

快掘工作面粉尘治理技术研究与应用

贺鹏飞 田如

(陕西煤业化工集团 孙家岔龙华矿业有限公司, 陕西 榆林 719314)

[摘要] 为有效治理工作面粉尘,保证煤矿井下的安全高效生产,以孙家岔龙华煤矿 20202 回风巷快掘工作面为例,通过分析工作面的产尘特点及粉尘运移分布规律,再针对主要尘源点开展粉尘治理技术研究。结果表明,20202 回风巷快掘工作面主要尘源为掘锚机滚筒连续高强度截割和垮落冲击产生。快掘工作面粉尘随风流进入涡流区,使得高浓度粉尘主要集中于涡流区域内,粉尘浓度超过 $1\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$,但粉尘在后方扩散范围较小。进而提出了“抑尘、控尘、除尘”有机综合治理粉尘技术体系,研发了长度 $1.5\ \text{m}$ 、重量不超过 $5\ \text{kg}$ 、能够四周径向出风、前端轴向出风、轴向可调风筒便的快接控风除尘装置,机载式负压除尘系统及配套工艺,形成配套的防尘工艺技术及装备。上述综合治理技术在工作面应用后,掘锚机平台工人操作地点降尘效率达 88.1% ;掘锚机后 $4\sim 5\ \text{m}$ 处降尘效率达 81.21% ,有效实现了工作面的粉尘综合治理。

[关键词] 快掘巷道;尘源判定;粉尘运移;粉尘治理;除尘系统

[中图分类号] TD714.4 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 2097-2423(2024)04-0013-05

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.04.003

0 前言

煤炭作为我国主体能源,需保证其产量^[1-2]。然而,煤矿井下各种灾害制约着煤炭安全高效生产^[3-4]。其中,高浓度粉尘不仅严重危害职工的身心健康,而且由于粉尘对光线的散射和吸收作用,生产期间严重影响工作面现场的能见度,存在安全隐患,既不符合国家煤矿安全规程及相关标准要求,也不符合职工对改善工作环境的期望^[5-6]。严重的粉尘危害已经成为制约煤矿高效快掘设备性能发挥、生产效率提高的瓶颈问题,亟待治理^[7-8]。

国内外学者开展了诸多快掘工作面粉尘防治方法的研究。现阶段的除尘技术主要包括湿式除尘^[9]、机械除尘^[10]、静电除尘^[11]和过滤除尘^[12]。然而因地下矿井狭长巷道结构特征,悬浮在空气中的粉尘随巷道内部风流扩散污染整条巷道,很难及时排除,严重危害人体健康,而且粉尘具有爆炸危险

性,可能造成更严重的人员伤亡和财产损失。现有除尘技术虽然能够达到控制粉尘浓度的目的,但降低程度有限^[13-14]。因此,本文针对龙华煤矿 20202 工作面,首先分析了回风巷快掘工作面产尘特性;其次,探究了工作面粉尘运移分布规律;最后,根据研究结果,创新探索“抑尘、控尘、除尘”有机综合治理思路,并开展现场应用。

1 工作面概况及产尘特性分析

1.1 20202 回风巷快掘工作面概况

龙华煤矿 20202 回风巷快掘工作面采用 MB670-1 型掘锚一体机进行截割,配合 PZL1500/300M-3 型锚护转载破碎机进行顶、帮锚支护,截割与支护顶、帮锚平行作业,正常日进尺 $30\ \text{m}$,月进尺 $780\ \text{m}$,巷道设计总长 $3\ 918\ \text{m}$,施工期 $150\ \text{d}$ 。20202 回风巷煤层厚度 $6.25\sim 7.39\ \text{m}$,平均煤厚 $6.5\ \text{m}$,属厚煤层,倾角 $1\sim 3^\circ$,属近水平煤层。煤层含 $0\sim 2$ 层夹矸,个别孔 3 层,夹矸厚 $0.04\sim 1.05\ \text{m}$,一般为 $0.40\ \text{m}$,岩性为粉砂岩、泥岩。掘进巷道断面形状均为矩形,宽 $5.6\ \text{m}$,高 $4.5\ \text{m}$ 。工作面使用 FBDY-No.6.3/2 \times 30 局扇供风,供风风筒直径 $1\ \text{m}$,实际供风量约 $500\ \text{m}^3/\text{min}$ 。

1.2 20202 回风巷快掘工作面产尘特点

20202 回风巷快掘工作面主要尘源为掘锚机滚筒连续高强度截割和垮落冲击粉尘,其各作业地点粉尘浓度测定结果如图 1 所示。

[收稿日期] 2024-05-06

[作者简介] 贺鹏飞(1991—),男,本科,工程师,研究方向:矿井通风。

[引用格式] 贺鹏飞,田如.快掘工作面粉尘治理技术研究与应用[J].绿色矿冶,2024,40(4):13-17.

HE Pengfei, TIAN Ru. Research and application of dust control technology in fast tunneling working face[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(4): 13-17.

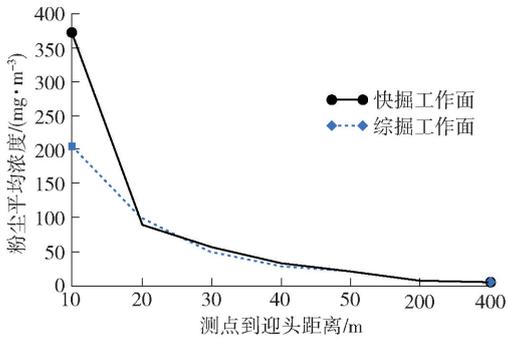


图1 20202回风巷快掘工作面粉尘浓度变化曲线

从图1可以看出,20202回风巷快掘工作面掘锚机平台工人操作地点回风侧(距迎头10 m)粉尘浓度高达373.33 mg/m³,而普通综掘工作面掘进司机处回风侧粉尘浓度为205.83 mg/m³,即快掘工作面掘锚机平台处的粉尘浓度远大于普通综掘工作面掘进司机处回风侧。随着距离的增加,工作面的粉尘浓度逐渐降低;至距迎头200 m处回风侧粉尘浓度降至10 mg/m³以下,且快掘工作面粉尘浓度下降速率大于综掘工作面,这是由于快掘工作面断面大于普通综掘工作面,风流速度较低,大粒径粉尘沉降速率快于普通综掘工作面。距迎头200 m后,粉尘浓度下降趋于平缓,空气中的粉尘基本为呼吸性粉尘,在运移过程中缓慢沉降。

2 工作面粉尘运移分布规律研究

根据20202回风巷快掘工作面现场实际情况,以及各掘进设备的参数,利用Solidworks软件建立快掘巷道三维模型,如图2所示。

快掘工作面风流速度矢量图以及粉尘浓度分布图如图3所示。从图3(a)可以看出,风流运动到快

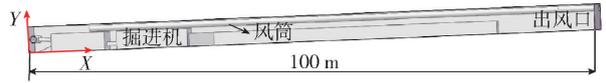


图2 20202回风巷快掘工作面三维模型

掘工作面迎头后,受煤壁的阻挡,风向两次发生偏转并在风筒相对一侧的转角处形成涡流,风流发生偏转时速度达5~6 m/s,卷吸风量及回旋风量较大,涡流影响区域覆盖工作面距迎头15 m范围,涡流区域风流汇集,易造成粉尘积聚。快掘工作面的粉尘在运移过程中受射流携带的作用进入涡流区,由于涡流区内速度小,流线封闭,粉尘不能及时扩散,导致高浓度粉尘主要集中于涡流区域内,粉尘浓度超过1000 mg/m³,后方的粉尘扩散范围较小,有利于后期粉尘的治理。

3 粉尘有机综合治理

龙华煤矿20202回风巷快掘工作面具有断面大、采掘设备集中、作业产尘强度大、局部风速过高、风流紊乱等特点。其粉尘浓度远大于普通综掘工作面,且粉尘向后扩散范围大,距迎头100 m范围都存在高浓度粉尘,粉尘治理难度更大。因此借鉴传统综掘面粉尘治理措施,采用“抑尘、控尘、除尘”有机综合治理思路。

3.1 抑尘装置

“抑尘”,即从源头上抑制粉尘的产生。在掘锚机割煤滚筒附近合理布置喷雾装置,利用喷雾覆盖滚筒及垮落区域破碎煤体,抑制割煤过程产生的粉尘,减少粉尘扩散。据现场调研,掘锚机截割大臂前端割煤滚筒附近已布置有喷雾装置,能够覆盖滚筒及垮落区域破碎煤体。

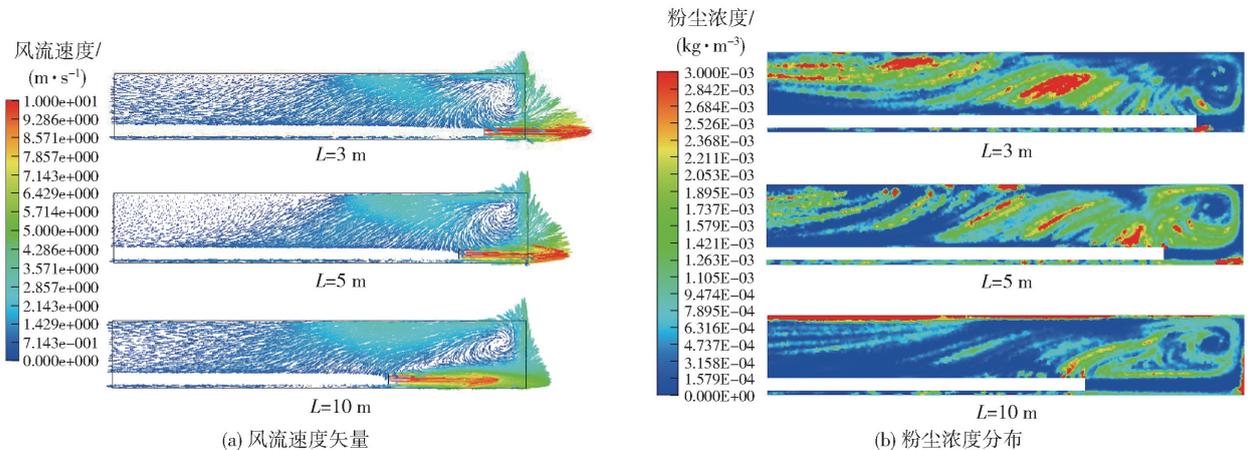


图3 快掘工作面供风风筒距迎头不同距离时风流速度矢量图以及粉尘浓度分布图 (L为快掘工作面供风风筒距迎头不同距离)

3.2 快接控风除尘装置研制

“控尘”，即针对掘锚机产尘源，根据粉尘运移分布规律，采用控风装置，通过调节轴向、径向的风量，形成向迎头推进的控尘风流，将掘锚机割煤时产生的粉尘控制在迎头范围内。

3.2.1 参数计算

控风除尘效果与供风量、抽风量、轴向出风量、径向出风量、轴径向出风口距迎头的距离等关键技术参数有关，且这些关键技术参数之间互相关联，存在匹配关系。研究这些关键技术参数之间的匹配关系，才能有效地实现良好的控风除尘效果。

各参数的计算见公式(1)~(5)所示。

$$Q_0 \geq 87.6\alpha S_0 d_0 + 18.2d_0^2 \quad (1)$$

$$S_1 \leq \frac{Q_c - Q_0}{98.8n\alpha \sqrt{ab}} - \frac{23.2 \sqrt{ab}}{98.8\alpha} \quad (2)$$

$$Q_y = (1.2 \sim 1.3) Q_c \quad (3)$$

$$Q_0 = 100 \times q \times k \quad (4)$$

$$Q_1 = Q_c - Q_0 \quad (5)$$

式中： α 为紊流系数，一般取0.08~0.12； Q_0 为轴向出风量， m^3/min ； Q_c 为除尘系统抽吸风量， m^3/min ； Q_y 为工作面供风量， m^3/min ； S_0 为轴向出风口与迎头煤壁距离， m ； S_1 为径向出风口与迎头煤壁距离， m ； d_0 为风筒直径， m ； n 为径向出风附壁风筒上开口数量； a 为附壁风筒单个开口宽度， m ； b 为附壁风筒单个开口高度， m ； k 为瓦斯涌出不均衡系数； Q_1 为有效径向出风量， m^3/min ； q 为快掘工作面回风流中瓦斯平均绝对涌出量， m^3/min 。

根据2022回风巷快掘工作面的生产技术参数(表1)，对控风除尘关键工艺技术参数进行计算，过程如下。

表1 2022回风巷快掘工作面的生产技术参数

工艺参数	取值
2022回风巷快掘工作面供风量 $Q_y/(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$	500
快掘工作面回风流中瓦斯平均绝对涌出量 $q/(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$	0.07
掘进工作面瓦斯涌出不均衡系数 k	3.0
工作面巷道断面面积/ m^2	15.12

3.2.1.1 除尘风机抽吸风量 Q_c

2022回风巷快掘工作面供风量为 $500 \text{ m}^3/\text{min}$ ，长压短抽通风除尘系统中供风量较除尘器的处理风量高出值取20%，按公式(3)可计算出除尘风机抽吸风量 $Q_c \geq 417 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

3.2.1.2 轴向出风量 Q_0

2022回风巷快掘工作面回风流中瓦斯平均绝对涌出量为 $0.07 \text{ m}^3/\text{min}$ ，掘进工作面瓦斯涌出不均衡系数 k 取3.0，则按公式(4)计算得到系统轴向出风量 $Q_0 \geq 21 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

3.2.1.3 有效径向出风量 Q_1

除尘风机抽吸风量 Q_c 为 $417 \text{ m}^3/\text{min}$ ，结合轴向出风量为 $21 \text{ m}^3/\text{min}$ ，按公式(5)可计算出有效径向出风量 $Q_1 \geq 396 \text{ m}^3/\text{min}$ ，然后可计算出径向出风流向巷道后部的风量 $\leq 104 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

工作面巷道断面面积为 15.12 m^2 ，通过计算可以得到有效径向出风流向工作面迎头的风流速度为 0.44 m/s 。《煤矿安全规程》中规定，巷道内的控制风速应在 $0.25 \sim 4.0 \text{ m/s}$ 。因此，有效径向出风流向工作面迎头的风速符合该项规定。此外，控风装置布置在除尘风机排风口后方，因此径向出风流向巷道后部的风速与除尘风机排向巷道后部的风速叠加，大于 0.46 m/s ，符合《煤矿安全规程》相关规定。

3.2.1.4 轴向出风口距迎头的距离 S_0

我国《煤矿安全规程》规定采煤工作面、掘进中的煤巷和半煤岩巷的最低允许风速为 0.25 m/s ，专用排瓦斯巷内风速不得低于 0.5 m/s 。

2022回风巷快掘工作面供风风筒直径 d_0 为 1.0 m ，圆形出风口的紊流系数为0.08，按照公式(1)，可计算得出轴向出风口距迎头的距离 $S_0 \leq 0.4 \text{ m}$ 。考虑到生产条件限制，取轴向出风口距迎头的距离 $S_0 \leq 15 \text{ m}$ 。

3.2.1.5 径向出风口距迎头的距离 S_1

2022回风巷快掘工作面有效径向出风量 Q_1 为 $396 \text{ m}^3/\text{min}$ ，径向出风口数量为4个，出风口有效直径为 0.5 m ，圆形出风口的紊流系数为0.08，则通过公式(2)，可以计算出径向出风口距迎头的距离 $S_1 \leq 27.1 \text{ m}$ 。考虑到风筒接续便捷，取径向出风口距迎头的距离 $S_1 \leq 15 \text{ m}$ 。

通过以上计算，可以得出除尘风机抽吸风量 $Q_c \geq 417 \text{ m}^3/\text{min}$ ，轴向出风量 $Q_0 \geq 21 \text{ m}^3/\text{min}$ ，有效径向出风量 $Q_1 \geq 396 \text{ m}^3/\text{min}$ ，轴向出风口距迎头的距离 $S_0 \leq 15 \text{ m}$ ，径向出风口距迎头的距离 $S_1 \leq 15 \text{ m}$ 。这5个最佳控风除尘关键工艺技术参数值，为现场实施提供了相应的参考依据。

3.2.2 控尘装置设计

快接控风除尘装置设计如图4所示。该装置主风筒直径为 1.0 m ，与供风风筒直径相同，长度 1.5 m ；

主风筒周壁上均布 4 个直径 0.5 m 的径向出风筒, 相互夹角 90°; 主风筒和径向出风筒出风口处设计有拉绳, 用于控制轴向及径向开口大小, 调风筒便; 主风筒后端设计有钩链式快速拆接装置, 能够与供风风筒快速连接及拆卸; 风筒整体采用抗静电阻燃的风筒布制作, 重量不超过 5 kg, 轻便适用。该快接控风除尘装置四周径向出风、前端轴向出风, 轴径向调风筒便, 具有拆接方便、调风操作简便、轻便适用、不影响生产等优点。

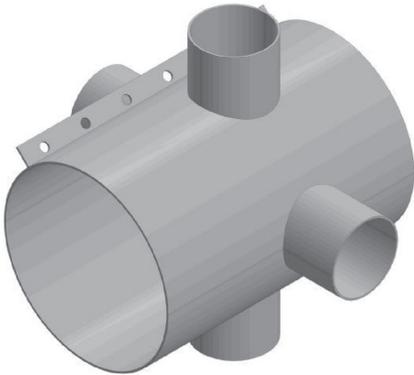


图 4 附壁风筒结构示意图

3.3 机载式负压除尘系统及配套工艺研究

“除尘”, 即在掘锚一体机上布置机载式负压除尘系统, 设计与掘锚机相适应、与现场供风量相匹配的机载高效除尘器 (即除尘风机), 设计与掘锚机相匹配的高效集尘管道, 形成负压除尘系统, 将控制在迎头处的含尘空气送入除尘器内过滤干净, 达到除尘的目的。

机载式负压除尘系统由机载式高效除尘风机和高效集尘管道组成, 采用机载的形式, 整体布置在掘锚机上。机载式高效除尘风机布置在掘锚机刮板输送机平台上, 由矿用防爆抽出式风机和高效除尘脱水段组成。风机采用单机双叶轮设计, 其处理风量 $\geq 450 \text{ m}^3/\text{min}$, 与现场供风量相匹配; 除尘脱水段采用斜梯形特殊结构设计, 外形尺寸与掘锚机相适应, 内置螺旋喷雾、高精度过滤网、波纹脱水器等组件, 除尘脱水效率高。

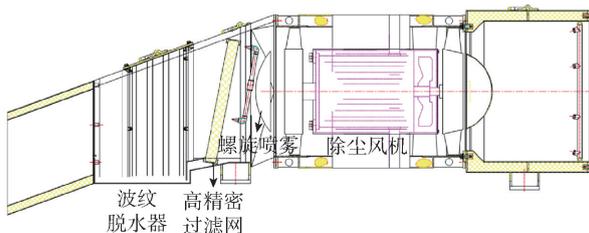


图 5 除尘脱水段结构示意图

针对掘锚机上原除尘系统吸尘口布置不合理、吸尘效果差的问题, 将高效集尘管道布置在掘锚机的截割大臂上。高效集尘管道由刚性集尘罩和橡胶风筒组成, 采用扁平化、折弯式设计, 吸尘口延伸至滚筒后方约 1 m 处, 集尘效率高。

4 现场应用效果考察

控风除尘装置和机载式负压除尘系统安装完成, 并按照相关技术参数进行调试后, 采用滤膜质量浓度法对 20202 回风巷快掘工作面粉尘治理效果进行现场测试考察。掘锚机平台工人操作地点回风侧总粉尘浓度从 $373.33 \text{ mg}/\text{m}^3$ 下降到 $44.44 \text{ mg}/\text{m}^3$, 降尘效率为 88.1%; 掘锚机后 4~5 m 处回风侧总粉尘浓度从 $91.67 \text{ mg}/\text{m}^3$ 降到 $17.22 \text{ mg}/\text{m}^3$, 降尘效率为 81.21%。20202 回风巷快掘工作面粉尘浓度大幅下降, 视野环境有明显改观, 粉尘治理效果显著。

5 结论

本文通过分析龙华煤矿 20202 回风巷快掘工作面产尘特点及粉尘运移分布规律, 提出了“抑尘、控尘、除尘”有机综合治理粉尘技术体系, 并进一步研发快接控风除尘装置、机载式负压除尘系统及配套工艺研究, 为综掘巷道高效掘进提供可靠保障, 并得出以下结论。

1) 快掘工作面的粉尘浓度随距迎头距离的增加而逐渐降低, 且快掘工作面粉尘浓度下降速率较综掘工作面更快。快掘工作面粉尘随风流进入涡流区, 使得高浓度粉尘主要集中于涡流区域内, 粉尘浓度超过 $1000 \text{ mg}/\text{m}^3$, 但粉尘在后方扩散范围较小。

2) 针对快掘系统风筒接续、快速、频繁的现场要求, 研制出了长度 1.5 m、重量不超过 5 kg、能够四周径向出风、前端轴向出风、轴径向调风筒便的快接控风除尘装置, 该装置具有拆接方便、调风操作简便、轻便适用、不影响生产等优点。

3) 根据掘锚机生产工艺, 结合掘锚机可利用空间等, 设计研制了机载式负压除尘系统。其风机采用单机双叶轮设计, 处理风量 $\geq 450 \text{ m}^3/\text{min}$; 除尘脱水段采用斜梯形特殊结构设计, 内置螺旋喷雾、高精度过滤网、波纹脱水器等组件; 高效集尘管道采用扁平化、折弯式设计布置在掘锚机的截割大臂上。

4) 20202 回风巷快掘工作面应用机载式负压除尘系统和控风除尘装置后, 掘锚机平台工人操作地点降尘效率达 88.1%; 掘锚机后 4~5 m 处降尘效率达 81.21%。

[参考文献]

- [1] 邹全乐,王鑫,李左媛,等. 木质素磺酸钙对固井水泥石变形破坏特性的影响及其改性机制[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1606-1621.
- [2] 冉启灿,梁运培,邹全乐,等. 倾斜煤层群覆岩“三场”非对称特征及靶向抽采机制[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 177-192.
- [3] 邹全乐,林柏泉,郑春山,等. 基于响应面法的钻割一体化喷嘴稳健性优化[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(6): 905-910.
- [4] 翟成,李贤忠,李全贵. 煤层脉动水力压裂卸压增透技术研究与应用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 1996-2001.
- [5] 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.
- [6] 周福宝,袁亮,程卫民,等. 矿井粉尘职业健康防护技术2013—2023年研究进展[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(12): 5-15.
- [7] 曹晓泽. 矿井采掘作业面粉尘高效治理技术研究[J]. 机械管理开发, 2023, 38(12): 276-278.
- [8] 张丙泉. 综掘工作面综合防尘技术的应用[J]. 山东煤炭科技, 2021, 39(9): 121-123.
- [9] 刘媛,闫骏,井鹏,等. 湿式静电除尘技术研究及应用[J]. 环境科学与技术, 2014(6): 83-88,102.
- [10] 高根树,张国才. 一种新型的机械除尘技术——旋流除尘离心机[J]. 环境工程, 1999(6): 31-32,3.
- [11] 方梦祥,柳佳佳,岑建孟,等. 高温静电除尘技术研究进展及应用前景[J]. 高电压技术, 2019, 45(4): 1108-1117.
- [12] 逢晓龙. 超声波雾化技术捕集微细颗粒物性能的研究[D]. 北京:北京化工大学, 2015.
- [13] DE Almeida Leão R X, AMORIM L S, MARTINS M F, et al. A model for velocity streamlines of airborne dust particles spreading caused by free-falling bulk materials [J]. Powder Technology, 2020, 371: 190-194.
- [14] ZHANG Xinghua, WANG Haifeng, CHEN Xi, et al. Experimental study on dust suppression at transshipment point based on the theory of induced airflow dust production [J]. Building and Environment, 2019, 160: 106200-106210.

Research and Application of Dust Control Technology in Fast Tunneling Working Face

HE Pengfei, TIAN Ru

(Sunjiacha Longhua Mining Co., Ltd., Shaanxi Coal and Chemical Industry Group, Yulin 719314, China)

Abstract: To effectively control the dust in the working face and ensure the safe and efficient production in the coal mine, taking the fast excavation working face of 20202 return airway in Sunjiacha Longhua Coal Mine as an example, by analyzing the dust production characteristics and dust migration distribution law of the working face, the dust control technology was studied for the main dust source points. The results show that the main dust source of the fast excavation working face of the 20202 return airway is the continuous high-strength cutting and caving impact of the anchor machine drum. The dust in the fully mechanized excavation face enters the eddy current area with the air flow, so that the high concentration dust is mainly concentrated in the eddy current area. The dust concentration exceeds $1\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$, but the dust diffusion range is small in the rear. Furthermore, the organic comprehensive dust control technology system of “dust suppression, dust control and dust removal” was proposed. A fast-connecting air-control dust removal device with a length of 1.5 m, a weight of no more than 5 kg, a radial air outlet around the periphery, an axial air outlet at the front end, and a simple axial and radial air adjustment was developed, and an airborne negative pressure dust removal system and supporting processes were developed to form a supporting dust prevention technology and equipment. After the application of the above comprehending treatment technology in the working face, the dust reduction efficiency of the workers at the operating site of the driving anchor machine platform reached 88.1%; the dust reduction efficiency at 4-5 m after the bolt-er is 81.21%, which effectively realizes the comprehensive dust control of the working face.

Key words: fast tunneling roadway; dust source determination; dust migration; dust control; dust removal system