



煤矸石山斜坡面矸石散体的空气渗流特性研究

王文才 王鹏 吴周康 李扬康 杨少晨

引用本文:

王文才, 王鹏, 吴周康, 等. 煤矸石山斜坡面矸石散体的空气渗流特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(5): 139–151.

WANG Wencai, WANG Peng, WU Zhoukang. Study on the air permeability characteristics of coal gangue dump slope gangue particles[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 139–151.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0831>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于无人机遥感的煤矸石山植被分类

Classification of coal gangue pile vegetation based on UAV remote sensing

煤炭科学技术. 2023, 51(5): 245–259 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0899>

无人机遥感支持下的煤矸石山自燃监测与预警

Monitoring and early warning the spontaneous combustion of coal waste dumps supported by unmanned aerial vehicle remote sensing

煤炭科学技术. 2023, 51(2): 412–421 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1901>

有效应力对孔周破裂煤体渗透率演化规律的影响

Effect of effective stress on the evolution of permeability patterns in perforated fractured coal bodies

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 122–131 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1349>

煤矸石山植物物种多样性与土壤化学因子的关系—以灵武矿区生态修复初期为例

Relationship between plant species diversity and soil chemical properties in coal gangue dump: early stage of ecological restoration in Lingwu Mining Area

煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5a808e39-f649-4d4f-8a7a-ae2eb2463316>

煤矸石香蕉型等厚筛粒群时空透筛分布规律及适配特性研究

Research on the distribution law of spatio-temporal permeability screening and adaptation characteristics of banana-type equal-thickness classification of coal gangues

煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 344–354 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0405>

排矸方式对矸石山稳定性的研究

Study on stability of gangue mountain in discharging method

煤炭科学技术. 2022, 50(3): 308–315 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7717e01c-904a-4e95-aad5-efb9f86a4b45>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

王文才,王 鹏,吴周康,等.煤矸石山斜坡面矸石散体的空气渗流特性研究[J].煤炭科学技术,2024,52(5):139–151.

WANG Wencai, WANG Peng, WU Zhoukang, *et al.* Study on the air permeability characteristics of coal gangue dump slope gangue particles[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 139–151.

煤矸石山斜坡面矸石散体的空气渗流特性研究

王文才^{1,2,3,4},王 鹏^{1,2,3,4},吴周康^{1,2},李扬康^{1,2},杨少晨^{1,2}

(1. 内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 内蒙古自治区矿业工程重点实验室, 内蒙古 包头 014010; 3. 内蒙古自治区煤炭安全开采与利用工程技术研究中心, 内蒙古 包头 014010; 4. 内蒙古煤炭绿色开采与绿色利用协同创新中心, 内蒙古 包头 014010)

摘 要:煤矸石山斜坡面矸石散体的颗粒偏析现象对其渗透特性有重要影响。为了研究斜坡面的空气渗流特性,基于自主设计的室内渗透率测定装置,结合散体岩土力学理论、通风理论及 FLUENT 数值模拟,研究了煤矸石山斜坡面不同高度不同深度处矸石散体孔隙率与渗透率的整体分布规律及空气渗流和温度分布特征,并通过现场实测进行验证。结果表明:在研究预设条件下,矸石山斜坡面浅部的孔隙率和渗透率分布特征受到颗粒偏析现象的显著影响,随着高度与深度增大,呈现出非线性负指数衰减规律;随着斜坡面矸石散体的粒径增大,其孔隙率也呈增大趋势,并且其增速逐渐放缓;矸石山顶部覆盖黄土层,导致渗流速度缓慢,氧气质量浓度较低,不利于氧化放热反应的进行,底部孔隙率较大风速过快,积热条件不佳,因此高温区域位于矸石山中上部距坡面 2~3 m 处,最高可达 780 K;风速场在热风压与外界风压的共同影响下,最高风速位于中上部近坡面处,可达 0.06 m/s。此外,沿矸石山 X 方向和 Z 方向深入,渗流速度与氧气浓度下降速率逐渐减小;整体而言,矸石山斜坡面孔隙率的分布是影响矸石山内部空气渗流特性的一个极为重要的因素。通过对矸石山风速氧气以及温度场的研究,将矸石山大致划分为表层冷却区、聚热易燃区以及内部低温区。研究成果可为我国干燥多风的中西部矿区煤矸石山自燃火区的准确预测和判定提供基础参考。

关键词:煤矸石山;渗流;渗透率;孔隙率;热风压

中图分类号:TD752.2

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2024)05-0139-13

Study on the air permeability characteristics of coal gangue dump slope gangue particles

WANG Wencai^{1,2,3,4}, WANG Peng^{1,2,3,4}, WU Zhoukang^{1,2}, LI Yangkang^{1,2}, YANG Shaochen^{1,2}

(1. School of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Mining Engineering, Baotou 014010, China; 3. Inner Mongolia Research Center for Coal Safety Mining and Utilization Engineering and Technology, Baotou 014010, China; 4. Inner Mongolia Cooperative Innovation Center for Coal Green Mining and Green Utilization, Baotou 014010, China)

Abstract: The phenomenon of particle segregation in the gangue aggregate on the slope surface of the coal gangue mountain significantly influences its permeability characteristics. To investigate the air infiltration characteristics of the slope surface, a self-designed indoor permeability measurement device was utilized. By integrating the theories of granular soil mechanics, ventilation, and FLUENT numerical simulation, the overall distribution patterns of porosity and permeability of the gangue aggregate at different heights and depths on the coal gangue slope surface were studied, as well as the characteristics of air infiltration and temperature distribution. These findings were validated through on-site measurements. The results demonstrate that the distribution characteristics of porosity and permeability in the shallow part of the gangue slope surface are significantly affected by the particle segregation phenomenon, exhibiting a nonlinear negative exponential decay pattern as the height and depth increase. As the particle size of the slope surface gangue aggregate increases, its porosity also

收稿日期:2023-06-20

责任编辑:黄小雨

DOI: 10.12438/cst.2023-0831

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52064043,51764044);内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2020MS05010)

作者简介:王文才(1964—),男,内蒙古伊金霍洛旗人,教授,博士生导师。E-mail: wencai99999@163.com

通讯作者:王 鹏(1993—),男,山西长治人,讲师,博士。E-mail: wangpeng5212@126.com

shows an increasing trend, but the rate of increase gradually slows down. The presence of a loess layer covering the top of the gangue slope hinders fluid flow and results in lower oxygen content, which is unfavorable for exothermic oxidation reactions. Moreover, at the bottom, where the porosity is larger, the wind speed is excessively high, creating unfavorable heat accumulation conditions. Therefore, the high-temperature region is located in the upper part of the gangue slope, 2~3 meters away from the slope surface, reaching temperatures as high as 780 K. Under the combined influence of thermal wind pressure and external wind pressure, the highest wind speed is found in the upper-middle part near the slope surface, reaching up to 0.06 m/s. Furthermore, as we delve deeper into the gangue slope in the X and Z directions, the flow velocity and the rate of decrease in oxygen concentration gradually decrease. Overall, the distribution of porosity on the gangue slope surface is a crucial factor affecting the air infiltration characteristics within the coal gangue mountain. Through the study of wind speed, oxygen concentration, and temperature fields in the gangue slope, this paper roughly categorizes the gangue slope into a surface cooling zone, a heat-gathering flammable zone, and an internal low-temperature zone. The findings from this research can serve as a fundamental reference for accurately predicting and identifying self-ignition fire zones in the arid and windy mining regions of central and western China.

Key words: coal gangue dump; seepage; permeability; porosity; hot air pressure

0 引言

煤矸石山在堆积过程中,由于矸石自然滑落产生的颗粒偏析现象,使得坡面不同高度孔隙率分布不同,进而在矸石山内部形成大量空气渗流通道。并在地表风流压力和矸石山内部火风压的共同作用下,其矸石山内部可燃物与氧气发生氧化放热反应,从而进一步演化为自燃火灾^[1]。

煤矸石山是一种由粒径、形状各异的矸石散体组成的非均质松散介质,其内部渗透性能分布不均,大致呈现出由上向下逐渐增大的规律^[2]。由于其中上部位孔隙率较低,极易产生热量积聚,当其维持的时间足以使温度达到可燃物质的引燃温度时,便会发生自燃火灾,对环境及社会造成严重危害^[3-4]。预防和治理煤矸石山的自燃,自燃火区的判定是首要的前提和保障条件,明确其内部的渗流特性则是判定自燃火区的重要依据。因此,建立矸石山斜坡面不同位置处的空气渗透特性计算方法至关重要。

相关研究表明,排矸方式、矸石形状及粒径分布是影响渗透特性的重要因素^[5-6],其主要通过影响渗流通道的孔隙率和渗透率等参数,进而影响风流场分布。贾宝山^[7]提出了矸石的平均有效直径为6~13 mm时,煤矸石产生自燃的可能性最大。不同粒径分布下的矸石堆积体,其孔隙特征也差异甚大^[8]。张天军等^[9]研究了不同粒径破碎砂岩在分级加载影响下的渗透特性,孔隙率的变化可以分为急剧减小与缓慢减小2个阶段,并且恒载变形只有在低应力作用下,对岩样的渗流速度影响程度才会最大。余明高等、尚宏波等、余为等^[10-12]通过改变应力条件,得到了破碎煤体渗透特性的演化规律。司俊鸿等^[13]采用数值模拟的方法建立了采空区多孔介质的孔隙率及渗透率三维分布数学模型,并得到了不同渗透

率与气体运移间的规律。苏付义^[14]通过对多组煤岩样品在不同围压下测得的孔隙率进行分析,证明了煤岩样品的孔隙率 ϕ 与其受到的有效压力 ΔP 呈指数函数关系,并解释了有效孔隙体积压缩系数的概念。李舒伶等^[15]从多孔介质流体动力学理论出发,分析了矸石山内部渗流场的分布,得到了自然发火的影响因素及内在联系。裴晓东等^[16]进一步对矸石山内部漏风风流的流动规律进行了研究,并提出了矸石山自然发火的防治途径。段玉龙等^[17]对矸石山的瞬态温度场进行了模拟和分析,得到了矸石山内部高温区的分布规律。

现有研究大都集中在地下岩块与煤炭领域^[18-20],虽然已有一些相关工作对矸石山的渗透性进行了初步研究,但其多局限于试验以及温度场分布规律等方面。因此,本研究以干燥多风的乌海地区某煤矸石山作为研究背景,通过理论分析、室内试验、数值模拟与现场测定相结合的研究方法,对煤矸石山松散介质的渗流特性进行了深入探讨,研究了其斜坡面不同高度不同深度处矸石散体孔隙率与渗透率的整体分布规律。并在热风压与外界风压共同影响下对矸石山内部空气渗流特性进行研究。该研究成果对预防和治理矸石山自燃危害方面具有一定的前景。

1 煤矸石山孔隙率分布

1.1 压缩试验

煤矸石山为松散介质分布,其孔隙率与压缩系数均随其所受压力的增大而减少。通过压缩试验,探究不同压力下孔隙率与压缩系数的耦合关系。由于试验条件限制,根据现场所测煤矸石粒径分布,依据SD 128—1984《土工试验规程》规定,对试验煤矸石粒径进行缩尺处理,缩尺方法采用相似级配法,缩尺后的粒径组成见表1。

表1 煤矸石试样的相似级配
Table 1 Similar grading of coal gangue samples

粒径/mm	相似级配/%
>50	24
30~50	18
10~30	15
5~10	11
<5	32

确定试件粒径组成后,先对试件进行称重处理(28.3 kg),根据矸石密度可得到矸石体积(0.011 32 m³)。然后对试件进行击实,所用击实筒直径为 300 mm,高 300 mm,试验分 3 层击实,每层 20 击。经过击实后测得试件最终高度为 249 mm,体积为 0.017 7 m³,经计算得出其初始孔隙比为 0.563。再由单轴压缩机对试件进行压缩处理,根据不同压力下的压缩体积,可得当前孔隙比。由式 (1)、式 (2) 计算可得出孔隙率与压缩系数,数据见表 2。

表2 煤矸石压缩试验结果
Table 2 Compression test results of coal gangue

压力/kPa	孔隙比/%	孔隙率/%	压缩系数/MPa ⁻¹
0	56.3	36.0	—
200	54.9	35.4	0.070
400	53.6	34.9	0.064
600	52.4	34.4	0.057
800	51.4	33.9	0.052
1 000	50.4	33.5	0.047
1 200	49.6	33.2	0.043
1 400	48.8	32.8	0.042
1 600	48.0	32.5	0.036
1 800	47.3	32.1	0.035
2 000	46.7	31.8	0.033

$$\varphi = \frac{e}{1+e} \quad (1)$$

$$C_{F_j} = 1\,000 \times \frac{e_1 - e_2}{p_1 - p_2} \quad (2)$$

式中: φ 为煤矸石孔隙率; C_{F_j} 为压缩系数, MPa⁻¹; F_j 为坡向挤压力; e_1 、 e_2 为对应于 p_1 、 p_2 时的孔隙比。

对表 2 试验数据进行 Allometricl 函数拟合,得出孔隙率与压缩系数的耦合曲线方程,如式 (3) 所示:

$$C_{F_j} = 122.14\varphi^{7.19} \quad (3)$$

1.2 孔隙率变化规律

煤矸石山堆积形成后,斜坡面某位置处矸石散体受到多种力的共同作用处于平衡状态,本文将矸

石堆积体视为均质体,将斜坡面矸石散体受力问题简化为平面问题,如图 1 所示。

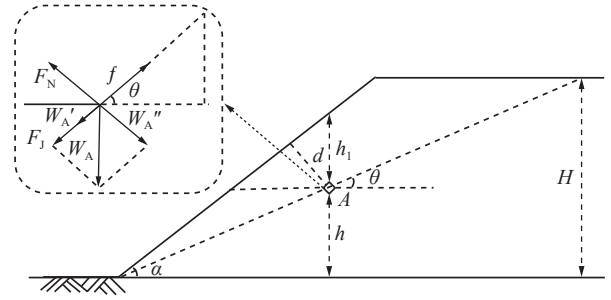


图1 矸石山受力分析

Fig.1 Force analysis of gangue bulk on slope surface

图 1 通过静力平衡法解释坡向挤压力的形成过程,在距离斜坡面长度为 d 处选取一点 A ,由力学分析可知,当矸石山斜坡面处于平衡状态时,这时该矸石所受到的合力为 0,单个矸石受力可表示为

$$W'_A + F_j = \mu F_N \rightarrow F_j + W_A \sin \theta = \mu W_A \cos \theta \quad (4)$$

式中: F_j 为坡向挤压力; W_A 为 A 处所受的压力; θ 为内影响角, A 点所受坡向挤压力与水平的夹角; μ 为摩擦因数,取值为 0.382。

根据垂直应力公式和受力分析可以得出:

$$W_A = \gamma d / \cos \alpha \quad (5)$$

式中, γ 为上覆岩层重度, kN/m³; d 为所在点到煤矸石山坡面的垂直距离。

将式 (5) 代入式 (4), 可得:

$$F_j = \mu \gamma d \cos \theta / \cos \alpha - \gamma d / \cos \alpha \sin \theta \quad (6)$$

式中, α 为煤矸石山坡脚角度。

内影响角如式 (7) 所示:

$$\frac{h}{\tan \theta} = \frac{h + d / \cos \alpha}{\tan \alpha} \rightarrow \theta = \arctan \frac{h \sin \alpha}{h \cos \alpha + d} \quad (7)$$

其中, h 为所在点高度。初始发火自燃深度一般距离斜坡面不超过 3 m, 如果燃烧塌陷形成大量裂隙, 可使极限自燃深度达到 10 m。因此本研究中 d 取值范围 (≤ 10 m), 根据矸石山自燃安息角, α 的取值范围 ($\leq 40^\circ$), 将内影响角视为高度与位置的影响函数, 即有:

$$y(\theta) = \arctan \frac{h \sin \alpha}{h \cos \alpha + d} \quad (0 \leq \alpha \leq 40^\circ, 0 \leq d \leq 10) \quad (8)$$

将式 (8) 代入式 (6), 可得:

$$F_j = \mu \gamma d \cos [y(\theta)] / \cos \alpha - \gamma d / \cos \alpha \sin [y(\theta)] \quad (9)$$

$$F_j = \frac{\mu \gamma d \cos \left(\arctan \frac{h \sin \alpha}{h \cos \alpha + d} \right)}{\cos \alpha} - \frac{\gamma d}{\cos \alpha \sin \left(\arctan \frac{h \sin \alpha}{h \cos \alpha + d} \right)} \quad (10)$$

上式可以看出当矽石散体位于煤矽石山斜坡面不同位置时,其所受坡向挤压力不同,致使斜坡面孔隙体积有所变化,进而其孔隙率也有所差异。孔隙体积的变化用煤矽石有效孔隙体积压缩系数^[14]表示:

$$C_{F_j} = -\frac{1}{V_{F_j}} \frac{dV_{F_j}}{dF_j} \quad (11)$$

式中: C_{F_j} 为煤矽石有效孔隙体积。

孔隙体积、煤矽石体积和孔隙度的关系:

$$V_{F_j} = \varphi V \quad (12)$$

由于煤矽石堆积过程中体积随压力的变化很小,可视为常数,对式(12)进行微分并代入式(11)可得:

$$\frac{1}{\varphi} d\varphi = -C_{F_j} dF_j \quad (13)$$

当有效压力从 F_{j_0} 变化到 F_j 时,矽石孔隙率从 φ_0 变化到 φ ,对式(13)进行积分并将式(3)代入,最后得到:

$$\int_{\varphi_0}^{\varphi} \varphi^{-1} d\varphi = \int_{F_{j_0}}^{F_j} -122.14\varphi^{7.19} dF_j \rightarrow \varphi = \varphi_0 e^{-122.14\varphi^{7.19} \Delta F_j} \quad (14)$$

将式(10)代入式(14)可得到斜坡面不同高度处的孔隙率公式,为简化计算,式中 φ 取平均值 φ_a ,公式如下:

$$\varphi = \varphi_0 e^{122.14\varphi_a^{7.19} \left\{ \mu\gamma d / \cos \alpha - \mu\gamma d \left[\cos \left(\arctan \frac{h \sin \alpha}{d + h \cos \alpha} \right) / \cos \alpha + \gamma d \sin \left(\arctan \frac{h \sin \alpha}{d + h \cos \alpha} \right) / \cos \alpha \right] \right\}} \quad (15)$$

由式(15)可以看出,煤矽石山斜坡面处的孔隙率变化呈现出非线性负指数衰减规律,随着距离地面的高度与距离斜坡面深度逐渐增加,矽石散体的孔隙率逐渐减小。选取矽石山底部为参照点,根据取样现场的实际情况并结合煤矽石的物化性质, α 取值 40° , γ 取值 20 kN/m^3 , φ_0 取值 40% , φ_a 取值 0.25 。通过式(15)可计算斜坡面不同位置处煤矽石散体的孔隙率,见表3。

表 3 斜坡面不同位置的孔隙率

Table 3 Porosity at different heights of sloped surfaces						
高度/m	不同深度下煤矽石散体孔隙率/%					
	1 m	3 m	5 m	7 m	10 m	16 m
1	37.3	36.2	35.9	35.7	35.6	35.5
3	35.9	32.3	39.0	31	29.4	28.8
5	35.5	35.0	28.1	26.6	25.3	24.0
7	35.3	29.5	26.3	24.4	22.5	26.0
10	35.1	28.6	24.7	22.2	19.7	17.0
16	34.9	27.8	23.0	19.8	16.5	12.9

对表3中数据进行拟合,得出孔隙率随位置分布的变化曲线(图2)与函数公式(式(16))分别如下所示:

$$\varphi = \frac{0.298 + 6.029h + 4.683d + 0.027d^2 - 0.323hd}{1 + 15.018h + 11.466d - 0.007h^2 + 0.071d^2 + 1.212hd} \quad R^2 = 0.999 \quad (16)$$

式中: h 为煤矽石山内部某点处距离地面的高度, m; d 为煤矽石山内部某点处距斜坡面距离, m。

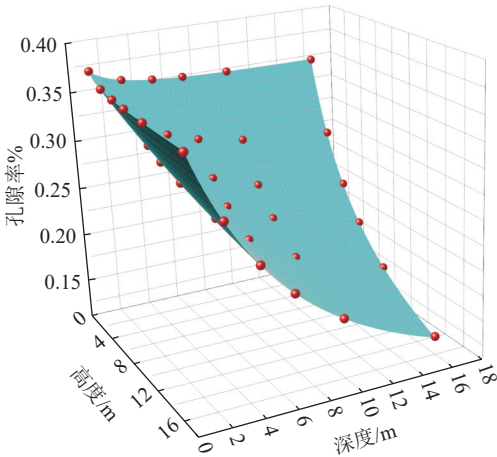


图 2 孔隙率拟合曲线
Fig.2 Porosity fitting curve

2 气体渗透规律试验

2.1 试验装置和步骤

矽石散体的气体渗透率是研究煤矽石山斜坡面不同位置处渗流规律的重要参数,由于矽石散体滑落堆积过程中存在颗粒偏析现象,使得煤矽石山坡面不同高度出现不同孔隙率,进而产生程度不同的渗透现象。本试验通过研究气体在不同粒径矽石散体中的渗流情况,获得不同粒径下其气体渗透率,并分析建立煤矽石山斜坡面不同位置处矽石体渗透率与孔隙率的关系。基于此,试验采用自行设计的渗透率测量试验装置,试验系统如图3所示。

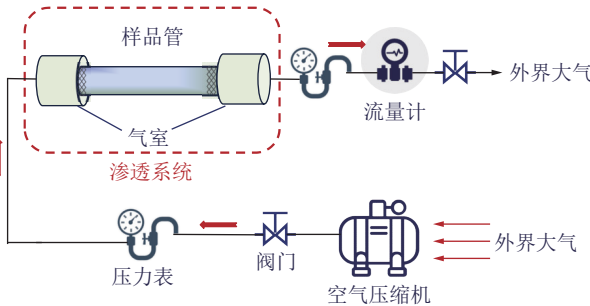


图 3 渗透率测定装置
Fig.3 Permeability measuring device

该装置由部分气体仪表、渗透系统和空气压缩机组成,渗透系统由样品管(长 1 m,内径 0.1 m)、气室(长 0.2 m,内径 0.2 m)和滤网组成。各组装部件间均进行密封处理,通过在样品管两端分别设置气室实现均匀加压,以使通过矸石散体中的气流更趋于均匀化。同时在渗透系统两端使用气压计和流量计测量样品管两端气体压力值和流量值。

试验过程中,首先将粒径较大的矸石散体进行破碎处理,然后根据粒径大小,使用方孔石子筛将矸石散体筛分成 10 组试样,粒径分别为 0~2.5、2.5~5、5~7.5、7.5~10、10~12.5、12.5~15、15~17.5、17.5~20、20~22.5、22.5~25 mm。随后,依次检测装置气密性,装样,开阀门和空气压缩机。最后,待气流稳定时,记录气压表和流量计上的读数。每组样品重复做 3 次试验,取 3 组试验的平均值为标准值。

采用排水称重法测量孔隙率时,忽略水分进入煤矸石内部毛细孔隙中对实验精确度的影响。将筛分好的矸石样品放入容器后称重,记录质量 m_1 ;然后往容器内注水至满刻度后再称重,记录质量 m_2 ;最后对同等规格的容器注水至满刻度,记录质量 m_3 。

2.2 试验结果和分析

根据孔隙率定义,默认水的密度为 10^3 kg/m^3 的情况下,煤矸石散体孔隙率为

$$\varphi = \frac{m_3 - (m_2 - m_1)}{m_3} \tag{17}$$

气体在矸石散体中流动时,由于孔隙通道较小,渗流过程中黏滞阻力很大,气体流速较慢,认为属于层流,符合松散介质渗流理论中的达西定律,采用修正的达西方程计算^[21-22],如下所示:

$$K = \frac{2QP_a\mu L}{A(P_1^2 - P_2^2)} \tag{18}$$

式中: K 为渗透率, 10^{-15} m^2 ; Q 为气体体积流量, m^3/s ; A 为气流通道横截面积, m^2 ; μ 为气体黏度, $1.83 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$; L 为渗流长度, m ; P_a 为大气压力, 0.1 MPa ; P_1 、 P_2 分别为进口压力和出口压力, MPa 。

孔隙率和渗透率的大小可由试验数据代入式(17)、式(18)可得,其结果见表 4。

表 4 孔隙率和渗透率的计算结果
Table 4 Calculation results of porosity and permeability

粒径/ mm	进口压力/ MPa	出口压力/ MPa	流量/ ($10^{-5} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	孔隙率/ %	渗透率/ (10^{-15} m^2)
0~2.5	0.60	0.10	27.78	7.62	0.10
2.5~5	0.52	0.10	27.78	10.34	0.14
5~7.5	0.45	0.10	27.78	14.31	0.19
7.5~10	0.43	0.10	27.78	16.45	0.21
10~12.5	0.38	0.10	27.78	19.43	0.26
12.5~15	0.37	0.10	27.78	21.58	0.28
15~17.5	0.35	0.10	27.78	22.99	0.32
17.5~20	0.32	0.10	27.78	24.83	0.39
20~22.5	0.30	0.10	27.78	26.03	0.45
22.5~25	0.29	0.10	27.78	26.67	0.49

由表 4 可以看出,随着矸石样品粒径的变化,其孔隙率和渗透率也随之变化。矸石散体的粒径越大,其孔隙率和渗透率也随之增大。对粒径、渗透系数和孔隙率的关系进行拟合,得到孔隙率和渗透率随粒径变化的曲线如图 4a 所示,渗透率随孔隙率变化的曲线如图 4b 所示,并得到变化曲线相应的关系式。

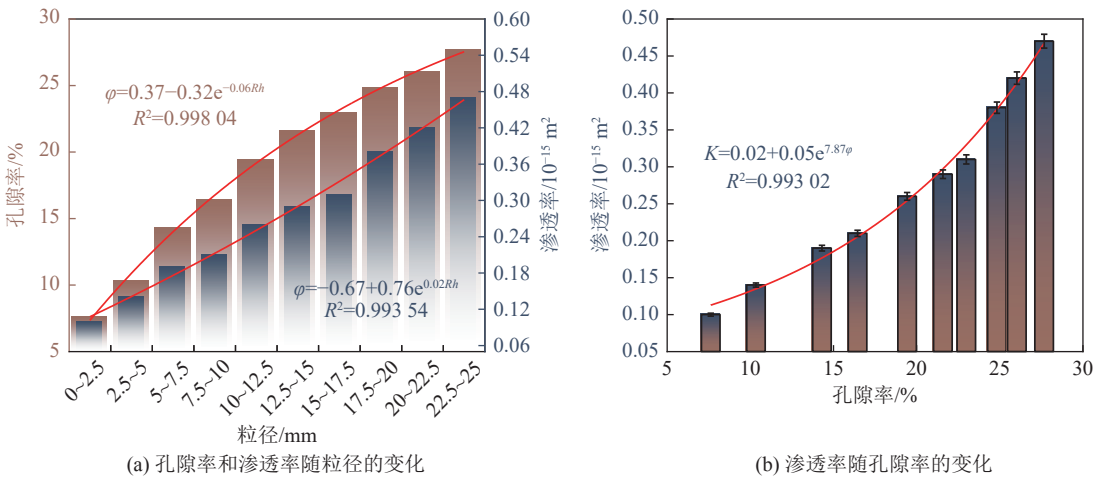


图 4 粒径、渗透率和孔隙率的拟合关系

Fig.4 Fitting relationship between particle size, permeability and porosity

2.3 渗透率的计算

由图4可知孔隙率与渗透率之间存在着一定的相互关系,联立式(16),可通过孔隙率方程求得不同

$$K = 0.02 \times 10^{-15} + 0.05 \times 10^{-15} \times e^{\frac{2.573+0.944h+0.071d+0.110d^2-0.268hd}{1+0.205h-0.157d-0.003h^2+0.035d^2+0.213hd}} \quad (19)$$

3 斜坡面渗流特征分析

3.1 风压渗流动力

矽石山内部的风流渗透需要动力源,此动力源主要来自矽石山外部风速产生的动压和矽石山内部与大气之间或矽石山内部不同位置之间由温差产生的热风压。干燥多风矿区动态排矽过程中,煤矽石山斜坡面的渗流风压分为初期风压和后期风压,其受外界风速影响,渗流过程有所差异。

若外界风速不为0,在煤矽石山斜坡面相距不远的两个区域在渗流方向产生风速动压差(即渗流初期风压),这两个区域间形成斜坡面浅部初期空气渗流;随着空气渗流的连续进行,斜坡面内部矽石的氧化放热反应加速,其释放的热量使矽石散体的温度逐步升高,当其两者之间形成较大温差时,煤矽石山斜坡面浅部形成火风压。此时,火风压与渗流初期风压共同构成了煤矽石山斜坡面浅部的渗流后期风压,在此渗流动力作用下,使得渗流区域的空气渗流量进一步增大。

若外界风速为0,渗流初期风压为0,煤矽石山斜坡面的任何位置不能产生空气渗流。此时,斜坡面内部的煤矽石会与存在孔隙中的氧气和扩散进入的氧气产生缓慢的氧化放热反应,经历长时间的缓慢升温后,其也会产生较大温度差,形成煤矽石山斜坡面浅部的火风压。

3.2 渗流速度方程

动态排矽形成的矽石山,可以视为是连续的松

$$v = \frac{\rho g Z (T_L - T_0) / (273.15 + T_0) + \rho [(v_0 \sin \theta_0)^2 - (v_m \sin \theta_m)^2]}{2 \int \left(0.15 \times 10^{-15} + 0.01 \times 10^{-15} e^{\frac{5.183+1.902h+0.143d+0.222d^2-0.539hd}{1+0.205h-0.157d-0.003h^2+0.035d^2+0.213hd}} \right) ds} \quad (22)$$

4 斜坡面渗流特征分析

煤矽石山的风压渗流是一个复杂的三维非稳态问题。为了方便进行仿真模拟,需要对模型进行简化处理,并做出一些基本假设:①煤矽石山内的渗流气体遵循理想气体状态方程;②外部风流风向与矽石山底面平行并均匀流动;③在渗流过程中煤矽石的各种物理参数如密度、形状和孔隙特征等保持不变;④不考虑水分和特殊环境对煤矽石山气体渗流的影响;⑤煤矽石山内部的松散煤矽石属于松散介质且具有各向同性;⑥矽石山其结构稳定,未发生渗流变形。

高度煤矽石山斜坡面不同位置处矽石体空气渗透率的计算方程,如式(19):

散介质,其坡面角就是矽石散体的自然安息角;空气在坡面里的运动属于渗流,其符合渗流理论的达西定律。

对于煤矽石山斜坡面内部渗流速度为 v 的渗流线 L (进风点 0 ,出风点 m)上的任意2点 i (进风点)和 j (出风点),根据达西定律可得:

$$\begin{aligned} dH &= v/K_{i-j} ds \rightarrow H = v \int_L (1/K_{i-j}) ds \\ \rightarrow v &= H / \left[\int_L (1/K_{i-j}) ds \right] \end{aligned} \quad (20)$$

式中: dH 为 L 上 i 点的动力微元; H 为 L 上的渗流动力; ds 为 L 上 i 点的距离微元; K_{i-j} 为 L 上 $i-j$ 点的空气渗透率; $\int_L ds$ 为 L 上 $i-j$ 点的曲线积分。同时,结合矽石山斜坡面渗流情况,根据矿井火灾灾变通风理论和能量方程式,可以得到:

$$\begin{aligned} H &= P_{i0} - P_{im} = H_a + H_b = \\ &= \frac{\rho g Z (T_L - T_0)}{273.15 + T_0} + \frac{\rho [(v_0 \sin \theta_0)^2 - (v_m \sin \theta_m)^2]}{2} \end{aligned} \quad (21)$$

式中: P_{i0} 和 P_{im} 分别为 L 上 0 、 m 点的全风压; H_a 为 L 上的火风压; H_b 为 0 、 m 点渗流方向的外界风速动压差; ρ 为外界空气密度, g 为重力加速度; Z 为 0 、 m 点间的高差; T_L 为 L 上矽石孔隙中空气的绝对温度; T_0 为外界空气绝对温度; v_0 和 v_m 分别 0 、 m 点外界风速; θ_0 和 θ_m 分别为 0 、 m 点外界风向与坡面夹角。

将式(19)、式(21)代入式(20)中,可得渗流速度方程:

4.1 数值模型建立

首先对矽石山不规则的外观形貌进行合理简化,采用SpaceClaim构建矽石山三维物理模型,并进行空气渗流模拟研究,其矽石山几何模型参数如下,矽石山总体积 $12\,224\text{ m}^3$,顶部的长度为 15.9 m ,宽度为 30 m ,总面积约为 478 m^2 。底部的长度为 35 m ,宽度为 30 m ,总面积约为 $1\,050\text{ m}^2$ 。矽石山斜坡面宽 30 m ,高度为 15.5 m ,边坡角度 40° ,矽石山顶部上覆平均厚度约 0.5 m 黄土层。矽石山斜坡面为迎风面,将迎风面右下角设置为坐标原点。使用Meshing软件对模型进行网格划分,采用Hex Dominant网

格划分方法,其网格统计节点数=209 487,网格数=587 483,其最大偏度 0.82,平均偏度 0.28,网格质量良好。构建矸石山西南角几何模型如图 5 所示。

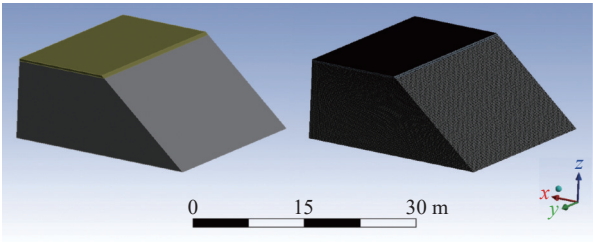


图 5 矸石山几何模型
Fig.5 Geometric model

4.2 边界条件和模型参数

根据实际情况设定其边界条件与模型参数,采用基于压力的瞬态求解器,选用 Realizable k-epsilon 黏性模型,开启组分运输,打开能量方程,在矸石山外部建立空气场模型,风流入口设置为速度入口,风流出口设置为出流边界,根据鄂尔多斯市年平均风速与风向,假设外界风流方向沿 X 轴正方向且平行于矸石山底面,风速为 2 m/s。其入口风流与外部空气场氧气体积分数均设置为 21%,其环境温度设置为 293 K,矸石山设置为松散介质区域开启氧气源项,能量源项,根据式(16)得出其矸石山孔隙率分布,并通过所求孔隙率进而计算出其黏性阻力、惯性阻力、耗氧速率。将其编写成 UDF 参数程序代码导入 fluent 中进行模拟计算。本文的基本参数具体值见表 5。

表 5 数值模拟参数

Table 5 Numerical simulation parameters

参数	数值	参数	数值
空气密度 $\rho_g/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1.43	风速 $v_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	2
煤矸石密度 $\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 436	氧气体积分数 $c_0/\%$	21
初始孔隙率 $e/\%$	40	大气压 P_a/kPa	101.325
初始渗透率 k/m^2	1.37×10^{-9}	环境温度 T/K	293
黄土孔隙率 $e/\%$	10	空气动力黏滞系数 $\mu/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	1.8×10^{-5}
黄土比热容 $C_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1 696	时间步长 $\Delta t/\text{s}$	259 200
黄土密度 $\rho_f/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 600	时步数 S	60

4.3 模拟结果

4.3.1 氧气场

矸石山内部的氧气浓度会影响氧化反应速率进而影响其自燃的发生。为了更直观地分析氧气浓度的分布特征,本研究输出了矸石山形成半年后的氧气浓度分布图。图 6 展示了煤矸石山 $Y=15\text{ m}$ 处的氧气浓度等值面图和在 xy 、 yz 、 xz 方向的氧气浓度切片图。

由于煤矸石氧化会消耗氧气且煤矸石山内部渗流速度较低,所以矸石山随着距斜坡面距离的增加其氧气浓度大大降低,至矸石山深部氧气浓度基本为 0。并且由于矸石山底部较顶部其孔隙率大,渗流速度快,导致其供氧量更大,所以底部其氧气浓度更高。

由图 6 可知沿着 x 方向向矸石山内部深入,氧气浓度下降速度逐渐降低。这种变化主要受到氧气

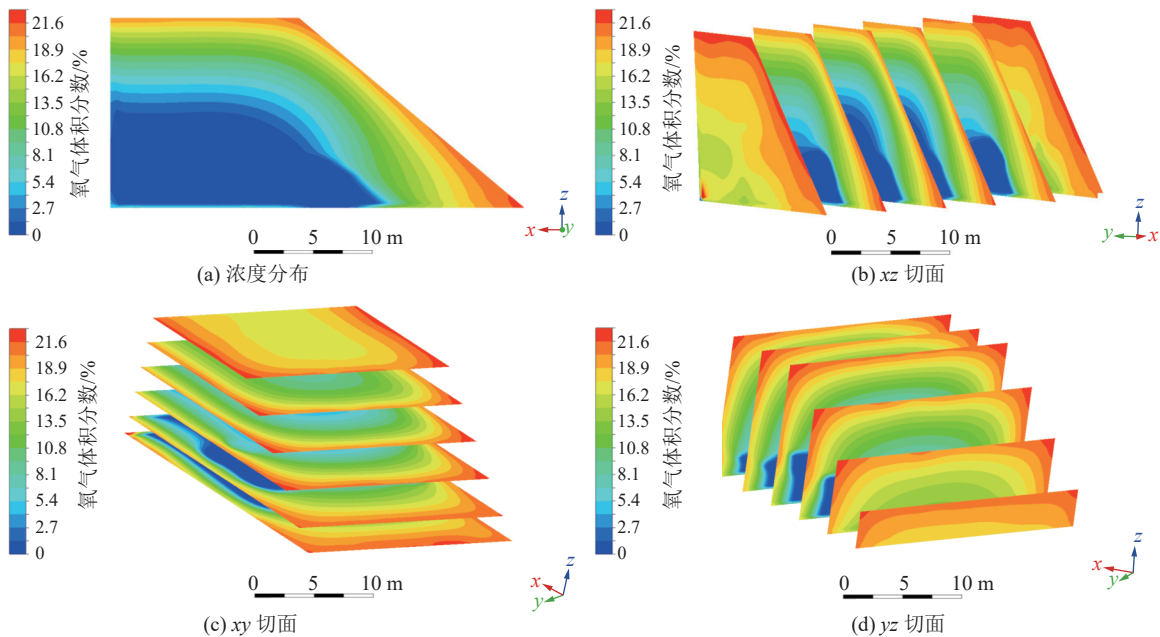


图 6 矸石山内部氧气浓度分布规律

Fig.6 Distribution pattern of oxygen concentration inside the gangue hill

扩散和煤矸石自燃氧化反应速率的影响,空气向矸石山内部渗流的过程中,煤矸石氧化耗氧,导致渗流气体氧气质量浓度逐渐降低,并由于氧气质量浓度降低其氧化反应速率也随之减小,最终导致氧气浓度下降速度逐渐降低直到矸石山深部氧气质量浓度为零不再发生氧化反应。沿着 z 轴方向随着高度的增加,氧气浓度迅速下降,并且矸石山顶部高浓度范围远远小于底部的范围。这是因为随着高度的增加其矸石山孔隙率降低,其渗流速度减小最终导致其

氧气浓度下降。

4.3.2 温度场

矸石山温度场分布对于矸石山的自燃程度具有直接影响。高温区域的存在会导致矸石山发生自燃,并且温度场还通过热风压力对渗流场的分布产生间接影响。为了更加直观地分析温度场的特征分布,本研究提供了矸石山形成半年后的温度分布图。图7展示了位于煤矸石山 $Y=15\text{ m}$ 处的温度等值面图,以及在 xy 、 yz 和 xz 方向上的温度切片图。

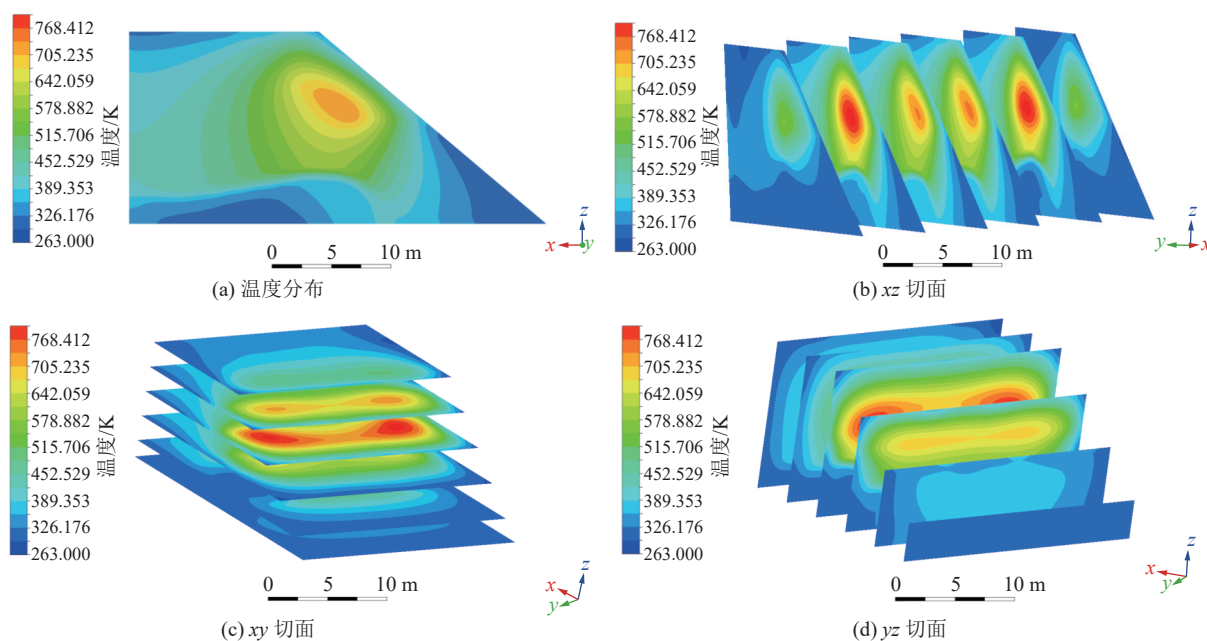


图7 矸石山内部温度分布规律

Fig.7 Distribution law of temperature inside the gangue hill

矸石山内部的热量主要是由煤矸石与氧气发生氧化反应释放的。根据图8可以观察到,矸石山内部渗流速度较低,导致氧气浓度随着深度增加而迅速降低,这造成氧化反应速率减慢,释放的热量大幅减少。直至矸石山深部,氧气质量浓度接近零,氧化放热反应停止进行,这是矸石山内部温度较低的主要原因。此外,矸石山底部的孔隙率较大,风速较高,集热条件较差,导致底部温度较低。上部靠近坡顶集热条件不佳,且由于孔隙率较低并覆盖着黄土,导致渗流速度缓慢,氧气质量浓度较低,不利于氧化放热反应的进行,因此上部温度较低。尽管矸石山表面的氧气浓度较高,热量释放较大,但由于靠近表面,不易形成产生集热现象。综上所述,矸石山高温区域主要分布在矸石山中上部区域,大约距离坡面 2 m 深处。

4.3.3 渗流场

渗流速度场的分布是影响矸石山自燃的重要因

素,其受外界环境风速与温度场的影响,为了更加准确直观地了解煤矸石山气体渗流速度场的整体情况。我们将输出 $Y=15\text{ m}$ 时矸石山内部渗流速度等值面图以及在 xy 方向、 yz 方向和 xz 方向的流速等值面图,具体如图8所示。

通过空气渗流速度的不同切面分布图,可以观察到边坡处和矸石山中上部的高温区域相对于内部具有较高的流速,最高可达 0.06 m/s 。当风流进入矸石山内部后,在黏性阻力和惯性阻力的共同作用下,随着与边坡的距离(x 方向)增加,流速逐渐降低。此外,由于矸石山的孔隙率从上到下逐渐增大,并且矸石山顶部有黄土覆盖,孔隙率较低,黏性阻力和惯性阻力也随之减小,因此,在高度方向(z 方向)上底部的高流速区域明显大于顶部。由于在模拟中假设煤矸石均匀分布且各向同性,渗流参数没有发生明显变化,在矸石山的宽度方向(y 方向)上流速分布差异不大。同时,受温度场引起的热风压影响,靠近中上

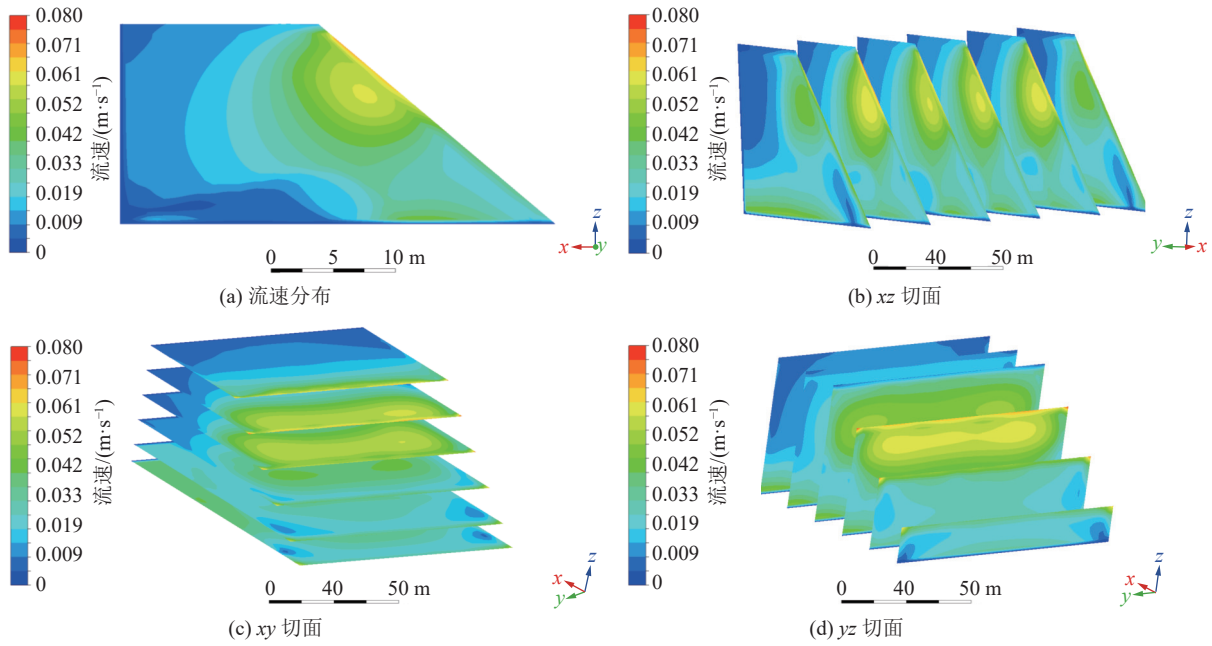


图 8 矸石山内部流速分布规律

Fig.8 Distribution law of flow velocity inside the gangue hill

部坡面的高温区域具有较大的风速,而矸石山深部的低温区域的氧化放热速率较慢,风速较小。为了更详细地描述渗流场情况,引入了流场矢量图进行可视化分析,如图 9 所示。

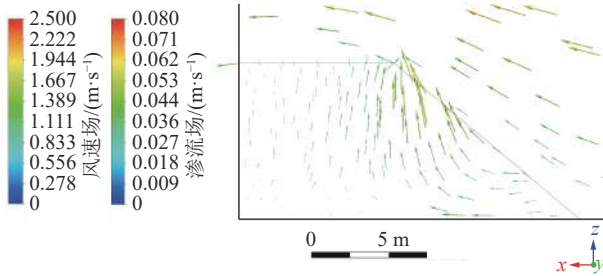


图 9 矸石山空气渗流示意

Fig.9 Schematic diagram of air seepage in gangue hill

图 9 中箭头的颜色表示风速大小,可观察到在 x 方向,随着渗流气体逐渐深入矸石山内部,流速逐渐降低并趋近于零,表明渗流主要发生在边坡浅部范围内。根据图示,由于矸石山孔隙率由下至上逐渐减少,所以较上部而言,其下部进风量较大,风流进入矸石山后风流垂直于 yo 平面。另一方面,渗流场受到热风压的影响,其高温区域风速较高,并且由于烟囱效应,其风流大多呈由下至上的趋势流动。

5 现场验证

5.1 研究区概括

研究区位于鄂尔多斯市东胜区某矿区,该矿区地貌类型为丘陵沟壑,属中温带半干旱气候,常年受

西北环流与极地冷空气的影响,干旱少雨、植被稀少。现场矸石山主要由经过洗选分离后的固体废弃物组成,堆积方式为自然倾倒和平地起堆,期间进行黄土分层覆盖,其坡面面积约为 12 万 m^2 ,顶部面积约为 8 万 m^2 ,平均高差 20 m,坡度约为 40° 。受西北风影响,矸石山西北坡面较易发生自燃现象,如图 10a 所示。出于安全考虑,避免现场作业出现垮塌事故,经现场考察,最终选取煤矸石山燃烧位置附近斜坡面浅部作为研究对象,如图 10b 所示。

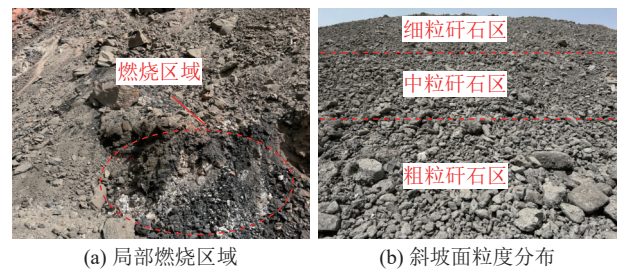


图 10 矸石山研究区现场

Fig.10 On site research on the location of gangue hills

5.2 漏风通道检测布置

为了进一步验证煤矸石山斜坡面的风压渗流情况,采用 SF_6 示踪气体检测法进行现场实验,如图 11 所示,该装置由 SF_6 气体钢瓶和气体调节装置组成, SF_6 气体稳定释放量为 10 ~ 100 mL/min,每次连续释放时间为 5 min。

布置现场:基于现场风速、风向以及坡面浅部矸石体温度,初步确定待测斜坡面浅部空气渗流方向。

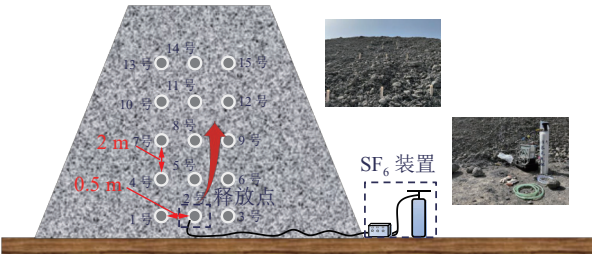


图 11 矸石山斜坡面测点布置示意

Fig.11 Layout diagram of measuring points on the slope surface of the gangue hill

在待测斜坡面按初步确定的空气渗流方向布置 3 列测线, 列距 0.5 m, 每列测线共布置 5 个测点, 测点间距 2 m。在每个测点垂直斜坡面布置 1 个测管, 测管埋深 2.5 m, 测管上每隔 0.5 m 设置一个 SF₆ 示踪气体探头和一个温度热电偶探头, 每个点的编号如 1-1、1-2、1-3 等依次类推。

测定参数: 首先对于煤矸石山待测斜坡面区域, 采用电子风表测定斜坡面待测区域的外界风速; 采用烟雾法测定其风向及其与斜坡面的夹角; 采用数字温度计测定其温度; 采用风扇湿度计测定外界空

气干球温度和湿球温度, 根据干、湿球温度差和干球温度查表确定空气相对湿度, 进而计算出外界空气的密度; 采用补偿式微压计测定进风点和出风点间全压差。然后在布点区域中间列最下测点处连续释放 SF₆ 气体, 接着记录各测管上各探头测得 SF₆ 气体的时间 t ; 根据斜坡面倾角和探头与斜坡面的距离确定各探头的 (X_i, Y_i, Z_i) , 通过“欧几里德距离”确定 L 数值。

计算结果: 按照各测点测得的 t , 计算 $v=L/t$, 求得渗流速度, 气体在斜坡面浅部的实际运动轨迹为曲线, 因此实际 SF₆ 渗流速度要大于测得的值, 但因测点间距较小, 其误差很小。根据已测得的 H 、 v 、 L 值, 按 $K=vL\eta/H$ 求得渗透率 K 。

5.3 检测结果分析

矸石山斜坡面内部漏风通道较多, SF₆ 气体释放完毕后, 同时记录不同探头检测到 SF₆ 气体的时间, 通过分析可以发现, 气体主要通过部分位点进行渗流, 说明矸石山内部氧气的渗流通道大致相近, 表 6 中仅列出几个具有代表性和特征性的位点取值参数。

表 6 现场渗流试验参数值
Table 6 On site seepage experimental parameter values

位点	d/m	h/m	$T_t/^\circ\text{C}$	$T_g/^\circ\text{C}$	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$v_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_m/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\theta_0/^\circ$	$\theta_m/^\circ$	Z/m	t/s
5-2	0.8	2.4	29	24.2	1.026 0	2.1	3.1	38.9	36.8	15.0	8.2
5-3	1.3	2.0	31.5	24.8	1.023 9	1.8	3.1	39.1	37.2	15.0	10.8
8-3	1.3	3.4	35.4	25	1.023 2	1.6	3.5	38.7	37.8	14.8	30.4
8-4	1.8	2.9	36.1	25.3	1.022 2	1.8	3.5	39	37.9	15.0	39.2
11-5	2.3	4.2	44.8	26.5	1.021 5	1.8	3.9	37.9	37.5	15.1	84.5
14-5	2.3	5.8	49.2	28.9	1.016 7	1.9	3.7	38.5	37.5	15.0	130.4

根据现场参数计算得出渗流速度与公式 (22) 进行相互验证, 结果如图 12a 所示。同时, 为验证公式 (19) 对渗透率预测的准确性, 在保证参数一致的前提下, 使用常见的几种渗透率公式 (Doyen 公式^[23]、Blake-Kozeny 公式^[24]、Kozeny 公式^[25]、Kozeny-Carman 公式) 进行对比, 并根据现场测试结果进行验证, 结果如图 12b 所示。

空气在斜坡面浅部的实际运动轨迹为曲线, 因此, 理论计算的渗流速度要大于测得的值, 图 12a 所示, 测试位点越高, 两种方法得出的渗流速度误差越大, 最大值可达到 0.037 m/s, 由于位点越高, 渗流路径相差越大, 造成误差偏大。图 12b 可以得出, 与列举的 4 种公式相比较, 本文的渗透率预测值与几种

公式均较为接近。其结果存在差异的主要原因为: 现有公式对渗透率的预测主要是基于常见矿物(煤炭)或典型条件下(地下采空区)的参数化模型。然而, 矸石山作为一种松散介质模型, 其内部结构和渗流特性受多种因素影响。并且, 在使用列举的 4 种公式计算矸石山上部渗透率时, 其计算结果均接近于 0, 与事实相对不符。由此见得现有公式对矸石山渗透率预测方面不能完全适用。而本文结合散体岩土力学理论和通风理论进行研究, 所得公式较现有公式而言对煤矸石山渗透率的预测具有更高的准确性与适用性。

通过以上研究可以看出, 伴随孔隙率的降低, 渗透率大致可以分为急速降低阶段和缓慢降低阶段。

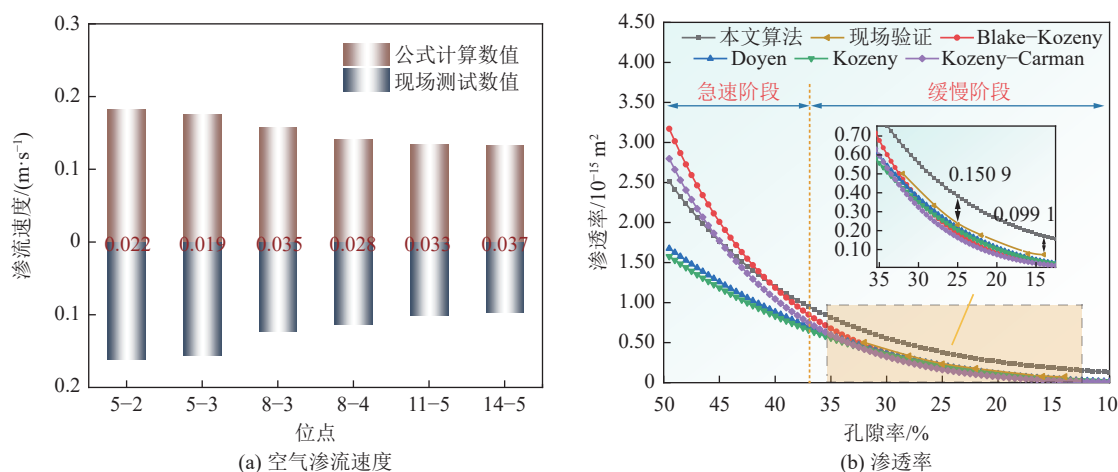


图 12 空气渗流速度、渗透率验证效果

Fig.12 Validation effect diagram of air infiltration velocity and permeability

同时,空气在矸石山斜坡面内的渗流是由高压区域移动到低压区域,大致可以划分为表层冷却区、聚热易燃区以及内部低温区,其具有非定常性、复杂性以及可压缩性等特征(图 13)。矸石山的孔隙率可以影响到其内部渗透性、空气流速以及氧气分布情况,而渗透性和流动性的大小可以表征向煤矸石山供氧的难易程度。此外,矸石山自燃的危害是因内部可燃物质与渗流气体发生氧化放热反应而产生,故了解渗流气体的分布与变化规律对矸石山自燃的预防与

治理具有重要意义。明确矸石山内部孔隙率及渗透率的分布规律又是对渗流场研究的必要前提条件,并有助于更好地理解自燃机制,即何种条件下自燃更容易发生。总之,孔隙率与渗透率是影响矸石山斜坡面内空气渗流特性的一个极为重要因素,通过深入了解矸石山整体孔隙率与渗透率的分布规律,可以更为全面地理解自燃机制,预测潜在风险,制定更有效的防治策略,推动相关技术的发展和改进,从而为矸石山自燃危害的预防和治理提供支持。

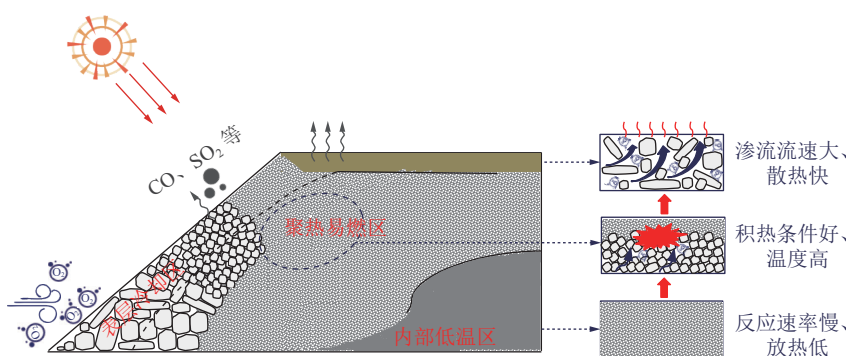


图 13 矸石山风压渗流示意

Fig.13 Schematic diagram of wind pressure seepage in gangue hill

6 结 论

1) 采用理论分析与室内试验相结合的研究方法,建立了煤矸石山斜坡面矸石散体坡向挤压力影响下的渗透率计算公式,以及斜坡面空气渗流风压作用下的渗流速度方程。随矸石山斜坡面高度与深度的变化,浅部孔隙率与渗透率的影响效果较大,且呈现出非线性负指数衰减规律。

2) 高温区域主要位于矸石山中上部距斜坡面 2~3 m 处,并在外界渗流压力和火风压双重影响下,

斜坡面表层与中上部高温区域渗流风速相对较高,在本文预设条件下,最高可达 0.06 m/s。氧气浓度沿 X 与 Z 方向深入随之下降,且下降速率逐渐降低。综合氧气浓度场、温度场以及流速场分布情况得出矸石山斜坡面浅层中上部更易发生自燃现象。

3) 伴随斜坡面研究位点的增高加深,以孔隙率为 0.37 范围为界,其渗透率大致可以分为急速降低阶段和缓慢降低阶段。通过研究矸石山整体孔隙率及渗透率的分布规律,可以为预防和治理矸石山自燃危害提供理论支持。

参考文献(References):

- [1] 肖武, 任河, 赵艳玲, 等. 无人机遥感支持下的煤矸石山自燃监测与预警[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(2): 412–421.
XIAO Wu, REN He, ZHAO Yanling, *et al.* Monitoring and early warning the spontaneous combustion of coal waste dumps supported by unmanned aerial vehicle remote sensing[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 412–421.
- [2] 边炳鑫, 解强, 赵由才, 等. 煤系固体废物资源化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [3] LIANG Y C, LIANG H D, ZHU S Q. Mercury emission from spontaneously ignited coal gangue hill in Wuda Coalfield, Inner Mongolia, China[J]. *Fuel*, 2016, 182: 525–530.
- [4] 薛刚. 大柳塔煤矿排矸场综合一体化火区治理方法[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(S1): 159–167.
XUE Gang. Comprehensive integrated fire area treatment method of wastedump in Daliuta Coal Mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(S1): 159–167.
- [5] 李建华, 陈涛, 杨木林. 排矸方式对矸石山稳定性的研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(3): 308–315.
LI Jianhua, CHEN Tao, YANG Mulin. Study on stability of gangue mountain in discharging method[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(3): 308–315.
- [6] 李舒伶, 高建科. 煤矸石山自然发火数学模型在红阳三矿新矸石山自然防治中的应用[J]. *中国安全科学学报*, 2003, 13(2): 31–33, 87.
LI Shuling, GAO Jianke. Application of mathematical model for spontaneous combustion of coal gangue dump in new gangue dump site of #3 Hongyang Mine[J]. *China Safety Science Journal*, 2003, 13(2): 31–33, 87.
- [7] 贾宝山. 煤矸石山自然发火数学模型及防治技术研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2002.
JIA Baoshan. Study on mathematical model of spontaneous combustion and its prevention and harness technology of coal gangue dump[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2002.
- [8] 郁邦永, 潘书才, 魏建军, 等. 承压饱和破碎岩石颗粒破碎及渗透率演化特征研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(3): 632–638.
YU Bangyong, PAN Shucui, WEI Jianjun, *et al.* Particle crushing and permeability evolution of saturated broken rock under compaction[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(3): 632–638.
- [9] 张天军, 尚宏波, 李树刚, 等. 分级加载下破碎砂岩渗透特性试验及其稳定性分析[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(5): 1129–1136.
ZHANG Tianjun, SHANG Hongbo, LI Shugang, *et al.* Permeability characteristics of broken sandstone and its stability analysis under step loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(5): 1129–1136.
- [10] 余明高, 晁江坤, 褚廷湘, 等. 承压破碎煤体渗透特性参数演化实验研究[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(4): 916–922.
YU Minggao, CHAO Jiangkun, CHU Tingxiang, *et al.* Experimental study on permeability parameter evolution of pressure-bearing broken coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(4): 916–922.
- [11] 尚宏波, 靳德武, 张天军, 等. 三轴应力作用下破碎煤体渗透特性演化规律[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(4): 1066–1075.
SHANG Hongbo, JIN Dewu, ZHANG Tianjun, *et al.* Permeability evolution of broken coal under triaxial stress[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(4): 1066–1075.
- [12] 余为, 李强, 黄伟, 等. 破碎岩体中的气体渗流规律研究[J]. *燕山大学学报*, 2007, 31(4): 317–321.
YU Wei, LI Qiang, HUANG Wei, *et al.* Study on the laws of gas flow in over-broken rock mass[J]. *Journal of Yanshan University*, 2007, 31(4): 317–321.
- [13] 司俊鸿, 程根银, 朱建芳, 等. 采空区非均质多孔介质渗透特性三维建模及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(5): 220–224.
SI Junhong, CHENG Genyin, ZHU Jianfang, *et al.* Three-dimensional modeling and application of permeability characteristics of heterogeneous porous media in goaf[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(5): 220–224.
- [14] 苏付义. 围限压力下煤岩孔隙度的变化特征及应用[J]. *煤田地质与勘探*, 1994, 22(3): 27–31.
SU Fuyi. Variation characteristics and application of coal porosity under confining pressure[J]. *Coal Geology & Exploration*, 1994, 22(3): 27–31.
- [15] 李舒伶, 高建科. 煤矸石山自然发火数学模型在红阳三矿新矸石山自然防治中的应用[J]. *中国安全科学学报*, 2003, 13(2): 25–27.
LI Shuling, GAO Jianke. Application of mathematical model for spontaneous combustion of coal gangue dump in new gangue dump site of #3 Hongyang Mine[J]. *China Safety Science Journal*, 2003, 13(2): 25–27.
- [16] 裴晓东, 张人伟, 杜高举, 等. 新建煤矿矸石山自然发火的数学模型及其模拟分析[J]. *矿业安全与环保*, 2009, 36(4): 11–13, 16, 91.
PEI Xiaodong, ZHANG Renwei, DU Gaoju, *et al.* Mathematical model for spontaneous combustion of waste dump and its simulation analysis in Xinjian coal mine[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2009, 36(4): 11–13, 16, 91.
- [17] 段玉龙, 周心权, 余明高, 等. 矸石山自燃程度和爆炸的关联分析[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(4): 514–519.
DUAN Yulong, ZHOU Xinquan, YU Minggao, *et al.* The relations between spontaneous combustion degree and explosions of gangue dump[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(4): 514–519.
- [18] 张凯, 郭俊廷, 滕腾. 弱胶结砂质泥岩注水软化与渗流特性试验研究: 以神东矿区为例[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(2): 195–201.
ZHANG Kai, GUO Juntao, TENG Teng. Experimental study on water-softening and seepage characteristics of weakly cemented sandy mudstone: taking Shendong Coal Mining Area as an example[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(2): 195–201.
- [19] 王刚, 李艳青, 刘世民, 等. 微观等效毛管束下液体初始渗流特性的可视化研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(2): 147–153.
WANG Gang, LI Yanqing, LIU Shimin, *et al.* Visualized experimental study on initial seepage characteristics of liquid under mi-

- cro-equivalent tube bundle[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(2): 147–153.
- [20] 张培森, 侯季群, 赵成业, 等. 不同应力状态下底板岩体渗流特性分析研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(1): 127–133.
ZHANG Peisen, HOU Jiqun, ZHAO Chengye, *et al.* Analysis and study on seepage characteristics of floor rock mass under different stress states[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 127–133.
- [21] PERERA M S A, RANJITH P G, CHOI S K, *et al.* Numerical simulation of gas flow through porous sandstone and its experimental validation[J]. *Fuel*, 2011, 90(2): 547–554.
- [22] 李志强, 鲜学福, 隆晴明. 不同温度应力条件下煤体渗透率实验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2009, 38(4): 523–527.
LI Zhiqiang, XIAN Xuefu, LONG Qingming. Experiment study of coal permeability under different temperature and stress[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2009, 38(4): 523–527.
- [23] COLÓN C F J, OELKERS E H, SCHOTT J. Experimental investigation of the effect of dissolution on sandstone permeability, porosity, and reactive surface area[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(4): 805–817.
- [24] 高建良, 刘佳佳, 张学博. 采空区渗透率对瓦斯运移影响的模拟研究[J]. *中国安全科学学报*, 2010, 20(9): 9–14.
GAO Jianliang, LIU Jiajia, ZHANG Xuebo. Simulation study on the influence of permeability on gas migration in gob[J]. *China Safety Science Journal (CSSJ)*, 2010, 20(9): 9–14.
- [25] (奥)薛定谔(A. E. Scheidegger)著, 王鸿勋译. 多孔介质中的渗流物理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1982.