

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.03.030

隧道爆破水袋抑尘剂制备及其相似模拟应用^{*}

王清标^{1,2,3}, 鲍守志¹, 王存文⁴, 秦广鹏^{1,3}, 施振跃^{1,3,4}, 孙永^{1,3},
王可用^{1,3}, 田成林^{1,3}, 刘忠磊⁵, 刘同江⁵, 耿福宝⁶

(1. 山东科技大学, 青岛 266590; 2. 山东建筑大学, 济南 250101;
3. 山东科技大学 煤矿充填开采国家工程实验室, 泰安 271019;
4. 山东能源集团有限公司 冲击地压防治技术与装备实验室, 济南 250200;
5. 中铁十四局集团有限公司, 济南 250101; 6. 山东华中检测鉴定有限公司, 济南 250100)

摘要: 为有效控制隧道钻爆法施工中的粉尘污染问题, 制备了一种环保高效的水袋抑尘剂, 通过增强水袋的湿润和粘结能力, 提升水压爆破的抑尘效率。基于安全环保的原则选取了三种表面活性剂 (OB-2、APG1214 和 1631), 通过表面张力法测定其临界胶束浓度 (CMC), 然后开展复配实验, 依据两两复配原则制备了三种复配抑尘剂 (S-1、S-2、S-3), 并通过表面张力和接触角实验, 综合评价其抑尘性能。依托某高原隧道工况确定几何相似比, 基于几何相似比 (1:10) 构建隧道爆破相似模型, 采用对照实验法, 模拟不放置水袋、放置普通水袋、放置抑尘剂水袋三种工况, 利用粉尘浓度实时监测系统获取三种工况下的粉尘浓度变化情况, 实现定量分析抑尘效果。实验结果表明: 抑尘剂 S-1 (OB-2 与 APG1214 复配) 性能最优, 其表面张力为 29.19 mN/m, 接触角为 27.7°, 优于其他复配溶液。相似模拟试验中, 抑尘剂水袋工况 (Ⅲ) 在 $t=21$ s 时断面总粉尘浓度仅为 12.22 mg/m³, 较不放置水袋工况 (Ⅰ) 和普通水袋工况 (Ⅱ) 分别降低了 79.89% 和 60.32%, 抑尘效果显著。

关键词: 隧道; 水压爆破; 水袋; 抑尘剂; 相似试验

中图分类号: TU94 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)03-0295-10

Preparation of Dust Suppressant for Water Bags in Tunnel Blasting and its Application in Similarity Simulation

WANG Qing-biao^{1,2,3}, BAO Shou-zhi¹, WANG Cun-wen⁴, QIN Guang-peng^{1,3}, SHI Zhen-yue^{1,3,4},
SUN Yong^{1,3}, WANG Ke-yong^{1,3}, TIAN Cheng-lin^{1,3}, LIU Zhong-lei⁵, LIU Tong-jiang⁵, GENG Fu-bao⁶

(1. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
2. Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 3. National Engineering Laboratory of
Coal Mine Fill Mining, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271019, China;
4. Rock Burst Prevention and Control Technology and Equipment Laboratory, Shandong Energy Group
Co., Ltd., Jinan 250200, China; 5. China Railway 14th Bureau Group Co., Ltd., Jinan 250101, China;
6. Shandong Huazhong Testing and Appraisal Co., Ltd., Jinan 250100, China)

收稿日期 (Date of reception): 2025-10-31

网络首发日期 (Published online): 2026-09-15

作者简介: 王清标 (1973-), 男, 教授、博士, 主要从事岩土工程、地下工程防灾减灾等方面的工作, (E-mail) skd990748@sdust.edu.cn。

通信作者: 施振跃 (1989-), 男, 讲师、博士, 主要从事爆破工程、地下工程防灾减灾科学研究工作, (E-mail) skd992844@sdust.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金 (52404134)

About the author: WANG Qing-biao (1973-), male, professor, Ph. D., primarily engaged in geotechnical engineering and disaster prevention and mitigation for underground engineering, (E-mail) skd990748@sdust.edu.cn.

Corresponding author: SHI Zhen-yue (1989-), male, lecturer, Ph. D., primarily engaged in scientific research in blasting engineering and disaster prevention and mitigation in underground engineering, (E-mail) skd992844@sdust.edu.cn.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (No. 52404134)

Abstract: To address dust pollution challenges in tunnel drilling and blasting operations, this study developed an eco-friendly high-efficiency water bag dust suppressant. The innovation significantly enhances the wetting and agglomeration capabilities of water bags, thereby optimizing dust control performance in hydrostatic blasting applications. Guided by safety and environmental protection principles, three surfactants (OB-2, APG1214, and 1631) and their critical micelle concentrations (CMC) were determined through surface tension measurements. Subsequently, three composite dust suppressants (S-1, S-2, and S-3) were formulated using binary combination methodology. Their dust-suppression efficacy was systematically assessed using surface-tension analysis and contact-angle measurements. A 1:10-scale tunnel-blasting model was developed based on geometric similarity principles derived from plateau tunnel conditions. Furthermore, controlled experiments compared three configurations: no water bag placement, placement of ordinary water bags, and placement of dust suppressant water bags. A real-time dust concentration monitoring system quantified particulate concentration variations across the three experimental configurations. Results demonstrated superior performance by the dust suppressant S-1 (OB-2/APG1214 composite), exhibiting an optimal surface tension of 29.19 mN/m and wettability (27.7° contact angle). In scaled simulations, scenario III (suppressant-treated water bags) achieved a sectional dust concentration of 12.22 mg/m³ at $t = 21$ s, representing reductions of 79.89% and 60.32% relative to scenarios I (no treatment) and II (conventional water bags), validating exceptional particulate control efficacy.

Key words: tunnel; water pressure blasting; water bag; dust suppressant; similarity test

为解决经济发展的空间局限性,中国正在向西部高原地区扩展隧道建设,该地区高山峻岭众多,施工环境相对低海拔地区更加复杂^[1]。目前,在我国隧道掘进工程中,钻爆法应用较为普遍,但其在应用过程中会产生大量粉尘,作业人员长时间处在高浓度粉尘环境中极易引起尘肺病等呼吸道疾病,对作业人员职业健康安全构成重大风险^[2-4]。由此可见,隧道粉尘污染已经成为不可忽视的安全生产问题,急需进行技术创新解决隧道粉尘污染问题。

为了降低粉尘浓度,国内外研究人员制定了多种降尘措施,如通风降尘技术^[5]、湿式喷雾降尘技术^[6]、水压爆破技术等,其中水压爆破技术是隧道建设中常用的一种控制爆破方法,该方法通过将水袋充填在炮孔中,利用乳化炸药起爆瞬间的巨大能量实现大部分气化,气化后的水蒸汽遇冷凝结并与岩石爆出的尘粒产生大面积接触使尘粒加速沉降从而实现降尘^[7]。但是,从实际应用情况来看,由于纯水的表面张力较大、湿润性能较差,气化后的液滴与尘粒结合不充分导致水压爆破不能达到理想的降尘效果。

经研究发现,向水中添加表面活性剂可以降低液体的表面张力,提高其对粉尘的湿润性能,从而进一步提高降尘效率^[8-10]。Tessum 和 Raynor 的实验表明,加入非离子表面活性剂可以有效提高液滴捕获粉尘颗粒的效率^[11]。Zhou 等对表面活性剂对粉尘的湿润机理开展了进一步研究^[12],发现阴离子+非离子的组合可以使表面活性剂分子更容易吸附到粉尘表面。Yan 等通过化学改性的方法制备了一种

喷雾抑尘剂^[13],经实验其具有良好的保水性、粘度和湿润性。Zhang 等基于瓜尔胶研制了一种具有良好的湿润性的喷雾抑尘剂^[14],产生了良好的降尘效果。Chen 等为解决煤尘污染问题^[15],对抑尘剂配方进行了优化,取得了良好的应用效果。Lai 等针对粉尘特点^[16],以表面张力和湿润性为指标,运用对比试验的方法确定了降尘剂的最优配比。王和堂等针对目前煤矿应用抑尘剂表面活性剂较低^[17],成本较高,降解性差等问题,研制了一种高表面活性、天然环保的生物抑尘剂。蒋仲安等针对爆破烟尘的成分^[18],采用了多种基料和表面活性剂来降低烟尘中的粉尘成分,同时还采用了相应的添加剂来降低爆破时所产生的有毒有害气体的含量。王剑采用理论研究现场试验的方法^[19],系统研究了水压爆破降尘的理论及添加泡沫除尘剂对提高爆破水雾除尘效果的影响。吴奎斌通过现场应用试验^[20],对高效水炮泥和普通水炮泥的降尘效果进行了对比分析。

目前,关于抑尘剂的研究主要集中于湿式喷雾技术等过程抑尘,而对于水袋等源头抑尘的研究相对较少,同时抑尘剂的效果主要通过现场应用进行验证,而对于通过构建相似模型进行验证的研究则较少。因此,本文制备一种用于源头抑尘的水袋抑尘剂,并构建隧道爆破相似模型对其抑尘效果进行验证。

1 水袋抑尘剂制备实验

1.1 表面活性剂的选择

大量研究表明,在纯水中加入表面活性剂能够

降低水的表面张力,从而提高雾滴捕捉粉尘的能力。环保为原则选取三种表面活性剂制备水袋抑尘剂,基于现场粉尘粒径小、比表面积较大的特性,以安全如表 1 所示。

表 1 三种表面活性剂基本信息
Table 1 Basic information of three surfactants

表面活性剂 Surfactant	离子型 Ionic type	性能 Performance
十二烷基二甲基氧化铵 Dodecyl dimethyl ammonium oxide(OB-2)	两性表面活性剂 Amphoteric surfactant	具有优异的增溶、起泡、保湿等性能,生理毒性小,易生物降解。 It has excellent properties such as solubilization,foaming,and moisturizing,with low physiological toxicity and easy biodegradability.
十二烷基葡萄糖苷 Dodecyl glucoside (APG1214)	非离子表面活性剂 Nonionic surfactant	具有亲水的极性基团和疏水的非极性基团的长链分子。 A long-chain molecule with hydrophilic polar groups and hydrophobic nonpolar groups.
十六烷基三甲基氯化铵 Hexadecyl trimethyl ammonium chloride(1631)	阳离子表面活性剂 Cationic surfactant	亲水亲油平衡值(HLB 值)在 17 ~ 19 范围内,具有良好的润湿反转作用。 The hydrophilic-lipophilic balance(HLB) value in the range of 17 ~ 19 exhibits excellent wettability reversal properties

1.2 确定临界胶束浓度

临界胶束浓度(CMC)是指表面活性剂在溶剂中形成胶束所需的最低浓度,当表面活性剂在溶剂中的浓度达到临界胶束浓度时,表面活性剂分子会从单个离子或分子缔合成为胶态的聚集物,即形成胶束,此后继续增加表面活性剂的浓度,只会增加胶束的数量,溶液的表面张力将不再发生变化而逐渐趋于平缓^[21]。

(1)实验设计

采用表面张力法测定三种表面活性剂的临界胶束浓度。配制 0. 00005%、0. 0005%、0. 005%、0.05%、0.25%、0.5%、1%、5%的 APG1214 溶液、OB-2 溶液和 1631 溶液,然后采用 JK99C 型全自动表面张力仪测定清水及三种表面活性剂溶液不同浓

度下的表面张力。

(2)结果分析

测试结果如表 2 和图 1 所示。在 0.00005%至 0.05%的质量浓度区间内,OB-2 和 1631 溶液的表面张力发生明显的下降;在 0.05%至 5%的质量浓度区间内,OB-2 和 1631 溶液的表面张力的下降趋势逐渐平缓,这说明 OB-2 和 1631 溶液的 CMC 为 0.05%,而在 0.00005%至 0.005%的质量浓度区间内,APG1214 溶液的表面张力发生明显的下降;在 0.005%至 5%的质量浓度区间内,APG1214 溶液的表面张力的下降趋势逐渐平缓,这说明 APG1214 溶液的 CMC 为 0.005%。因此 OB-2、APG1214 和 1631 的最佳配比浓度分别为 0.05%、0.005%和 0.05%。

表 2 清水及三种表面活性剂溶液不同浓度下的表面张力(单位:mN/m)

Table 2 Surface tension of water and three types of surfactant solutions at different concentrations(unit:mN/m)

表面活性剂 Surfactant	质量浓度 Mass concentration							
	0.00005%	0.0005%	0.005%	0.05%	0.25%	0.5%	1%	5%
纯水	75.26							
OB-2	69.62	65.78	52.67	31.08	29.50	31.14	31.09	30.45
APG1214	51.84	45.29	27.01	29.64	30.84	31.07	30.51	30.22
1631	71.66	68.14	56.79	37.84	36.57	35.51	34.93	34.47

1.3 表面活性剂复配试验

由 1.2 可知,三种表面活性剂中 OB-2 和 1631 的临界胶束浓度接近,不宜以单体溶液的质量浓度作为因素水平开展正交试验,因此本实验采用两两复配的原则开展表面活性剂复配实验,OB-2、APG1214 和 1631 的配比浓度分别为 0.05%、

0.005%和 0.05%。各复配溶液如图 2 所示。

1.4 抑尘剂配比优选

研究发现,表面张力和接触角是评估抑尘剂性能的两个重要参数,较低的表面张力和接触角有助于抑尘剂溶液更好地润湿粉尘,从而更有效地捕获和团聚粉尘颗粒,提高抑尘效率。

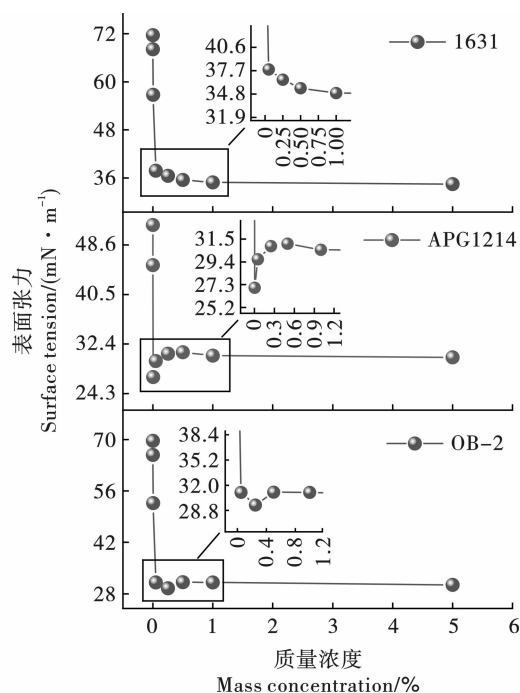


图1 不同质量浓度下表面活性剂的表面张力

Fig. 1 Surface tension of surfactants at different mass concentrations

1.4.1 表面张力对比分析

为对复配溶液进行配比优选,采用 JK99C 型全

自动表面张力仪测定抑尘剂 S-1、抑尘剂 S-2、抑尘剂 S-3 的表面张力。由表 3 可知,三种复配溶液表面张力的顺序为:抑尘剂 S-1 < 抑尘剂 S-3 < 抑尘剂 S-2,抑尘剂 S-1 的表面张力最小,湿润性能最佳。

1.4.2 接触角对比分析

为测定抑尘剂溶液的接触角,首先需要对粉尘样品进行压片处理,称取 300 mg 的粉尘,经球磨 30 s 并进行干燥后,采用压片机将其压制成直径为 10 mm,厚度为 3 mm 的圆形试片。实验仪器采用 DSA100 型视频光学接触角测量仪。不同溶液在试片上的接触角变化规律如图 3 所示。

表3 三种复配溶液的表面张力

Table 3 Surface tension of three complex solutions

复配溶液 Compound solution	表面张力/(mN·m ⁻¹) Surface tension/(mN·m ⁻¹)
抑尘剂 S-1 Dust Suppressant S-1	29.19
抑尘剂 S-2 Dust Suppressant S-2	37.05
抑尘剂 S-3 Dust Suppressant S-3	34.97

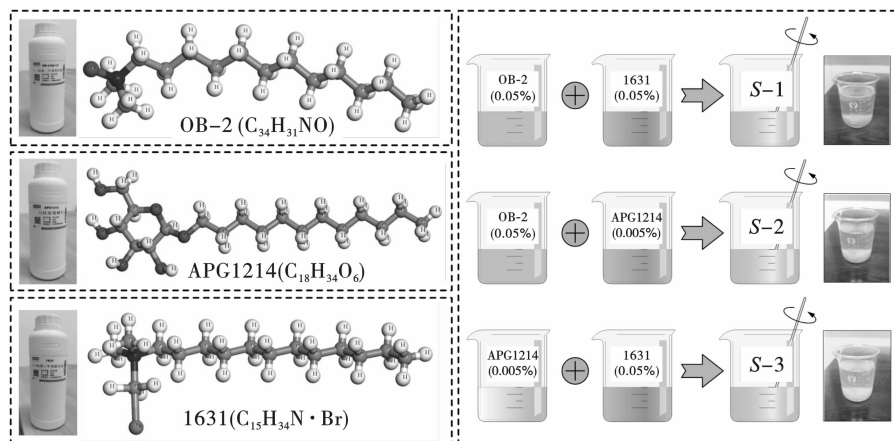


图2 表面活性剂复配流程

Fig. 2 Surface active agent compounding process

由图 3 可知,溶液在试片上的接触角随着时间变化先下降而后趋于平稳,纯水在试片上的接触角最大为 46.9°,最小为 10.9°;抑尘剂 S-1 在试片上的接触角最大为 27.7°,最小为 12.0°;抑尘剂 S-2 在试片上的接触角最大为 33.4°,最小为 6.0°;抑尘剂 S-3 在试片上的接触角最大为 30.1°,最小为 9.0°。实验结果表明,三种复配溶液的接触角均显著低于对照组,证实表面活性剂的引入可有效降低溶液体系的表面张力并增强其润湿性能;S-1 的接触

角最大值较小,表明 S-1 具有最优的固-液界面润湿效率。综上所述,确定 S-1 为复合型水袋抑尘剂的最优配方。

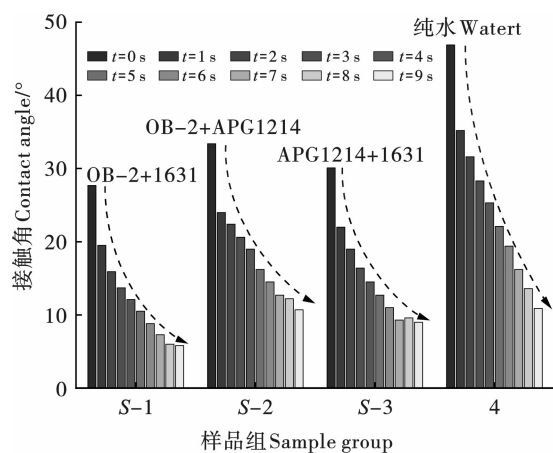
2 相似模拟试验

2.1 模拟工况概况

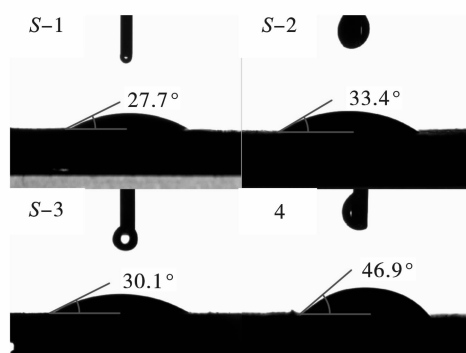
本相似模型以某高原隧道出口为工程背景,隧道设计为两单隧道。经地质勘察,隧道围岩等级主要以 IV、V 级围岩为主。隧道出口标段全段采用钻

爆法施工, 爆破方式采用水压爆破。某高原隧道出

口洞口轮廓如图 4 所示。



(a) 接触角变化规律
(a) The variation pattern of contact angles



(b) 四组样品接触角的最大值
(b) Maximum contact angle of four sample groups

图 3 四组样品在试片上的接触角变化规律及其最大值

Fig. 3 The variation pattern of contact angles and their maximum values for four sets of samples on the test piece

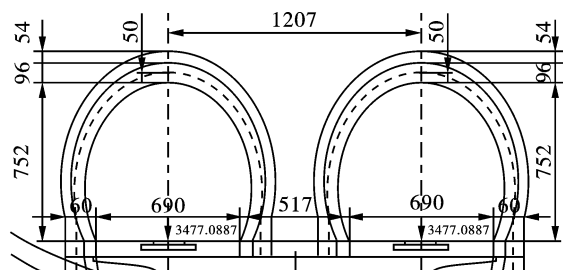


图 4 某高原隧道洞口轮廓图(单位:mm)

Fig. 4 Outline map of the entrance of a high-altitude tunnel (unit:mm)

2.2 相似模拟试验方案设计

2.2.1 模型相似常数

根据某高原隧道出口洞口轮廓图可知, 洞口设计为圆形洞口, 洞口宽度为 6900 mm, 高度为 7520 mm。考虑到洞口形状不规则且尺寸较大, 为方便试验并将不利影响降到最小, 将洞口形状简化为门洞形, 取相似模型的几何相似比为 10。基于几何相似比, 根据隧道实际尺寸计算出模型断面宽度为 690 mm, 高度为 752 mm, 弧顶半径为 345 mm。为了满足试验要求, 确定模型框架总长度为 2000 mm, 模型内部划分为两个区域, 分别是监测区域和爆破区域, 其中监测区域长度为 1500 mm, 该区域用于设置监测设备以监测粉尘浓度; 爆破区域长度为 500 mm, 该区域用于模拟爆破后粉尘扩散的过程, 炮孔设置在该区域内。模型框架材质为有机玻璃, 为了防止爆破时冲击波损坏模型结构, 将框架厚度设置为 10 mm, 经测试模型框架整体具有较强的硬度, 能够满足该相似试验的基本条件。相似试验模型框架如图 5 所示。

2.2.2 相似材料的选择

(1) 掌子面的设置

掌子面的设置是爆破模拟的关键。为降低试验成本, 提高试验效率, 采用以高强玻璃为材料的框架结构模拟掌子面, 框架结构由两块高强玻璃板组成, 每块高强玻璃板的尺寸与模型断面一致, 厚度为 10 mm。框架结构如图 6 所示。

(2) 炮孔的数量及布设

为减小试验误差, 根据相似比将炮孔数量取为 13 个, 各炮孔根据现场布置方式均匀布置在断面上, 通过监测断面上产生的粉尘浓度估算现场产生的粉尘浓度。由 2.2.2(1) 可知, 掌子面采用两块高强玻璃板组成的框架进行模拟, 为了更好地模拟炮孔, 分别在两块高强玻璃板上设置若干个孔, 然后将若干个不锈钢管分别插入孔中, 不锈钢管和孔共同组成了模拟炮孔。相似试验炮孔布置图如图 7 所示。

(3) 相似炸药的选择

室内使用工业炸药具有严重的安全隐患, 考虑安全性和经济性, 拟采用爆竹作为模拟炸药。使用时, 适当将爆竹引线延长, 并将各引线连接在一起以便点燃, 然后按照装药结构把爆竹放置在炮孔内部, 确认周边安全的情况点燃引线即可, 相似炸药及其连接如图 8 所示。

(4) 水袋和粉尘的选择

拟采用塑料袋装水封口模拟水袋, 水袋中可装填清水和抑尘剂。采用研磨岩样(花岗岩)获得的粉尘作为相似材料。所用粉尘类型及参数如表 4 所示。

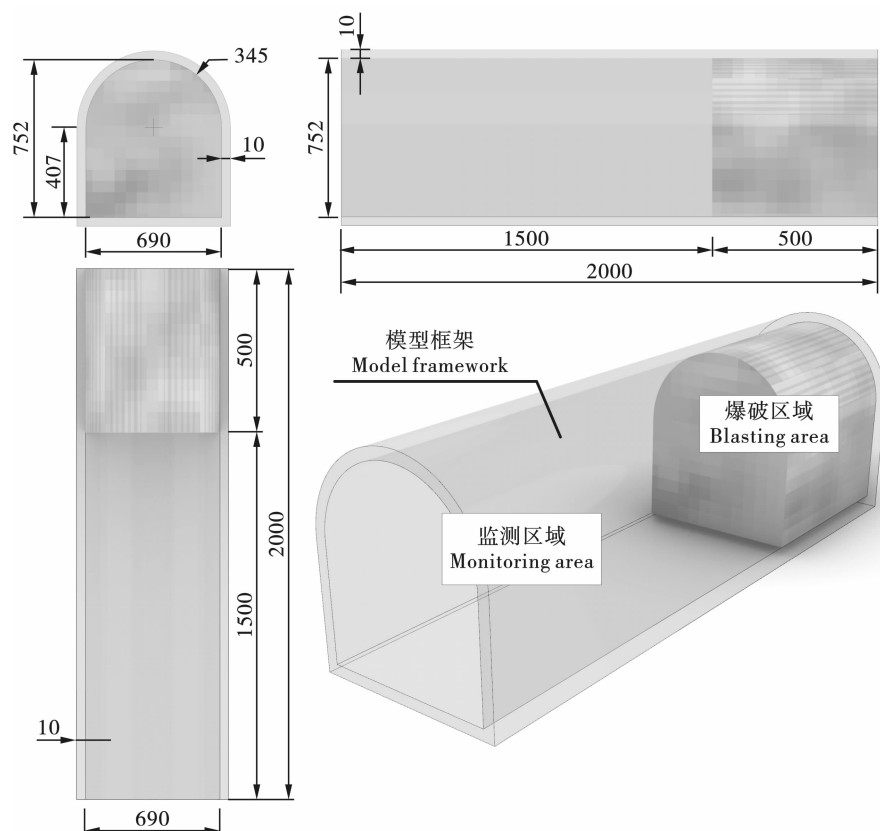


图 5 相似试验模型框架(单位:mm)

Fig. 5 Similar experimental model framework(unit:mm)

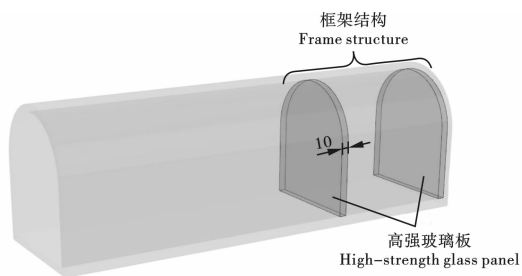


图 6 掌子面框架结构

Fig. 6 Working face structure

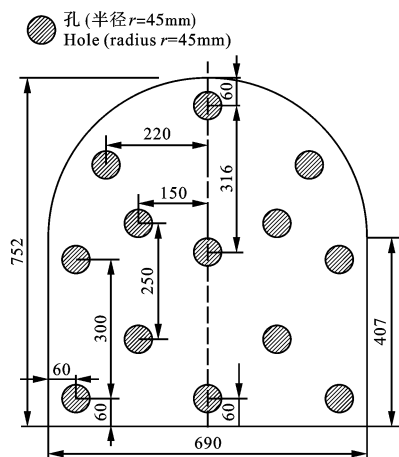


图 7 相似试验炮孔布置图(单位:mm)

Fig. 7 Layout of similar test blastholes(unit:mm)



图 8 相似炸药引线连接

Fig. 8 Similar explosive lead connection

2.2.3 爆破方案设计

基于现场实际工况,设计了三种试验工况以初步分析水袋抑尘剂的应用效果。三种试验工况分别是不放置水袋(Ⅰ)、放置普通水袋(Ⅱ)、放置抑尘剂水袋(Ⅲ),三种试验工况的炮孔装药结构图如图 9 所示。

表 4 粉尘类型及参数
Table 4 Dust type and parameters

类型 Type	密度 Density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粒径范围 Particle size range/mm	比表面积 Specific surface area/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}$)	主要化学成分 Main chemical components
岩石粉尘 Rock dust	2.65	<0.075	389	二氧化硅 Silicon dioxide

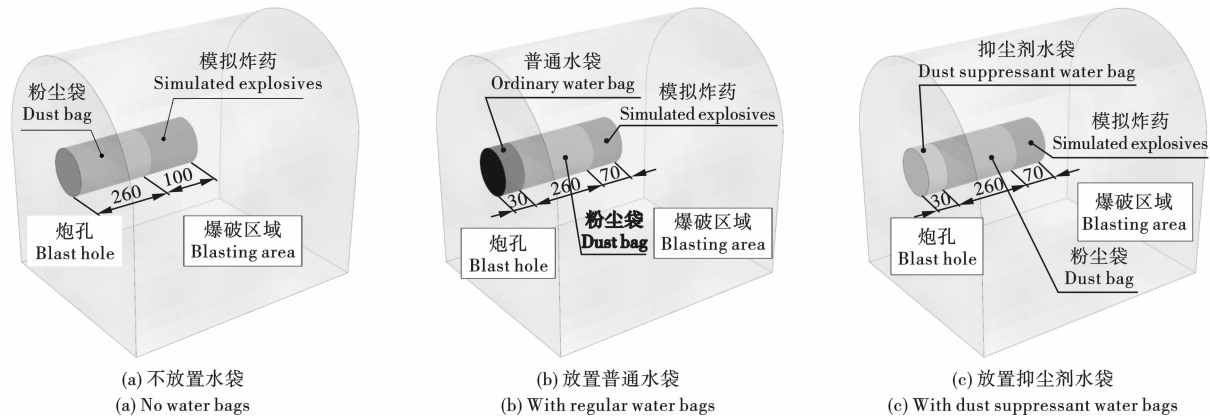


图 9 三种试验工况的装药结构图(单位:mm)
Fig. 9 Structure diagram of charge for three test conditions(unit:mm)

2.2.4 监测方案设计

试验主要监测不放置水袋(Ⅰ)、放置普通水袋(Ⅱ)、放置抑尘剂水袋(Ⅲ)三种试验工况下各监测点的粉尘浓度变化情况。监测设备使用颗粒物传感器(图 10),该传感器可通过无线网络将监测数据发送至物联网平台并显示在计算机上。

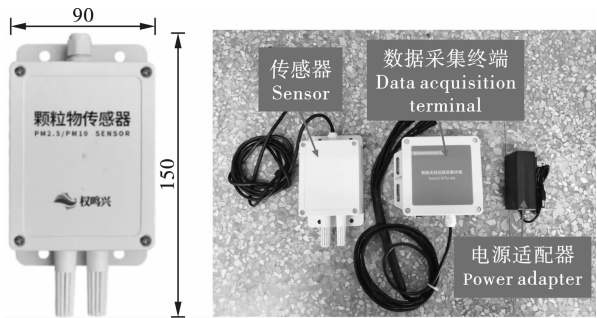


图 10 粉尘浓度监测设备(单位:mm)
Fig. 10 Dust concentration monitoring equipment(unit:mm)

为了更加直观地监测断面内的粉尘浓度及其他数据的变化情况,在断面上设置四处监测点,其中 A_1 和 B_2 监测点位于断面两侧,距离底部 407 mm 处; C_1 监测点位于模型断面弧顶部,距离底部 752 mm;在距两侧 345 mm、底部 150 mm 处设置 D_1 监测点以监测工人呼吸带区域内的粉尘浓度,此后每相隔 500 mm 在断面内布设四个监测点,共 12 个监测点。监测点布设位置如图 11 所示。

2.2.5 相似试验模型

经过框架制作、炮孔设置、监测设备设置及调试等准备工作,最终得到隧道爆破水袋抑尘剂效果相似模型,如图 12 所示。

2.3 相似试验结果分析

设置不放置水袋(Ⅰ)、放置普通水袋(Ⅱ)、放置抑尘剂水袋(Ⅲ)三种试验工况,对三种工况分别进行三次试验。

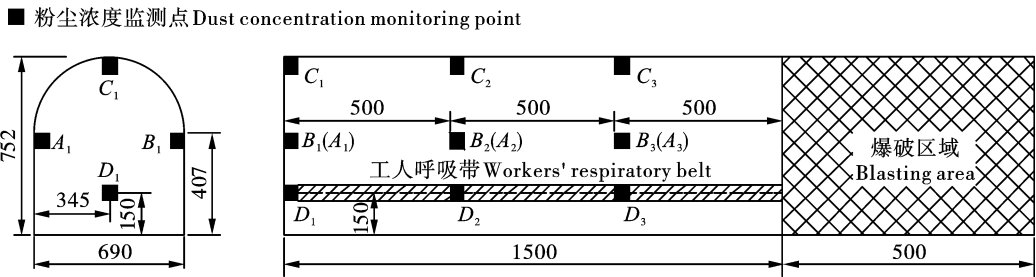


图 11 监测点布设位置图(单位:mm)
Fig. 11 Location map of monitoring points(unit:mm)



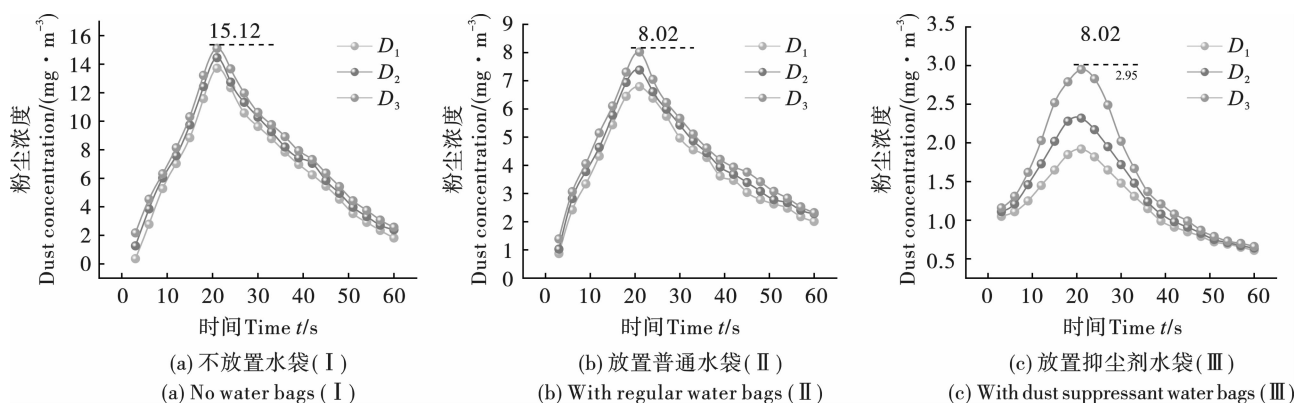
图 12 相似试验模型

Fig. 12 Similar experimental model

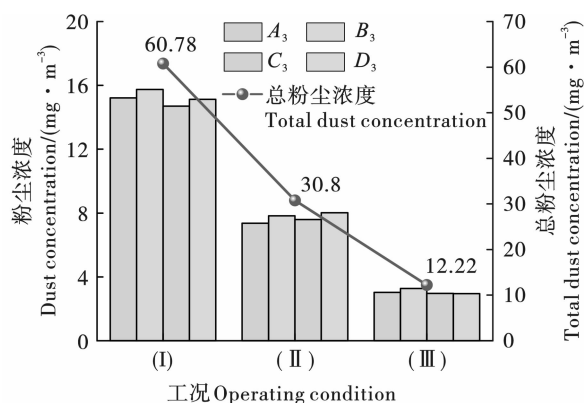
以工人呼吸带区域监测点(D 点)为典型监测点,通过监测该点处的粉尘浓度,并采用数据处理软

件 Origin 对监测数据进行整理分析,得到三种试验工况下 D 监测点处粉尘浓度随时间的变化情况点线图,如图 13 所示。

由图 13 可知,三种工况在 $t = 60$ s 内 D 监测点粉尘浓度变化曲线整体呈倒“V”型,随着时间的增加,粉尘浓度呈现先增大后减小的趋势,然后粉尘浓度逐渐减小且变化逐渐趋于平缓。其中工况(Ⅰ)、(Ⅱ)、(Ⅲ)中 D 监测点的粉尘浓度在 $t = 21$ s 时均达到最大值,分别为 15.12 mg/m^3 、 8.02 mg/m^3 、 2.95 mg/m^3 。通过对比工况(Ⅰ)、(Ⅱ)、(Ⅲ)中 D 监测点处的粉尘浓度最大值,发现(Ⅰ) > (Ⅱ) > (Ⅲ),说明水袋抑尘剂能够有效降低粉尘浓度,进一步验证了水袋抑尘剂具有良好的抑尘效果。

图 13 三种工况下在 $t = 60$ s 内 D 监测点粉尘浓度变化情况点线图Fig. 13 Line chart of dust concentration changes at monitoring point D within $t = 60$ s under three working conditions

三种工况下均在 $t = 21$ s 时粉尘浓度达到最大,为分析同一断面不同测点的粉尘浓度变化情况,选取距离产尘源最近的断面 3 为监测断面,记录三种工况下 $t = 21$ s 时断面 3 上各监测点的粉尘浓度并绘制成图,如图 14 所示。由图 14 可知,采用工况(Ⅰ)即不放置水袋时,断面 3 上的 A_3 、 B_3 、 C_3 、 D_3 四个监测点的粉尘浓度较大,总粉尘浓度达到 60.78 mg/m^3 ;采用工况(Ⅱ)即放置普通水袋时,断面 3 上的 A_3 、 B_3 、 C_3 、 D_3 四个监测点的粉尘浓度明显减小,总粉尘浓度为 30.80 mg/m^3 ,较工况(Ⅰ)减小了 29.98 mg/m^3 ,减少率为 49.3% ,说明水袋的存在能够降低粉尘浓度;采用工况(Ⅲ)即放置抑尘剂水袋时,断面 3 上的 A_3 、 B_3 、 C_3 、 D_3 四个监测点的粉尘浓度进一步减小,总粉尘浓度为 12.22 mg/m^3 ,较工况(Ⅰ)和(Ⅱ)分别减少了 48.56 mg/m^3 和 18.58 mg/m^3 ,减少率分别为 79.89% 和 60.32% ,这说明水袋抑尘剂 S-1 能够有效降低粉尘浓度,抑尘效果良好。

图 14 三种试验工况在 $t = 21$ s 时断面 3 上各监测点及总粉尘浓度变化图Fig. 14 Changes in monitoring points and total dust concentration on section 3 at $t = 21$ s for three test conditions

3 结论

针对隧道爆破施工中粉尘污染严重的问题,制

备了一种可提高水压爆破抑尘效率的水袋抑尘剂。通过抑尘剂制备优选及相似模拟试验,得到以下主要结论:

(1)制备了一种高效水袋抑尘剂配方S-1。通过临界胶束浓度测定与复配实验,确定了以十二烷基二甲基氧化铵(OB-2,0.05%)和十二烷基葡萄糖苷(APG1214,0.005%)进行复配的抑尘剂S-1。该配方能显著降低溶液的表面张力及接触角,表现出较为良好的湿润性能。

(2)相似模拟试验验证了水袋抑尘剂S-1的抑尘能力。试验中,添加抑尘剂S-1的工况(Ⅲ)降尘效果最为显著,可使爆破后产尘区断面总粉尘浓度峰值较普通水袋工况(Ⅱ)降低60.32%,较无水袋工况(Ⅰ)降低79.89%,证明其能从源头有效抑制粉尘扩散,具有良好的抑尘效果。

参考文献 (References)

- [1] 中华人民共和国国务院. 中华人民共和国国民经济和社会发展的第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-03-13) [2025-09-10]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
- [1] The State Council of the People's Republic of China. The 14th five year plan for national economic and social development of the people's republic of China and the long range objectives for 2035 [EB/OL]. (March 13, 2021) [September 10, 2025]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm. (in Chinese)
- [2] 陈志强. 钻爆法隧道施工粉尘防治的研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [2] CHEN Zhi-qiang. Research on dust prevention and control in tunnel construction by drilling and blasting method [D]. Jinan: Shandong University, 2008. (in Chinese)
- [3] 陈星宇, 吴剑, 任松, 等. 高海拔隧道施工期污染物扩散规律[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(1): 176-187.
- [3] CHEN Xing-yu, WU Jian, REN Song, et al. Pollutant diffusion law during high-altitude tunnel construction [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2024, 58(1): 176-187. (in Chinese)
- [4] 董文秀. 浅谈隧道施工粉尘来源及防治对策[J]. 建筑安全, 2020, 35(12): 16-18.
- [4] DONG Wen-xiu. A brief discussion on the sources and prevention measures of dust in tunnel construction [J]. Construction Safety, 2020, 35(12): 16-18. (in Chinese)
- [5] 张旺钱. 双线铁路隧道施工通风粉尘运移特性模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2025, 21(4): 1417-1424. DOI: 10.20174/j.juse.2025.04.33.
- [5] ZHANG Wang-qian. Model experimental study on the dust transport characteristics of construction ventilation in double-track railway tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2025, 21(4): 1417-1424. DOI: 10.20174/j.juse.2025.04.33. (in Chinese)
- [6] 江丙友, 张琦, 朱志辉, 等. 湿式除尘器中气水喷雾降尘效果试验研究[J]. 金属矿山, 2023(7): 82-90. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.202307008.
- [6] JIANG Bing-you, ZHANG Qi, ZHU Zhi-hui, et al. Experimental study on dust reduction effect of air-water spray in wet dust collector [J]. Metal Mine, 2023(7): 82-90. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.202307008. (in Chinese)
- [7] 李广涛, 李大春. 隧道掘进水压爆破技术发展新阶段[J]. 爆破, 2022, 39(3): 82-87.
- [7] LI Guang-tao, LI Da-chun. New development stage of water pressure blasting technique in tunnel excavation [J]. Blasting, 2022, 39(3): 82-87. (in Chinese)
- [8] WANG Xiao-nan, YUAN Shu-jie, LI Xiang, et al. Synergistic effect of surfactant compounding on improving dust suppression in a coal mine in Erdos, China [J]. Powder Technology, 2019, 344: 561-569. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.061>.
- [9] LIN Zi-kang, CHEN Xian-feng, XU Chao-hang, et al. Effect of ionic liquid-surfactant compound solutions on the wettability and functional groups of coal [J]. Journal of Molecular Liquids, 2024, 401: 124650. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.124650>.
- [10] BAO Qiu, NIE Wen, NIU Wen-jin, et al. Molecular simulation and wetting study on the mechanism and capability of hydrophilic surfactants used as spray dust suppressants for dust reduction in coal mines [J]. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 2023, 36: 101253. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101253>.
- [11] TESSUM Mei W, RAYNOR Peter C. Effects of spray surfactant and particle charge on respirable coal dust capture [J]. Safety and Health at Work, 2017, 8: 296-305. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2016.12.006>.
- [12] ZHOU Qun, QIN Bo-tao, ZHOU Bang-hao, et al. Effects of surfactant adsorption on the surface functional group contents and polymerization properties of coal dust [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 173: 693-701. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.049>.
- [13] YAN Jia-yi, NIE Wen, ZHANG Hai-han, et al. Synthesis and performance measurement of a modified polymer dust suppressant [J]. Advanced Powder Technology, 2020,

- 31:792-803, <https://doi.org/10.1016/j.apl.2019.11.033>.
- [14] ZHANG Hai-han, NIE Wen, YAN Jia-yi, et al. Preparation and performance study of a novel polymeric spraying dust suppression agent with enhanced wetting and coagulation properties for coal mine[J]. Powder Technology, 2020, 364: 901-914. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.082>.
- [15] CHEN Man, CHEN Xi, GE Shao-cheng, et al. Study on preparation and properties of mineral compound suppressant[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2024, 207: 88-99. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2024.05.033>.
- [16] 来弘鹏, 周冬辉, 宋竹兵, 等. 山岭隧道水压爆破降尘剂试验研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(2): 188-194. DOI:10.13807/j.cnki.mtt.2021.02.024.
- [16] LAI Hong-peng, ZHOU Dong-hui, SONG Zhu-bin, et al. Experimental study on dust suppressing agent for hydraulic blasting in mountain tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(2): 188-194. DOI:10.13807/j.cnki.mtt.2021.02.024. (in Chinese)
- [17] 王和堂, 贺 胜, 章 琦, 等. 微生物发酵法合成生物抑尘剂的试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 477-488.
- [17] WANG He-tang, HE Sheng, ZHANG Qi, et al. Experimental study on synthesis of biological dust suppressant by microbial fermentation[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 477-488. (in Chinese)
- [18] 蒋仲安, 王 伟. 降低爆破烟尘的降尘剂配方的实验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(10): 1720-1724.
- [18] JIANG Zhong-an, WANG Wei. Research on optimal formula of dustfall agent to remove blasting smoke[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1720-1724. (in Chinese)
- [19] 王 剑. 聚能水压爆破水袋装液与除尘效果研究[J]. 建筑技术开发, 2019, 46(18): 94-96.
- [19] WANG Jian. Study on water bag liquid and dust removal effect of cumulative hydraulic blasting[J]. Building Technology Development, 2019, 46(18): 94-96. (in Chinese)
- [20] 吴奎斌. 高效水炮泥爆破防尘技术的应用[J]. 能源技术与管理, 2010(4): 75-76.
- [20] WU Kui-bin. Application of high-efficiency water cannon mud blasting dust control technology[J]. Energy Technology and Management, 2010(4): 75-76. (in Chinese)
- [21] TARIQ Mohammad, FREIRE Mara G, SARAMAGO Benilde, et al. Surface tension of ionic liquids and ionic liquid solutions[J]. Chemical Society Reviews, 2012, 41(2): 829-868. DOI:10.1039/c1cs15146k

(上接第 232 页)

- [8] 杨 军, 苏 平, 李萍丰, 等. 诱爆销毁废旧炮(航)弹的爆破设计及组织实施[J]. 工程爆破, 2005, 11(4): 84-87.
- [8] YANG Jun, SU Ping, LI Ping-feng, et al. Blasting design and organization of induced detonation for destruction of waste artillery and aerial bombs[J]. Engineering Blasting, 2005, 11(4): 84-87. (in Chinese)
- [9] 张正平, 张宝国, 刘文广, 等. “金航”轮沉船水下爆破解体[J]. 工程爆破, 2003, 9(2): 65-68.
- [9] ZHANG Zheng-ping, ZHANG Bao-guo, LIU Wen-guang, et al. Underwater explosive demolition of the sunken ship “Jinhang”[J]. Engineering Blasting, 2003, 9(2): 65-68. (in Chinese)
- [10] 陈英海. 高吸水树脂在森林防火中的应用[J]. 森林防火, 1993(2): 44-45.
- [10] CHEN Ying-hai. Application of super absorbent resin in forest fire prevention[J]. Forest Fire Prevention, 1993(2): 44-45. (in Chinese)
- [11] 刘云川, 汪旭光, 刘连升. 不耦合装药条件下炮孔初始压力计算的能量方法[J]. 中国矿业, 2009, 18(6): 104-107.
- [11] LIU Yun-chuan, WANG Xu-guang, LIU Lian-sheng. Energy method for calculating initial pressure in blast holes under uncoupled charge conditions[J]. China Mining Magazine, 2009, 18(6): 104-107. (in Chinese)
- [12] 王志亮, 诸 斌. 径向不耦合爆破中聚苯乙烯泡沫吸能数值研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(7): 1020-1025.
- [12] WANG Zhi-liang, ZHU Bin. Numerical study on energy absorption of polystyrene foam in radial uncoupled blasting[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2012, 40(7): 1020-1025. (in Chinese)
- [13] 浙江省爆破行业协会. T/ZJBP 0001—2022 爆炸物品销毁作业安全技术规范[S]. 北京: 冶金工业出版社, 2022.
- [13] Zhejiang Blasting Industry Association. T/ZJBP 0001—2022 Technical specification for safety of explosive destruction operations[S]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2022. (in Chinese)