

黄金矿山深部开采井下热源分析

吴锋^{1,2},李明^{1*},彭剑平²

(1. 山东理工大学资源与环境工程学院; 2. 招金矿业股份有限公司)

摘要:为量化黄金矿山深部开采过程中释放的热量,进而给出热害治理建议,分析了矿区原岩温度随深度的变化并对爆破、围岩、设备等热源散热量进行了计算。研究表明:矿区地温梯度约为 $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,进入 -752 m 中段生产时,原岩温度将达到 $34.3\text{ }^{\circ}\text{C}$;深部开采过程中,夏季主要散热源为机械设备(电能)及空气压缩散热,分别占比 38.18% 及 26.56% ,冬季主要散热源为围岩散热及机械设备,分别占比 38.74% 及 24.81% ;深部开采通风量为 $67.9\text{ m}^3/\text{s}$ 时,可保证深部开采过程中整体环境适宜性,当局部出现高温时,可以针对性采用加大通风进行降温。

关键词:深部开采;黄金矿山;原岩温度;井下热源;高温热害

中图分类号:TD727

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2024)07-0017-05

doi:10.11792/hj20240704

引言

随着开采深度的不断延伸,热害问题越来越成为矿山深部开采过程面临的主要问题,且在金属矿开采中更为突出,深井开采矿体均在增温带范围内,埋藏越深,热害对矿山生产影响越大。而且井下工作面气候条件的优劣,不仅取决于温度,还与空气含湿量和风速相关^[1-2]。

地面空气进入井下后,由于受到矿井内各种热源的影响,空气状态参数发生很大变化。随着金属矿山开采深度的增加及矿内机械化程度的提高,矿内热环境恶化问题越来越突出,尤其盘区采场的热环境恶化程度更加严重。分析导致金属矿山热害产生的热源结构,是进行热害治理技术研究的基础,金属矿山矿内热源可分为典型热源和普遍热源两大类。

典型热源是指在开采过程中,金属矿山所独有的热源,该热源在金属矿山中具有普遍意义,而在煤矿中几乎不存在,或者存在但在总热源中占的份额小。金属矿山开采中的典型热源主要包括:矿体开采过程中采用爆破法采矿引起的开采工艺——爆破散热、采场胶结充填引起的充填体散热、无轨柴油设备散热及具有氧化性矿石的氧化散热等。

普遍热源是指在矿山开采过程中普遍存在的热源,这种热源在各种矿山开采过程中都存在。普遍热源包括:开采深度增加造成原岩温度升高引起的围岩散热、井下机电设备散热、通风位差引起的自压缩热、

矿物在运输过程中的散热等^[3-4]。

本文依托新疆地区某黄金矿山工程实例,分析深部开采过程中各种热源的放热量,进而对深部开采热环境治理提出建议。

1 工程简介

该黄金矿山位于新疆维吾尔自治区,矿区属山前低丘陵山区,海拔 $750\sim 935\text{ m}$ 。矿石类型为金石英脉型及构造蚀变岩型,围岩以凝灰质砂岩为主,岩体较稳定,块状结构,质量中等。

矿体平均厚度 $0.87\sim 1.94\text{ m}$,平均倾角 $65^{\circ}\sim 83^{\circ}$,厚度 $\geq 0.8\text{ m}$ 的矿体采用浅孔留矿嗣后充填采矿法开采,厚度 $<0.8\text{ m}$ 的矿体采用削壁充填采矿法开采。矿山采用竖井开拓方式,中段高度 50 m ,当前采矿工作主要集中在 198 m 中段以上。

该矿山现有通风系统最深达到 -202 m 中段,但在深部开采通风系统的规划中,深度达到地下 -752 m 位置。根据规范及实际需求,需对井下热环境进行实际测试分析,并结合深部开采设计量化散热量,确定最小通风量。

2 深部原岩温度测试

2.1 原岩温度测试方案

测温孔深度为 30 m ,分别布置于 198 m 中段、 -2 m 中段、 -102 m 中段、 -202 m 中段。选用铠装热电偶作为温度传感器,同一测温孔中安装6个温度

收稿日期:2024-01-12;修回日期:2024-03-02

基金项目:山东省重点研发计划(竞争性创新平台)项目(2022CXPT032)

作者简介:吴锋(1983—),男,高级工程师,从事采矿技术研究及管理工作;E-mail:zjkykj@126.com

*通信作者:李明(1970—),男,副教授,博士,从事采矿技术研究工作;E-mail:41406278@qq.com

传感器,分别位于距离孔口 5 m、10 m、15 m、20 m、25 m 及 30 m 处,以此来测试不同水平巷道、不同围岩深度的温度。

2.2 测试结果

不同中段的原岩温度与孔深均满足对数型拟合关系(如图 1 所示)。198 m 中段、-2 m 中段、-102 m 中段原岩温度随测点深度的增加而增大,但是 -202 m 中段原岩温度随测点深度的增加出现减小的趋势,说明该中段的空气温度高于原岩温度。随着中段海拔从 198 m 下降到 -202 m,巷道的调热圈半径从 25 m 减小到 10 m,而原岩温度则从 19.4 °C 升高到 24.1 °C。

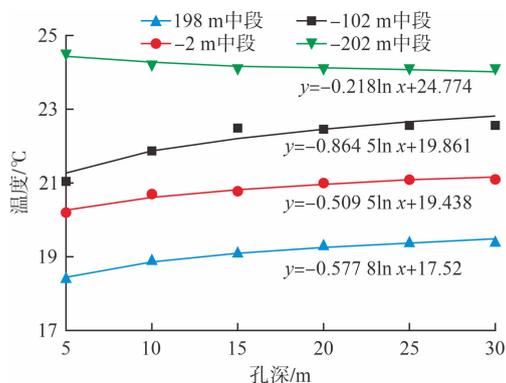


图 1 不同中段原岩温度-孔深变化关系

Fig. 1 Variation of original rock temperature with hole length on different levels

2.3 地温梯度及深部原岩温度预测

原岩温度随深度变化趋势如图 2 所示。根据各中段原岩温度测得结果,原岩温度随深度的增加而逐渐升高,并呈现近似线性关系,通过对深度-原岩温度进行直线拟合可得该矿山不同深度原岩温度计算公式。由拟合公式可知,矿区深部地温梯度约为 1.7 °C/100 m。据此估算,矿山进入 -502 m 中段生产时,原岩温度在 30 °C 左右;进入 -752 m 中段生产时,原岩温度将达到 34.3 °C。随开采深度增加,地温增高,存在一定程度热害。

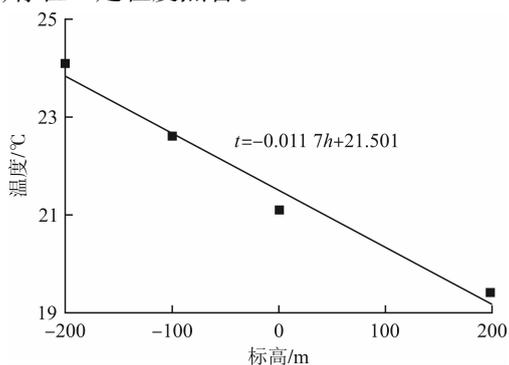


图 2 原岩温度随深度变化趋势

Fig. 2 Variation of original rock temperature with depth

3 深部开采热源分析

3.1 爆破散热

该矿山采用炮采工艺采矿,用于炮采的炸药爆炸产生的能量一部分用来破坏矿岩结构,另一部分则以热量的形式向矿内空气释放。炸药爆炸做功后直接向环境释放的热量^[5]为:

$$Q_b = \frac{m_b Q_{br} (1 - \omega)}{\tau_b} \quad (1)$$

式中: Q_b 为每次爆破平均散热量(kW); m_b 为每次爆破炸药用量(kg); Q_{br} 为所用炸药的爆热(kJ/kg); ω 为炸药的爆力值系数; τ_b 为两次爆破时间间隔(s)。

该矿山采用 2 号岩石乳化炸药,该类炸药对应的爆热及爆力值系数分别为 3 676.24 kJ/kg 及 0.32。矿山深部回采及掘进需要的炸药日消耗量为 561.42 kg,由式(1)可计算得出,爆破散热量为 16.2 kW。

3.2 充填工艺散热

胶结充填后,胶结材料在凝固过程中会释放大量的热。由于该矿山深部开采主要采用废石及尾砂充填,每年消耗胶结充填材料(强度等级 42.5 普通硅酸盐水泥,最终水化热为 330 kJ/kg)约 1 761 t,若考虑最不利条件,即胶结充填材料的水化热在 1 年内完成散热,则充填工艺散热量约为 18.4 kW。

3.3 无轨柴油设备散热

无轨柴油设备在工作过程中,柴油燃烧的能量一部分转化为机械能,另一部分以热能形式通过设备排出的高温尾气排入矿内空气环境,无轨柴油设备散热量(Q_c)为:

$$Q_c = \frac{M_c}{\eta_c} (1 - \eta_c) \frac{\tau_c}{24} \quad (2)$$

式中: M_c 为无轨柴油设备的功率(kW); η_c 为无轨柴油设备柴油机的效率; τ_c 为无轨柴油设备的工作时间(h/d)。

该矿山深部开采使用的柴油设备如表 1 所示。按照效率 40%、工作时间 18 h 计算,则无轨柴油设备散热量为 155.25 kW。

表 1 无轨柴油设备散热量统计结果

Table 1 Statistics of heat release from trackless diesel equipment

设备	同时工作台数	单台功率/kW	总功率/kW	散热量/kW
WJ-1K 地下内燃铲运机	2	49	98	110.25
UQ-5 地下自卸车	1	40	40	45

3.4 围岩散热

大多数情况下,围岩主要以热传导方式将热传给岩壁,并通过岩壁传给井下气流。井巷围岩放热(或

吸热)量(Q_{gu}),可按式(3)^[6-7]进行计算:

$$Q_{gu} = k_{\tau} l U (t_{gu} - t_B) \quad (3)$$

式中: l 、 U 分别为巷道的长度(m)和周长(m); t_{gu} 为井巷围岩的初始温度($^{\circ}\text{C}$); t_B 为巷道中风温($^{\circ}\text{C}$); k_{τ} 为围岩深部未冷却岩体与风流间的温差 1°C 时,单位时间从巷道 1 m^2 的壁面上向风流放出(或吸收)的热量 $[\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})]$,当巷道壁有强烈水分蒸发时,对于通风时间 $1 \sim 10\text{ a}$ 的巷道:

$$k_{\tau} = \frac{\lambda}{2R_0} + \frac{b}{2\sqrt{t_f}} \quad (4)$$

式中: λ 为导热系数 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$; R_0 为巷道断面水力半径; b 为岩体的蓄热系数; t_f 为巷道通风时间(s)。

$$b = 1.13 \sqrt{\lambda C \rho} \quad (5)$$

$$R_0 = 0.564 \sqrt{f} \quad (6)$$

式中: C 为比热容 $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$; ρ 为岩体密度 (kg/m^3) ; f 为巷道断面面积 (m^2) 。

一个中段服务周期一般在5年以内,围岩热力学参数如表2所示,由式(4)可得巷道在形成后5年内的不稳定热交换系数为 $0.61 \sim 0.80\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

表2 围岩热力学参数

Table 2 Thermodynamic parameters of surrounding rocks

导热系数/ [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]	比热容/ [$\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$]	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
1.74	900	2 800

为了分析围岩散热,以 $1\ 000\text{ m}$ 为巷道长度,有轨及无轨巷道周长的平均值 10.662 m 为巷道周长。该金矿区每月日均气温最高及最低分别为 22°C (7月)及 -10°C (1月),在冬季经过井口进风预热后,输送至井下的风温不低于 2°C ,因此,分别以 22°C 及 2°C 为夏季及冬季的进风温度,计算深部开采围岩对风流放热量。深部开采过程中计划同时开采5个中段,因此,在最不利情况下同时开采最深的 $-552 \sim -752\text{ m}$ 中段,夏季围岩5年平均总散热量约为 392.48 kW ,冬季围岩5年平均总散热量约为 $1\ 134.06\text{ kW}$ 。

3.5 机械设备散热

采掘机械接收的电能几乎全部转换为热能,但实际观测表明,仅有80%的热量传给风流,其余热量则被运输的矿岩带走。因此,采掘机械的放热量(Q_{ej})可用式(7)^[8]进行计算:

$$Q_{ej} = 0.8 k_{ej} N_{ej} \quad (7)$$

式中: k_{ej} 为设备的利用系数,等于24除以每日实际工作时间; N_{ej} 为采掘机械电动机消耗的功率(kW)。

矿区主要回采和掘进设备如表3所示。由式(7)计算得到,机械设备散热量为 726.32 kW 。

表3 矿山主要回采和掘进设备

Table 3 Major mining and excavation equipment list of mines

设备	总功率/kW	利用系数
局扇	110	0.7
电动铲运机	225	0.7
耙斗装岩机	66	0.7
矿用挖掘机装载机	111	0.7
耙矿绞车	15	0.7
井下提升机	710	0.7
电机车	60	0.7

3.6 空气压缩散热

地表气体经井筒进入工作面中,由于井筒空气柱的压力,导致气体被压缩,因此将原本的势能转化为热能,从而提高气流的温度。空气压缩的散热量(Q_b)为:

$$Q_b = 0.009\ 8 C_p M_B \Delta H \quad (8)$$

式中: C_p 为空气的定压比热容 $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$; M_B 为风量 (m^3/s) ; ΔH 为风流向下流动的垂直深度(m)。

通过对许多矿井井筒大量实测数据研究表明:井筒内风流每下降 100 m ,气流温度升高 $0.4^{\circ}\text{C} \sim 0.5^{\circ}\text{C}$ 。若取温升为 $0.45^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,则计算得出开采 $-502 \sim -752\text{ m}$ 中段矿体时空气压缩散热量约为 505.3 kW 。

3.7 采出矿(岩)散热

井下矿体从开采到出矿存在一个时间过程,由于矿体新暴露于矿内热环境中,所以在出矿过程中存在放热现象。矿(岩)体运输散热量(Q_{ys})可根据式(9)进行计算:

$$Q_{ys} = 0.002\ 4 M C_k l^{0.8} (t_{gu} - t_a - 3.5) \quad (9)$$

式中: M 为矿(岩)体的运输量 (kg/s) ; C_k 为矿(岩)体的比热容 $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})]$; l 为矿物运输的距离(m); t_a 为巷道中风流的平均温度($^{\circ}\text{C}$)。

采出的矿石量为 $666.67\text{ t}/\text{d}$,开拓的废石量为 $278.6\text{ t}/\text{d}$,合计 $945.27\text{ t}/\text{d}$ 。假定平均运输距离为 $1\ 500\text{ m}$,则 -502 m 中段至 -752 m 中段夏、冬两季矿(岩)体运输散热量为 58.20 kW 及 222.47 kW 。

3.8 人员散热

矿工在作业时的自身放热量,主要取决于劳动强度和持续作业时间。矿工在劳动时的放热量(Q_R)可用式(10)^[1]近似计算:

$$Q_R = k_R q_R N \quad (10)$$

式中: k_R 为矿工同时工作系数,一般为 $0.5 \sim 0.7$; N

为作业地点的总人数; q_R 为能量代谢率 (W/人), 不同劳动强度的能量代谢率如表 4 所示。

表 4 不同劳动强度的能量代谢率

Table 4 Energy metabolism rate under different labor intensities

人体状态	休息	轻度劳动	中等劳动	繁重劳动
能量代谢率/(W·人 ⁻¹)	90~115	250	275	470

该矿山最大班下井人数 74 人, 实行三班倒工作制。 k_R 取 0.7; q_R 取 275 W/人, 由式(8) 计算得出, 人员散热量为 14.3 kW。

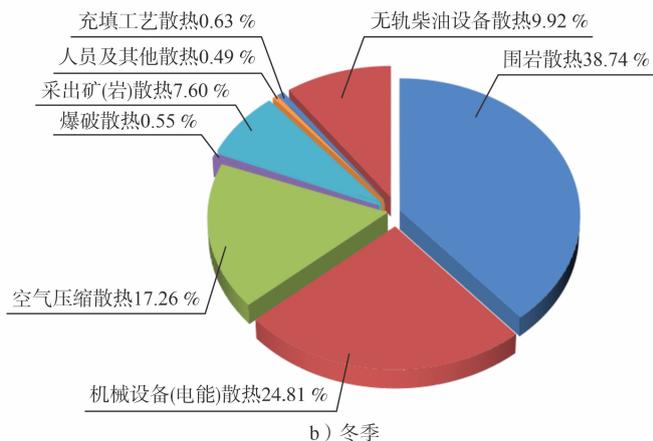
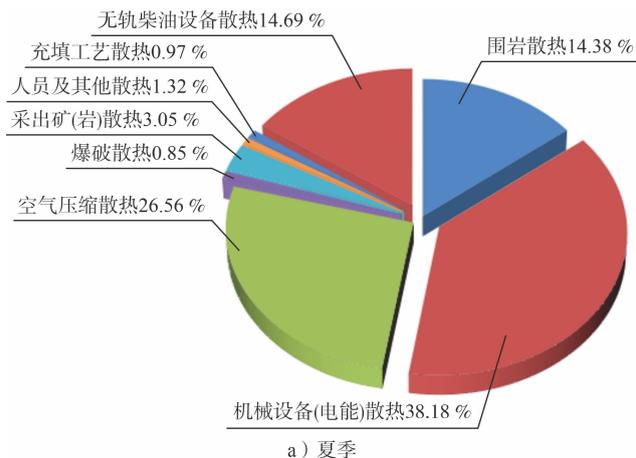


图 3 -502 ~ -752 m 中段热源散热量占比

Fig. 3 Takeups of heat release from heat sources from Level -502 m to Level -752 m

4.2 深部开采井下热害治理建议

深部开采通风量为 $67.9 \text{ m}^3/\text{s}$, 空气密度取 $1.177 \text{ kg}/\text{m}^3$, 夏季及冬季进风温度分别取 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 及 $2 \text{ }^\circ\text{C}$, 设定 $28 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 空气的焓值分别为 $75 \text{ kJ}/\text{kg}$ 、 $43 \text{ kJ}/\text{kg}$ 、 $9 \text{ kJ}/\text{kg}$, 则通风空气升温至 $28 \text{ }^\circ\text{C}$ 后在夏季及冬季可携带的热量分别为 2557.38 kW 、 5274.61 kW , 均远超各种热源的总散热量。通风可以保证整体环境较适宜生产活动。开采过程中开采工艺散热、机械设备散热及人员散热导致局部出现高温可以针对性采用加大通风进行降温, 达到规范要求, 创建舒适作业环境。

对于掘进工作面: 掘进工作包括开拓、探矿、采准切割, 一般每个采准及切割工作面配备 1 台 FBD-11 型或 FBD-5.5 型局扇辅助通风。独头掘进工作面的通风, 按照巷道长度配备局扇, 掘进巷道工作面距主风流巷道 200 m 内可配备 1 台局扇进行抽出式通风, 大于 200 m 应配备 2 台局扇进行压抽式通风。

对于采场: 采场通风一般是利用主扇的风压将回采工作面的空气引向回风巷抽出地表。在主扇通风不良情况下, 为加速采场降温, 可在采场内配备 FBD-11 型或 FBD-5.5 型局扇辅助通风, 以进一步改善工作环境。

4 散热量综合评价及热害治理建议

4.1 深部开采散热量综合评价

-502 ~ -752 m 中段热源散热量占比如图 3 所示。由图 3 可知: -502 ~ -752 m 中段开采过程中, 夏季各种热源的散热量约为 1902.57 kW 、冬季各种热源的散热量约为 2927.23 kW 。夏季主要散热源为机械设备(电能)散热及空气压缩散热, 分别占比 38.18% 及 26.56% ; 冬季主要散热源为围岩散热及机械设备(电能)散热, 分别占比 38.74% 及 24.81% 。

5 结论

本文主要分析了矿区地温及原岩温度、深部开采热源, 根据现场测试数据对某黄金矿山深部开采热环境治理给出了降温建议, 结论如下:

1) 原岩温度测试数据表明地温梯度约为 $1.7 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ 。通过地温拟合公式 $t = -0.0117h + 21.501$ 可对深部开采的井巷原岩温度进行预测: 进入 -502 m 中段生产时, 原岩温度在 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右; 进入 -752 m 中段生产时, 原岩温度将达到 $34.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2) -502 ~ -752 m 中段开采过程中, 夏季各种热源的散热量约为 1902.57 kW 、冬季各种热源的散热量约为 2927.23 kW 。夏季主要散热源为机械设备(电能)散热及空气压缩散热, 分别占比 38.18% 及 26.56% ; 冬季主要散热源为围岩散热及机械设备(电能)散热, 分别占比 38.74% 及 24.81% 。

3) 深部开采通风量为 $67.9 \text{ m}^3/\text{s}$, 通风空气升温至 $28 \text{ }^\circ\text{C}$ 后在夏季及冬季可携带的热量分别为 2557.38 kW 及 5274.61 kW , 均远超各种热源的总散热量。预计深部开采过程中整体环境较适宜, 开采过程中开采工艺散热、机械设备散热及人员散热导致局部出现高温可以针对性采用加大通风进行降温。

[参 考 文 献]

- [1] 赵兴东,修国林,杨竹周,等. 三山岛金矿围岩温度梯度测试及工程热环境分析[J]. 金属矿山,2013(6):109-113.
- [2] 陈宜华,孙浩. 深井高温矿床井下热源与热量分析[J]. 金属矿山,2011(3):132-135.
- [3] 那寒鑫. 深井矿山岩体热害源分析与控制[D]. 长沙:中南大学,2014.
- [4] 徐鸿博,李焱星. 金属矿山深井热源分析与矿井通风[J]. 世界有色金属,2017(19):257-258.
- [5] 魏诚. 矿山深部开采地温测定及高温热环境分析[J]. 黄金,2023,44(6):30-34.
- [6] 赵小稚,崔箭,王敬志. 岩温对曹家洼金矿深部开采热环境的影响[J]. 黄金,2014,35(6):33-35.
- [7] 王伟,冯福康,赵天勇,等. 秦岭金矿深部探矿中段高温热害治理方案探讨[J]. 黄金,2021,42(3):25-31.
- [8] 陈胤,杨运良,程磊. 矿井高温热害分析与治理[J]. 矿业快报,2008(6):78-79.

Analysis of heat sources in deep underground mining of gold mines

Wu Feng^{1,2}, Li Ming¹, Peng Jianping²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology;

2. Zhaojin Mining Industry Co., Ltd.)

Abstract: To quantify the heat released during the deep mining of gold mines and provide suggestions for heat hazard management, this study analyzed the variation of original rock temperature with depth and calculated the heat release from blasting, surrounding rock, and equipment. The results show that the geothermal gradient of the mining area is approximately 1.7 °C/100 m. At the -752 m level, the original rock temperature reaches 34.3 °C. During deep mining, the main heat sources in summer are heat release from electric power of mechanical equipment and air compression, accounting for 38.18 % and 26.56 % of the total heat, respectively. In winter, the primary heat sources are heat released from surrounding rocks and mechanical equipment, accounting for 38.74 % and 24.81 % of the total heat, respectively. With a ventilation rate of 67.9 m³/s, the overall environment during deep mining can be kept suitable. In cases of localized high temperatures, targeted cooling can be achieved by increasing ventilation.

Keywords: deep mining; gold mines; original rock temperature; underground heat sources; high-temperature heat hazard