

doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0021

He Weiwei, Sheng Yu. Numerical analyses of thermal effect of ventilation on the surrounding rock of shaft in permafrost regions (I): Airflow temperature varying in an intake shaft [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 177-185. [何维维, 盛煜. 矿井通风对多年冻土井筒围岩热影响的数值分析 (I): 入风井筒风温的变化规律[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 177-185.]

矿井通风对多年冻土井筒围岩热影响的数值分析 (I): 入风井筒风温的变化规律

何维维^{1, 2}, 盛煜¹

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘 要: 多年冻土区蕴藏着丰富的矿产资源, 矿业开发已成为多年冻土区经济发展的主要产业之一, 但是其开采过程将不可避免地受到冻土的影响, 也造成多年冻土区生态环境恶化的影响. 在西部大开发的进程中, 能源需求量逐渐增加, 而多年冻土区矿山露天开采量逐渐减少, 开展多年冻土区矿山地下开采相关的研究工作显得尤为迫切. 基于前人在非冻土区的相关研究成果, 结合位于多年冻土区的江仓矿区气象资料, 利用 MATLAB 软件编写入风井筒风温计算程序, 并引入临界温度的概念研究入风井筒风温的变化规律, 确定了影响因素, 获得了矿井通风与多年冻土井筒围岩的对流换热边界条件中风流温度的拟合函数, 其计算方法和结果为下一步采用数值模拟的方法研究矿井通风对多年冻土井筒围岩的热影响提供了参考依据.

关键词: 多年冻土; 矿井通风; 临界温度; 对流换热; 江仓矿区

中图分类号: P642.14 **文献标识码:** A

0 引言

多年冻土区蕴藏着丰富的矿产资源^[1-2], 由于露天开采在技术上好实现, 并且采矿成本低, 在多年冻土区主要采用简单的露天开采, 再加上片面追求经济效益, 人们在无序地开发矿产资源的同时也破坏了多年冻土区脆弱的生态环境, 而且被破坏的地质环境自然修复能力极差^[3-5]. 近年来, 随着认识的不断提高, 人们认识到了环境问题的重要, 尤其是冻土环境的脆弱性, 更为重要的是多年冻土区矿产资源露天产量逐渐减少, 地下产量逐渐增加. 因此, 对多年冻土区矿山地下开采的研究具有十分重要的意义.

多年冻土区矿山地下开采将穿越多年冻土层, 由于矿井需要通风以保证井下作业的安全, 根据国

内外相关研究分析, 通风作用会对冻土的热状况产生很大的影响, 从而对冻土的热稳定性产生很大的影响^[6-11]. 目前对矿井通风与多年冻土区矿井围岩的热交换作用的研究以定性分析为主, 而对于矿井井筒入风流温度的计算, 都是针对一般地区(非冻土区)的风流与井壁之间的热交换^[12-14]. 在国内外涉及多年冻土区风流与井巷围岩之间相互热作用的研究目前还不多见, 多年冻土区矿山地下开采的冻害问题仍没有完全解决, 就目前的研究现状而言, 还不能满足工程实际的需要. 本文从拟建的江仓矿区一号井田的工程建设应用实际出发, 通过现场实测资料分析以及入风井筒风温的计算模型来研究多年冻土入风井筒风流温度的变化规律, 从而为研究矿井通风对多年冻土区井巷围岩的热影响奠定了基础, 为多年冻土煤矿井下的安全生产创造良好的条件.

收稿日期: 2012-08-11; 修订日期: 2012-10-02

基金项目: 国家自然科学基金创新群体(40821001)资助

作者简介: 何维维(1984—), 男, 湖北随州人, 助理工程师, 2011 年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获硕士学位, 现主要从事岩土工程数值模拟研究. E-mail: heweiwei08@lzb.ac.cn

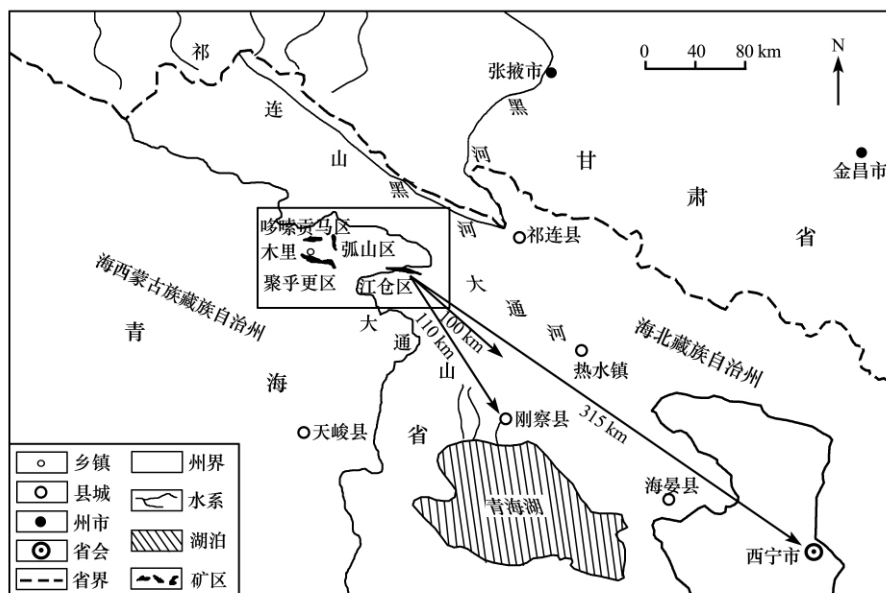


图1 江仓矿区地理位置示意图

Fig.1 Map showing the geographic location of Jiangcang coalfield

1 研究区概况

木里煤田矿区位于青海省东北部,其地理坐标为 $98^{\circ}59' \sim 99^{\circ}35'24''$ E, $38^{\circ}10' \sim 38^{\circ}02'02''$ N. 矿区由江仓区、聚乎更区、弧山区和哆嗦贡玛区4个区组成,位于矿区东南端的江仓区东起砾岩山,西至阿子沟,与聚乎更矿区相邻,东西长约25 km,南北平均宽约2 km,面积约50 km²,海拔在2 800~3 900 m之间. 矿区东距热水镇约100 km(有简易公路相通),距刚察县110 km,距西宁市315 km,矿区地理位置如图1所示.

根据青海省奥凯煤业发展有限责任公司开发江仓一号井田矿井建设的相关资料,江仓矿区现有6个井田和两个勘探区,资源储量(普查) 17.5×10^8 t,而拟建矿区一井田精查资源储量为 1.23×10^8 t. 由于设计工业广场和井筒处在一井田南翼底板位置,江仓一井田副井井口中心坐标纬距(X)为4 211 610.2,经距(Y)为33 552 968.93,提升方位角为 232° ,标高为+3 792 m,井筒直径D为4 m,井底车场标高为+3 450 m,垂直开采深度为342 m. 该区域为多年冻土层,上部第四系岩性以砾岩为主,覆盖厚度约5~6 m,下部为基岩,岩性以砂岩为主,依据露天采坑实际情况,第四系上部2 m为季节性冻土,以下为多年冻土层.

2 矿井入风井筒风流热力学参数

矿山进风井内风流温度的分布取决于井筒入风

口气温和风流流经井筒过程的热湿交换结果. 风流在入风井筒中的热力变化过程是非常复杂的,但影响风流在井筒中热交换的主要因素是地面气象参数、风流在井筒中的加湿压缩和围岩放热(或吸热),而地面气象参数是进入矿内风流的初始条件,是影响矿内风流热力状态的一个主要因素,也是研究风流在井筒中的加湿压缩和围岩放热(或吸热)的基础. 地面气象参数是指进入矿内风流的温度、湿度和流速这三个参数的综合作用状态,在流经井筒过程中与之不断进行热湿交换,这三个参数也不断发生变化,间接地反映了矿井进风井风流温度的变化,地面风流热力学参数作分析研究是非常有必要的.

2.1 风流热力学参数计算方法

地面空气通常称为湿空气,由于湿空气中水蒸汽含量的变化对空气环境的干燥和潮湿程度产生重要影响,从而使湿空气的物理性质发生改变. 因此,在分析湿空气的状态过程中,研究湿空气中水蒸汽的分压力十分重要. 饱和水蒸汽分压力即为湿空气的相对湿度为100%时,水蒸汽的分压力是计算湿空气其他物理性质的基础. 联合国世界气象组织(WMO)推荐使用戈夫-格雷奇(Goff-Gratch)公式,我国现行的《地面气象观测规范》也采用戈夫-格雷奇(Goff-Gratch)公式求解饱和和水蒸汽分压力,但是该公式比较复杂,计算繁琐. 根据周西华等^[15]对饱和和水蒸气分压经验公式的比较分析,在干球温度为 20°C 以下时,采用Buck公式计算的结果与戈

夫-格雷奇公式最为接近, 误差较小。

当 $t > 0$ °C 时,

$$P_s = 611.21e^{\frac{(18.678-t/234.5)t}{257.14+t}} \quad (1)$$

当 $t < 0$ °C 时,

$$P_s = 611.15e^{\frac{(23.036-t/333.7)t}{279.82+t}} \quad (2)$$

$$d = \frac{0.622\varphi P_s}{B - \varphi P_s} \quad (3)$$

$$i = 1.01t + d(2501 + 1.85t) \quad (4)$$

$$\rho = 0.003484 \frac{B}{273+t} \left(1 - \frac{0.3784P_s}{B}\right) \quad (5)$$

式中: t 为干球温度(地面温度)(°C); B 为大气压力(Pa); φ 为空气相对湿度(%); P_s 为饱和水蒸气分压力(Pa); d 为含湿量($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$); i 为空气焓值($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$); ρ 为空气密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

目前, 最容易测得的风流热力参数为干球温度、大气压力、相对湿度和风速。根据以上所测得的参数, 依据所建立的数学模型, 计算测点风流的其它热力参数, 为研究矿井风流温度的变化规律奠定了基础。

2.2 实测原始数据处理结果

本文选取 2008 年 1—12 月江仓气象站气温、大气压力、空气相对湿度观测资料, 共 365 d。每日气温测 48 次, 整点前后半小时进行观测, 即每日 00:00—23:30, 将各对应时间的温度分别输入表格, 然后算出江仓矿区各气象参数的平均值。而在高原多年冻土区, 正确剖析附面层是为了合理选择地表下冻土冻融计算的上部边界条件。附面层是指附着于下垫面的一个物理层, 具有一定厚度, 在大气及太阳辐射作用下, 其温度、湿度与上覆空气层和下卧土层的温度、湿度具有不连续的突变现象。因此, 根据附面层原理^[16]将气温换算成地面温度, 见表 1。

根据上述 Buck 公式, 并利用 Visual Basic 软

件编写程序计算风流热力学参数值, 计算结果表见图 2。

3 矿井入风井筒风量

青藏高原地区矿井内空气单位体积含氧量随着海拔的增高而减少, 而且该地区的空气密度不足平原地区的 60%, 若达到和平原矿井相同的氧气供应量, 矿井总进风量需大于平原矿井的 1.3 倍才能满足生产的需要^[17]。

矿井通风分为机械通风和自然通风, 但在主副井贯通之前, 自然通风并不能很好地改变矿井内气候环境, 故建议采用机械通风的方式, 按主扇的工作方式主要分为压入式、抽出式通风两种。由于抽出式通风是负压通风, 即井内的大气压力小于外部环境, 而对于高海拔矿井, 不仅不能改善矿井气候

表 1 江仓矿区 2008 年各气象参数月平均值

Table 1 Monthly average meteorological index in Jiangcang coalfield

月份	地表干球温度/°C	地表相对湿度/%	地表大气压力/Pa	地表风速/(m·s ⁻¹)
1 月	-14.35	73.78	70 624.35	1.44
2 月	-14.94	70.08	70 792.50	2.09
3 月	-6.20	62.45	71 016.34	2.75
4 月	0.34	68.27	71 063.73	2.89
5 月	5.77	76.08	71 276.17	2.58
6 月	7.80	88.42	71 293.74	2.17
7 月	11.09	92.22	71 306.27	2.36
8 月	9.94	85.83	71 376.88	2.29
9 月	7.28	96.84	71 424.95	2.13
10 月	1.59	81.42	71 474.73	2.20
11 月	-6.64	69.16	71 269.79	2.47
12 月	-10.39	53.03	71 015.87	3.46

Query								Add	Update	Delete
	干球温度 t (℃)	饱和水蒸气压力 Ps (Pa)	相对湿度 φ (%)	大气压力 B (Pa)	含湿量 d (kg/kg)	空气焓值 i (kJ/kg干空气)	空气密度 ρ (kg/m ³)			
13	-14.35	175.529	0.7378	70624.35	0.001143	-11.666	0.95			
14	-14.94	166.255	0.7008	70792.5	0.001025	-12.553	0.955			
15	-6.2	362.471	0.5245	71016.34	0.001969	-1.31	0.926			
16	0.34	626.471	0.5827	71063.73	0.003766	9.765	0.903			
17	5.77	920.411	0.7608	71276.16	0.006171	21.328	0.886			
18	7.8	1058.23	0.8842	71293.74	0.008272	28.685	0.88			
19	11.09	1320.452	0.9222	71376.27	0.010796	38.423	0.869			
20	9.94	1222.934	0.9583	71376.88	0.009263	33.428	0.873			
21	7.28	1021.296	0.9684	71424.95	0.008734	29.314	0.883			
22	1.59	685.523	0.8142	71474.73	0.004895	13.864	0.904			
23	-6.64	348.953	0.6916	71269.79	0.002113	-1.447	0.93			
24	-10.39	251.089	0.5303	71015.87	0.001168	-7.594	0.941			

图 2 风流热力学参数计算结果

Fig. 2 The calculated values of thermodynamic parameters of the airflow

环境,还会进一步使空气压力低、含氧量不足的问题恶化;相反压入式通风,即井内的大气压力大于外部环境,随着井内的大气压力增加,空气密度也随之增大,单位体积内氧含量增加,从而改善矿井的气候环境^[17].因此,本文选用压入式通风方式对拟建矿井入风井筒的风量进行研究.

青藏高原特殊的地理条件,高原矿井的入风井筒的风量要进行适当的修正,修正式为:

$$Q_1 = cQ_0 = \frac{p_0}{p_1}Q_0 \quad (6)$$

式中: Q_1 及 Q_0 分别为标准状况下及高海拔地区的矿井需风量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); p_0 及 p_1 分别为标准状况下及高海拔地区的大气压力(Pa); 经过计算, $c=1.42$.

$$Q = v \times S \quad (7)$$

式中: Q 为风量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); v 为风流速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); S 为井巷断面面积(m^2).

$$G = Q \times \rho \quad (8)$$

式中: G 为质量风量($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$); ρ 为空气密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

4 矿井入风井筒风温变化规律

4.1 矿井入风井筒风温计算方法

对于风温的计算,前人已经做了大量研究,提出了许多风温的计算模型,但是这些模型大都包含关于温度、含湿量等一些隐式的非线性方程,而如何求解这些方程往往是风温计算的关键^[18].目前,主要采用迭代法求解这些方程,然而由于计算公式和参数选择十分复杂,这种方法往往并不能凑效.本文基于 MATLAB 软件编制计算程序来解算入风井筒风流温度的分布规律.入风井筒风流温度的分布取决于入风口气温和风流与井筒之间热湿交换结果.通常入风井筒的风流主要与井壁围岩之间发生热量交换,因此以下分析均假设风流仅与井壁间发生热湿交换,无其他热源,且通风时间在一年以上.由于井筒风流的热力过程复杂,很难建立起井筒风温计算的精确的数学分析模型,故本文采用差分法^[19]进行井筒风温计算,从而研究入风井筒风温变化的规律.

差分法的基本思想是:把入风井筒沿井深自上而下划分成一个个井段,井段高可取 $Z=10 \text{ m}$,然后把风温从井口逐段计算到井底,并且把每个井段的平均原始岩温作为该井段的原始岩温,如图 3 所示.

用 K 值显热比法计算风流流经每一井段后的

风温变化值,则第一井段末端的风温为:

$$t_1 = t_{y1} - (t_{y1} - t_0) \exp\left(-\frac{2\pi\lambda K_\tau \epsilon Z}{Gc_{pk}}\right) + \frac{Z(1+d_0)}{427(c_{pk} + d_0c_{psh})} \quad (9)$$

式中: t_1 为第一井段终点风温($^{\circ}\text{C}$); t_{y1} 为第一井段平均原始岩温($^{\circ}\text{C}$); t_0 为这一井段起点(井口)风温($^{\circ}\text{C}$); λ 为围岩导热系数($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); K_τ 为无因次不稳定传热系数; ϵ 为显热比; Z 为井段长度(m); G 为质量风量($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$); c_{pk} 为空气定压比热容, $1.00 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$; d_0 为井口风流的含湿量($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$); c_{psh} 为水蒸气定压比热容, $1.8 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

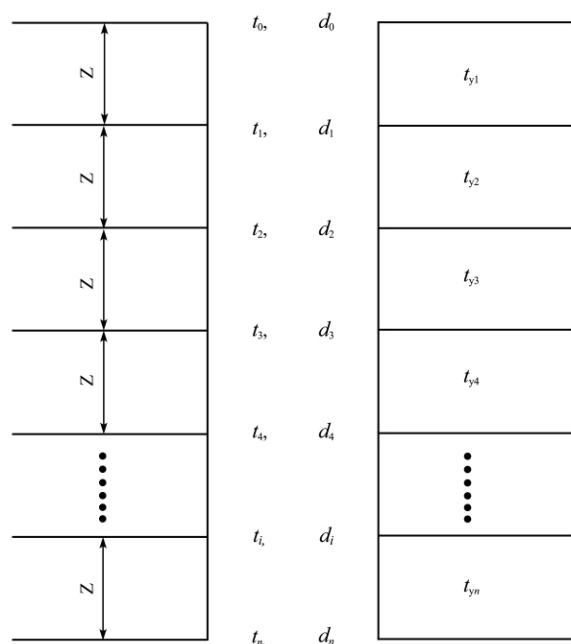


图 3 入风井筒风温计算模型

Fig. 3 The calculation model of airflow temperature in an intake shaft

把 K_τ 值看作不随质量风量 G 而变化的常量: 令 $D=2\pi\lambda K_\tau \epsilon Z/c_{pk}$, 又令 $C=Z(1+d_0)/427(c_{pk} + d_0c_{psh})$; 由于进风井中空气含湿量 c_{psh} 值远小于 1, 并且 $c_{psh}=1.83c_{pk}$, 故 d 变化引起的 C 值变化很微小, 所以可以把 C 也看作不随井段而变化的常数. 引入 C 、 D 两个参数, 则式(9)可简化为:

$$t_1 = t_{y1} - (t_{y1} - t_0) \exp(-D/G) + C \quad (10)$$

把上一井段终点的风流温度作为相邻下一井段起点的风流温度可依次求出各井段终点的风流温度:

$$t_i = t_{yi} + C - (t_{yi} - t_{yi-1} - C) \exp\left(-\frac{1}{G}D\right) - (t_{yi} - t_{yi-2} - C) \exp\left(-\frac{2}{G}D\right) - \dots$$

$$\begin{aligned}
 & - (t_{y2} - t_{y1} - C) \exp(-\frac{i-1}{G}D) \\
 & - (t_{y1} - t_0) \exp(-\frac{i}{G}D) \quad (11)
 \end{aligned}$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$ 为井段序号. 设进风井围岩中地温增深率为 $\Delta(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$.

则

$$t_{yi} = t_{y1} + (i-1)Z/\Delta \quad (12)$$

$$t_{yi} - t_{yi-1} = Z/\Delta \quad (13)$$

代入式(11)得各井段下端风温计算通式:

$$\begin{aligned}
 t_i &= (t_{y1} - C) + (i-1) \frac{Z}{\Delta} \\
 & - (\frac{Z}{\Delta} - C) \sum_{j=1}^{i-1} \exp(-\frac{j}{G}D) \\
 & + (t_0 - t_{y1}) \exp(-\frac{i}{G}D) \quad (14)
 \end{aligned}$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$. 当 $i=n$ 时, 即为进风井井底风温:

$$\begin{aligned}
 t_n &= (t_{y1} - C) + (n-1) \frac{Z}{\Delta} \\
 & - (\frac{Z}{\Delta} - C) \sum_{j=1}^{n-1} \exp(-\frac{j}{G}D) \\
 & + (t_0 - t_{y1}) \exp(-\frac{n}{G}D) \quad (15)
 \end{aligned}$$

地壳表层的温度受地面温度周期性变化的影响是随深度的增加而减弱的, 至一定的深度, 这种影响将近似消失, 地温基本保持恒定, 地温常年保持恒定的层被称为恒温带. 恒温带以上, 地温的变化受太阳辐射影响而具有周期性变化, 称为变温带. 恒温带以下, 地温的变化受制于地球内热, 随深度的增加而不断地增加, 称为增温带. 所以对于恒温带以上的井筒部分, 地面日均气温在一年内作周期性变化是影响这一段风温变化的最主要因素, 当井口入风气温作周期性变化时, 岩土体的传热条件也不断地调整变化, 由于岩土体中热量传导的时间效应, t_i 的计算不能根据即时的 t_0 值用式(14)直接计算.

有学者研究了风流起点温度作周期性变化时, 距起点一定距离外风温相应变化的基本关系, 给出了一般关系式, 将该关系式应用于对进风井风温分布的计算, 在对式(14)作如下两项修正后, 即可进行入风井筒风温分布计算, 将式(14)第 4 项拆分为两项, 并对其中反映地面气温波动的一项进行修正, 修正后的式(14)为:

$$t_i = (t_{y1} - C) + (i-1) \frac{Z}{\Delta}$$

$$\begin{aligned}
 & - (\frac{Z}{\Delta} - C) \sum_{j=1}^{i-1} \exp(-\frac{j}{G}D) + (t_{m0} - t_{y1}) \\
 & \times \exp(-\frac{i}{G}D)(t_0 - t_{y1}) \exp(-\frac{S_a i}{G}D) \quad (16)
 \end{aligned}$$

式中: t_{m0} 为年平均气温($^\circ\text{C}$); S_a 为幅衰减修正系数. 修正系数 S_a 可根据地面气温变化的角速度、入风井筒断面参数和毕欧准数以及围岩热物理参数求出.

围岩与风流之间不稳定传热系数 K_τ 是指围岩深部未冷却岩体与空气间温差为 1°C 时, 每小时从 1 m^2 壁面向(从)空气放出(吸收)的热量, 是围岩与风流热湿交换的重要热力参数之一, 也是计算风流温度的必备参数之一. 根据江仓矿区一井田副断面设计图以及入风井口空气的物性参数、围岩的物性参数(见表 2), 采用岑衍强等^[20] 利用五元回归的方法求解不稳定传热系数的实用计算式来求解 K_τ .

根据江仓矿区 30 m 钻孔长期测温资料数据分析, 恒温带深度为 15 m, 温度为 -0.8°C , 即为井筒围岩原始岩温 t_{y1} . 根据江仓气象站气温监测资料, 江仓矿区年平均气温 t_{m0} 为 -4.58°C . 通过对江仓 65 m 深孔冻土地温资料进行回归分析可以得到在恒温带以下的地层, 矿井平均地温梯度为 $0.0196^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$.

4.2 矿井入风井筒风温的计算

根据上述讨论的风温计算方法, 以入风井口的位置为 r 轴, 向右为正方向; 以井口到井底的垂直距离为 x 轴, 向下为负方向, 建立平面直角坐标系, 利用 MATLAB 软件编写风温计算程序, 求得了公式(16)的解析解, 求解所需的入风井口空气的物性参数见图 2, 围岩的物性参数如表 2 所示.

根据江仓矿区实际气象资料, 矿区最大风速为 $V_{\max} = 3.46\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 故选取在风流质量流量 $G = 10\text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $G = 30\text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 的作用下矿井入风井筒风温的变化规律. 根据风温计算 MATLAB 程序, 可通过调整质量风量、通风时间、入风井温度(即不同月份代表不同风流初始温度)计算不同条件下矿井入风井筒风流温度, 从而分析其变化规律.

4.2.1 相同入风井温度 t_0 不同质量风量 G 的工况下矿井内风流温度分布

将式(11)对 G 求偏导可知对于一定的井深都存在一个 t_0 的临界值 t_{01} :

$$t_{01} = t_{y1} + \frac{i-1}{2}(\frac{Z}{a} - C)$$

则通过实测参数计算临界温度 $t_{01} = 2.42^\circ\text{C}$. 小于

表 2 计算 K_r 值相关参数Table 2 Relevant parameters for calculating value K_r

断面面积 S /m ²	断面周长 U /m	空气密度 ρ /(kg · m ⁻³)	围岩的导热系数 a /(m ² · s ⁻¹)	围岩的导热系数 λ /(W · m ⁻¹ · °C ⁻¹)	显热比 ϵ	围岩原始 岩温/°C
10.26	12.15	0.91	7.31×10^{-7}	1.93	0.3	-0.8

临界温度 t_{01} 的入风井筒风流温度的有 3 月、12 月, 如图 4, 图 5 所示; 大于临界温度 t_{01} 的入风井筒风流温度的有 5 月、9 月, 如图 6, 图 7 所示. 以临界温度 t_{01} 为分界线, 对于 3 月、12 月, 风流在流动过程中不断与围岩发生热湿交换, 使得风流温度不断上升, 随着井深的增加, 围岩与风流之间的温差逐渐减小, 使得风流温度上升的幅度逐渐减小; 对于 5 月、9 月, 在某一井深处, 风温 t_i 随井深增加逐渐

降低, 之后便随着井深增加逐渐升高; 如图 4, 图 5, 图 6, 图 7 所示, 质量风量 G 越大, 空气流速越大, 空气与井壁接触时间减少, 空气温度变化趋势不明显, 风温逐渐趋近于矿井围岩的原始岩温.

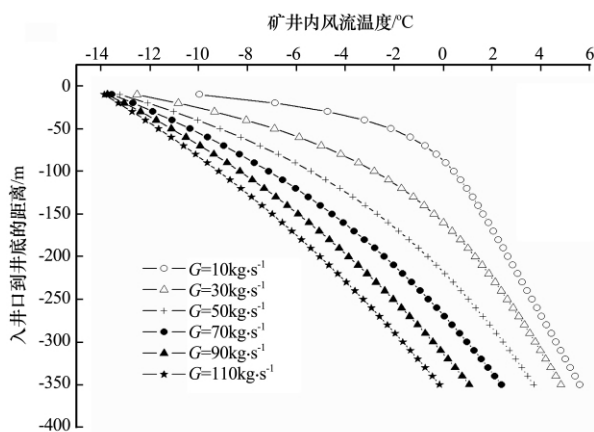


图 4 12 月(地面月均温度 -10.39 °C)不同 G 时风流温度分布

Fig. 4 The airflow temperature profiles for different G in December (The monthly average surface air temperature: -10.39 °C)

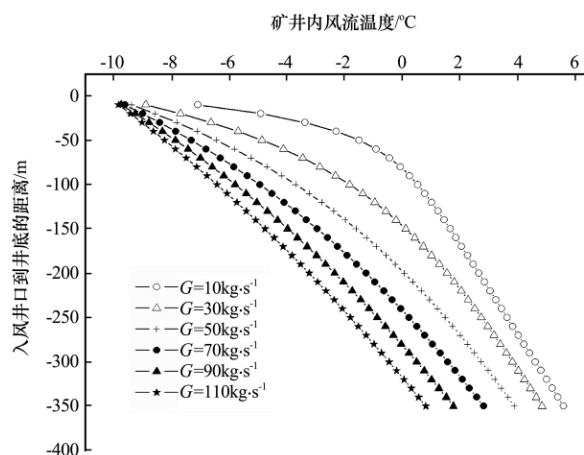


图 5 3 月(地面月均温度 -6.2 °C)不同 G 时风流温度分布

Fig. 5 The airflow temperature profiles for different G in March (The monthly average surface air temperature: -6.2 °C)

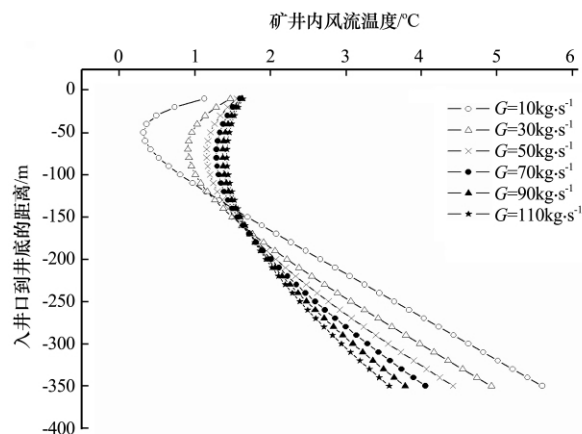


图 6 5 月(地面月均温度 5.77 °C)不同 G 时风流温度分布

Fig. 6 The airflow temperature profiles for different G in May (The monthly average surface air temperature: 5.77 °C)

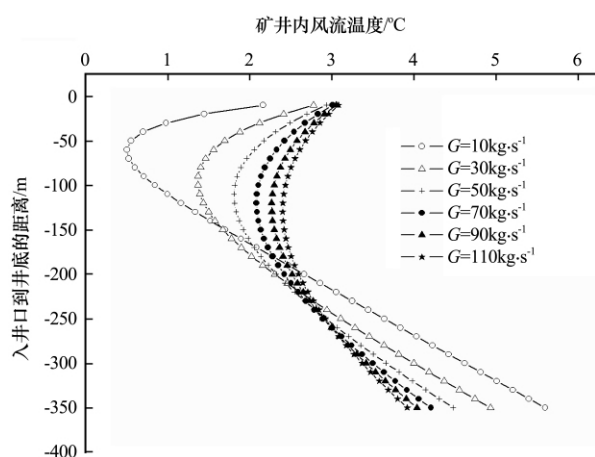


图 7 9 月(地面月均温度 7.28 °C)不同 G 时风流温度分布

Fig. 7 The airflow temperature profiles for different G in September (The monthly average surface air temperature: 7.28 °C)

4.2.2 相同质量风量 G 不同入风井温度 t_0 的工况下矿井内风流温度分布

如图 8 和图 9 所示, 在质量风量 G 保持不变的

情况下, 以临界温度 t_{01} 为分界线, 可将江仓矿区一年 12 个月的井口入风平均温度分为多年冻土区冷季(1、2、3、4、10、11、12 月)和暖季(5、6、7、8、9 月)。对于冷季时期, 风流在流动过程中不断与围岩发生热湿交换, 使得风流温度不断上升, 随着井深的增加, 围岩与风流之间的温差逐渐减小, 使得风流温度上升的幅度逐渐减小; 对于暖季时期, 在某一井深处, 风温 t_i 随井深增加逐渐降低, 之后便随着井深增加逐渐升高。

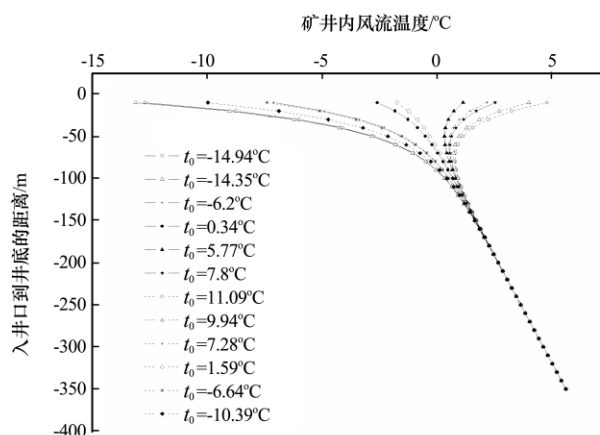


图 8 质量流量 $G=10 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 不同 t_0 时风流温度分布

Fig. 8 The airflow temperature profiles for different t_0 ($G=10 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

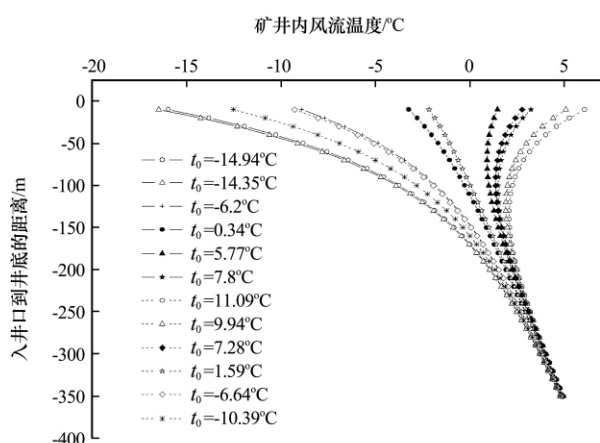


图 9 质量流量 $G=30 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 不同 t_0 时风流温度分布

Fig. 9 The airflow temperature profiles for different t_0 ($G=30 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

4.3 矿井入风井筒风温的拟合函数

由上述图可以看出, 矿井入风井筒风流的温度随着时间 y 及井深 x 呈一定规律性地变化, 为此, 可以将其拟合成一个函数关系式。具体分两步: 先拟合同一深度下风流温度随时间的变化规律, 沿着井深一共需拟合 35 组函数, 以 $x=10 \text{ m}$, 风流温度 t 与时间 y 的变化规律为例(图 11), 通过对风流温度的数

据整理, 可以看出风流温度能够拟合成比较标准的三角函数正弦曲线, $t=a+b\sin(2\pi y/365+c)$; 然后分别拟合正弦函数的系数 a 、 b 、 c 与井深的变化关系, 通过拟合 35 组数据发现, 系数 c 一直不变, 系数 a 、 b 值随着深度 x 呈有规律地变化。其中, a 与深度 x 的变化规律见图 11, b 与深度 x 的变化规律见图 12。

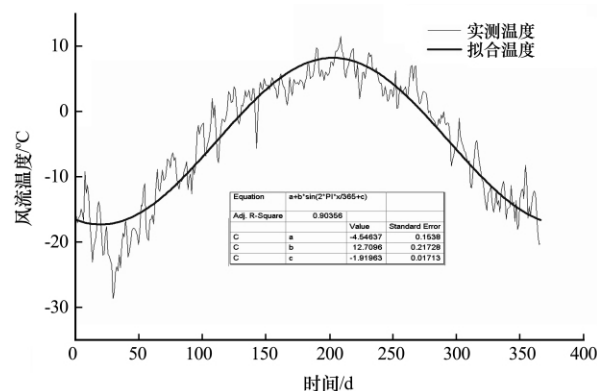


图 10 风流温度随着时间的变化规律($x=10 \text{ m}$ 处)

Fig. 10 Daily variations of measured and fitted airflow temperatures ($x=10 \text{ m}$)

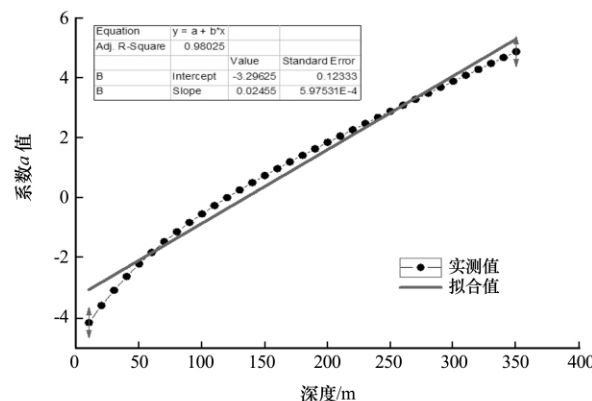


图 11 系数 a 随深度 x 的变化规律

Fig. 11 Variation of measured and fitted coefficient a with of depth

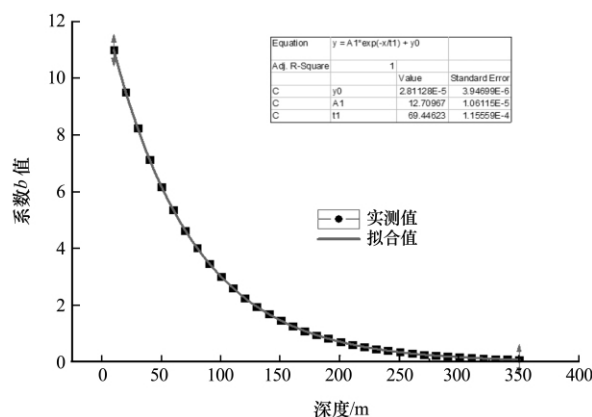


图 12 系数 b 随深度 x 的变化规律

Fig. 12 Variations of measured and fitted coefficient b with depth

综上所述,在 $G=30 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,风流温度 t 与时间 y 及深度 x 的拟合关系式为:

$$a = 0.02455x - 3.29625 \quad (17)$$

$$b = 12.7\exp(-x/69.45) + 2.81 \times 10^{-5} \quad (18)$$

将式(17)及(18)带入正弦函数中,得到风流温度 t 与时间 y (以天为单位)及深度 x 的拟合关系式:

$$t = 0.025x - 3.3 + [12.7\exp(-x/69.45) + 2.81 \times 10^{-5}] \times \sin(2\pi y/365 - 3\pi/5) \quad (19)$$

式中: x 为深度(m); y 为时间(d); t 为风流温度($^{\circ}\text{C}$).

可以采用上述同样的方法,求 $G=10 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,风流温度 t 与时间 y 及深度 x 的拟合关系式:

$$a = 0.02227x - 1.9229 \quad (20)$$

$$b = 12.7\exp(-x/26.57) + 1.85 \times 10^{-5} \quad (21)$$

将式(20)及(21)带入正弦函数中,得到风流温度 t 与时间 y 及深度 x 的拟合关系式:

$$t = 0.022x - 1.92 + [12.7\exp(-x/26.57) + 1.85 \times 10^{-5}] \times \sin(2\pi y/365 - 3\pi/5) \quad (22)$$

5 结论

(1) 在恒温带以上,多年冻土区入风井筒风温的变化主要受井口入风温度及风速的影响,与江仓矿区的气象资料密切相关;而地温梯度并非是随深度变化的,考虑井口入风气温作周期性变化的影响因素,可采用修正的风温解析式来研究多年冻土区入风井筒风流温度的变化规律。

(2) 引入临界温度 t_{01} 这一个概念,矿井入风井筒风流温度随着多年冻土区暖季(即 5—9 月)、冷季(即 10 月至翌年 4 月)呈现不同的变化规律。

(3) 建立了入风井筒风温随时间及井深变化的拟合方程,确定了矿井通风与多年冻土井筒围岩对流换热的边界条件中风流温度的拟合函数,为下一步采用数值模拟的方法分析多年冻土井筒围岩温度的变化规律奠定了基础,从而研究矿井通风对多年冻土井筒围岩的热影响。

参考文献(References):

- [1] He Weiwei, Sheng Yu, Zhou Fei, *et al.* Mining in permafrost regions: Status and prospect [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(2): 388—396. [何维维, 盛煜, 周飞, 等. 多年冻土区矿山开采研究现状及展望[J]. 冰川冻土, 2011, 33(2): 388—396.]
- [2] Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, *et al.* Geocryolo-

- gy in China [M]. Beijing: Science Press, 2000: 408—409. [周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 408—409.]
- [3] Makarov V N. Environmental problems related to diamond mining in permafrost areas—the case history of the Anabar placer mine, northwestern Yakutia[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(Suppl.): 257—262.
- [4] Zheng Huailong, Ma Futing. The impact of opencut coal mining on permafrost [J]. Opencast Coal Mining Technology, 2000, 16(4): 14—16. [郑怀龙, 马富廷. 露天煤矿开采对多年冻土的影响[J]. 露天采煤技术, 2000, 16(4): 14—16.]
- [5] Yang Sizhong, Jin Huijun, Yu Shaopeng, *et al.* An investigation into the permafrost environment along the Chinese-Russian oil pipeline route from Mohe to Daqing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(2): 358—366. [杨思忠, 金会军, 于少鹏, 等. 中俄输油管道(漠河-大庆段)主要冻土环境问题探析[J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 358—366.]
- [6] Li Shude, Guo Dongxin. Thermal state and stability of tunnel in Tumengela coalmine, Xizang [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1980, 2(3): 46—50. [李树德, 郭东信. 西藏土门格拉煤矿井巷热状态及其稳定性[J]. 冰川冻土, 1980, 2(3): 46—50.]
- [7] Elchaninov E A, Shor A I, Rozenbaum M A. The stability of underground workings in permafrost[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Permafrost (Part II). Ottawa: National Research Council of Canada, 1980: 321—337.
- [8] Zhang Changqing (trans.). Engineering Geocryology [M]. Lanzhou: State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2002: 196—199. [张长庆译. 工程冻土学[M]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 2002: 196—199.]
- [9] Izakson V Yu, Petrov E E. Dynamics of thawing permafrost rocks for mining excavations [J]. Journal of Mining Science (Soviet Mining), 1987, 23(2): 105—110.
- [10] Kovalev I I. Influence of surrounding permafrost temperature on the stressed state around mine workings[J]. Journal of Mining Science (Soviet Mining), 1987, 23(3): 199—202.
- [11] Izakson V Yu, Petrov E E. Engineering method for predicting and controlling the size of than aureoles around mine workings in a permafrost region[J]. Journal of Mining Science (Soviet Mining), 1985, 21(5): 400—405.
- [12] Jiang Zhongan, Li Huaiyu. Varying law of air temperature and humidity in the inclined shaft[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1997, 19(4): 329—333. [蒋仲安, 李怀宇. 斜井内空气温度和湿度的变化规律[J]. 北京科技大学学报, 1997, 19(4): 329—333.]
- [13] Hou Qizong, Shen Boxiong. The prediction model of temperature and moisture transfer between tunnel periphery rock and air[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 1997, 19(3): 123—127. [侯祺棕, 沈伯雄. 井巷围岩与风流间热湿交换的温湿预测模型[J]. 武汉工业大学学报, 1997, 19(3): 123—127.]
- [14] Wang Xiaofeng, Chen Caiyun. Temperature forecast to mine airflow and analysis on mechanism of heat exchange[J]. Coal Technology, 2008, 27(10): 59—61. [王晓峰, 陈彩云. 矿井风流温度预测及热交换机理分析[J]. 煤炭技术, 2008, 27

- (10): 59—61.]
- [15] Zhou Xihua, Shan Yafei, Wang Jiren. The unsteady thermal exchange between wall rock and airflow of roadway[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2002, 21(3): 264—266. [周西华, 单亚飞, 王继仁. 井巷围岩与风流的不稳定换热[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2002, 21(3): 264—266.]
- [16] Huang Zhijun, Lai Yuanming, Li Shuangyang, *et al.* Dynamic response of embankment in permafrost regions under traffic load[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(2): 418—426. [黄志军, 赖远明, 李双洋, 等. 交通荷载作用下冻土路基动力响应分析[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 418—426.]
- [17] Wang Hongliang, Xin Song. Ventilation system based on artificial increasing pressure technology in high-altitude mines [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science and Technology, 2009, 19(6): 447—450. [王洪梁, 辛嵩. 人工增压技术的高海拔矿井通风系统[J]. 黑龙江科技学院学报, 2009, 19(6): 447—450.]
- [18] Wei Pingru, Li Zhimin. Study on air temperature change in intake shaft of Liangbei coal mine[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2007, 34(6): 10—12, 95. [魏平儒, 李治民. 梁北矿进风井筒风温变化规律研究[J]. 矿业安全与环保, 2007, 34(6): 10—12, 95.]
- [19] Liu Jingxiu. A discussion of the law of temperature change in an intake shaft[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 24(1): 75—77. [刘景秀. 矿山进风井筒风温变化规律探析[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(1): 75—77.]
- [20] Cen Yanqiang, Hu Chunsheng, Hou Qizong. Investigation into unsteady heat transfer coefficient K between the surrounding rock of mine wells or lanes and airflow[J]. Journal of Fuxin Mining Institute, 1987, 6(3): 105—114. [岑衍强, 胡春胜, 侯祺棕. 井巷围岩与风流间不稳定换热系数的探讨[J]. 阜新矿业学院学报, 1987, 6(3): 105—114.]

Numerical Analyses of Thermal Effect of Ventilation on the Surrounding Rock of Shaft in Permafrost regions (I): Airflow Temperature Varying in An Intake Shaft

HE Wei-wei^{1, 2}, SHENG Yu¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China;
2. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd, Shanghai 200032, China)

Abstract: There are abundant mineral resources in permafrost region of China and the mineral resources exploitation has become one of mainly economic developmental types. As a main resource of energy and raw materials, the mineral resources exploitation promotes economic growth of the western China. However, since the ecosystem of the Qinghai-Tibetan Plateau are very fragile and sensitive to changes in climate and ground surface conditions, a series of environmental geological problems caused by mining resources exploitation, such as the destruction of the ecosystem environment, the destroy of resources and geological hazard. With a large of energy quantity demanded and gradually decreasing of yield of open-pit mining, researches on underground mining are even more

badly needed in permafrost region. Based on the relevant research achievements in unfrozen earth area and the meteorological data of Jiangcang coalfield in permafrost area, using calculation program of airflow temperature in an intake shaft, varying law of airflow temperature in an intake shaft was studied by the use of critical temperature. The factors of influencing the airflow temperature were determined and the fitted equation of convection heat transfer boundary conditions between mining ventilation and the surrounding rock of the shaft in permafrost regions was found. The calculation methods and results are given as references for the next study on thermal influence of the surrounding rock of shaft in permafrost regions under the action of mining ventilation.

Key words: permafrost; mining ventilation; critical temperature; convection heat transfer; Jiangcang coalfield