

# 上向分层分支进路式胶结充填采矿法 在倾斜中厚矿体中的应用

刘新光, 刘 怀, 王子轩\*, 陆振云\*, 徐 晨, 王寿庆, 李福生

南京金焰锶业有限公司, 江苏 南京

收稿日期: 2025年11月24日; 录用日期: 2026年2月4日; 发布日期: 2026年3月19日

## 摘 要

南京爱景山锶矿为急倾斜、中厚矿体, 矿体形态多变, 常见分支复合现象。采用传统浅孔留矿采矿方法采矿会造成底柱和间柱的损失, 损失率高, 且贫化大。矿山通过反复论证, 提出“上向分层分支进路式胶结充填采矿法”采矿工艺, 即在矿体下盘布置脉外人行斜井、脉内联络道、随行溜井等措施, 采用脉内分支进路回采, 有效控制了采场顶板暴露面积, 不留顶底柱, 提高了回采率, 保证了回采安全。该工艺为矿山取得了较好的技术经济指标, 同时也提高了矿柱回收的安全性。该技术可为类似矿山提供借鉴。

## 关键词

上向分层分支进路式胶结充填采矿法, 急倾斜脉状中厚矿体, 回采工艺, 南京爱景山锶矿

# Application of Upward Layered and Branching Access-Type Cemented Filling Mining Method in the Inclined Medium-Thick Ore Bodies

Xinguang Liu, Huai Liu, Zixuan Wang\*, Zhenyun Lu\*, Chen Xu, Shouqing Wang, Fusheng Li

Nanjing Jinyan Strontium Industry Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

Received: November 24, 2025; accepted: February 4, 2026; published: March 19, 2026

## Abstract

The ore body of Nanjing Aijingshan strontium deposit is a steeply inclined, medium-thick one with

\*通讯作者。

文章引用: 刘新光, 刘怀, 王子轩, 陆振云, 徐晨, 王寿庆, 李福生. 上向分层分支进路式胶结充填采矿法在倾斜中厚矿体中的应用[J]. 矿山工程, 2026, 14(2): 407-413. DOI: 10.12677/me.2026.142043

diverse shapes and common branching and composite phenomena. The traditional shallow hole retention mining method could cause loss of bottom and intermediate columns, with a high loss rate and significant impoverishment. After repeated argumentations, the mine proposed “upward layered and branching access-type cemented filling mining method”, which involves arranging out of vein inclined shafts, in vein connecting passages, accompanying chutes and other measures in the lower part of the ore body, using in vein branching access for mining, effectively controlling the exposed area of the roof of the mining area, leaving no roof and bottom pillars, improving the mining rate, and ensuring mining safety. This process has achieved good technical and economic indicators for the mine, while also improving the safety of pillar recovery. This technology maybe provide a reference for similar mines.

## Keywords

Upward Layered and Branching Access-Type Cemented Filling Mining Method, Steeply Inclined Vein Shaped Medium-Thick Ore Body, Mining Process, Nanjing Aijingshan Strontium Deposit

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 概况

南京爱景山锶矿为国内外少见的岩浆热液充填的脉状锶矿床。矿体赋存于  $F_2$  断层上盘凝灰岩中，走向 NW，倾向 NE，倾角  $60^\circ\sim 85^\circ$ ，其中主矿体为 SrII 矿体，在空间上连续性好，沿走向、倾向延伸长，品位较高，但矿体厚度变化较大(从 1 m 左右到接近 20 m) [1]。该矿床从上世纪七十年代开始进行露天小规模开采，本世纪初转入地下开采，采矿方法及回采工艺经多次改进与完善，浅孔留矿采矿法、上向分层尾砂胶结充填采矿法虽然取得了一定成效，但由于围岩稳固性较差，矿体属于陡倾斜中厚矿体且形态多变、分支复合现象常见，不但经常发生冒顶片帮现象，且采矿损失率、贫化率较高，采矿人员劳动强度大，采场生产能力难以达到设计要求等问题较为突出，因此需要寻求一种具有替代意义的安全、高效、经济的新采矿方法。

上向水平分层充填采矿法在现代矿山开采中得到了广泛应用，但较适合于缓倾斜中厚矿体 [2]，而这种采矿方法对于陡倾斜矿体，需要研究特定的采场结构参数 [3]；削壁充填法 [4]、下向进路充填采矿法 [5]、分段凿岩阶段嗣后充填采矿法 [6]、间隔充填采矿法 [7] 等采矿方法在陡(急)倾斜、薄 - 极薄矿体的采矿中得到较好应用；进路式填充采矿法对于非金属矿开采适用程度高 [8]。

根据溧水爱景山锶矿矿体赋存特点、历年开采情况及类似矿山采矿方法经验，结合上述采矿方法的适用性，经反复论证及技术经济比较，提出了“上向分层分支进路胶结充填采矿法”工艺，经多年的实践，该工艺控制了采矿过程中的顶板安全风险，取得了较好的技术经济指标，给矿山带来了较大的经济效益。

## 2. 采矿工艺与技术

### 2.1. 基本思路

“上向分层分支进路式胶结充填采矿法”，主要有如下三个层次的含义：

1) 将采区折返式斜坡道调整为下盘脉外斜井、各采场之间联络道由脉外调整至脉内、将溜矿井布置在矿体内部，减少了大量的采准工程量。

2) 根据采场揭示矿体的形态变化，尤其是矿体出现分支、复合现象的情况下，适时调整采场边界或

增加分支进路,既提高回采率、减少了贫化,又控制了采场顶板连续暴露面积,提高采场回采安全性。

3) 对位于充填体下的顶底柱回收提供了行之有效的方案。采用充填接顶、预留通道的方式,将分层回采转变为进路式回采,通过进路控制上层充填体暴露面积,逐条进路回采,提高了回采率。

## 2.2. 关键技术

### 1) 下盘脉外人行斜井技术

针对急倾斜中厚矿体赋存情况,在保证安全生产的前提下,为降低采切比,在矿体下盘布置脉外人行斜井,代替传统工艺折返式斜坡道及专用充填天井,结合采场每层回采高度,在人行斜井内布置多条分层联络道,并与采场连通,联络道间隔 4~6 m。人行斜井作为人行、设备、材料和通风的主要通道。根据实践经验,人行斜井倾角控制在 25°~30°之间,以确保人员行走安全和舒适。为满足风速要求和人员通行空间,根据《金属非金属地下矿山通风技术规范》[9]的行人通风巷道的最低风速不得低于 0.15 m/s 计算,人行斜井断面积一般取 4~8 m<sup>2</sup>,斜井净宽和净高取 2.5~3.0 m,以满足人员通行、设备运输和通风阻力的要求。

断面积  $A$  (m<sup>2</sup>)与风量  $Q$  (m<sup>3</sup>/s)关系为:  $A \geq Q/0.15$ 。

### 2) 矿房间脉内联络通道预留技术

在上述下盘脉外斜井技术的基础上,一步采过程中在矿体上盘布置一条沿脉巷道,该沿脉巷道随一步采采场逐层上向压顶,采场充填后预留高度为 2.5 m 的空间,作为矿房间脉内联络通道。二步采回采过程中,在矿体下盘布置矿房间脉内联络通道。通过上下盘两条脉内联络通道,并逐层压顶预留方式替代传统的掘进脉外联络道,减少了废石提升量,提高了采场生产效率,实现了采准比下降的目标。预留高度需满足采矿设备和工艺要求。该技术不仅降低掘进成本,更通过空间复用与工序协同,将采准周期压缩 30%以上;预留通道的 2.5 m 净高,既保障凿岩台车通行与支护作业空间,又兼顾充填接顶密实度要求——高度过低易致接顶不实,过高则增加暴露风险。实践表明,上下盘双通道压顶节奏须严格匹配充填强度发展曲线,滞后超 48 小时将显著增大顶板离层概率。

### 3) 随行溜井技术

在脉内靠下盘区域布置随行溜井,溜井采用钢卷筒焊,随采场充填逐层接高,每层接高约 2 m,保证溜井与充填体高度一致。本技术代替了溜井掘进,避免了溜井掘进作业的安全风险。采场回采结束后,即可拆除溜井设备,并回收溜井底部保安矿柱。

### 4) 分支进路回采技术

中低温热液脉状矿体常有分支复合现象,影响采场布置,不利于三率指标控制。在矿房拉底揭示矿体赋存状况的情况下,对分支矿脉厚度小于 4 m、中间废石夹层超出 2 m 以上的薄矿带,可在采场内布置分支进路,进路宽度与矿体厚度一致。保留废石夹层作为采场回采的间柱。分支进路随采场逐层挑顶、充填直至分支矿脉与主矿脉复合或尖灭。通过采场内部布置分支进路,有效降低废石混入率,同时保留的废石夹层间柱,保证了采场顶板安全可控,达到矿石回收率高、废石混入率低的效果。该技术显著提升复杂地质条件下矿体回收效率,尤其适用于分支发育、形态不规则的脉状矿体。通过动态识别矿脉展布特征,实时优化进路布置参数,实现回采过程与地质条件精准匹配。该技术已在南京爱景山锶矿深部延深工程中完成工业化验证,矿房平均回采率达 95.90%,废石混入率为 5.59%。现场应用表明,矿石回采率提高 12%以上,废石混入率下降 4 个百分点,顶板稳定性良好,未发生因间柱失稳引发的安全事故。

### 5) 矿房暴露面积灵活控制技术

采用“改变矿房界线、增加采场数”的方式。当采场暴露面积过大时,在采场压顶前控制压顶炮孔界线,确保压顶挑高区域面积处于允许暴露面积之内。出矿结束后进行充填作业,充填过程中将采场未

压顶区域完全接顶，将接顶区域并入二步采采场中。对于个别变化大的采场，采场界线的移动可能导致二步采间柱面积过大，影响二步采过程中顶板空顶面积的控制，此情况下的一步采期间，于间柱中间施工巷道后拉底形成新的采场，该采场作为一步采采场进行回采。矿房界线移动增加采场数的技术，有效保证采场回采安全，提高回采效率。

根据矿体厚度与稳定性动态调整矿房暴露面积。对厚度 3~6 m 的矿体，顶板连续暴露面积设定不超 160 m<sup>2</sup>；厚度超 6 m，结合顶板支护强度分级，确保最大暴露面积不超 200 m<sup>2</sup>。所有参数均基于实时微震监测与围岩变形反馈动态修正，实现“一矿房一策”精准管控。微震事件频次与能量级变化实时纳入暴露面积调整阈值，当监测到日累计微震事件超 15 次或单次能量突破 10<sup>4</sup> J 时，系统自动触发缩采指令，同步强化锚网联合支护。该机制使矿房顶板离层率下降至 0.8% 以下，较传统模式降低 62%。该控制技术已在深部延深工程矿房推广应用，取得较好效果。

### 6) 充填体下顶底矿柱充分回收技术

针对深部高应力环境下顶底矿柱残存率高的难题，创新采用“预留空间卸压 - 后退一次回收”工艺：先在顶柱底部施工预留巷道空间，释放集中应力；再充填至顶底柱底部，及时采用锚网支护顶板，预防应力破坏。该工艺使深部顶底柱综合回收率由 70% 提升至 93.5%。该技术已成功应用于南京爱景山锑矿 -190 m 中段顶底柱矿体回收作业，未发生一起应力诱发冒顶片帮事件，实现顶底柱资源的充分利用，增加矿山经济效益并延长其服务年限。

## 2.3. 工艺流程

矿体回采及顶柱回收工艺见图 1。

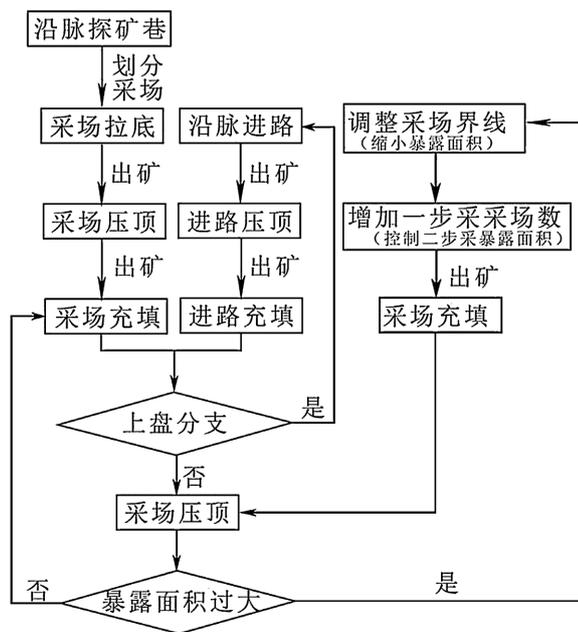


Figure 1. Mining process flow chart  
图 1. 回采工艺流程图

### 1) 矿体回采工艺

上向分层胶结尾砂胶结充填采矿法的主要工艺如图 2 所示。

根据矿体走向长度，在矿体下盘沿脉布置人行通风斜井，斜井内在 4~6 m 垂直高度上布置水平分层

联络道，与采场连通，在脉内靠下盘区域布置溜井，安装溜井装备。在运输中段上盘沿脉布置探矿巷道兼做拉底巷及一步采采场联络道，并揭露矿体边界，该脉内沿脉巷随采场充填分层向上回采。在采场顶板最大允许暴露面积范围内合理划分采场边界，在采场边界内进行一步回采拉底，进入压顶、出矿、充填作业循环，如矿体较长，可将采区分为两个或两个以上的盘区交替作业。溜井随采场充填逐层加高。在矿体出现分支矿脉情况下，布置分支沿脉进路回采，分支进路随采场逐层往上回采。在采场暴露面积过大情况下，采场压顶前，重新划分采场界线，控制压顶面积，将采场未压顶区域充填接顶，在采场界线调整后，若出现二步采预留间柱面积过大，需将间柱重新划分，增加一步采场，以控制二步采间柱面积。

2) 顶柱回收工艺

顶柱回收工艺如图3所示。首先对上中段采场首层充填形成结构假底，使充填体假底强度达到C15。

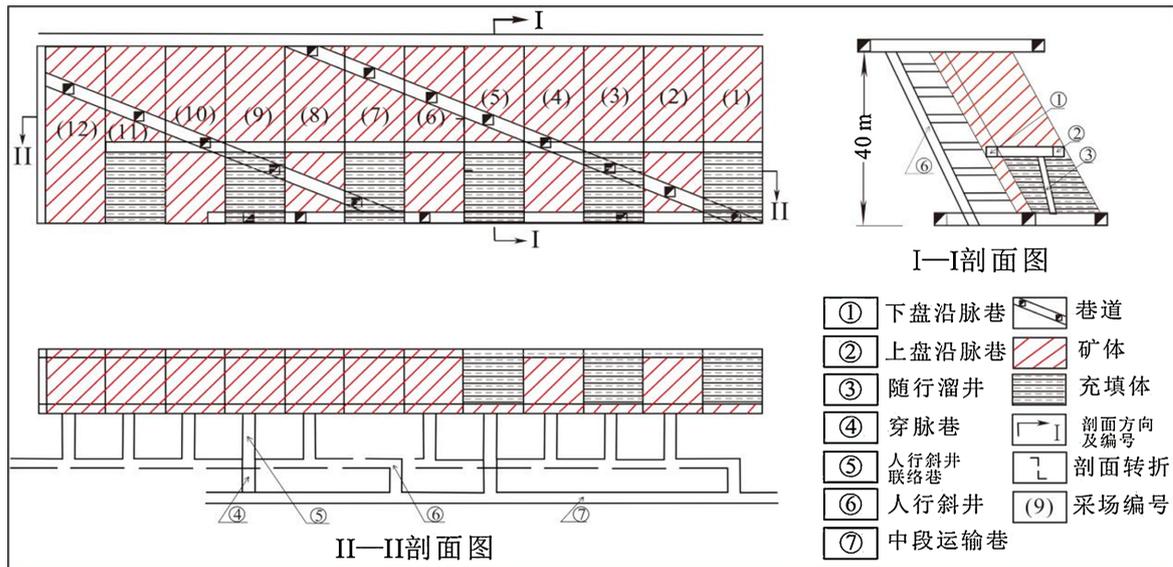


Figure 2. Schematic diagram of upward layered and branching access-type cemented filling mining method  
图2. 上向分层分支进路式胶结充填采矿法示意图

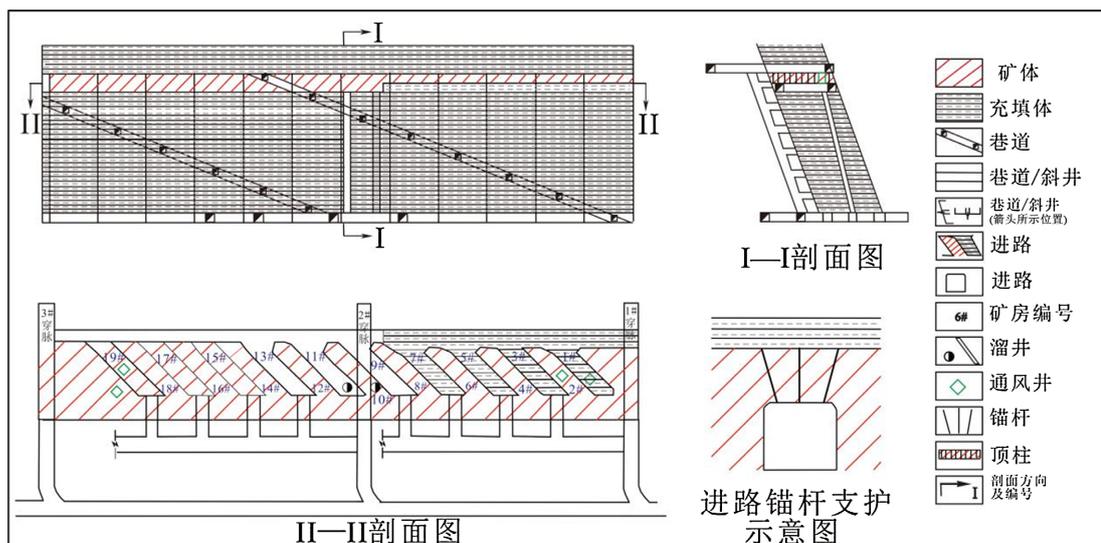


Figure 3. Schematic diagram of the access-type mining method for recovering top and bottom pillars  
图3. 进路式回收顶底柱采矿方法示意图

在下中段采用上向分层尾砂胶结充填采矿至顶柱时,对采场通过充填实现接顶(上盘、下盘通道不接顶),使顶柱上下均与充填体充填密实,保证顶柱整体稳定。再从下盘联络道向顶底柱内溜井方向掘进进路,以此进路为起始沿矿体上盘走向方向掘进采矿进路,至采场端部,采矿进路断面为 $3 \times 3 \text{ m}$ ,采矿进路支护采用锚网支护,随掘随支。如矿体相对较厚大( $>8.0 \text{ m}$ ),施工分支进路(进路与矿体走向夹角 $45^\circ$ )。再从采矿进路端部后退式压顶扩帮,压顶扩帮的崩矿步距可根据铲运设备能力确定为 $3\sim 5 \text{ m}$ ,形成 $4 \text{ m}$ 宽、 $5 \text{ m}$ 高的采空区,当采空区面积达到上中段假底允许暴露面积时,立即对采空区进行封闭充填,充填接顶、保养至充填体强度达 $2.0 \text{ MPa}$ 后,继续进行压顶、扩帮作业循环,直至顶底柱回采结束。

## 2.4. 适用性

基于南京爱景山锶矿的详细地质和岩体力学参数,该方法适用于矿体厚度为 $3.0\sim 12.0 \text{ m}$ ,RMR值不低于45,Q值不小于1.5,顶底柱厚度 $\geq 4.0 \text{ m}$ ,方可采用该进路式回收工艺;充填体单轴抗压强度须达 $2.0 \text{ MPa}$ 以上、养护期不少于14天,方能进入下一分层压顶作业。上述参数体系已通过南京爱景山锶矿现场试验验证,实测RMR平均值48.3、Q值1.72,充填体28天强度达 $2.3 \text{ MPa}$ ,完全满足安全高效回采要求。该参数体系亦适用于同类型中厚倾斜矿体,尤其在构造稳定、节理发育中等的岩层中表现更优。

## 3. 技术经济指标

### 3.1. 主要技术经济指标

根据南京爱景山锶矿2025年生产技术经济指标统计数据(表1),锶矿通过采用上向分层分支进路式胶结充填采矿法,不仅适用于矿体形态多变、开采技术条件复杂、节理裂隙发育、中等稳固矿体条件,而且在生产中也取得了较好的技术经济指标:平均回采率95.9%,贫化率5.5%,采场生产能力达 $56.55 \text{ kt/a}$ ,生产成本降低13.99%。现场实测数据显示,该工艺使顶底柱回收周期缩短30%,安全生产条件得到大幅改善,生产指标远优于行业平均水平。

**Table 1.** List of technical and economic indicators at  $-190 \text{ m}$  Middle Section of Nanjing Aijingshan strontium deposit in 2025  
**表 1.** 南京爱景山锶矿 2025 年 $-190 \text{ m}$  中段采场技术经济指标一览表

序号	技术经济指标	单位	技术使用前	技术使用后	变化率(%)
1	回采率	%	90	95.9	6.56
2	贫化率	%	10	5.5	-45.00
3	采出品位	%	47.18	49.09	4.05
4	采切比	m/kt	3.7	2.7	-27.03
5	采场生产能力	kt/a	43.15	56.55	31.05
6	采矿成本	元/t	308.9	265.7	-13.99
7	全员劳动生产率	t/人·月	101.2	138.8	37.15

### 3.2. 矿山经济效益

“上向分层分支进路式胶结充填采矿法”等系列采矿技术与过去所采用的采矿方法相比,矿石的技术经济指标均大幅度提高。经测算,在 $-190 \text{ m}$ 中段顶柱多回收矿石约2.4万吨,按市场价 $1100 \text{ 元/t}$ 计算,增加产值2640万元,增加效益396万元, $-190 \text{ m}$ 中段减少掘进工程量 $140 \text{ m}$ ,减少工程投资120万元。同时因生产效率提升及成本降低,年综合经济效益增加超500万元。目前,该技术已在矿山推广至 $-230 \text{ m}$ 中段,这一系列技术运用不仅夯实了矿山可持续发展的根基,更平衡了矿山资源集约利用与生态友好

的关系。

#### 4. 结语

上向分层分支进路式胶结充填采矿法实施后,大幅度提高矿山技术经济指标,在原有充填法高回收率的基础上,通过优化减少开采工程量和开采成本,实际取得了显著的经济、社会和安全效益,为中小型、类似地质条件复杂矿体采矿提供了很好的借鉴和示范作用,凡具急倾斜、中厚层矿体且矿体形态多变等共性地质特征者,皆可借此法实现安全与效益双提升。

#### 致 谢

南京金焰锑业有限公司骆光新工程师和章里清工程师参与了部分工作,匿名评审专家提出了宝贵的修改意见和建议,在此一并表示衷心感谢。

#### 基金项目

本文得到南京金焰锑业有限公司“爱景山锑矿地下开采延深工程”(编号:JYSY2019001)(内控)项目资助。

#### 参考文献

- [1] 陆振云, 范飞鹏, 刘新光, 等. 江苏溧水爱景山锑矿床天青石矿物形态学与成矿过程的关系[J]. 华东地质, 2024, 45(4): 402-413.
- [2] 刘兴. 缓倾斜中厚矿体机械化上向水平分层充填采矿法关键技术探索[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2025(3): 134-137.
- [3] 肖欢, 李绍斌, 刘银, 等. 某采场上向水平分层进路充填采矿法结构参数研究[J]. 云南地质, 2024, 53(1): 42-50.
- [4] 谢蕴忠, 徐磊. 急倾斜极薄矿体采矿技术研究[J]. 采矿技术, 2025, 25(3): 80-82.
- [5] 关少禹, 刘奇, 张为星. 某金矿下向进路充填采矿法试验研究[J]. 采矿技术, 2025, 25(3): 48-52.
- [6] 张建强, 张陆佳, 张明, 等. 阿舍勒铜矿急倾斜薄矿脉分段凿岩阶段嗣后充填采矿方法研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2025, 77(3): 34-39.
- [7] 刘东锐. 急倾斜极薄矿脉间隔充填采矿工艺研究[J]. 采矿技术, 2025, 25(2): 5-9.
- [8] 王东. 进路式充填采矿法充填接顶技术要点及有效应用[J]. 中国金属通报, 2025(6): 37-39.
- [9] 国家矿山安全监察局. KA30-2026 金属非金属地下矿山通风技术规范[S]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2026.