

矿井湿喷过程的产尘特性和复合降尘外加剂的制备

蒋仲安^{1,2}, 司明理^{1,2,4}, 张国梁^{1,2,3}, 曾发镔^{1,2}, 李 聪^{1,2}

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 国家卫生健康委粉尘危害工程防护重点实验室, 北京 102308; 3. 中国安全生产科学研究院, 北京 100012; 4. 新疆维吾尔自治区安全生产应急救援指挥中心, 新疆 乌鲁木齐 830013)

摘 要: 矿井湿喷过程的粉尘污染是制约湿喷支护工程高效、清洁和安全生产的重要因素。为降低湿喷过程粉尘对作业人员的危害, 提高矿山企业粉尘防治和职业健康保障的能力, 运用气溶胶力学与 Hertz-Mindlin 碰撞理论, 构建了湿喷混凝土冲击产尘的动力学模型; 并针对湿喷工艺特点, 建立了湿喷混凝土相似实验装置, 对不同工艺条件下的产尘特性进行分析; 结合湿喷过程外加剂的降尘机制, 对外加剂的减弹降尘性能进行研究, 配置适用于湿喷工艺的高性能复合降尘外加剂。结果表明, 湿喷过程中弥散在空气中的气溶胶颗粒粒径大部分在 $2\text{ }\mu\text{m}$ 以下, $2\text{ }\mu\text{m}$ 以下 (不含 $2\text{ }\mu\text{m}$) 颗粒数占比在 90% 以上。湿喷产尘主要受喷射距离、喷射压力和水灰比影响。喷射距离不宜太大或太小; 随着喷射距离的增加, 颗粒浓度呈先降低后增加的趋势。同样, 喷射压力为 0.4 MPa 时, 较为合适。当压力太大时, 会导致回弹率和粉尘质量浓度增加; 当压力太小时, 物料到达受喷面时的动能较小, 不能很好地黏附在受喷面。同时, 在保证物料流动性的同时, 可通过减小水灰比来降低回弹率和产尘量。研制的复合降尘外加剂主要由速凝剂、络合剂、早强剂、黏结剂以及表面活性剂复配形成。通过正交实验以及优化实验, 最终确定的湿喷复合降尘外加剂配方及其质量分数为: A-55%、B-3%、C-4.5%、D-0.5%、E-0.15%、水-36.85%。掺入该复合降尘外加剂后, 湿喷过程粉尘质量浓度下降了约 57%, 有效降低湿喷过程的粉尘产生量, 降尘效果明显。

关键词: 降尘外加剂; 产尘特性; 粉尘; 湿喷; 矿井

中图分类号: TD714 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)02-0865-11

Dust generation characteristics during the wet-mix shotcrete process in mines and the preparation of a composite dust-reducing additive

JIANG Zhongan^{1,2}, SI Mingli^{1,2,4}, ZHANG Guoliang^{1,2,3}, ZENG Fabin^{1,2}, LI Cong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. NHC Key Laboratory for Engineering Control of Dust Hazard, Beijing 102308, China; 3. China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China; 4. Production Safety Emergency Rescue Command Center, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830013, China)

Abstract: The dust pollution during the wet-mix shotcrete process in mines constitutes a crucial factor limiting the efficiency, cleanliness, and safety of wet-mix shotcrete support projects. To mitigate the potential harm to workers and enhance the dust control and occupational health capabilities of mines, a dynamic model for the dust generation during wet-mix shotcrete is constructed using the aerosol mechanics and the Hertz-Mindlin collision theory. In consideration of the

收稿日期: 2023-10-29 修回日期: 2024-02-29 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.ST23.1387

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (51874016)

作者简介: 蒋仲安 (1963—), 男, 浙江诸暨人, 教授。E-mail: jza1963@263.net

通讯作者: 张国梁 (1994—), 男, 山西朔州人, 博士。E-mail: zg1556759842@163.com

引用格式: 蒋仲安, 司明理, 张国梁, 等. 矿井湿喷过程的产尘特性和复合降尘外加剂的制备[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 865-875.

JIANG Zhongan, SI Mingli, ZHANG Guoliang, et al. Dust generation characteristics during the wet-mix shotcrete process in mines and the preparation of a composite dust-reducing additive[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 865-875.



移动阅读

characteristics of the wet-mix shotcrete process, a similar experimental apparatus for wet-mix shotcrete is established to analyze the dust generation characteristics under different process conditions. Additionally, focusing on the dust reduction mechanism of additives in the wet-mix shotcrete process, a study is conducted on the dust reduction performance of additives, leading to the formulation of a high-performance composite dust-reducing additive suitable for the wet-mix shotcrete process. The results show that the aerosol particles dispersed in the air during the wet-mix shotcrete process predominantly have diameters below $2\text{ }\mu\text{m}$, with particles below $2\text{ }\mu\text{m}$ constituting over 90% of the particle count. Dust generation during wet-mix shotcrete is primarily influenced by factors such as spray distance, spray pressure, and water-cement ratio. The optimal spray distance should avoid extremes, and as the distance increases, the particle concentration shows a trend of initially decreasing and then increasing. Similarly, a spray pressure of 0.4 MPa is deemed suitable, and excessively high pressure leads to an increased rebound rate and dust concentration, while very low pressure results in insufficient kinetic energy for material adhesion to the sprayed surface. Simultaneously, maintaining material fluidity and reducing rebound rates and dust generation can be achieved by lowering the water-cement ratio. The composite dust-reducing additive, composed of setting accelerators, chelating agents, early strength agents, binders, and surfactants, is developed. Through orthogonal and optimization experiments, the final formula is determined as A-55%, B-3%, C-4.5%, D-0.5%, E-0.15%, and water-36.85%. Incorporating this composite dust-reducing additive reduces dust concentration during the wet-mix shotcrete process by approximately 57%, effectively lowering dust emissions and demonstrating a significant dust reduction effect.

Key words: dust-reducing additives; dust generation characteristics; dust; wet-mix shotcrete; mine

矿产资源是国民经济和社会发展的基石,随着“西部大开发”和“一带一路”战略的不断推进,我国对中西部地区矿产资源的需求与日俱增^[1-3]。喷射混凝土作为矿山巷道支护的重要工艺,会产生大量的水泥粉尘,对作业人员的职业健康和生命安全将造成严重危害。喷射混凝土工艺产生的细微粉尘常诱发不可治愈的矽肺病,水泥粉尘的致敏性、刺激性亦可引起较煤尘或岩尘更为严重的疾病,如皮肤炎症、结/角膜炎、限制性肺病和肺癌等^[4-5]。因此,为使喷射混凝土过程产生的粉尘降低到合理水平,改进物料喷射工艺,研制降尘外加剂已成为迫切需求与有效途径。

目前,研究多采用理论分析、数值模拟、现场试验等手段对矿井喷射混凝土的粉尘污染问题进行分析^[6-11]。宋海洲^[12]分析了湿喷工艺的产生机理和优化参数,研制了新型泡沫混凝土湿喷机组;WANG等^[13]通过减少管网弯头的数量,设计了喷浆机自动除尘系统;YUNO等^[14]利用球型细颗粒粉煤灰替代喷射混凝土物料中的细骨料,有效降低了喷射过程的产生量和回弹率;曾宪涛等^[15]将喷射混凝土与磁化水进行搅拌后,发现磁化水的加入可提高混凝土的体系强度,并减少喷射产尘量。同时,目前对抑尘机理的研究也有了一定进展^[16]。XUE等^[17]制备了一种新型的无碱喷射混凝土用液体促进剂,探讨了无碱液体促进剂的促进机理以及喷射剂与促进剂的水化过程。周刚教授团队^[18]研究的新型无碱速凝剂,在降低混凝土凝结时间的同时,可有效提高物料的黏聚力,降低回弹量和粉尘产

生量。混凝土拌合过程添加增黏剂和抑尘剂也可有效降低混凝土喷射过程的粉尘,减少由回弹损失的混凝土,如德国生产的 Silipon SPR6 型增黏剂、日本竹中土木、三共化成公司联合研制的高效低粉尘喷射混凝土增黏剂。国内也有一些效果较好的产品,如冶金建筑研究总院研究的 8604 型增黏剂。

从目前国内外的研究成果综合来看,关于矿井湿喷产尘的研究主要集中在湿喷工艺优化、喷射设备设计以及湿喷粉尘运移扩散等领域。对于我国矿山粉尘防治和职业健康防护工作来说,接尘工人数和罹患尘肺病人数仍处于世界高位,湿喷作业现场依旧是最差的作业场所之一,通过研制新型降尘外加剂^[19-20]与改进喷射工艺^[21-24]是降低湿喷过程粉尘质量浓度的有效措施。因此,笔者对湿喷产尘特性进行理论分析和实验研究,并配置高效复合降尘外加剂,为构建安全环保、清洁健康的矿井环境提供技术参考。

1 湿喷混凝土冲击产尘动力学模型

矿山常见的混凝土喷射工艺主要为干喷、潮喷和湿喷^[25]。3种技术的主要区别是骨料、胶凝材料与水混合的位置,如图1所示。干喷混凝土是将骨料、胶凝材料以及外加剂按一定比例混合并搅拌均匀后,采用压缩空气将其输送到喷枪位置与高压水按比例混合,然后喷射到受喷面。干喷工艺受限于其工作原理,物料与水接触的时间较短且混合不均匀,回弹率较高,会产生大量的粉尘颗粒。潮喷混凝土的原理与干喷

相似,区别在于会在混凝土风送前,加一定量的水进行搅拌,再输送到喷头位置与高压水混合后进行喷射作业。潮喷可在一定程度上降低混凝土的回弹和粉尘的产生。湿喷混凝土技术是将骨料、胶凝材料以及外加剂在拌合机内按一定比例与水混合并搅拌均匀后,泵送到喷枪位置与速凝剂混合,再经过压缩气体喷射到受喷面。由于湿喷过程混凝土与水会在泵送前充分混合,水合化较好,而喷射混凝土产生主要为水泥颗粒,因此会大幅降低喷射过程的粉尘产生量和回弹量。目前,湿喷工艺已成为主要的混凝土喷射技术,在许多国家被广泛使用,特别是在煤矿领域的研究和应用较多。

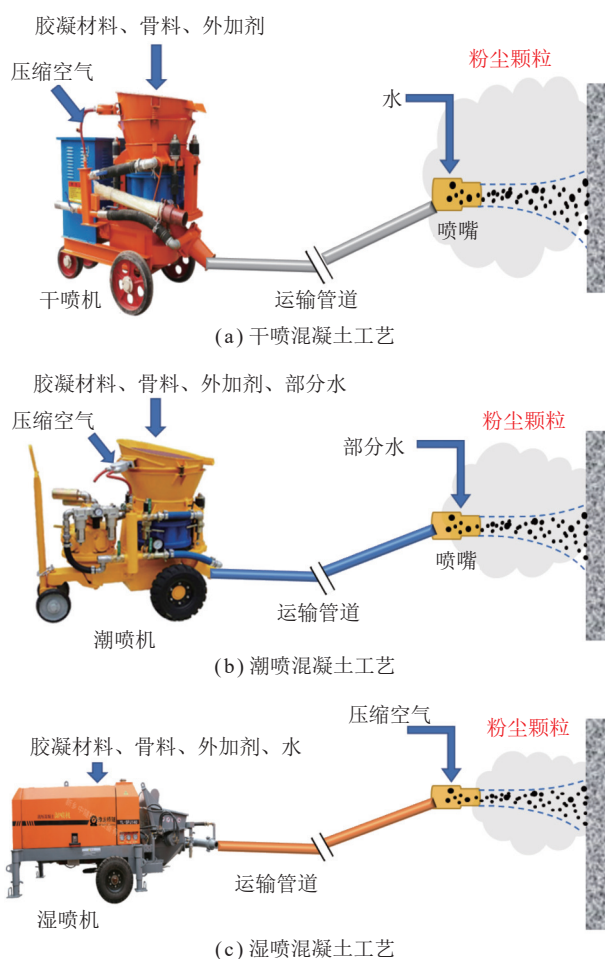


图1 干喷、潮喷及湿喷工艺流程

Fig.1 Process flow for dry-mix shotcrete, damp-mix shotcrete, and wet-mix shotcrete

根据湿喷工艺特点及产尘机理,将湿喷产生尘分为2个阶段,即喷射阶段和碰撞阶段,如图2所示。

在喷射阶段时,当物料被泵送到喷枪位置后,高速气流会冲击物料,使其破碎;同时,粉尘从物料中析出。由于受力和速度发生变化,摆脱物料流的粉尘会在湿喷气流的作用下运移扩散。

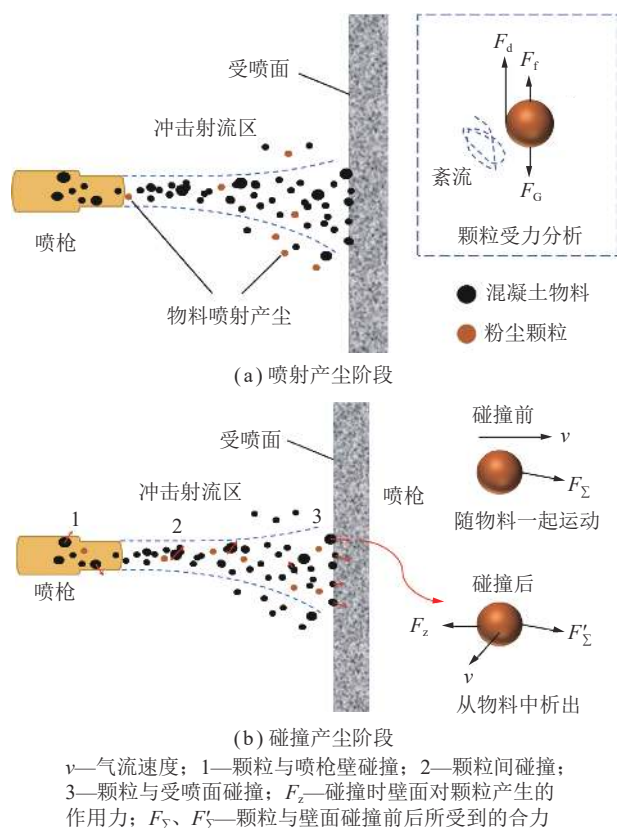


图2 湿喷过程粉尘颗粒产生的2个阶段

Fig.2 Two stages of dust particle generation in the wet-mix shotcrete process

在碰撞阶段时,当物料与喷枪壁摩擦碰撞,成团的物料会被冲散,导致一次碰撞产生尘,同时产生的粉尘会进入冲击射流区域;喷出的物料在冲击射流区会发生相互撞击,导致2次碰撞产生尘;当物料撞击受喷面时,在冲击力的作用下,会破坏物料团粒的结构,导致物料破碎或回弹,同时细小颗粒物被剥离扩散到空气中,该过程为3次碰撞产生。

1.1 喷射阶段气固耦合动力学模型

湿喷产生的粉尘和冲击气流之间存在相互作用,粉尘在空气中主要受到重力 F_G 、浮力 F_f 、阻力 F_d 、压力梯度力 F_p 、巴塞特力 F_B 、萨夫曼升力 F_s 、马格努斯效应力 F_M 以及虚假质量力 F_V 等影响^[26-28]。根据牛顿第二定律得到,喷射阶段粉尘的运动方程为

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = \sum F = F_G + F_f + F_d + F_p + F_B + F_s + F_M + F_V \quad (1)$$

其中, m_p 为粉尘质量, kg; v_p 为颗粒运动速度, m/s; t 为粉尘运动时间, s。与其他作用力相比, F_p 、 F_B 、 F_s 、 F_M 、 F_V 的数量级非常小,对紊流区的粉尘的扩散影响相对较小,忽略不计。同时,湿喷粉尘对气流的反作用力也可忽略,仅考虑压缩气流对粉尘颗粒的作用力。假

设粉尘颗粒为球形,式(1)变为

$$\frac{1}{6}\pi d_p^3 \rho_p \frac{dv_p}{dt} = F_G + F_f + F_d = \frac{\pi}{6}d_p^3 \rho_p g - \frac{\pi}{6}d_p^3 \rho_g g + C_D \frac{\rho_g d_p^2 v_p^2 \pi}{8} \quad (2)$$

式中, d_p 为颗粒粒径, m; g 为重力加速度, 取 9.81 m/s^2 ; ρ_g 、 ρ_p 分别为气体和颗粒密度, kg/m^3 ; C_D 为阻力系数。

颗粒在停止运动前, 速度是随时间逐渐变化, 利用颗粒雷诺数 Re 对式(2)简化:

$$\frac{dRe}{dt} = \frac{3}{4} \frac{\mu_g}{\rho_p d_p^2} \left[\frac{4g\rho_g(\rho_p - \rho_g)}{3\mu_g^2} d_p^3 - C_D Re^2 \right] = \frac{1}{24\tau} (\xi - C_D Re^2) \quad (3)$$

式中, $Re = \frac{\rho_g d_p v}{\mu_g}$; $\xi = \frac{4g\rho_g(\rho_p - \rho_g)}{3\mu_g^2} d_p^3$; τ 为湿喷粉尘颗粒的松弛时间, $\tau = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_g}$, 其物理意义为颗粒运动受阻而使速度减小至 $1/e$ 所需要的时间(e 为自然对数底数), s ; μ_g 为空气的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

计算湿喷粉尘垂直向下的运动距离 z , 将 $\frac{dz}{dt} = v_{py}$ 、

$v_{py} = \frac{\mu_g Re}{\rho_g d_p}$ 代入式(3), 则有

$$\frac{dRe}{dz} = \frac{3\rho_g}{4\rho_p d_p} \frac{\xi - C_D Re^2}{Re} \quad (4)$$

对于满足斯托克斯定律的湿喷粉尘颗粒, 有 $C_D Re^2 = 24Re$ 。同时, 颗粒挣脱壁面瞬间, 竖直方向的速度为 0, 即当 $t=0$ 时, $v_{py}=0$ 。因此, 湿喷过程喷射阶段的颗粒沉降方程为

$$t = \tau \ln \left(\frac{\xi}{\xi - 24Re} \right) \quad (5)$$

$$z = -\frac{\rho_p d_p}{18\rho_g} \left[Re + \frac{\xi}{24} \ln \left(\frac{\xi - 24Re}{\xi} \right) \right] \quad (6)$$

1.2 碰撞阶段粉尘冲击动力学模型

湿喷粉尘颗粒与受喷面碰撞可简化为颗粒与喷枪壁、颗粒与受喷面以及颗粒间碰撞 3 种情况。如图 3 所示, 除了气固相互作用外, F_d 、 F_s 、 F_M 来源于颗粒与颗粒、颗粒与壁面之间碰撞, 此时不可忽略。因此, 湿喷过程碰撞阶段粉尘的运动方程为

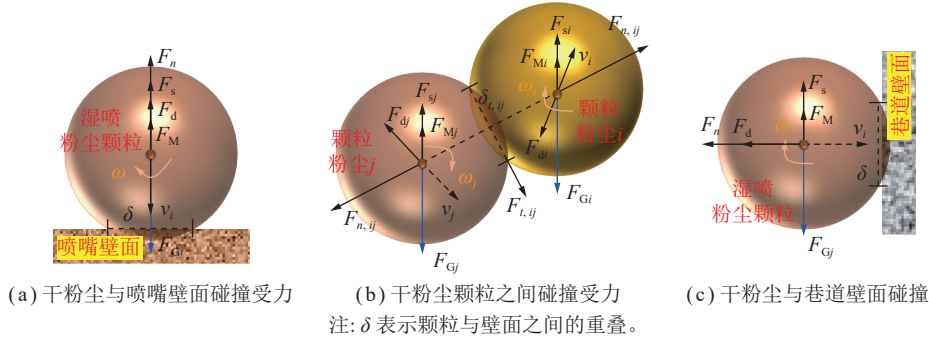


图 3 湿喷粉尘颗粒碰撞受力分析

Fig.3 Force analysis of dust particles during wet-mix shotcrete

$$m_{pi} \frac{dv_{pi}}{dt} = F_{Gi} + \sum_{j=1}^{n_i} (F_{n,ij} + F_{t,ij}) + F_{d,i} + F_{s,i} + F_{M,i} \quad (7)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i} (T_{t,ij} + T_{n,ij}) \quad (8)$$

式中, m_{pi} 为颗粒 i 的质量, kg ; v_{pi} 为颗粒 i 的瞬时速度, m/s ; n_i 为对颗粒 i 存在作用力的颗粒总数; $F_{n,ij}$ 为法向力, N ; $F_{t,ij}$ 为切向力, N ; ω_i 为颗粒 i 的角速度, rad/s ; $T_{t,ij}$ 为由切向力产生的颗粒 i 和颗粒 j 之间的扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; $T_{n,ij}$ 为由法向力产生的颗粒 i 和颗粒 j 之间的扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ [29]。

湿喷颗粒的运动是相互独立, HertzMindlin 模型能够反映颗粒与受喷面发生碰撞时的相互作用 [30-31]。于是颗粒的法向力和切向力分别为

$$\begin{cases} F_{n,ij} = \frac{4}{3} Y^* \sqrt{R^*} \delta_{n,ij}^{3/2} - F_{n,ij}^d \\ F_{n,ij}^d = -\sqrt{\frac{5}{6}} \frac{\ln e_1}{\sqrt{\ln^2 e_1 + \pi^2}} \sqrt{S_{n,ij} m^* v_n} \\ S_{n,ij} = 2Y^* \sqrt{R^*} \delta_{n,ij} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} F_{t,ij} = -\delta_{t,ij} S_{t,ij} - F_{t,ij}^d \\ F_{t,ij}^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}} \frac{\ln e_1}{\sqrt{\ln^2 e_1 + \pi^2}} \sqrt{S_{t,ij} m^* v_t} \\ S_{t,ij} = 8G^* \sqrt{R^*} \delta_{t,ij} \end{cases} \quad (10)$$

其中, Y^* 为等效弹性模量, Pa ; m^* 为颗粒质量, kg ; R^* 为等效半径, m ; $\delta_{n,ij}$ 、 $\delta_{t,ij}$ 分别为法向与切向的重叠; $S_{n,ij}$ 为法向刚度; v_n 、 v_t 分别为相对速度的法向与切向分量, m/s ; e_1 为恢复系数; G^* 为剪切模量。其中, $F_{n,ij}$ 取决于法向重叠 $\delta_{n,ij}$ 和切向刚度 $S_{t,ij}$ 。

湿喷产生的粉尘颗粒携带水分,当2个含水颗粒接触时,颗粒之间的间隙液体表现出索道状或毛细管状态,并引起各种额外力和扭矩。因此,利用液桥模型描述颗粒间隙液体的相互作用^[32-33]。式(7)修正为

$$m_{pi} \frac{dv_{pi}}{dt} = F_{Gi} + \sum_{j=1}^{n_i} (F_{n,ij} + F_{t,ij}) + F_{d,i} + F_{s,i} + F_{M,i} + F_{lq} \quad (11)$$

$$F_{lq} = \sum_{j=1}^{n_i} (F_{cap} n_{ij} + F_{v,n} n_{ij} + F_{v,t} t_{ij}) \quad (12)$$

式中, F_{lq} 为颗粒之间的液桥力, N; F_{cap} 为颗粒之间的毛细管力, N; $F_{v,n}$ 为法向黏性力, N; $F_{v,t}$ 为切向黏性力, N; n_{ij} 为颗粒 i 与颗粒 j 之间的法向单位矢量; t_{ij} 为颗粒 i 与 j 之间的切向单位矢量。

$$F_{cap} = 4\pi R^* \sigma G_f \cos \theta \quad (13)$$

$$F_{v,n} = -6\pi\mu_L R^{*2} G_f^2 \frac{dh}{hdt} \quad (14)$$

$$F_{v,t} = -12\pi R^* \mu_L v_t \left[\frac{8}{15} \ln \left(\frac{2R^*}{h} \right) + 0.9588 \right] \quad (15)$$

式中, σ 为表面张力, N/m; θ 为接触角, rad; μ_L 为液体的黏度系数; G_f 为校正因子, $G_f = 1 - [1 + V_L/(\pi R h^2)]^{-0.5}$; h 为颗粒表面之间的分离距离, m; V_L 为颗粒间液桥的体积, m^3 。

颗粒间的“液桥”相互作用如图4所示。初始阶段,液体均匀地覆盖在颗粒表面,此时液膜厚度为 h_0 ;当2个颗粒接触时,会形成“液桥”,2者间隙液引起的的作用力可用式(13)~(15)表示。当2个颗粒的距离达到临界值后,液桥消失,利用毛细管数 C_a 表示该临界值。

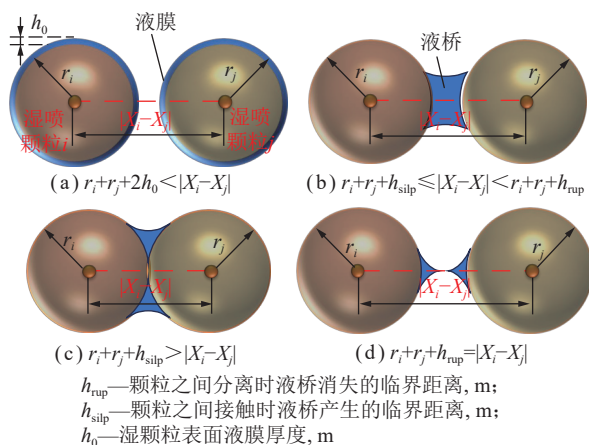


图4 湿喷粉尘颗粒间的液桥作用

Fig.4 Liquid bridge interaction among wet-mix shotcrete dust particles

$$h_{rup} = (1 + 0.5\theta) \left(1 + \sqrt{C_a} \right) V_L^{1/3} \quad (16)$$

2 矿井湿喷过程的产尘特性实验研究

2.1 矿井湿喷产尘特性相似实验平台的构建

针对湿喷过程的产尘特点,建立湿喷混凝土相似实验装置,如图5所示。喷射系统由喷射装置、流量计、PU管与空压机组成。同时,采用粉尘粒子计数器(型号:Fluke 985)统计喷射过程中空气中的颗粒数,采用粉尘浓度检测仪(型号:TSI 8530)测定粉尘质量浓度。监测位置在喷嘴出口上方约0.4 m位置。

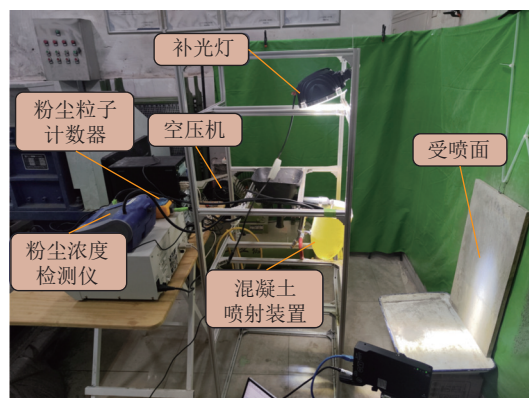


图5 湿喷产尘特性的相似实验平台

Fig.5 Analogous experimental platform for studying the dust generation characteristics during wet-mix shotcrete

2.2 不同喷射距离下的湿喷产尘特性

分析喷射距离对粉尘产生的影响。现场湿喷时,喷枪出口距受喷面的距离为0.7~1.9 m。实验过程的喷射距离的相似比为4.33。因此,确定实验时的喷射距离为0.16、0.23、0.30、0.37和0.44 m。同时,固定喷射压力为0.4 MPa、水灰比为0.41时,分析不同喷射距离下产生的粉尘颗粒数和全尘质量浓度,如图6(a)所示。

湿喷过程中弥散在空气中的气溶胶颗粒粒径大部分在2 μm 以下,2 μm 以下(不含2 μm)颗粒数占比在90%以上。随着喷射距离的增加,颗粒质量浓度呈先降低后增加的趋势。

由于喷射距离的增加,物料到达受喷面的时间增加,在压缩气体冲击作用下,物料碰撞、剪切产生的粉尘增多,导致悬浮颗粒物质量浓度增加。但当距离太大时,物料到达受喷面时动能较低,回弹产生的粉尘量会大大降低,导致最终的粉尘质量浓度下降。当喷射距离为0.37 m,其全尘质量浓度最高为16.0 mg/m^3 。

2.3 不同喷射压力下的湿喷产尘特性

分析喷射压力对粉尘产生的影响。现场湿喷提供的喷射压力一般为0.2~0.6 MPa。实验过程的喷射压力的相似比为1。因此,确定实验时喷射的压力为

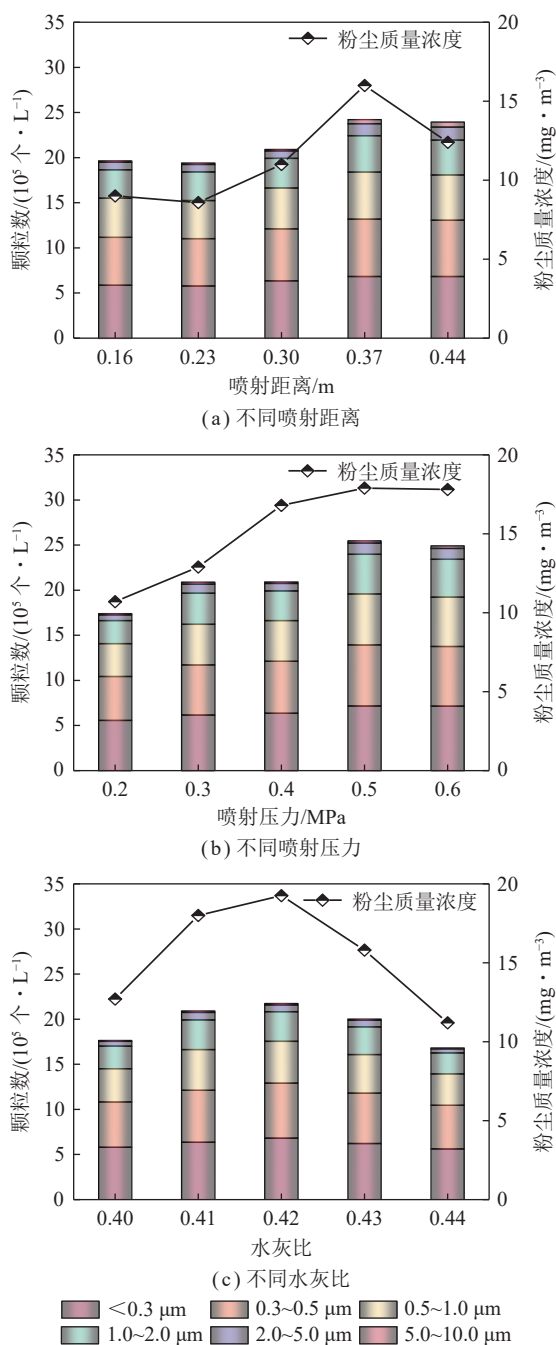


图6 不同喷射距离、喷射压力、水灰比的粉尘颗粒数及质量浓度

Fig.6 Particle count and concentration of dust at different water spraying distances, spraying pressure and cement ratio

0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 MPa。固定喷射距离为 0.30 m、水灰比为 0.41 时,分析不同喷射距离下产生的粉尘颗粒数和全尘质量浓度,如图 6(b) 所示。

当喷射压力为 0.2 MPa 时,物料不能很好的黏附在受喷面上,大量物料会剥落,导致回弹率较高;当喷射压力为 0.4 MPa 及以上时,物料与受喷面结合较好,但喷射过程产生的粉尘质量浓度较大。

湿喷过程,随着喷射压力的增加,产生的悬浮气

溶胶颗粒质量浓度和颗粒数均会逐渐上升。由于压力的增加,物料喷射具有的动能上升,加强了对物料周围流场的扰动,导致许多细微粉尘颗粒逸散;同时,在破碎、碰撞、剪切和回弹过程产生的粉尘量增多。

因此,现场施工时,喷射压力不宜太大或太小。当喷射压力太大时,压缩气体的冲击力太大,导致物料回弹比例增加;当喷射压力太小时,物料到达受喷面时的动能较小,不能很好的黏附在壁面上。

2.4 不同水灰比下的湿喷产尘特性

分析物料黏度对粉尘产生的影响。物料黏度主要受水灰比影响。湿喷时采用的水灰比一般在 0.40~0.44。因此,确定实验的水灰比为 0.40、0.41、0.42、0.43、0.44。固定喷射距离为 0.30 m、喷射压力为 0.4 MPa 时,分析不同水灰比下湿喷产尘特性的变化,如图 6(c) 所示。

湿喷过程,当水灰比由 0.40 上升到 0.42 时,物料黏度下降,产生的悬浮颗粒物质量浓度会明显上升;但当水灰比继续增加后,由于物料黏度太低,导致喷射过程类似液体射流,水泥被水充分浸润,喷射产生的雾滴增多,而水泥尘减少,因此空气中悬浮颗粒物的质量浓度降低。

当水灰比增加、黏度降低后,悬浮颗粒物的粒子个数与质量浓度相同,也出现先增加后降低的趋势。以 2 μm 以下(包含 2 μm)的颗粒为主,2 μm 以上的颗粒数量占比均在 10% 以下。

3 矿井湿喷复合降尘外加剂的制备

针对湿喷过程的产生问题,一种方法是改进物料喷射工艺,另一种方法是改变原材料以及配合比。其中,外加剂是物料配合以及喷射过程不可缺少的物质。物料喷射过程,添加单一的速凝剂在降低粉尘质量浓度,减少回弹率方面效果欠佳。因此,通过配合早强剂、增黏剂以及表面活性剂而形成的复合型降尘外加剂逐渐成为发展的主要趋势。复合型降尘外加剂除需具有良好的工作性能外(速凝、早强方面),还需具有黏性好、回弹率低和产尘量小等特点。针对湿喷过程的产生特性,笔者在保证物料基本工作性能的基础上,对外加剂的减弹降尘性能进行研究,配置适用于湿喷工艺的高性能复合降尘外加剂。

3.1 复合降尘外加剂制备的原料及实验设备

选取 5 种试剂进行复配优化实验:十八水硫酸铝($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$)、氟化钠 NaF、三乙醇胺 $\text{C}_6\text{H}_{15}\text{NO}_3$ 、聚丙烯酰胺 PAM 以及十二烷基苯磺酸钠 SDBS。其中,十八水硫酸铝具有速凝效果,氟化钠具有络合作用,可增加十八水硫酸铝,三乙醇胺具有早强效果,聚丙烯酰胺具有增黏效果。

采用基准水泥和标准砂对配置的外加剂性能进行测试。实验过程主要对掺外加剂后的净浆凝结时间、砂浆抗压强度、水泥净浆黏度以及溶液表面张力进行测定。其中,使用的仪器设备见表 1。

表 1 实验过程使用的主要仪器设备
Table 1 Primary instrumental equipment utilized in the experimental process

仪器	型号	仪器	型号
恒温加热磁力搅拌器	DF-101S	数控水泥养护箱	SY-84
水泥净浆搅拌器	NJ-160	多功能试验机	冠腾YAW-600
维卡仪	ISO	净浆流动度试模测定仪	60~36 mm型
数显黏度计	NDJ-5s	表面张力测定仪	BZY-201

3.2 复合降尘外加剂的正交实验设计
设计正交实验,研究复配后的溶液对物料凝结时间、强度以及黏度的影响,并确定最佳复合降尘外加剂基础溶液的配方。

复合降尘外加剂基础溶液的配制过程如图 7 所示,分 3 个步骤:① 在恒温水浴条件下 (55~70 ℃), 采用磁力搅拌机使十八水硫酸铝溶解于水中, 搅拌速率为 150~200 r/min。② 当十八水硫酸铝完全溶解后, 在溶液中添加氟化钠, 再次搅拌均匀后保持 40 min, 使其充分反应;③ 每隔 30 min 添加一定量的三乙醇胺和聚丙烯酰胺, 使其络合溶解, 即可得到复合外加剂基础溶液。将其冷却到室温后, 装瓶备用即可。



图 7 复合外加剂制备工艺流程
Fig.7 Process flow for the preparation of composite additives

为确定 4 种材料对凝结时间和抗压强度影响的主次顺序及混合溶液的最佳配比,设计四因素三水平的正交实验。实验水平和因素设计见表 2,实验方案见表 3。

表 2 正交实验设计的水平和因素
Table 2 Levels and actors in orthogonal experimental design

水平	因素			
	A	B	C	D
1	45	3.0	3.0	0.3
2	50	4.0	4.0	0.4
3	55	5.0	5.0	0.5

3.3 复合降尘速凝剂的正交实验结果与分析

按上述配比制备 9 组复合外加剂基础溶液,如图 8(a) 所示。将凝结时间、强度和加入外加剂后的水泥净浆黏度作为测定指标,其中,复合外加剂掺量为水泥质量的 6%。掺入复合外加剂后的水泥净浆形态

表 3 正交实验方案
Table 3 Orthogonal experimental plan

实验编号	A	B	C	D
1	1(45)	1(3.0)	1(3.0)	1(0.3)
2	1(45)	2(4.0)	2(4.0)	2(0.4)
3	1(45)	3(5.0)	3(5.0)	3(0.5)
4	2(50)	1(3.0)	2(4.0)	3(0.5)
5	2(50)	2(4.0)	3(5.0)	1(0.3)
6	2(50)	3(5.0)	1(3.0)	2(0.4)
7	3(55)	1(3.0)	3(5.0)	2(0.4)
8	3(55)	2(4.0)	1(3.0)	3(0.5)
9	3(55)	3(5.0)	2(4.0)	1(0.3)

注: A 因素为十八水硫酸铝的质量分数,%; B 因素为氟化钠的质量分数,%; C 因素为三乙醇胺的质量分数,%; D 因素为聚丙烯酰胺的质量分数,%。

如图 8(b) 所示。由于添加掺有速凝成分的复合外加剂后,水泥会快速凝结。因此在测定黏度时,将添加剂掺量降低到 2%,防止水泥过快凝结硬化。

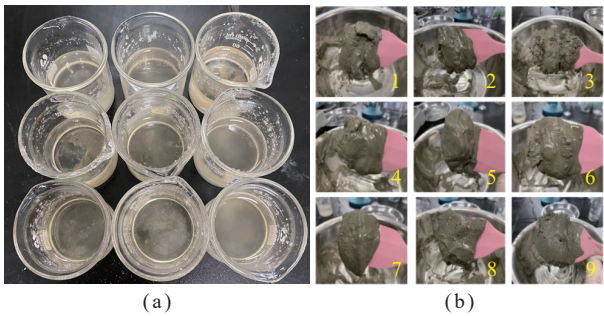


图 8 不同组别的外加剂溶液和水泥净浆形态
Fig.8 Solution of additives and the morphology of cement slurries in different groups

正交实验如图 9 所示,制备的 9 种复合外加剂溶液的初凝时间和终凝时间均低于 5、12 min,满足 GB/T 35159—2017《喷射混凝土用速凝剂》。同时,掺入不同组别的外加剂,水泥净浆黏度显著增加,不同组别间差距较大。水泥净浆黏度的显著增加可减少干性水泥粉尘的逸散,增强对喷射过程中粉尘的捕捉。

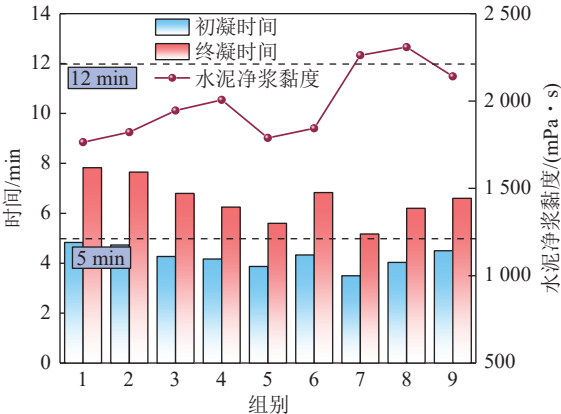


图 9 不同组别复合外加剂的正交实验结果
Fig.9 Orthogonal experimental results for various groups of composite admixtures

采用极差分析法对降尘外加剂的正交复配实验结果进行分析,见表 4,各组分材料对净浆初凝时间的影响程度顺序为 ACDB(由大到小,下同),即十八水硫酸铝>三乙醇胺>聚丙烯酰胺>氟化钠,对净浆终凝时间的影响程度顺序为 ACDB,对掺入外加剂后水泥体系黏度的影响程度顺序为 ADBC。

组分 A(十八水硫酸铝)决定水泥体系的促凝效果和黏度,但受限于溶解度,组分 A 的最佳掺量为水平 3;掺入组分 B(氟化钠)后,促凝效果和黏度会略微下降,但由于 B 的主要作用是络合 A,防止溶液失稳,综合考虑组分 B 的最佳掺量为水平 1;组分 C(三乙醇胺)对凝结时间和抗压强度的影响也较大,但对水泥体系的黏度影响较小,综合考虑组分 C 的最佳掺量为水平 3;添加组分 D(聚丙烯酰胺)对凝结时间的影响

表 4 正交实验极差分析结果

Table 4 Orthogonal experimental range analysis results						
指标	值	A	B	C	D	因素排序及最佳方案
初凝时间	均值1	4.61	4.17	4.40	4.40	因素排序: ACDB 最佳方案: A3B1C3D3
	均值2	4.12	4.21	4.47	4.19	
	均值3	4.01	4.37	3.88	4.16	
	极差	0.60	0.20	0.59	0.24	
终凝时间	均值1	7.43	6.42	6.96	6.68	因素排序: ACDB 最佳方案: A3B1C3D3
	均值2	6.23	6.48	6.83	6.55	
	均值3	5.99	6.74	5.86	6.42	
	极差	1.44	0.33	1.10	0.26	
水泥体系黏度	均值1	1 844	2 011	1 972	1 898	因素排序: ADBC 最佳方案: A3D3B1C3
	均值2	1 880	1 973	1 989	1 976	
	均值3	2 237	1 977	1 998	2 087	
	极差	393.3	38.3	25.8	189.0	

较小,但会显著增加水泥体系的黏度,达到增黏降尘的效果,综合考虑组分 D 的最佳掺量为水平 3。最终确定复合外加剂基础溶液配方为: A—质量分数 55%, B—质量分数 3.0%, C—质量分数 4.5%, D—质量分数 0.5%, 其余为水。

3.4 复合降尘外加剂的性能优化实验

上述实验配置的复合外加剂基础溶液具有较好的促凝效果,同时可增强水泥体系的黏性,能够有效降低混凝土喷射过程的凝结时间,并增黏降尘。但配置的复合型添加剂基础溶液表面张力较大,在 80.0~90.0 mN/m 内,不易浸润物料颗粒。为降低复合型添加剂的表面张力,增强其润湿性,选择表面活性剂——十二烷基苯磺酸钠 SDBS(组分 E) 与其进行复配优化,使复合外加剂能更有效地润湿物料并捕获细微颗粒,达到降尘的效果。

复配优化后外加剂中 SDBS 的掺量为 0.05%~0.25%,测定优化后的外加剂溶液表面张力和掺入水泥体系后的凝结时间,结果如图 10 所示。

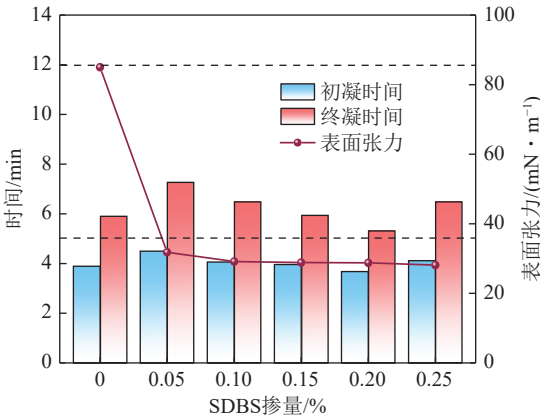


图 10 复合降尘外加剂与 SDBS 复配后的性能测定
Fig.10 Performance evaluation of the composite dust-reducing additive after compounding with SDBS

由图 10 可知,添加微量组分 E,溶液的表面张力显著下降;但继续增加后,变化相对较小。同时,随着组分 E 掺量的增加,初凝时间和终凝时间均有小幅度的增加,但均在规定的范围内,符合速凝剂合格的标准。

通过以上正交实验及复配优化实验,最终确定复合降尘外加剂的配方为:A-质量分数 55%,B-质量分数 3.0%,C-质量分数 4.5%,D-质量分数 0.5%,E-质量分数 0.15%,水-质量分数 36.85%。

4 矿井湿喷过程复合降尘外加剂的实验应用效果分析

进一步测试复合降尘外加剂的降尘效果。设计的外加剂输送装置。添加剂在输送泵的作用下会在喷嘴位置雾化,然后在喷头位置与喷射的物料结合。其中,喷头采用树脂材料进行 3D 打印。

观察不同实验条件下,湿喷过程的产生特性,验证研制的复合降尘外加剂的减弹和降尘特性。固定喷射距离为 0.300 m、喷射压力为 0.4 MPa 和水灰比为 0.41。选定外加剂掺量为 6% 进行降尘效果对比实验,如图 11 所示。



图 11 复合降尘外加剂应用效果实验

Fig.11 Experimental evaluation of the application of the composite dust-reducing additive

设计的外加剂降尘效果对比实验共 3 组。第 1 组为空白对照组,喷射过程不掺入外加剂;第 2 组掺入 6% 现场使用的 SBT 液体外加剂,第 3 组掺入 6%

实验配置的复合降尘外加剂。

湿喷过程掺入不同外加剂情况下,产生的颗粒数和粉尘质量浓度如图 12 所示。空气中悬浮颗粒物主要以 $2\ \mu\text{m}$ 以下的颗粒为主。当掺入外加剂后,物料的整体黏度上升,喷射过程,微细颗粒物被剥离的难度增加。因此,产生的颗粒数量会明显减少。空白对照组粉尘质量浓度偏高,粉尘质量浓度在 $15.0\ \text{mg}/\text{m}^3$ 以上,空气中悬浮颗粒物主要以 $10\ \mu\text{m}$ 以下的颗粒为主。掺入 SBT 外加剂后,粉尘质量浓度下降了约 52%;掺入复合降尘外加剂后,粉尘质量浓度下降了约 57%。综上所述,复合降尘外加剂的掺入能有效降低湿喷过程的粉尘产生量,降尘效果明显。

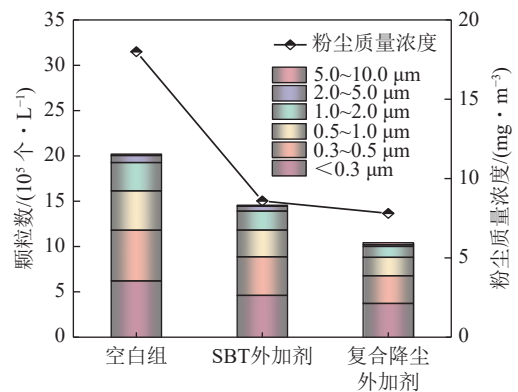


图 12 不同组别的粉尘颗粒数及质量浓度

Fig.12 Particle count and concentration of dust in different groups

5 结 论

(1) 湿喷产生主要分为 2 个阶段,即喷射阶段和碰撞阶段。在喷射阶段,当物料被泵送到喷枪位置后,高速气流会冲击物料,使其破碎;同时,粉尘从物料中析出。在碰撞阶段,其产生尘主要为 3 个过程,即颗粒与喷枪壁摩擦碰撞产生、颗粒与受喷面撞击产生以及颗粒间碰撞。

(2) 湿喷过程中弥散在空气中的气溶胶颗粒粒径大部分在 $2\ \mu\text{m}$ 以下, $2\ \mu\text{m}$ 以下 (不含 $2\ \mu\text{m}$) 颗粒数占比在 90% 以上。随着喷射距离的增加,颗粒质量浓度呈先降低后增加的趋势。

(3) 湿喷过程,随着喷射压力的增加,产生的悬浮气溶胶颗粒质量浓度和颗粒数均会逐渐上升。喷射压力为 0.4 MPa 时,较为合适。当压力太大时,会导致回弹比例和粉尘质量浓度增加;当压力太小时,物料到达受喷面时的动能太小,不能很好地黏附在受喷面。

(4) 当喷射物料的水灰比增加、黏度降低后,产生

的悬浮颗粒物的颗粒数同质量浓度均出现先增加后降低的趋势。水灰比太大时,会导致喷射过程类似液体射流,回弹率增加。在保证物料流动性的同时,尽可能减小水灰比来降低回弹率和产尘量。

(5) 研制的复合降尘外加剂主要由速凝剂、络合剂、早强剂、黏结剂以及表面活性剂复配形成。通过正交实验以及优化实验,最终确定的湿喷复合降尘外加剂配方及质量分数为:A(十八水硫酸铝)—55%、B(氟化钠)—3%、C(三乙醇胺)—4.5%、D(聚丙烯酰胺)—0.5%、E(SDBS)—0.15%、水—36.85%。掺入该复合降尘外加剂后,湿喷过程粉尘质量浓度下降了约57%,有效降低湿喷过程的粉尘产生量,降尘效果明显。

参考文献(References):

- [1] 袁亮. 煤矿粉尘防控与职业安全健康科学构想[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 1-7.
YUAN Liang. Scientific conception of coal mine dust control and occupational safety[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 1-7.
- [2] 蒋仲安, 曾发镔. 基于CNKI文献计量学的矿山粉尘研究可视化知识图谱分析[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(4): 37-44, 50.
JIANG Zhong'an, ZENG Fabin. Visualization knowledge graph analysis of mine dust research based on CNKI bibliometrics[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(4): 37-44, 50.
- [3] 李德文, 隋金君, 刘国庆, 等. 中国煤矿粉尘危害防治技术现状及发展方向[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(6): 1-7, 13.
LI Dewen, SUI Jinjun, LIU Guoqing, et al. Technical status and development direction of coal mine dusthazard prevention and control technology in china[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2019, 46(6): 1-7, 13.
- [4] PAN Gang, LI Pengcheng, CHEN Lianjun, et al. A study of the effect of rheological properties of fresh concrete on shotcrete-rebound based on different additive components[J]. Construction and Building Materials, 2019, 224: 1069-1080.
- [5] 程卫民, 刘国明, 陈连军. 矿用喷浆粉尘控制技术的研究进展[J]. 煤矿安全, 2020, 51(10): 87-97.
CHENG Weimin, LIU Guoming, CHEN Lianjun. Research progress of mine shotcrete dust control technology[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(10): 87-97.
- [6] 赵文彬, 薄福利, 谭允祯. 干喷法锚喷工艺产尘机理及降尘对策[J]. 煤矿安全, 2007(5): 22-24.
ZHAO Wenbin, BO Fuli, TAN Yunzhen. Dust generation mechanism and dust reduction countermeasures of dry-spraying anchoring-spraying process[J]. Safety in Coal Mines, 2007(5): 22-24.
- [7] 韩斌, 武拴军, 李宏业. 高效机械化湿喷混凝土技术及其在地下矿山的应用[J]. 金属矿山, 2009(5): 23-26.
HAN Bin, WU Shuanjun, LI Hongye. High-efficient wet shotcreting technology and its application in underground mines[J]. Metal Mine, 2009(5): 23-26.
- [8] CHEN L, LI P, LIU G, et al. Development of cement dust suppression technology during shotcrete in mine of China—A review[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018, 55: 232-242.
- [9] SUN Z, CHEN L, YU X, et al. Study on optimization of shotcrete loading technology and the diffusion law of intermittent dust generation[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 312: 127765.
- [10] CHEN L, SUN Z, LIU G, et al. Spraying characteristics of mining wet shotcrete[J]. Construction and Building Materials, 2022, 316: 125888.
- [11] LI Cong, JIANG Zhong'an, ZHANG Guoliang, et al. Dust pollution during shotcrete process in high-altitude tunnel based on numerical simulation[J]. Particology, 2023, 75: 82-95.
- [12] 宋海洲. 东滩煤矿综合防尘关键技术及监测管理研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
SONG Haizhou. Research on key technology equipment and management system of comprehensive dust control in dongtan coal mine[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019.
- [13] WANG Q, WEI J, WANG G. Design of concrete spraying machine's automatic dust-removing system[C]//Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application Workshops. IEEE Computer Society, 2009.
- [14] YUNO K, ISHII M, HASHIMOTO C, et al. Construction placement and hardened properties of shotcrete with highly functional flyash[J]. International Journal of Modern Physics B, 2010, 24(15-16): 2472-2477.
- [15] 曾宪桃, 任振华, 王兴国. 磁化水降低喷射混凝土粉尘浓度与减少回弹的试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(4): 705-712.
ZENG Xiantao, REN Zhenhua, WANG Xingguo. Experimental investigations reducing the dust density and the rebound rate of shotcrete by using magnetized water[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(4): 705-712.
- [16] 程高峰. 喷射混凝土支护降尘技术的研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2011.
CHENG Gaofeng. Research on dust fall technology of shotcrete support [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2011.
- [17] SHENG Y, XUE B, LI H, et al. Preparation and performance of a new-type alkali-free liquid accelerator for Shotcrete[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017, 2017: 1-9.
- [18] ZHOU G, CHENG W, CAO S, et al. Development of a New Type of Alkali-Free Liquid Accelerator for Wet Shotcrete in Coal Mine and Its Engineering Application[J]. Advances in materials science and engineering, 2015, 2015: 1-14.
- [19] CHOI P, YUN K, YEON JH. Effects of mineral admixtures and steel fiber on rheology, strength, and chloride ion penetration resistance characteristics of wet-mix shotcrete mixtures containing crushed aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2017, 142: 376-384.
- [20] 张自政, 柏建彪, 王襄禹, 等. 我国沿空留巷围岩控制技术研究与展望[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 3979-4000.
ZHANG Zizheng, BAI Jianbiao, WANG Xiangyu, et al. Review and development of surrounding rock control technology for gob-side entry retaining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023,

- 48(11): 3979–4000.
- [21] YU K K, CHOI P, YEON J H. Correlating rheological properties to the pumpability and shootability of wet-mix shotcrete mixtures[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 98: 884–891.
- [22] WANG J, NIU D, ZHANG Y. Mechanical properties, permeability and durability of accelerated shotcrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 95: 312–318.
- [23] ZHOU G, CHENG W, CAO S. Development of a new type of alkali-free liquid accelerator for wet shotcrete in coal mine and its engineering application [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015: 1–12.
- [24] CHEN L, MA G, LIU G, et al. Effect of pumping and spraying processes on the rheological properties and air content of wet-mix shotcrete with various admixtures[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 225: 311–323.
- [25] 周刚, 张琦, 程卫民, 等. 煤矿锚喷作业区喷浆粉尘数值模拟与新型湿喷一体机研制[J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2016, 47(2): 606–614.
- ZHOU Gang, ZHANG Qi, CHENG Weimin, et al. Numerical simulation on gunite dust of bolt-shotcrete operating area in coal mine and development of new wet shotcrete integral machine[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2016, 47(2): 606–614.
- [26] 蒋仲安, 陈举师, 温昊峰. 气溶胶力学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2018.
- [27] 王纯, 张殿印, 王海涛, 等. 除尘工程技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- [28] 蒋仲安, 陈雅, 王佩. 双尘源耦合下呼吸性粉尘扩散的紊流系数求解[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(8): 129–134.
- JIANG Zhong'an, CHEN Ya, WANG Pei. Solution of turbulence coefficient in the diffusion of respirable dust under the coupling of two dust sources[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(8): 129–134.
- [29] SHAO T, HU Y, WANG W, et al. Simulation of Solid Suspension in a Stirred Tank Using CFD-DEM Coupled Approach[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2013, 21(10): 1069–1081.
- [30] VELICKY B, CAROLI C. Pressure dependence of the sound velocity in a two-dimensional lattice of Hertz-Mindlin balls: Mean-field description[J]. *Physical Review E*, 2002, 65 (2): 021307.
- [31] YU H, CHENG W, XIE Y, et al. Micro-scale pollution mechanism of dust diffusion in a blasting driving face based on CFD-DEM coupled model[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(22): 21768–21788.
- [32] PITOIS O, MOUCHERONT P, CHATEAU X. Liquid bridge between two moving spheres: An experimental study of viscosity effects[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2000, 231(1): 26–31.
- [33] CHEN H, LIU W, ZHENG Z, et al. Impact dynamics of wet agglomerates onto rigid surfaces[J]. *Powder Technology*, 2020, 379.