

文章编号: 1671-251X(2024)03-0108-06

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2023120069

煤矿井下爆炸性环境下电磁波热效应的安全性研究

郭波超¹, 田子建¹, 侯明硕¹, 石洋名¹, 杨维²

(1. 中国矿业大学(北京) 人工智能学院, 北京 100083;
2. 北京交通大学 电子与信息工程学院, 北京 100044)

摘要: GB/T 3836.1—2021《爆炸性环境 第 1 部分: 设备 通用要求》规定爆炸性环境中射频设备的额定功率不得大于 6 W, 该规定限制了大功率射频设备在煤矿井下的应用, 而现有针对爆炸性环境电磁安全性的相关研究缺乏完善的理论分析和实验验证。针对上述问题, 推导了电磁波热效应方程, 分析得出影响电磁波耦合瓦斯和煤尘混合气体产生热能的可控参数为电磁波耦合时间、电场强度和电磁波频率。以 GB/T 3836.1—2021 中可能堆积煤尘的电气设备表面温度最高不能超过 150 °C 的规定为依据, 采用多物理场仿真软件 COMSOL 对不同发射功率的电磁波耦合瓦斯和煤尘混合气体的热效应安全性进行了仿真实验, 结果表明: 满足温度不超过 150 °C 的电磁波热效应安全额定发射功率为 16.48 W; 随着电磁波发射功率的增加, 电磁波热效应安全时长(电磁波耦合瓦斯和煤尘混合气体产生的热能不会使环境温度超过 150 °C 对应的时间段)逐渐减少, 但只要在安全时长内, 电磁波的发射功率不受限制。

关键词: 煤矿井下; 电磁波热效应; 瓦斯; 额定功率; 安全时长

中图分类号: TD655 文献标志码: A

Research on safety of electromagnetic wave thermal effect in explosive environment of
underground coal mine

GUO Bochao¹, TIAN Zijian¹, HOU Mingshuo¹, SHI Yangming¹, YANG Wei²

(1. School of Artificial Intelligence, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;
2. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: GB/T 3836.1-2021 *Explosive atmospheres-Part 1: Equipment-General requirements* stipulates that the threshold power of RF equipment in explosive environments shall not exceed 6 W. This regulation limits the application of high-power RF equipment in coal mines. However, existing research on electromagnetic safety in explosive environments lacks comprehensive theoretical analysis and experimental verification. In order to solve the above problems, the electromagnetic wave thermal effect equation is derived. It is analyzed that the controllable parameters affecting the generation of thermal energy from the mixture of gas and coal dust coupled by electromagnetic waves are the electromagnetic wave coupling time, the electric field strength and the electromagnetic wave frequency. Based on the regulation in GB/T 3836.1-2021 that the maximum surface temperature of electrical equipment that may accumulate coal dust cannot exceed 150 °C, simulation experiments are conducted using the multi physics field simulation software COMSOL to evaluate the thermal safety of gas and coal dust mixtures coupled with electromagnetic waves of different emission powers. The results show that the emission power that meets the safety threshold of electromagnetic wave thermal effect with a temperature not

收稿日期: 2023-12-24; 修回日期: 2024-03-26; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074305)。

作者简介: 郭波超(1993—), 男, 河北邯郸人, 博士研究生, 研究方向为无线电能传输, E-mail: guobochao1@163.com。通信作者: 田子建(1964—), 男, 湖南望城人, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要研究方向为矿井监控与通信, E-mail: tianzj0726@126.com。

引用格式: 郭波超, 田子建, 侯明硕, 等. 煤矿井下爆炸性环境下电磁波热效应的安全性研究[J]. 工矿自动化, 2024, 50(3): 108-113.

GUO Bochao, TIAN Zijian, HOU Mingshuo, et al. Research on safety of electromagnetic wave thermal effect in explosive environment of underground coal mine[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(3): 108-113.



扫码移动阅读

exceeding 150 °C is 16.48 W. With the increase of electromagnetic wave emission power, the safe duration of electromagnetic wave thermal effect (the corresponding time period that the thermal energy generated by the mixed gas of electromagnetic wave coupling gas and coal dust not causing the ambient temperature to exceed 150 °C) gradually decreases. However, as long as the safe duration is maintained, the emission power of electromagnetic waves is not limited.

Key words: underground coal mine; electromagnetic wave thermal effect; gas; threshold power; safety duration

0 引言

煤矿井下属于爆炸性环境,电磁波耦合瓦斯和煤尘的混合气体或金属构件产生的热能和火花会引爆瓦斯。随着煤矿智能化快速发展,电磁技术(如5G通信技术和无线充电技术等)在煤矿井下的应用势必大幅提高电磁波的频率范围和发射功率,因此需要考虑由电磁波能量带来的安全隐患。

GB/T 3836.1—2021《爆炸性环境 第1部分:设备通用要求》规定,爆炸性环境中射频设备的阈功率不得大于6 W^[1]。然而,有专家学者指出6 W的发射功率限制了大功率射频设备在煤矿井下的应用,阻碍了煤矿安全高效生产,并针对爆炸性环境电磁安全性进行了大量研究,主要围绕以下3个方面:①6 W发射功率限制的理论依据。②金属构件耦合电磁波产生火花的条件。③电磁波热效应引爆瓦斯的功率。

针对6 W发射功率的限制,多位专家学者指出GB/T 3836.1—2021规定的安全功率阈值缺乏理论分析和实验验证^[2-4]。孙继平等^[2]表明GB/T 3836.1—2021和IEC 60079-0:2017《Explosive atmospheres-Part 0:Equipment-General requirements》规定的连续无线电波防爆安全功率阈值应为点火功率阈值,而不是发射器的有效输出功率与天线增益的乘积。梁伟峰等^[3]分析并指出煤矿井下连续无线电波防爆安全功率阈值应为8 W。田子建等^[4]通过理论得出煤矿井下射频设备的发射功率应该限制在10.5 W。

针对金属构件耦合电磁波产生火花的条件,刘晓阳等^[5-6]研究发现5G频段内不同频率电磁波耦合金属构件产生火花的安全距离不同。常琳等^[7]分析了矿用5G系统阈功率的计算方法。范思涵等^[8-9]分析了不同金属构件的安全耦合距离,得出传输距离的变化会改变电磁波的安全性。

针对电磁波热效应引爆瓦斯的功率,相关研究较少,伍颖^[10]指出引爆瓦斯可能需要的功率达上百瓦,但没有给出具体的实验过程。大多学者主要针对引爆瓦斯的机理展开研究。夏晨阳等^[11]从无线充

电技术磁场辐射方面,分析了磁场引爆瓦斯的机理,得出不同频率与负载的系统最大传输功率容量是逐渐降低的。孟积渐等^[12]指出在煤矿井下煤尘能够吸收电磁波辐射能量,成为引爆瓦斯的点燃源。Gao Jiancun等^[13]研究了电磁场影响瓦斯爆炸的机理,仿真结果表明,电磁场加速了顺磁自由基的运动,增加了链式反应的有效碰撞,促进了链式反应的速度。

然而上述研究的相关理论和实验并不完善,尤其是关于爆炸性环境电磁波热效应的安全性方面。本文通过建立电磁波耦合瓦斯和煤尘混合气体的热效应方程,分析影响热能产生的可控参数,并通过电磁仿真研究爆炸性环境下电磁波耦合瓦斯和煤尘的混合气体产生热能引爆瓦斯的阈功率,为电磁技术在煤矿井下的应用提供理论依据。

1 电磁波热效应方程

电磁波在传播过程中存在直射、反射、绕射和透射等现象,为简化分析,本文仅针对直射传播中电磁波耦合瓦斯和煤尘混合气体产生热能的物理现象进行研究。

1.1 电磁分布方程

本文不考虑由发射源数量和位置导致的电磁波叠加现象,只针对无源电磁波进行分析。无源麦克斯韦方程的时域表达式为

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ∇ 为矢量微分算子; \mathbf{E} 为电场强度; μ 为介质的磁导率, $\mu = \mu_0 \mu_r$, μ_0 为真空磁导率, μ_r 为相对磁导率; \mathbf{H} 为磁场强度, $\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu_0$, \mathbf{B} 为磁感应强度; t 为电磁波耦合时间; ϵ 为介质的介电常数, $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为相对介电常数, $\epsilon_r = \epsilon' + j\epsilon''$, ϵ' 为相对介电常数实部, 表示存储的电能, ϵ'' 为相对介电常数虚部, 表示消耗的电能。

由于无源电磁波是按正弦规律变化,所以将

式(1)中的电场及磁场分别代入时谐场的磁矢势偏微分方程中, 可得电磁波在三维空间的分布方程。磁矢势偏微分方程为

$$\varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} + \nabla \times \mu_0^{-1} (\nabla \times \mathbf{A}) = 0 \quad (2)$$

式中 \mathbf{A} 为时谐场的磁矢势。

联立式(1)和式(2)可得无源空间的电磁场亥姆霍兹方程(即电磁分布方程):

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu \varepsilon \mathbf{E} = 0 \\ \nabla^2 \mathbf{H} + \omega^2 \mu \varepsilon \mathbf{H} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 ω 为电磁波角频率, $\omega = 2\pi f$, f 为电磁波频率。

通过式(3)可确定空间电磁场的分布只与电磁波的角频率、介质的介电常数和磁导率有关。由于无源电磁波在三维空间内是均匀传播, 为简化后续求解和分析, 本文以电场沿巷道水平方向传播为例, 对式(3)进行求解, 可得沿巷道水平方向的电场强度:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\max} \exp(-\omega \sqrt{\mu \varepsilon} x) \quad (4)$$

式中: \mathbf{E}_{\max} 为最大电场强度; x 为电磁波沿巷道水平方向传播距离。

1.2 电热转换方程

电磁能量守恒方程^[14]为

$$\int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} dV + \int_V j\omega (\varepsilon \mathbf{E}^2 + \mu \mathbf{H}^2) dV + \int_V \nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dV = 0 \quad (5)$$

式中: V 为单位体积; \mathbf{J} 为电流密度, $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$, σ 为电导率。

式(5)中, $\int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} dV$ 表示介质将电磁能转换为焦耳能, $\int_V j\omega (\varepsilon \mathbf{E}^2 + \mu \mathbf{H}^2) dV$ 表示介质消耗的电磁能, $\int_V \nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dV$ 表示输入的电磁能。

对式(5)进行变换, 得到电场、磁场耦合介质产生热能的方程:

$$\int_V (\sigma + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon'') j\omega \varepsilon_0 \varepsilon'' \mathbf{E}^2 dV + \int_V j\omega \varepsilon_0 \varepsilon' \mathbf{E}^2 dV + \int_V j\omega \mu \mathbf{H}^2 dV + \int_V \nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dV = 0 \quad (6)$$

由式(6)可知, 电磁波在传播过程中会被介质存储一部分电磁能, 并消耗一部分电磁能, 被消耗的电磁能会转换为热能。但在瓦斯和煤尘混合气体中并不包含磁性介质, 因此本文暂不考虑瓦斯和煤尘混合气体的磁能损耗。则电磁波耦合瓦斯和煤尘混合气体产生热能的方程为

$$Q = (\sigma + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon'') \mathbf{E}^2 \quad (7)$$

式中 Q 为热能。

1.3 热能传递方程

当电场耦合瓦斯和煤尘混合气体产生热能后,

由于气体流动会向周围空间传递热能, 所以需要考虑热能在三维空间的传递过程。根据热力学第一定律可得热能传递方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (8)$$

式中: ρ , C_p , k 分别为瓦斯和煤尘混合气体的密度、热容、导热系数; T 为环境温度; u 为环境温度随时间变化的速率。

联立式(7)和式(8), 可得电场耦合瓦斯和煤尘的混合气体产生的热能在三维空间的传递方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + (\sigma + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon'') \mathbf{E}^2 \quad (9)$$

式(9)中的 ρ , C_p , u , k , σ , ε_0 , ε'' 为常数, 只与所处环境介质的物理性质有关。因此, 由式(9)可得影响热能产生的可控参数有 3 个, 分别为电磁波耦合时间 t 、电场强度 \mathbf{E} 和电磁波频率 f 。

2 电磁波热效应仿真实验

2.1 仿真设置

本文采用多物理场仿真软件 COMSOL 进行电磁仿真。为优化仿真, 本文做以下假设: 瓦斯均匀且各向同性; 热物理性质和介电性质不变; 质量传递忽略不计。

电磁波热效应仿真模型如图 1 所示。模型由 2 层物质组成, 外层为煤尘, 内层为瓦斯。电磁波从入射端向瓦斯和煤尘混合气体发射能量, 终止于出射端。模型尺寸参数见表 1。

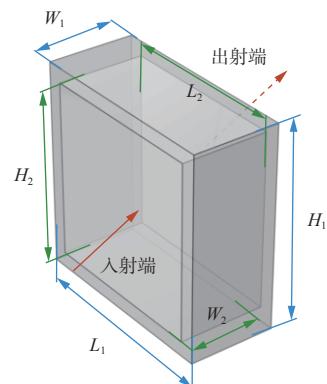


图 1 电磁波热效应仿真模型

Fig. 1 Simulation model of electromagnetic thermal effect

表 1 仿真模型几何参数

Table 1 Geometric parameters of simulation model

参数	L_1	W_1	H_1	L_2	W_2	H_2
值/cm	30	70	70	30	60	60

由于大功率射频设备的工作频率限定在 100~148.5 kHz^[15], 所以本文将电磁波频率 f 设定为

100 kHz。仿真设置环境初始温度为20 °C, 仿真时间为7×24 h, 不考虑气体对流传热。

介质的电学性质包括导电性(用电阻率或电导率描述)、介电性(用介电常数描述)、导磁性(用导磁率描述)和激电性(用极化特性参数描述)。瓦斯和煤尘的混合气体中磁性介质少, 因此导磁率一般可视为1。瓦斯和煤尘的电学性质参数分别见表2和表3。

表2 瓦斯的电学性质参数

Table 2 Electrical property parameters of gas

参数值来源	电导率/(10 ⁻⁵ S·m ⁻¹)	介电常数/(F·m ⁻¹)
文献[16]	—	0.77~5.57
文献[17]	—	0.25~0.80
文献[18]	4.70~7.30	—
文献[19]	3.57~4.54	—
文献[20]	8.33~1.10	—

表3 煤尘的电学性质参数

Table 3 Electrical property parameters of coal dust

参数值来源	电导率/(10 ⁻³ S·m ⁻¹)	介电常数/(F·m ⁻¹)
文献[21]	0.185~0.926	119.28~326.65
	0.209~0.730	5.74~15.28
	0.039~0.052	10.59~24.01
	0.086~0.312	77.30~263.47
文献[22]	1.25~1.66	500~540
	2.50~2.60	490~522
	2.50~2.60	485~518

介质的热学性质包括热容性(用恒压热容描述)、热传导性(用导热系数描述)和热膨胀性(用热膨胀系数描述)。瓦斯和煤尘的热学性质参数分别见表4和表5。

表4 瓦斯的热学性质参数

Table 4 Thermal property parameters of gas

参数值来源	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	恒压热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
文献[23]	0.2~1.8	—
文献[24]	0.022	2 570

表5 煤尘的热学性质参数

Table 5 Thermal property parameters of coal dust

参数值来源	密度/(kg·m ⁻³)	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	热膨胀系数/K ⁻¹	恒压热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
文献[14]	1 263	0.478	—	1 000
文献[25]	1 846	1.215	0.000 12	1 200

由于瓦斯和煤尘的电热学性质在不同文献中并不相同, 为保证电磁波热效应仿真结果的可靠性, 本

文仿真中选择表2—表4中参数最大值, 见表6。

表6 瓦斯和煤尘的电热学性质参数

Table 6 Electrothermal property parameters of gas and coal dust

参数	瓦斯	煤尘
电导率/(S·m ⁻¹)	1.1	2.6×10 ⁻³
介电常数/(F·m ⁻¹)	5.57	522
密度/(kg·m ⁻³)	—	1 846
导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.022	1.215
热膨胀系数/K ⁻¹	—	0.000 12
恒压热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	2 570	1 200

2.2 仿真结果分析

依据GB/T 3836.1—2021中可能堆积煤尘的电气设备表面温度最高不能超过150 °C的规定, 如果环境温度超过150 °C, 即认定会引爆瓦斯。为研究电磁波热效应引爆瓦斯的功率, 对不同发射功率的电磁波热效应进行仿真, 结果如图2所示。可看出GB/T 3836.1—2021规定的6 W发射功率电磁波经过7×24 h后, 电磁波热效应使环境温度最高上升至67 °C, 低于150 °C, 说明6 W是一个足够安全的发射功率; 田子建等^[4]提出的爆炸性环境中10.5 W发射功率的电磁波热效应使环境温度最高上升至102 °C, 符合GB/T 3836.1—2021中环境温度不超过150 °C的规定; 通过对不同发射功率的电磁波热效应仿真得出, 满足环境温度不超过150 °C规定的电磁波热效应安全阈发射功率为16.48 W。因此在仅考虑电磁波耦合瓦斯和煤尘混合气体的热效应时, 爆炸性环境电磁波的发射功率可提高至16.48 W, 远高于目前GB/T 3836.1—2021规定的6 W发射功率。

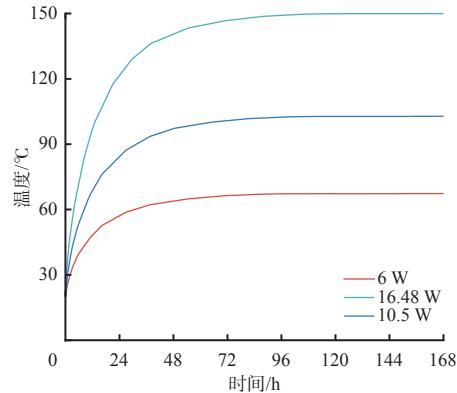


图2 电磁波热效应安全阈发射功率仿真结果

Fig. 2 Simulation results of safe threshold transmitting power of electromagnetic wave thermal effect

然而对于无线充电技术, 16.48 W的发射功率依然不满足应用要求。因此对20~100 W发射功率的电磁波热效应进行仿真, 结果如图3所示。可看出20~100 W发射功率的电磁波热效应最终均使环境

温度超过 150 ℃; 不同发射功率电磁波热效应的安全时长(电磁波耦合瓦斯和煤尘混合气体产生的热能不会使环境温度超过 150 ℃ 对应的时间段)不同, 20 W 发射功率电磁波热效应的安全时长为 27 h, 100 W 发射功率电磁波热效应的安全时长为 1.4 h, 随着电磁波发射功率的增加, 安全时长逐渐减少。

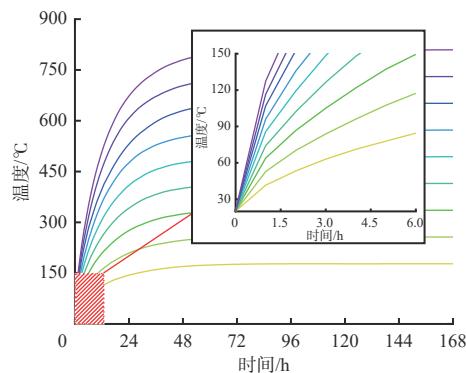


图 3 不同发射功率的电磁波热效应仿真结果

Fig. 3 Simulation results of electromagnetic wave thermal effect with different transmission powers

3 结论

1) 通过推导电磁波热效应方程可知, 影响电磁波耦合瓦斯和煤尘混合气体产生热能的可控参数为电磁波耦合时间、电场强度和电磁波频率。

2) 对不同发射功率的电磁波热效应进行仿真, 结果表明: 满足环境温度不超过 150 ℃ 的电磁波热效应安全阈发射功率为 16.48 W; 随着电磁波发射功率的增加, 电磁波热效应使环境温度不超过 150 ℃ 的安全时长逐渐减少, 但只要在安全时长内, 电磁波的发射功率不受限制。

参考文献(References):

- [1] GB/T 3836.1—2021 爆炸性环境 第 1 部分: 设备 通用 要求[S].
GB/T 3836.1-2021 Explosive atmospheres-Part 1: Equipment-General requirements[S].
- [2] 孙继平, 彭铭, 潘涛, 等. 无线电波防爆安全阈值研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(2): 1-5.
SUN Jiping, PENG Ming, PAN Tao, et al. Research on the safety threshold of radio wave explosion-proof[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(2): 1-5.
- [3] 梁伟峰, 孙继平, 彭铭, 等. 煤矿井下无线电波防爆安 全功率阈值研究[J]. 工矿自动化, 2022, 48(12): 123-128, 163.
LIANG Weifeng, SUN Jiping, PENG Ming, et al. Research on safe power threshold of radio wave explosion-proof in coal mine[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(12): 123-128, 163.
- [4] 田子建, 降滉舟, 常琳, 等. 半波振子结构在井下 5G 辐射场中的安全性分析[J]. 工矿自动化, 2023, 49(6): 159-167.
TIAN Zijian, JIANG Huangzhou, CHANG Lin, et al. Safety analysis of half wave oscillator structure in underground 5G radiation field[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(6): 159-167.
- [5] 刘晓阳, 马新彦, 刘坤, 等. 矿井 5G 电磁波辐射能量 安全性研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(7): 85-91.
LIU Xiaoyang, MA Xinyan, LIU Kun, et al. Research on the safety of 5G electromagnetic wave radiation energy in coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(7): 85-91.
- [6] 刘晓阳, 马新彦, 田子建, 等. 井下金属结构等效接收 天线的放电火花安全性研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(9): 126-130.
LIU Xiaoyang, MA Xinyan, TIAN Zijian, et al. Research on discharge spark safety of equivalent receiving antenna of underground metal structure[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(9): 126-130.
- [7] 常琳, 郑慧莹, 李鸣. 煤矿 5G 通信系统的安全性研究 [J]. 煤矿安全, 2021, 52(8): 137-141, 146.
CHANG Lin, ZHENG Huiying, LI Ming. Research on safety of 5G communication system in coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(8): 137-141, 146.
- [8] 范思涵, 杨维, 刘俊波. 井下金属结构近场耦合大环发 射天线电磁波能量安全性分析[J]. 工矿自动化, 2022, 48(6): 118-127.
FAN Sihan, YANG Wei, LIU Junbo. Analysis of electromagnetic wave energy safety of underground metal structure near-field coupled large loop transmitting antenna[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(6): 118-127.
- [9] 范思涵, 杨维, 田子建. 井下柱状金属结构接收电磁波 能量安全性分析[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-9 [2023-12-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20231206.1855.003.html>.
FAN Sihan, YANG Wei, TIAN Zijian. Safety analysis of electromagnetic wave energy received by underground columnar metal structures[J/OL]. Coal Science and Technology: 1-9 [2023-12-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20231206.1855.003.html>.
- [10] 伍颖. 煤矿井下电磁波远场辐射能量对瓦斯气体的安 全性分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
WU Ying. Safety analysis of electromagnetic wave far field radiation energy on gas in coal mine[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [11] 夏晨阳, 庄裕海, 卢振洲, 等. 高瓦斯矿井无线供电系 统安全容量研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(增刊 2): 71-74.
XIA Chenyang, ZHUANG Yuhai, LU Zhenzhou, et al.

Research of safety capability of wireless power supply system used in high gas mine[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(S2): 71-74.

[12] 孟积渐, 陈永冉. 煤矿井下无线充电安全影响因素分析及对策[J]. 煤矿安全, 2020, 51(12): 109-112.

MENG Jijian, CHEN Yongran. Analysis of influencing factors of wireless charging safety in underground coal mine and countermeasures[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(12): 109-112.

[13] GAO Jiancun, WANG Le, HU Shoutao, et al. The free radical mechanism of electromagnetic field affecting explosion of premixed methane[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 234. DOI: [10.1016/j.combustflame.2021.111649](https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111649).

[14] SU Chang, ZHANG Yongli, YANG Xinle, et al. Numerical simulation of the temperature field of coal subjected to microwave directional heating[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 45084-45095.

[15] 工业和信息化部. 工业和信息化部关于印发无线充电(电力传输)设备无线电管理暂行规定的通知[EB/OL]. [2023-10-22]. https://www.gov.cn/gongbao/2023/issue_10626/202308/content_6897062.html. Ministry of Industry and Information Technology. Notice of the Ministry of Industry and Information Technology on issuing *Interim Regulations on Radio Management of Wireless Charging (Power Transmission) Equipment*[EB/OL]. [2023-10-22]. https://www.gov.cn/gongbao/2023/issue_10626/202308/content_6897062.html.

[16] MOLDOVER M R, BUCKLEY T J. Reference values of the dielectric constant of natural gas components determined with a cross capacitor[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2001, 22(5): 859-885.

[17] SCHMIDT J W, MOLDOVER M R. Dielectric permittivity of eight gases measured with cross capacitors[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2003, 24(2): 375-403.

[18] 孙敦帅. 抽采煤层瓦斯运移分布的电阻率动态响应特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.

SUN Dunshuai. Characterization of resistivity dynamic response of gas transport distribution in extracted coal seam[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.

[19] 汤小燕, 陈昕怡, 郑雷清, 等. 含瓦斯煤岩导电特性研究综述[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(25): 10617-10624.

TANG Xiaoyan, CHEN Xinyi, ZHENG Leiqing, et al. Review and prospect of conductive characteristics of gas-containing coal rocks[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(25): 10617-10624.

[20] 陈立, 张英华, 黄志安, 等. 不同粒径煤吸附瓦斯过程中的热电效应[J]. 工程科学学报, 2018, 40(4): 416-426.

CHEN Li, ZHANG Yinghua, HUANG Zhi'an, et al. Thermoelectric effect in process of gas adsorption in different particle sizes of coal[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2018, 40(4): 416-426.

[21] 杨耸. 受载含瓦斯煤体电性参数的实验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2012.

YANG Song. Experimental study on the electrical parameters of being loaded gas-filled coal[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2012.

[22] 李祥春, 张琪, 安振兴, 等. 不同煤体电性参数影响因素实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(3): 570-578.

LI Xiangchun, ZHANG Qi, AN Zhenxing, et al. Experimental study of influencing factors of electrical parameters of different kinds of coal mass[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2021, 50(3): 570-578.

[23] GORODILOV B G, SUMAROKOV V V, JEŽOWSKI A, et al. Thermal conductivity of O₂-and N₂-doped solid CH₄[J]. *Journal of Low Temperature Physics*, 2001, 122: 187-193.

[24] LIANG Zhi, TSAI H L. Molecular dynamics simulations of self-diffusion coefficient and thermal conductivity of methane at low and moderate densities[J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2010, 297(1): 40-45.

[25] 王和堂, 杨景皓, 谭江龙, 等. 难注水煤层液态CO₂加注多场耦合演化规律研究[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-12 [2024-03-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20231107.0841.001.html>.

WANG Hetang, YANG Jinghao, TAN Jianglong, et al. Research on multi-field coupling evolution law of liquid CO₂ filling in difficult water injection seams[J/OL]. *Coal Science and Technology*: 1-12 [2024-03-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20231107.0841.001.html>.