,质量浓度和灰砂比交互作用、粗骨料掺量和灰砂比交互作用以及质量浓度和粗骨料掺量交互作用所对应的 F 值依次为 31.33, 3.69, 0.111,两者相互验证,表明质量浓度和灰砂比交互作用最为显著。当粗骨料掺量一定时,充填体强度随灰砂比和质量浓度的增加显著提高,这是因为随着质量浓度和灰砂比的增加,一方面,充填体颗粒间的胶凝分子更多,胶结作用更强,另一方面,尾砂颗粒与胶凝分子颗粒形成的网格结构更加致密和紧密,从而使得充填体强度更高。由图 5(c)可以看出,质量浓度和粗骨料掺量交互作用响应面较为平缓,且 F 值仅为0.111,表明两者间的交互作用不明显,即当灰砂比一定时,增加质量浓度和

粗骨料掺量对于充填体强度的提升不明显,这种情况在低灰砂比(如1∶20、1∶30)时更为显著。



(a)粗骨料掺量和灰砂比交互作用响应面 (b)粗骨料掺量和灰砂比交互作用等高线

(c)质量浓度和粗骨料掺量交互作用响应面 (d)质量浓度和粗骨料掺量交互作用等高线

(e)质量浓度和灰砂比交互作用响应面 (f)质量浓度和灰砂比交互作用等高线

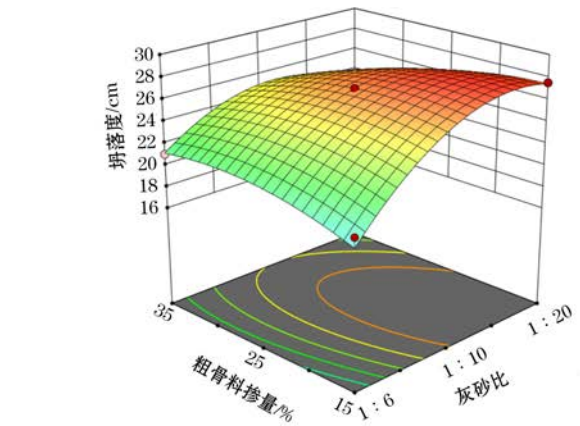
图5 多因素交互作用下充填体强度变化情况

Fig.5 Changes of backfill strength under the interaction of multiple factors

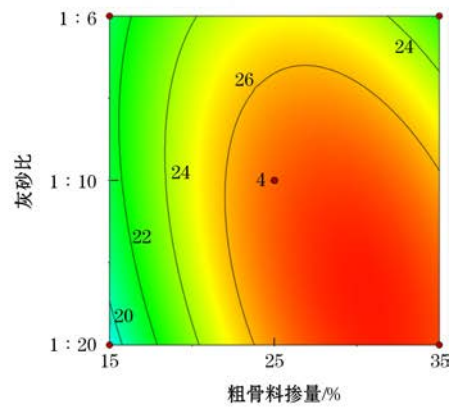
4.2.2 交互作用对充填料浆坍落度影响变化规律

图6展示了充填料浆坍落度在粗骨料掺量、灰砂比、质量浓度交互作用下的响应面变化曲线。由图6可以看出,对于充填料浆坍落度而言,粗骨料掺量和质量浓度交互作用响应面最陡,基本呈现上凸形状,其次为粗骨料掺量和灰砂比交互作用响应面,也呈现上凸形状,最后为质量浓度和灰砂比交互作用响应面。同时由表3充填料浆坍落度方差分析结

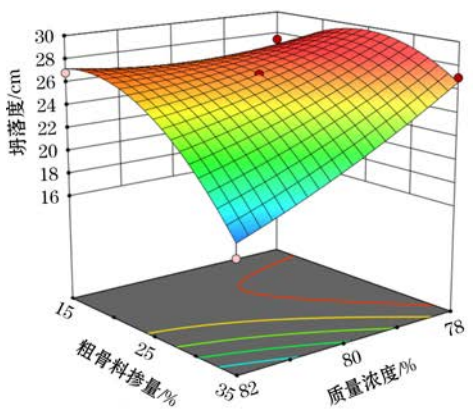
果也可以看出，粗骨料掺量和质量浓度交互作用、粗骨料掺量和灰砂比及质量浓度和灰砂比所对应的 F 值依次为 20.7，8.58，0.185，两者相互验证，表明粗骨料掺量和质量浓度交互作用最为显著。当灰砂比一定时，充填料浆坍落度随粗骨料掺量的增加而增大，随质量浓度的增加而降低，原因是粗骨料掺量增加后，在相同质量浓度情况下，由于粗骨料密度更大，充填料浆中致密的细尾砂减少，保水性相应降低，因此，料浆整体流动性增强，坍落度增加；而质量浓度增加时，充填料浆中固体颗粒含量不断增加，含水率不断减少，料浆流动性不断降低，当粗骨料掺量减少时，这种情况更为明显，流动性更差。



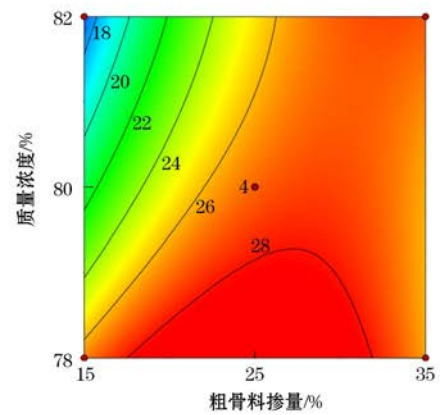
（a）粗骨料掺量和灰砂比交互作用响应面



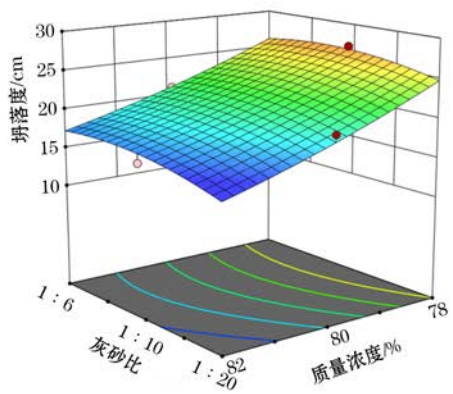
（b）粗骨料掺量和灰砂比交互作用等高线



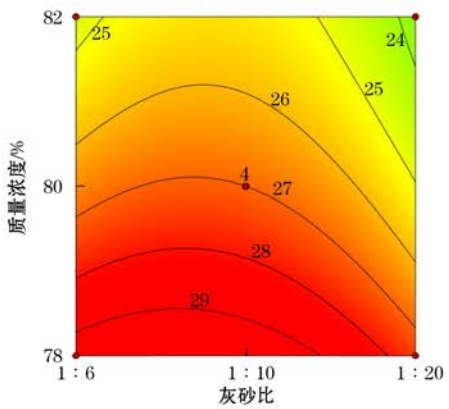
（c）粗骨料掺量和质量浓度交互作用响应面



（d）粗骨料掺量和质量浓度交互作用等高线



（e）质量浓度和灰砂比交互作用响应面



（f）质量浓度和灰砂比交互作用等高线

图 6　多因素交互作用下充填料浆坍落度变化情况

Fig.6　Changes in the slump of filling slurry under the interaction of multiple factors

4.3 充填料浆输送和充填体强度参数优化

根据《金属非金属矿山充填工程技术标准》(GB/T 51450—2022)以及混凝土坍落度分级输送需求,对矿山输送和充填体强度参数进行优化。以充填体抗压强度和充填料浆坍落度为研究目标,基于 Numencial 模块,最终得到优化后的参数为:粗骨料掺量 30.7%、灰砂比 1∶6、质量浓度 82%。在该参数下,充填体抗压强度和充填料浆坍落度预测值分别为 3.878 MPa、27.5 cm,试验值分别为 3.890 MPa、26.8 cm,充填体强度试验值与预测值误差为 3.1%,充填料浆坍落度试验值与预测值误差为 2.5%,均在 5%以内,因此,验证了应用响应面分析法优化充填体强度和充填料浆坍落度是可靠的。

5 结论

(1) 在单一因素影响下,对于充填体强度而言,敏感度因素从大到小依次为灰砂比、质量浓度、粗骨料掺量;对于充填料浆坍落度而言,敏感度因素从大到小依次为粗骨料掺量、质量浓度、灰砂比。

(2) 基于响应面法建立了充填料浆坍落度和强度配比的响应回归模型,模型预测值与试验值有较好的线性关系,模型的拟合度高、可靠性高。

(3) 对于充填体强度而言,质量浓度和灰砂比交互作用响应面最陡,其次为粗骨料掺量和灰砂比交互作用响应面,最后为质量浓度和粗骨料掺量交互作用响应面,表明质量浓度和灰砂比交互作用对充填体强度影响最为显著;对于充填料浆坍落度而言,粗骨料掺量和质量浓度交互作用响应面最陡,基本呈现上凸形状,其次为粗骨料掺量和灰砂比交互作用响应面,也呈现上凸形状,最后为质量浓度和灰砂比交互作用响应面,表明粗骨料掺量和质量浓度交互作用对料浆坍落度影响最为显著。

(4) 对充填体强度和充填料浆坍落度进行了参数优化,最终得到优化后的参数为:粗骨料掺量 30.7%、灰砂比 1∶6、质量浓度 82%,充填体强度和料浆坍落度试验值与预测值误差均在 5%以内,验证了应用响应面分析法对充填体强度和充填料浆坍落度进行优化是可靠的。

参考文献(References):

[1] 王涛,石勇,郑伯坤,等.全尾砂膏体多尺度物料均质化制备技术研究[J].采矿技术,2024,24(1):167-173.
WANG Tao, SHI Yong, ZHENG Bokun, et al. Study on multi-scale material homogenization preparation technology of whole tailings paste[J]. Mining Technology,2024,24(1):167-173.

[2] 王振闽,李振龙,李帅,等.机械化上向水平分层充填法在低品位缓倾斜多层金矿脉开采中的应用[J].中国矿业,2021,30(11):87-93.
WANG Zhenmin, LI Zhenlong, LI Shuai, et al. Application of mechanized upward slicing and filling method in mining low grade,gently inclined and multilayer parallel gold veins [J]. China Mining Magazine,2021,30(11):87-93.

[3] 贾万玉,吴若菡,万串串.三山岛金矿深部矿体上向水平分层充填采矿法优化研究与应用[J].有色金属(矿山部分),2021,73(1):22-27.
JIA Wanyu, WU Ruohan, WAN Chuanchuan. Optimization and application of upward horizontal cut and fill mining method for deep orebody in Sanshandao gold mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2021,73(1):22-27.

[4] 潘广跃.充填采矿技术在金属非金属矿山采矿工程中的运用探讨[J].中国设备工程,2024(12):216-218.
PAN Guangyue. Discussion on the application of filling mining technology in the mining engineering of metal and non-metal mines[J]. China Plant Engineering,2024(12):216-218.

[5] 张佳斯.地下金属矿山充填采矿技术分析[J].中国金属通报,2024(2):34-36.
ZHANG Jiasi. Analysis of filling mining technology in underground metal mines[J]. China Metal Bulletin, 2024 (2):34-36.

[6] 张晶,周宗红,任凤玉,等.充填条件下复杂采空区围岩冒落规律与治理方案研究[J].有色金属工程,2023,13(3):121-128.
ZHANG Jing, ZHOU Zonghong, REN Fengyu, et al. Study on caving law of surrounding rock and treatment scheme in complex goaf under filling condition [J]. Nonferrous Metals Engineering,2023,13(3):121-128.

[7] 常明卫,陈龙龙,张为星,等.竖分条上向水平分层充填法在金牛公司的应用[J].采矿技术,2021,21(5):1-2+6.
CHANG Mingwei, CHEN Longlong, ZHANG Weixing, et al. Application of vertical slitting and filling method in Jinniu Company[J]. Mining Technology,2021,21(5):1-2+6.

[8] 黎维平.充填采矿技术在金属矿山采矿工程中的应用研究[J].冶金与材料,2024,44(8):121-123.
LI Weiping. Research on application of filling mining technology in metal mine mining engineering[J]. Metallurgy and Materials,2024,44(8):121-123.

[9] 张兵,杨世兴,龚武田,等.基于爆破漏斗试验的中深孔爆破参数优化研究[J].矿业研究与开发,2024,44(5):25-30.
ZHANG Bing, YANG Shixing, GONG Wutian, et al. Optimization of medium-length hole blasting parameters based on blasting crater test[J]. Mining Research and Development,2024,44(5):25-30.

[10] 牛峥嵘,彭亮.深坑铁矿全尾砂充填料浆流动性研究[J].采矿技术,2019,19(3):32-35.
NIU Zhengrong, PENG Liang. Research on fluidity of full tailing filling slurry in deep pit iron mine[J]. Mining Technology,2019,19(3):32-35.

[11] 常英杰,吴爱祥,阮竹恩,等.含粗骨料膏体输送管道磨损机理及参数优化[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(1):307-316.
CHANG Yingjie, WU Aixiang, RUAN Zhuen, et al. Wear mechanism and parameters optimization of coarse aggregate-containing paste transport pipes[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2024,55(1):307-316.

[12] 邓高岭,曾鹏,杨肃.超长距离低压输送技术研究与应用[J].采矿技术,2024,24(4):12-16.
DENG Gaoling, ZENG Peng, YANG Su. Research and application of ultra-long distance low pressure conveying technology[J]. Mining Technology,2024,24(4):12-16.

[13] 许宏图,刘树龙,石大庆,等.煤矸石-脱硫石膏-粉煤灰膏体料浆制备及性能研究[J].矿业研究与开发,2024,44(6):156-164.
XU Hongtu, LIU Shulong, SHI Daqing, et al. Preparation of coal gangue-desulfurization gypsum-fly ash paste slurry and its properties[J]. Mining Research and Development, 2024,44(6):156-164.

[14] 孙凯华,胡彦飞,赵旭.基于响应面法的煤矸石充填料浆流变特性实验研究[J].矿产保护与利用,2024,44(2):11-21.
SUN Kaihua, HU Yanfei, ZHAO Xu. Experimental study on rheological properties of coal gangue slurry based on response surface method[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2024,44(2):11-21.

[15] 李涛,杨涛,刘金成,等.煤基固废充填料浆长距离输送悬浮态稳定性研究[J/OL].煤炭科学技术:1-14[2024-09-09].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20240510.1142.001.html.
LI Tao, YANG Tao, LIU Jincheng, et al. Study on the suspension state stability of coal-based solid waste filling slurry of long-distance pipeline transportation[J/OL]. Coal Science and Technology:1-14[2024-09-09].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20240510.1142.001.html.

[16] 于泰鹏,曾庆隆.三安铁矿全尾砂胶结充填体输送和力学性能研究[J].现代矿业,2024,40(7):200-204.
YU Taipeng, ZENG Qinglong. Study on transportation and mechanical properties of full tailings cemented filling body in San'an Iron Mine[J]. Modern Mining,2024,40(7):200-204.

[17] 李坤,潘彦臻,胡骅,等.混合碎石料配比对浆体流动性能和充填体强度的影响[J].科技创新与应用,2024,14(20):65-69.
LI Kun, PAN Yanzhen, HU Hua, et al. Effect of mixed gravel ratio on slurry flow performance and backfill strength [J]. Technology Innovation and Application,2024,14(20):65-69.

[18] 盛宇航,裴佃飞,齐兆军,等.尾砂粒级组成对胶结充填料流变特性与强度的影响[J].黄金科学技术,2024,32(4):631-639.
SHENG Yuhang, PEI Dianfei, QI Zhaojun, et al. Influence of particle size composition of tailings on rheological characteristics and strength of cemented tailings backfill[J]. Gold Science and Technology,2024,32(4):631-639.

[19] 蔡发雄,孙伟,张盛友,等.巴西劈裂下全尾砂胶结充填体抗拉强度特征研究[J].矿产保护与利用,2024,44(4):65-73.
CAI Faxiong, SUN Wei, ZHANG Shengyou, et al. Study on tensile strength characteristics of cemented backfill with full tailingsunder brazilian splitting[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2024,44(4):65-73.

[20] 郝建帅,周子涵,陈忠辉,等.钢渣在矿山充填胶凝材料中的水化硬化性能研究现状分析[J].矿业科学学报,2024,9(4):573-585.
HAO Jianshuai, ZHOU Zihan, CHEN Zhonghui, et al. Review of hydration and hardening properties of steel slag in mine filling cementitious materials[J]. Journal of Mining Science and Technology,2024,9(4):573-585.