

# 夏甸金矿深井通风降温试验及数值模拟研究\*

张成法<sup>1</sup>, 段泽宇<sup>2</sup>, 刘业娇<sup>2</sup>, 崔梦圆<sup>2</sup>

(1. 中国黄金集团建设有限公司矿业分公司, 陕西 西安 710024;

2. 内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院, 内蒙古 包头市 014010)

**摘要:**针对夏甸金矿深井通风降温问题,在该矿-682 m 水平掘进巷道进行了通风降温试验,并运用 Fluent 数值模拟软件对试验巷道进行模拟,以此来研究通风降温过程中巷道内风流速度场与温度场的变化规律。试验结果表明,通风过程中,风量越大,降温效果越明显。Fluent 模拟结果表明,通风过程中,风流在距掌子面 20 m 内会形成涡流,风流紊乱,而在距掌子面 20 m 外,风流则较为稳定;巷道内距掌子面越近,温度越低;受风流与岩壁热交换的影响,巷道断面的温度会呈现出四周高中间低的分布规律。对比试验数据与模拟结果,验证了 Fluent 数值模拟的准确性与可靠性,为解决夏甸金矿其他掘进巷道的通风降温问题提供了参考依据。

**关键词:**深井巷道;通风降温;速度场;温度场;数值模拟

## 0 引言

随着矿产资源的日益消耗,地层浅部的矿产资源将逐渐被开采殆尽。随着不断向矿山深部开采,井下地热显著增加,深部巷道高温现象凸显<sup>[1-2]</sup>。阻碍深部矿床顺利开采的原因之一便是井下高温热害,同时它也严重影响了矿工的身心健康和劳动效率<sup>[3-4]</sup>,甚至导致采掘作业无法正常进行。随着时间的发展,面临这一问题的矿井也会越来越多<sup>[5]</sup>。

许多学者针对这一问题进行了研究,岳许辉等<sup>[6]</sup>针对矿井热环境,对掘进工作面等进行分析后发现,可通过控制热源来使工作面降温;胡靖<sup>[7]</sup>结合永川煤矿的实际情况,经过分析后发现,可采用回风排热的冷风制冷系统对永川煤矿的热害进行治理;姬建虎等<sup>[8]</sup>通过自行研制集中降温系统的方式来解决阳城煤矿井下热害问题;严明庆<sup>[9]</sup>针对韦家沟煤矿设计了冷水机组的矿井降温系统,使掘进工作面的温度降低了 7.4 °C;辛嵩等<sup>[10]</sup>采用液氧氮混合降温系统解决了赵楼煤矿的井巷降温问题。现有研究大多数针对的是煤矿巷道通风问题,极少有针对金属矿深井巷道通风问题的研究。因此,对夏甸金矿

的深井巷道通风问题进行深入研究有非常重要的现实意义。

本文选取夏甸金矿-682 m 水平掘进巷道进行通风降温试验,并根据实测的巷道参数使用 Gambit 软件建立三维几何物理模型,最后运用 Fluent 数值模拟软件进行数值模拟,以此来研究夏甸金矿深部掘进巷道在通风过程中温度与风流速度的变化规律。

## 1 深井掘进巷道通风降温试验

### 1.1 试验方案及测点布置

夏甸金矿主井地表标高为+165 m,试验选中的测试巷道为-682 m 水平掘进巷道,巷道长度为 100 m。通风方式为压入式通风,选用直径为 500 mm 的柔性风筒,风筒出口距离掌子面 10 m。局部通风机选用 DJK50 NO6.5 对旋式通风机。试验共设 7 个测试断面,断面距离巷道入口的距离分别为 20 m、50 m、65 m、80 m、90 m、95 m、99.5 m,依次记为 G、F、E、D、C、B、A 断面,如图 1(a)所示。为更全面地收集每个断面的温度变化,在每个断面布置 5 个测点,如图 1(b)所示,最后取 5 个测点的平均

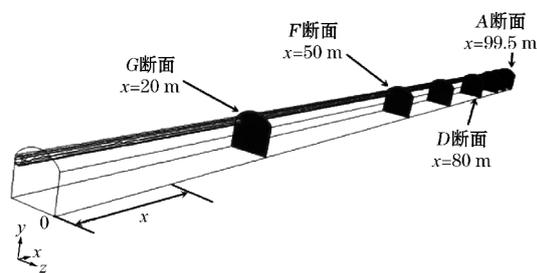
\* 收稿日期: 2023-04-17

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金面上项目(2021MS05059)。

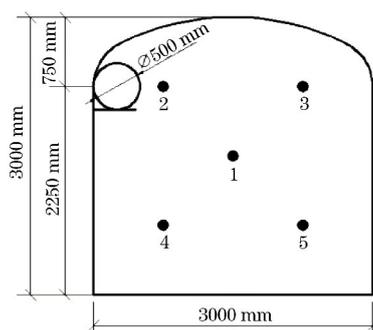
作者简介: 张成法(1989—),男,山东烟台人,硕士研究生,主要研究方向为矿山安全管理与深井通风降温,E-mail: 253993873@qq.com。

通信作者: 段泽宇(2001—),男,山西大同人,硕士研究生,主要研究方向为矿山灾害防治,E-mail: zeyudian0416@163.com。

温度为该断面的温度,在每个巷道断面的壁面喷漆,标记测点位置。



(a) 巷道断面分布



(b) 断面测点分布

图1 断面与测点布置

## 1.2 试验步骤

(1) 在未通风情况下,分别测定每个测点的温度。

(2) 打开局部通风机通风(只开一个电机),使用多参数记录仪测定风筒出口处温度及风速,通风1 h后,记录各测点温度。

(3) 打开两个电机,增大风量。使用多参数记录仪测定风筒出口处温度及风速,通风1 h后,记录各测点温度。

(4) 试验结束后,收回仪器并关停电机。

## 1.3 试验结果分析

断面温度为断面上5个测点的平均温度,其变化情况如图2所示。

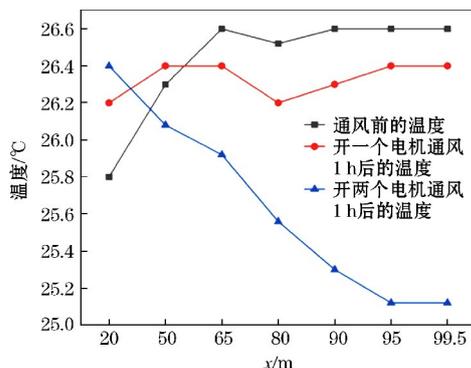


图2 巷道断面温度变化

通风前巷道口( $x=20$  m)温度远低于巷道内的温度,是由于该试验巷道不是正在掘进的巷道,而是已经放置了一段时间,巷道口附近的岩壁已经和运输大巷中的新鲜空气进行了一段时间的自然换热,所以巷道口处( $x=20$  m)温度相对较低( $25.8$  °C),且远远低于掌子面的温度,而沿着巷道向里,越靠近掌子面,温度越高。

将各断面到试验区域入口的距离设为 $x$ ,风筒出口位置位于C断面( $x=90$  m)。巷道内空气的流动方向为由掌子面向外流动。从图2可以看出,当开一个电机进行通风时,除巷道入口处( $x=20$  m)的温度有所升高,其他测点的温度都有不同程度的降低,而巷道入口处温度升高的原因为开启风机通风后,新鲜的风流与巷道壁面进行热量交换,污风随着风流方向排出,致使巷口处温度有所升高。降温幅度在D断面( $x=80$  m)处取得极大值,降温后的温度为 $26.2$  °C,除G断面外,温度沿D断面( $x=80$  m)处两侧逐渐升高。总体来看,除巷道入口处的温度略有上升,整个掘进巷道的温度都呈现下降的趋势,但温度下降的最大值也仅为 $0.2$  °C,下降程度较小,难以达到相关安全生产需求。

当开启两个电机通风时,相较于开启一个通风机通风,除巷道入口处( $x=20$  m)的温度有所升高,其他断面的温度都大幅度降低,而巷道入口处温度升高的原因与开启一个电机通风时一样。降温幅度在A断面( $x=99.5$  m)处取得最大值 $1.2$  °C,A断面( $x=99.5$  m)降温后的温度为 $25.1$  °C。总体来看,通风1 h后,巷道内的风流速度场与温度场都较为稳定,温度沿气体流动方向逐渐升高,温度曲线近似线性。

## 2 深井掘进巷道通风数值模拟

### 2.1 数学模型的理论基础与主控方程的选择

为了便于研究,本文提出了以下假定<sup>[11-12]</sup>:将通风空气看作是一种不可压缩的介质,在不考虑由于液体黏度作用而产生的热量消耗、水蒸气的蒸发和瓦斯解吸的情况下,将空气与固体的物性参数看作是一个常量;流体在湍流中的黏滞特性是等向同性的,其黏滞系数 $V$ 按标量法计算;流体为稳定的湍流,并符合布辛尼斯克假说;气体成分间无化学作用。

气流在掘进巷道的流动遵守质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。尽管这些方程中变量

各不相同,但均可反映单位时间和单位体积内物理量的守恒性质。其通用形式如下<sup>[13]</sup>:

$$\partial(\rho\varphi)/\partial t + \text{div}(\rho u\varphi) - \text{div}(\Gamma \text{grad}\varphi) = S \quad (1)$$

式中, $\rho$ 为气体密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $\varphi$ 为通变量,代表速度 $v$ 、温度 $T$ 、浓度 $C$ 等; $u$ 为对流项; $\Gamma$ 为广义扩散系数; $S$ 为广义源项。

井下风流绝大部分处于湍流状态。因此,在模拟实际过程中就必须选取相应的湍流计算模型,并进行简化处理。本文采用考虑浮力作用的双方程模型(标准 $k-\varepsilon$ 模型),流动为稳态紊流,且满足 Boussinesq 假设。

## 2.2 物理模型的建立

根据夏甸金矿通风降温试验的巷道参数,用 Gambit 软件建立巷道的三维几何模型,如图 3 所示。

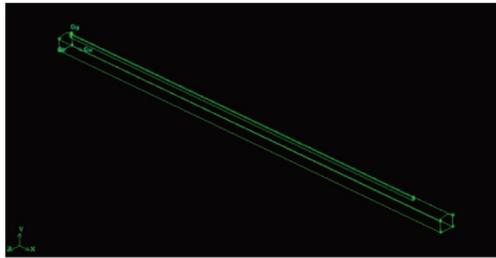


图 3 巷道三维几何模型

## 2.3 网格划分及边界条件的设定

对建立的巷道模型进行网格划分,Elements 选择 Tet/Hybrid(混合网格),设定巷道体网格大小即 Interval size 为 0.2,划分网格总数为 488 227,如图 4 所示。

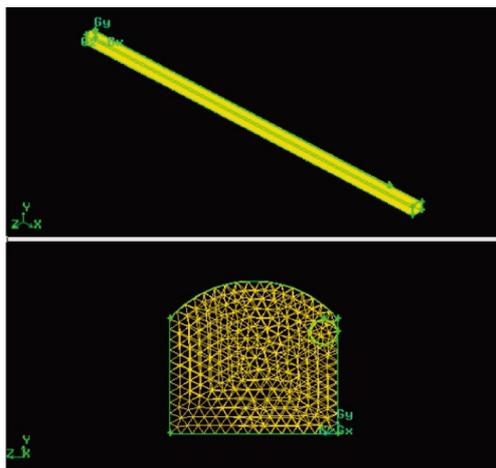


图 4 巷道模型网格划分

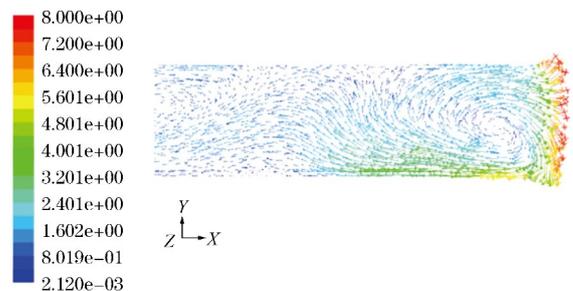
根据掘进巷道的物理模型以及现场试验测定值确定边界条件。以风筒出口处为模型的入口边界,设置为速度入口,入口温度为 297.8 K(24.8 °C),入

口风速为 24 m/s。以掘进巷道入口处为模型的出口边界,设置为自由出口。

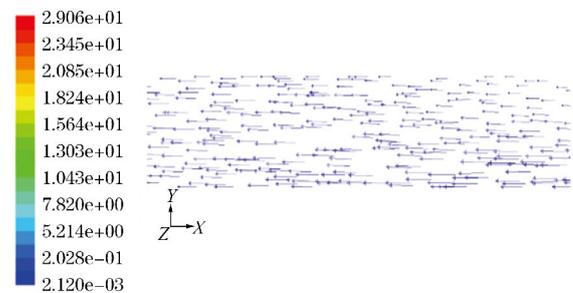
设置无滑动边界条件为壁面边界条件,设置壁面温度为 300.3 K(27.3 °C),设定壁面与空气的对流换热系数为 15 W/(m<sup>2</sup>·°C)。确定边界条件后,运用 Fluent 软件进行数值模拟并分析模拟结果。

## 2.4 深井掘进巷道内风流速度场规律研究

图 5 为深井掘进巷道的风流速度场分布,掘进巷道风流速度场可以分为两大区域,以风筒出口(即 C 断面)为界,风筒出口至掌子面为风流高速区,风筒出口至回流方向为风流低速区。其中风流高速区的风流流场结构比较复杂,风流比较紊乱,在掌子面处产生了涡流,如图 5(a)所示。风速由掌子面向工作面后方迅速减小,距掌子面 20 m 外,风流比较稳定,如图 5(b)所示。



(a) 风流高速区风流分布



(b) 风流低速区风流分布

图 5 风流分布

## 2.5 深井掘进巷道内温度场规律研究

图 6 为 A 断面至 G 断面的温度分布。由图 6 可知,随着各断面与掌子面距离的增大,各断面的温度也随之增大。风流自风筒口(C 断面)喷出后,先到达掌子面,之后再沿巷道流出,期间不断与岩壁进行热交换,岩壁给风流传热,风流温度升高,随后风流沿巷道流出,风流沿巷道运动路程越长,岩壁给风流传热也越多。由图 6 可知,各断面的中心温度较低,而四周温度相较于中心温度较高,这是由于四周的风流距岩壁更近,热传导更快。

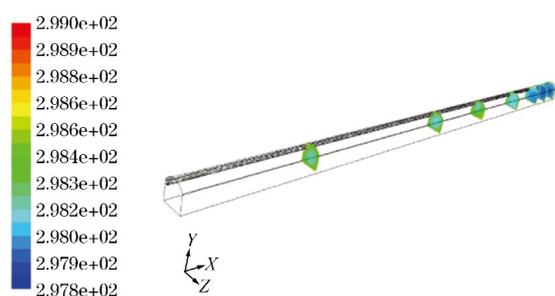
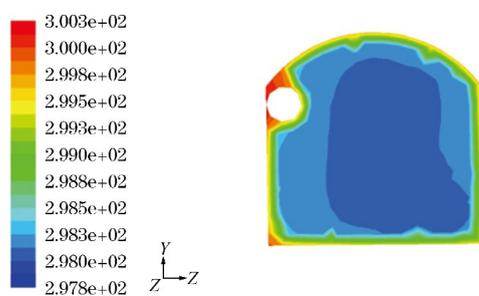
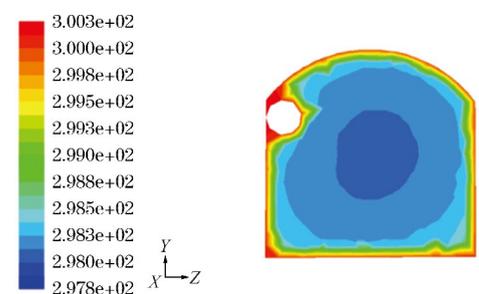


图6 断面温度分布

图7(a)为D断面( $x=80\text{ m}$ )的温度分布。由图7(a)可知,D断面( $x=80\text{ m}$ )距离掌子面20 m处,比较靠近新鲜风流,并且风流比较稳定。整个断面温度普遍偏低,比较接近入风温度。整体来看,上部温度略高于下部温度。



(a) D断面温度分布



(b) F断面温度分布

图7 D断面与F断面温度分布图

图7(b)为F断面( $x=50\text{ m}$ )的温度分布图。由图7(b)可知,F断面( $x=50\text{ m}$ )距离掌子面50 m处,风流也比较稳定,风流温度高于D断面。巷道周围靠近岩壁的温度较高,巷道中心的温度较低。相比D断面,F断面的岩壁温度对巷道温度的影响要大一些。虽然两个断面的整体温度都较低,但风筒与岩壁接点处的温度却偏高,这是由于该接点处的空间相较于整个巷道来说较为狭小、空气流动不畅通及气流流动速度慢,导致该位置的温度偏高。

### 3 深井巷道现场试验与数值模拟结果对比

定义通风前后的风温温差与通风前风温的比值

为降温率 $\lambda$ <sup>[14]</sup>,表1为开两个电机通风的现场试验与数值模拟的结果对比。

表1 试验结果与模拟结果的对比

断面	温度/ $^{\circ}\text{C}$		降温率 $\lambda/\%$	
	试验	模拟	试验	模拟
A(99.5 m)	25.12	24.91	5.56	6.35
B(95 m)	25.12	24.93	5.56	6.27
C(90 m)	25.30	25.01	4.88	5.97
D(80 m)	25.56	25.22	3.61	4.90
E(65 m)	25.92	25.53	2.55	4.02
F(50 m)	26.08	25.71	0.80	2.24
G(20 m)	26.40	25.78	-2.27	0.07

由表1可知,除G断面外,其他断面的试验数据与模拟结果进行对比,温差最大为 $0.39\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,降温率之差最大为1.47个百分点,模拟结果准确可靠。而G断面的数据不仅没有降温,反而升温,这是由于G断面在通风试验前已经与外部巷道进行了长时间的热量交换,温度远低于巷道内的温度。

### 4 结论

(1) 通过分析夏甸金矿深井通风降温试验的数据得出:开一个电机通风时,风量较小,降温效果不明显;开两个电机通风时,风量增大,降温效果相较于开一个电机通风时出现显著提升。说明风量的大小会对降温效果产生直接的影响,风量越大,降温效果越明显。开两个电机通风时,沿着风流的流动方向,巷道温度也逐渐升高,温度分布曲线近似线性。

(2) 根据Fluent模拟结果可知,在对深井巷道进行局部通风后,在深井巷道内会形成两个区域,在距掌子面20 m内会形成一个风流高速区,风流紊乱,并在掌子面形成涡流,而在距掌子面20 m外会形成另外一个区域,风流比较稳定。由于岩壁不断地与风流进行热交换,对于整条通风巷道的温度会呈现出离掌子面越近温度越低的规律,而对于巷道内同一断面的温度,则会呈现出中间低四周高的规律。

(3) 通过对比分析深井巷道通风试验数据与Fluent模拟结果可知,除G断面外,其他断面实测数据与模拟结果相比,最大温差为 $0.39\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,降温率之差最大为1.47个百分点,试验数据与模拟结果基本相同,验证了Fluent数值模拟方法的可靠性,该试验与模拟结果为夏甸金矿其他掘进巷道的通风降

温问题提供了参考依据。

#### 参考文献:

- [1] 春杰. 矿井风流热力过程及通风降温模拟研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2009.
- [2] 张成法. 夏甸金矿井下深部开采通风降温研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.
- [3] 王德明. 矿井通风与安全[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2012.
- [4] 温龙泉, 卜磊. 解析煤矿井下通风灾害预防[J]. 科技创新与应用, 2014(28): 93.
- [5] 谢和平, 周宏伟, 薛东杰, 等. 煤炭深部开采与极限开采深度的研究与思考[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 535-542.
- [6] 岳许辉, 李浪平, 刘怀江. 煤矿掘进工作面局部降温系统研究[J]. 神华科技, 2019, 17(11): 80-83.
- [7] 胡靖. 永川煤矿-350 m 水平掘进工作面降温技术分析[J]. 低碳世界, 2016(21): 74-75.
- [8] 姬建虎, 丁希阳, 张习军, 等. 阳城煤矿井下集中降温系统[J]. 煤矿安全, 2018, 49(2): 103-106.
- [9] 严明庆. 韦家沟煤矿降温技术研究与应用[J]. 矿山机械, 2018, 46(8): 56-58.
- [10] 辛嵩, 张琪, 张龙. 赵楼煤矿液氮液氧混合降温可行性研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(4): 13-15.
- [11] 王文才, 魏丁一, 许哲. 矿井立井提升设备活塞风动力效应研究[J]. 中国煤炭, 2017, 43(5): 74-78.
- [12] 陈功胜. 巷道围岩调热圈半径及温度场分布规律研究[J]. 煤炭技术, 2014, 33(4): 113-115.
- [13] 王文才, 魏丁一, 王振涛, 等. 基于 Fluent 的矿井活塞风动力效应研究[J]. 工业安全与环保, 2017, 43(9): 29-31.
- [14] 张瑞明, 魏丁一, 杜翠凤, 等. 掘进巷道通风降温试验及数值模拟研究[J]. 工业安全与环保, 2019, 45(9): 51-54.