

东胜矿区煤矸石山易燃层位置研究*

王文才^{1,2,3,4}, 滕奕铭¹, 王鹏¹, 张小磊¹, 贾文杰⁵

(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; 5. 达拉特旗苏家沟煤炭有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要: 为研究东胜矿区低硫高挥发分煤矸石山易燃层垂向位置, 为靶向注浆提供易燃风险区定位, 通过现场实验、相似模拟实验及烧失实验, 探究煤矸石山垂向的粒度分布规律和含煤率分布规律, 耦合高度-粒径-含煤率构建自燃风险指数模型, 通过自燃风险指数对煤矸石山不同高度划分风险等级。研究结果表明: 相似模拟实验与现场实测 D_{50} 相对误差 $< 5\%$, 方法可靠; 煤矸石山易燃层位于位置高度比 $0.63 \sim 0.74$ 处, 通过自燃风险指数模型分级, 易燃层属于高风险和极高风险自燃等级; 易燃层位于煤矸石山垂向高度垂向高度 $9.45 \sim 11.1$ m 之间, 山顶平台注浆钻孔深度设计为 7 m, 可以覆盖易燃层。

关键词: 煤矸石山; 粒度分布; 含煤率分布; 易燃层; 自燃风险指数模型

中图分类号: TD75 文献标识码: A

文章编号: 2095-2295(2026)01-0075-07

DOI: 10.16559/j.cnki.2095-2295.2026.01.010

Study on the location of combustible layers in coal gangue hills of dongsheng mining area

WANG Wencai^{1,2,3,4}, TENG Yiming¹, WANG Peng¹, ZHANG Xiaolei¹, JIA Wenjie⁵

(1. School of Mining and Coal School, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Mining Engineering, Baotou 014010, China; 3. Inner Mongolia Engineering Research Center of Safe Coal Mining and Utilization, Baotou 014010, China; 4. Inner Mongolia Collaborative Innovation Center of Green Coal Mining and Utilization, Baotou 014010, China; 5. Dalate Banner Sujiagou Coal Co., Ltd., Ordos 017000, China)

Abstract: To investigate the vertical position of the flammable layer in low-sulfur and high-volatile coal gangue dumps in the Dongsheng Mining Area, and to provide the location of flammable risk zones for targeted grouting, field experiments, similar simulation experiments, and loss-on-ignition experiments were conducted to explore the vertical laws of particle size distribution and coal content distribution in coal gangue dumps. A fire risk index model was established by coupling height, particle size, and coal content, and risk levels were classified for different heights of the coal gangue dump based on the fire risk index. The results show that the relative error of D_{50} between the similar simulation experiment and the field measurement is less than 5% , indicating the reliability of the method; the flammable layer of the coal gangue dump is located at a relative height ratio of $0.63 \sim 0.74$, which is classified as high-risk and extremely high-risk fire levels through the fire risk index model; the flammable layer is between 9.45 m and 11.1 m in the vertical height of the coal gangue dump, and the design depth of the grouting borehole on the top platform is 7 m, which can cover the flammable layer.

Key words: coal gangue dump; particle size distribution; coal content distribution; flammable layer; fire risk index model

* 基金项目: 国家自然科学基金(52464018); 内蒙古自治区自然科学基金青年基金(2025QN05002)。

作者简介: 王文才, 男, 教授, E-mail: wencai99999@163.com

收稿日期: 2025-11-20

煤矸石是在煤炭生产过程中产生的伴生固废,一般以堆存形式存放。东胜矿区煤矸石为侏罗纪低硫高挥发分煤矸石^[1],长期堆积容易自燃。2022年东胜矿区煤矸石产量600万t,矿区煤矸石堆存量巨大。目前煤矸石山自燃防治以注浆灭火技术为主^[2],但盲目注浆会浪费材料,造成经济损失。

对煤矸石山自燃的理论和防治技术研究,国内外学者均作出大量工作^[3-7]。煤矸石山的粒度分布是影响煤矸石山自燃的重要因素,巩潇等^[8]指出煤矸石粒径在6~13mm区间容易发生自燃,张靖等^[9]研究表明煤矸石氧化受粒径与升温次数影响。王文才等^[10-11]研究煤矸石山粒度分布与渗透特性的关联,并通过Fluent软件模拟计算煤矸石山自燃三带的位置。董红娟等^[12]用程序升温实验研究了煤矸石自燃的特征温度点。ZHANG等^[13]研究煤和煤矸石的共燃过程,指出二者共存自燃危险性会增加。相似模拟实验可以研究煤矸石山粒径分布规律^[14],崩塌落石的运动过程^[15]与排弃煤矸石的运动过程相似,可以基于崩塌落石运动理论对排弃煤矸石的运动过程进行分析。以上学者对煤矸石自燃的研究,考虑到粒径、温度、含煤量等因素的影响,但对煤矸石山高温易燃区域未结合粒度-含煤率耦合机制进行分析,未结合易燃指数模型对垂向易燃层位置分级量化。

论文以东胜矿区分层高度15m、覆土厚度0.3m的侏罗纪低硫煤矸石山为研究对象,通过现场实测、相似模拟实验及烧失实验,研究煤矸石山易燃层垂向位置,建立自燃风险指数模型,为靶向注浆提供易燃风险区定位。

1 研究方法

1.1 煤矸石山现场测定

东胜矿区的煤矸石山,一般采用分层排矸、覆土碾压的方式堆积。选择煤矸石山其中一个分层作为研究对象,该分层高度为15m,按自然安息角形成的坡面角为36°。选择煤矸石山的一个分层,在其垂向的不同高度均布设2个测点,形成如图1所示的网状布点形式。在现场进行各测点样品的采集,然后进行筛分测定。

1.2 煤矸石山相似模拟实验

1.2.1 实验物理参数量纲分析与相似常数

煤矸石经车厢倾倒后,受重力及摩擦力作用,沿

煤矸石山斜坡面滚动,并形成煤矸石山的坡面及坡体。煤矸石沿坡面运动形成上部和中部静力堆积带、下部重力堆积带,煤矸石山边坡坡面形态主要取决于煤矸石散体动摩擦效应以及散体中的细、中、粗颗粒分布。

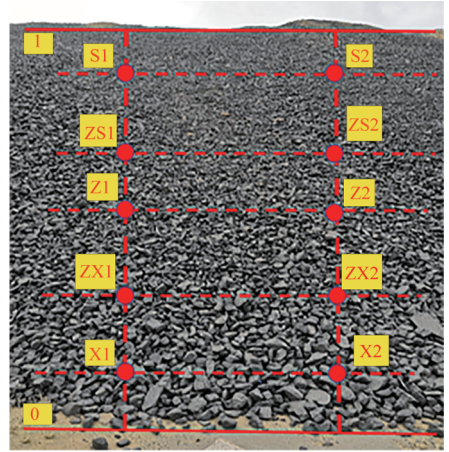


图1 煤矸石山现场测点布置

Fig. 1 Layout of field measurement points of coal gangue dump

在煤矸石山的上部边坡面,煤矸石的中粒、粗粒以滚动摩擦形式通过,耗能极小,偶尔也以挟持或撞击方式给细粒以极少能量补充。细粒是由运动至静止的主体,并以滑动摩擦形式运行,直至耗尽势能。煤矸石山的煤矸石排放使各级颗粒按能量守恒原理克服各自动摩擦力在坡面上运动直至静止,其遵循能量守恒定理,即^[14]:

$$mgh(\sin\theta - \mu\cos\theta) = \frac{1}{2}mv^2. \quad (1)$$

式中: m 为颗粒的质量,kg; g 为重力加速度, m/s^2 ; θ 为坡面倾角,°; μ 为颗粒的动摩擦因数; v 为颗粒沿坡面的速度, m/s 。

由式(2)可以看出,可以将相似模拟实验的煤矸石山堆积物物理过程用质量 m ,kg;长度 l ,m;时间 t ,s;密度 ρ , kg/m^3 ;加速度 a , m/s^2 ;流量 Q , m^3/s ;速度 v , m/s ;动量 X , $kg \cdot m/s$;以及力 F 共9个主要物理量所构成的函数来表述,即:

$$f(m, l, t, \rho, Q, a, v, X, F) = 0. \quad (2)$$

这9个物理量的量纲分别为M、L、T、 ML^{-3} 、 L^3T^{-1} 、 LT^{-2} 、 LT^{-1} 、 MLT^{-1} 以及 MLT^{-2} 。

由于质量 m 、长度 l 及时间 t 具备独立量纲,因此

将其作为函数基本量,通过 π 定理^[16]将函数 f 的其余6个物理量用无因次准数 π_i ($i = 1, 2, \dots, 6$)定性描述,即构造关于其余6个物理量的 π 项为:

$$\pi_i = \frac{Y_i}{m^{\alpha_i} l_i^{\beta_i} t^{\gamma_i}} \quad (3)$$

式中: Y_i ($i = 1, 2, \dots, 6$)分别为密度 ρ 、加速度 a 、流量 Q 、速度 v 、动量 X 以及力 F ; $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)分别为相应物理量量纲中质量 m 、长度 l 及时间 t 的指数。

在式(3)中,密度 ρ 的量纲为 ML^{-3} ,由量纲齐次原理可得 $\alpha_1 = 1, \beta_1 = -3, \gamma_1 = 0$,则密度 ρ 的 π 项为 $\pi_1 = \rho l^3/m$;同理,加速度 a 、流量 Q 、速度 v 、动量 X 以及力 F 的 π 项分别为 $\pi_2 = at^2/l, \pi_3 = Qt/l^3, \pi_4 = vt/l, \pi_5 = Xt/ml$ 和 $\pi_6 = Ft^2/ml$ 。

现场煤矸石山高度15 m,在相似模拟实验中,确定煤矸石山高度为1.5 m,因此,几何相似常数为 $c_l = 10$;实验用的煤矸石来自同一矿区,煤矸石排放仅受到重力加速度 g 作用,密度相似常数 c_ρ 和加速度相似常数 c_a 均为1。由物理量密度的 π 项表达式 π_1 可知,相似条件需满足:

$$\frac{(c_\rho)(c_l l)^3}{c_m m} = \frac{\rho l^3}{m} \quad (4)$$

式中: c_ρ 为密度相似常数。

由式(4)可得:

$$\frac{c_\rho c_l^3}{c_m} = 1 \quad (5)$$

式(5)即为相似模拟密度相似判据。将 $c_l = 10$ 和 $c_\rho = 1$ 代入式(5),求得 $c_m = 1000$ 。

由煤矸石排放加速度 a 、流量 Q 、速度 v 、动量 X 以及力 F 的 π 项表达式 π_i ($i = 2, 3, \dots, 6$)可知,这5个物理量的相似常数需满足:

$$\frac{c_a c_l^2}{c_l} = \frac{c_Q c_l}{c_l^3} = \frac{c_v c_l}{c_l} = \frac{c_X c_l}{c_m c_l} = \frac{c_F c_l^2}{c_m c_l} = 1 \quad (6)$$

由式(6)可得 $c_l = 100.5, c_Q = 100 \times 100.5, c_v = 100.5, c_X = 1000 \times 100.5, c_F = 1000$ 。

1.2.2 实验过程

煤矸石密度为 2000 kg/m^3 ,矿山运输煤矸石的卡车载重量为20 t,根据质量相似常数,相似模拟中煤矸石的每次倾倒量为20 kg。根据几何相似常数 $c_l = 10$,确定实模拟卡车倾倒煤矸石滑槽尺寸为 $96 \text{ cm} \times 24 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$,由表1可得各粒径质量分布的平均值,实验用煤矸石粒径质量分布基于此平均值,与现场一致,如表2所示。

表1 相似模拟实验煤矸石粒径质量分布

Table 1 Mass distribution of coal gangue particle sizes in similar simulation experiment

粒径/mm	0~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~5.0	5.0~10.0	10.0~20.0	>20.0
质量分数/%	25.3	17.3	13.8	13.2	16.0	10.7	3.7

在相似模拟最终堆积形成的1.5 m高的煤矸石山顶部,覆盖厚度为0.03 m的黄土并进行压实(见图2)。

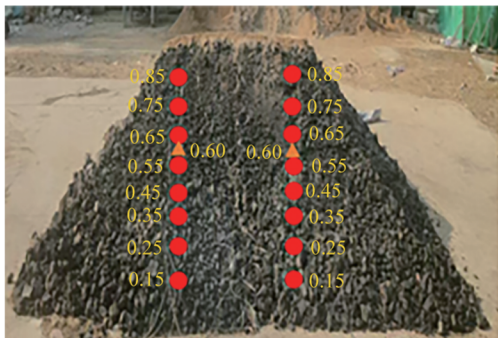


图2 煤矸石山粒度分布相似模拟实验采样点布置

Fig. 2 Layout of sampling points in similar simulation experiment of particle size distribution of coal gangue dump

1.3 烧失法测定含煤率

在相似模拟的煤矸石山不同位置高度比处取样,用电子天平称量样品初始质量 m_0, g ,再将样品破碎后放入坩埚并置于 $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 的干燥箱烘干,称量烘干后的样品质量 m_1, g ;则样品含水率 $M_t, \%$ 为:

$$M_t = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (7)$$

将烘干后的样品和坩埚一起放入马弗炉,升温至 $650 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$,保持该温度3 h以确保样品中的煤完全燃烧。样品灼烧结束后将样品取出,冷却至室温后迅速称量残余物质质量 m_2, g ;则样品含煤率 $\omega, \%$ 为:

$$\omega = \frac{m_1 - m_2}{m_0} \times 100\% \quad (8)$$

2 结果与讨论

2.1 煤矸石山粒度分布特征

2.1.1 实测结果及其分析

在现场进行各测点样品的采集与筛分测定,其结果如表2所示。

表2中 λ 为位置高度比,即采样点高度与煤矸

石山实际高度比值,每个 λ 设2个采样点,共10个采样点。由表2可知,煤矸石山粒度垂向分布呈“上细下粗”的规律,随采样点高度下降,0~10 mm细粒煤矸石占比下降,50 mm以上粗粒煤矸石占比快速增加。煤矸石粒度分布与采样点高度存在联系。中间粒径(取为2组中间粒径平均值)随高度变化如图3所示。

表2 分层粒度现场筛分测定结果
Table 2 Field screening test results of layered particle size

采样点	λ	D_{50}/mm	不同粒径(mm)质量分布/%						
			0~5	5~10	10~20	20~50	50~100	100~200	>200
S1	0.85	4.06	60.68	27.76	9.61	1.95	0.00	0.00	0.00
S2	0.85	3.98	60.39	28.00	9.58	2.03	0.00	0.00	0.00
ZS1	0.70	7.19	48.21	33.19	13.52	5.07	0.00	0.00	0.00
ZS2	0.70	7.25	46.94	34.04	14.37	4.65	0.00	0.00	0.00
Z1	0.55	14.68	15.57	19.10	32.76	17.57	15.00	0.00	0.00
Z2	0.55	14.04	17.38	20.62	30.31	18.27	13.42	0.00	0.00
ZX1	0.35	60.30	1.58	4.82	9.17	25.36	44.02	15.05	0.00
ZX2	0.35	55.76	2.23	5.51	10.84	26.87	39.52	15.03	0.00
X1	0.15	121.39	0.00	0.00	3.12	14.86	22.67	39.04	20.31
X2	0.15	112.85	0.00	0.00	4.56	15.33	25.17	38.45	16.49
	0~1	40.14	25.30	17.30	13.78	13.20	15.98	10.76	3.68

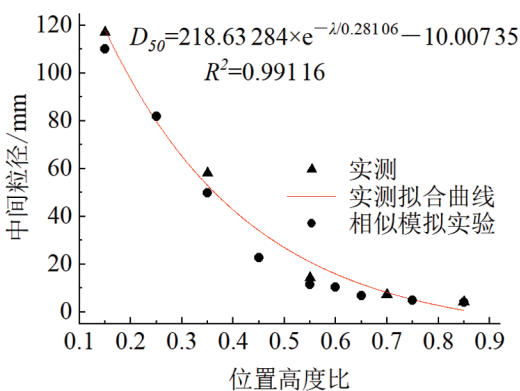


图3 D_{50} 随分层位置高度变化

Fig. 3 Variation of D_{50} with the height of layered position

$$D_{50} = 218.63284 \times e^{-\lambda/0.28106} - 10.00735 \quad (9)$$

式中: D_{50} 为煤矸石中间粒径,mm; e 为自然数; λ 为位置高度比。式(9)的相关系数 $R^2 = 0.99116$ 。

2.1.2 相似模拟结果及其分析

以图3所示测点在煤矸石山分层中的不同位置高度比处采样,并对样品进行筛分测定后得到表3的粒度分布。

将表3数据按几何相似常数 $c_l = 10$ 复原,其相似模拟得出的煤矸石山分层中垂向粒径分布如图3所示,相似模拟与现场实测的 D_{50} 在位置高度比0.15处相差最大,为7 mm,相对误差 $< 5\%$,可见其与实测结果吻合,说明相似模拟的煤矸石山与实际煤矸石山相似性极强。

对实测中间粒径曲线进行拟合分析,可得

表3 煤矸石山分层中粒度垂向分布相似模拟结果

Table 3 Similar simulation results of vertical particle size distribution in the layers of coal gangue dump

位置高度比 λ	D_{50} /mm	复原 D_{50} /mm	不同粒径(mm)质量分布/%						
			0~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~5.0	5.0~10.0	10.0~20.0	>20.0
0.85	0.41	4.10	64.28	25.12	8.05	2.55	0.00	0.00	0.00
0.85	0.37	3.70	66.15	23.87	7.52	2.46	0.00	0.00	0.00
0.75	0.45	4.50	60.18	28.53	8.79	2.27	0.23	0.00	0.00
0.75	0.51	5.10	57.32	30.28	9.85	2.39	0.16	0.00	0.00
0.65	0.71	7.10	36.21	32.75	16.12	10.23	4.69	0.00	0.00
0.65	0.66	6.60	38.57	35.12	15.38	8.93	2.00	0.00	0.00
0.60	1.06	10.60	31.62	30.75	17.68	12.65	6.82	0.48	0.00
0.60	1.00	10.00	34.05	30.52	17.79	11.29	5.96	0.39	0.00
0.55	1.14	11.40	29.05	27.18	19.62	14.83	7.72	1.60	0.00
0.55	1.12	11.20	29.83	29.12	18.65	14.21	6.69	1.50	0.00
0.45	2.19	21.90	15.32	18.05	22.87	29.15	13.61	1.00	0.00
0.45	2.33	23.30	14.15	16.38	23.02	28.95	15.42	2.08	0.00
0.35	5.02	50.20	9.04	12.08	17.23	31.89	22.57	7.19	0.00
0.35	4.96	49.60	8.93	12.37	17.15	35.28	19.86	6.41	0.00
0.25	8.16	81.60	1.73	3.48	7.69	21.85	32.67	24.93	7.65
0.25	8.22	82.20	2.17	3.62	8.35	22.48	31.89	24.37	7.12
0.15	10.20	102.00	0.00	1.85	3.92	11.65	26.32	38.95	17.31
0.15	11.82	118.20	0.00	1.32	3.12	9.75	24.18	40.52	21.11

2.2 煤矸石山含煤率垂向规律

如表4和图4所示。

通过烧失法确定的煤矸石山分层中垂向含煤率

表4 煤矸石山分层中垂向含煤率分布

Table 4 Vertical coal content distribution in the layers of coal gangue dump

λ	D_{50} /mm	复原 D_{50} /mm	m_0 /g	m_1 /g	M_1 /%	m_2 /g	/%
0.85	0.41	4.10	2.001 1	1.958 7	2.12	1.461 1	24.87
0.85	0.37	3.70	2.000 4	1.958 0	2.12	1.460 9	24.85
0.75	0.45	4.50	1.999 6	1.957 8	2.12	1.501 8	22.81
0.75	0.51	5.10	1.999 0	1.956 9	2.12	1.496 5	23.03
0.65	0.71	7.10	2.000 5	1.956 1	2.22	1.561 6	19.72
0.65	0.66	6.60	2.000 1	1.955 5	2.23	1.557 7	19.89
0.60	1.06	10.60	2.000 0	1.951 6	2.42	1.577 2	18.72
0.60	1.00	10.00	2.001 0	1.951 6	2.47	1.579 6	18.59
0.55	1.14	11.40	1.998 9	1.945 7	2.68	1.589 1	17.84
0.55	1.12	11.20	1.999 3	1.945 1	2.71	1.583 0	18.11
0.45	2.19	21.90	2.001 5	1.941 1	3.02	1.624 2	15.83
0.45	2.33	23.30	2.000 3	1.939 1	3.06	1.617 2	16.09
0.35	5.02	50.20	2.002 5	1.938 6	3.19	1.652 1	14.31
0.35	4.96	49.60	2.000 0	1.935 8	3.21	1.655 4	14.02
0.25	8.16	81.60	1.999 6	1.922 0	3.88	1.660 7	13.07
0.25	8.22	82.20	2.001 6	1.922 5	3.95	1.651 1	13.56
0.15	10.20	102.00	2.000 7	1.908 5	4.61	1.678 8	11.48
0.15	11.82	118.20	2.001 2	1.910 5	4.53	1.691 0	10.97

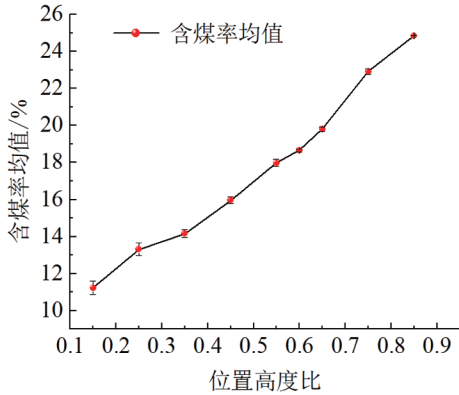


图4 煤矸石山分层中垂向含煤率分布

Fig. 4 Vertical coal content distribution in the layers of coal gangue dump

对煤矸石山位置高度比 λ 与含煤率(图4中含煤率均值)关系进行非线性曲线拟合分析

$$\omega = 9.25708e^{\lambda/0.8706} + 0.47991. \quad (10)$$

式中: λ 为煤矸石山位置高度比; D_{50} 为煤矸石中间粒径,mm; ω 为含煤率,%。式(10)相关系数 $R^2 = 0.9951$ 。

由表4和图4可知,含煤率随中间粒径增大呈递减趋势,随煤矸石山位置高度比 λ 增大呈递增趋势,从0.15处11.225%增至0.85处24.86%。这是由于煤的强度和比重较小,排弃中煤易碎且滚动的动能较小,因而越靠近上部,其含煤量越高。

2.3 煤矸石山垂向易燃层判定

煤矸石颗粒尺寸是矸石山自燃的重要因素之

一。有关研究表明^[17],煤矸石的平均粒径为6~13 mm时,煤矸石山的氧化升温 and 蓄热条件达到最好,其自燃的可能性最大。煤矸石的平均粒径为6~13 mm时,其多位于煤矸石山分层的中上部,其含煤量也高,是煤矸石山分层最可能发生自燃的垂向粒度层。将平均粒径6 mm和13 mm代入式(1),得到煤矸石山最低和最高易燃层的位置高度比分别为 $\lambda_{\min} = 0.63$ 和 $\lambda_{\max} = 0.74$,即煤矸石山每一分层中的易燃层位于分层位置高度比0.63~0.74之间。

根据相似模拟实验的粒度分布和含煤率分布,可构建煤矸石山自燃风险指数模型,如式(11)所示:

$$R = \left(\frac{\omega}{\omega_{ref}} \times f(D_{50}) \times \frac{\lambda}{\lambda_{ref}} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (11)$$

式中: R 为自燃风险指数, ω 为含煤率,% , ω_{ref} 为参考含煤率,取15%, $f(D_{50})$ 为粒径影响因子, λ 为位置高度比, λ_{ref} 为参考位置高度比,取0.5。

$$f(D_{50}) = \begin{cases} \frac{D_{50}}{6} & D_{50} < 6 \\ 1 + \frac{13 - D_{50}}{7} & 6 \leq D_{50} \leq 13 \\ \frac{13}{D_{50}} & D_{50} > 13 \end{cases}. \quad (12)$$

式中: $f(D_{50})$ 为粒径影响因子, λ 为位置高度比, D_{50} 为复原中间粒径,mm。

将表3中 λ 、复原 D_{50} (取平均值)及 ω (取平均值)带入自燃风险指数模型,可得煤矸石山不同高度自燃风险指数,结果如表5所示。

表5 煤矸石山不同高度自燃风险指数

Table 5 Spontaneous combustion risk index at different heights of coal gangue dump

λ	0.150	0.250	0.350	0.450	0.550	0.600	0.650	0.750	0.850
R	0.275	0.347	0.481	0.663	1.069	1.224	1.416	0.976	0.891

由表5数据,可划分低风险($R < 0.500$)、中风险($0.500 \leq R < 1.000$)、高风险($1.000 \leq R < 1.200$)和极高风险($R \geq 1.200$)4个煤矸石山自燃危险等级。现场煤矸石山易燃层介于位置高度比0.630~0.740,属于高风险和极高风险自燃风险等级,模型分级效果良好。

现场煤矸石山易燃层位于垂向高度9.45~11.1 m之间,易燃层下方距煤矸石山顶部5.55 m,

综合考虑现场情况增加超深1.45 m,设计煤矸石山顶部平台钻孔深度7 m,以确保注入浆液可覆盖易燃层。易燃层垂向位置可为靶向注浆方案提供钻孔深度参数。

3 结论

1) 相似模拟实验与现场实测 D_{50} 相对误差 < 5%,方法可靠。煤矸石山含煤率与高度呈正相关

关系,每一分层中的易燃层位于分层位置高度比0.630 ~ 0.740 之间,但研究存在局限性,未考虑降雨等环境条件对细粒煤矸石增加的影响,未考虑覆土碾压对含煤率影响。

2) 通过构建自燃风险指数模型,可划分低风险($R < 0.500$)、中风险($0.500 \leq R < 1.000$)、高风险($1.000 \leq R < 1.200$)和极高风险($R \geq 1.200$)4个煤矸石山自燃风险等级,煤矸石山易燃层介于位置高度比0.630 ~ 0.740,属于高风险和极高风险自燃风险等级。

3) 易燃层位于煤矸石山垂向高度9.450 ~ 11.100 m 之间,将钻孔深度设计为7 m。未来可通过渗透率实验等优化钻孔孔径、注浆压力、钻孔密度等参数,进一步提高靶向注浆效率。

参考文献:

- [1] 王浩森,胡社荣,徐方,等. 东胜矿区煤矸石堆自燃的控制因素及类型划分[J]. 中国矿业,2013,22(04):114.
- [2] 张运增,张福成,马灵军,等. 煤矸石自燃特征及注浆防灭火技术应用[J]. 中国煤炭,2024,50(11):55.
- [3] ZHOU C, NIU H, WANG H. Investigation of the combustion properties of gangue post-water immersion utilizing oxidation kinetic theory [J]. Fuel, 2025, 397: 135286.
- [4] ZHENG Q, ZHOU Y, LIU X, et al. Environmental hazards and comprehensive utilization of solid waste coal gangue[J]. Progress in Natural Science: Materials International,2024,34(2):223.
- [5] SHAO S, MA B, WANG C, et al. Thermal behavior and chemical reactivity of coal gangue during pyrolysis and combustion[J]. Fuel,2023,331:125927.
- [6] 周琛鸿,李绪萍,张靖,等. 不同浸水率煤矸石浸水复干氧化特性研究[J]. 煤炭科学技术,2024,52(S1):107.
- [7] 王振兴,王洋,韩东洋,等. 煤矸石放热危险性与微观基团相关性研究[J]. 煤矿安全,2024,55(2):107.
- [8] 巩潇,刘飞,赵方莹. 煤矸石山自燃机理及灭火技术研究[J]. 洁净煤技术,2012,18(5):83.
- [9] 张靖,李天宇,李绪萍,等. 不同粒径煤矸石二次氧化指标气体产生规律研究[J]. 中国安全生产科学技术,2024,20(10):94.
- [10] 王文才,王鹏,马莹鸽,等. 矸石山矸石散体分布规律及其与渗透特性的关联研究[J]. 安全与环境学报,2023,23(11):3867.
- [11] 王文才,杨少晨,王大伟,等. 煤矸石山自燃三带分布规律研究[J]. 内蒙古科技大学学报,2024,43(3):214.
- [12] 董红娟,卢悦,张金山,等. 煤矸石自燃阶段特征与气体释放特性分析[J]. 内蒙古科技大学学报,2022,41(4):341.
- [13] ZHANG Y, ZHANG Y, SHI X, et al. Co-spontaneous combustion of coal and gangue: Thermal behavior, kinetic characteristics and interaction mechanism[J]. Fuel,2022,315:123275.
- [14] 崔乃鑫,赵芳芳,梁冰,等. 矸石山内部粒径分布规律的实验研究[J]. 山东大学学报(工学版),2012,42(02):52.
- [15] 蔡向阳,铁永波. 崩塌落石运动计算模型综述[J]. 地质灾害与环境保护,2016,27(3):100.
- [16] 苏占东,周思哲,王成虎,等. 工程岩体物理模拟研究中实验材料的选择与应用[J]. 地质论评,2023,69(3):1133.
- [17] 王晓琴. 煤矿矸石山自燃致因与灭火施工工艺研究[J]. 煤炭与化工,2018,41(2):152.

(责任编辑:师宝萍)