

文章编号: 1671-251X(2023)12-0108-06

DOI: [10.13272/j.issn.1671-251x.2023070080](https://doi.org/10.13272/j.issn.1671-251x.2023070080)

# 金属振子结构在矿井5G辐射场中的安全功率分析

董红涛<sup>1</sup>, 田子建<sup>2</sup>, 侯明硕<sup>2</sup>, 赵晖<sup>3</sup>, 卫若茜<sup>3</sup>

(1. 陕西彬长小庄矿业有限公司, 陕西 咸阳 713500;  
2. 中国矿业大学(北京)人工智能学院, 北京 100083;  
3. 陕西彬长矿业集团有限公司, 陕西 咸阳 712000)

**摘要:**煤矿井下存在瓦斯等易燃易爆气体,5G无线通信系统基站天线辐射出的电磁波被井下金属结构吸收,在金属结构断点处产生放电火花,当电火花能量达到瓦斯气体的最小点火能时可能发生爆炸,限制了5G技术在煤矿井下的应用。为了评估5G无线通信基站射频功率的安全性,通过分析金属结构耦合电磁波的方式,得到射频功率、最大辐射场强与距离的关系;以最小点火能为安全判定标准,得出天线负载的接收功率小于2.625 W时,可确保不会引起瓦斯爆炸;分析得出煤矿井下应优先选择700 MHz作为5G工作频段;通过分析方向性系数,得出应选择臂长与波长比为0.65的对称振子天线金属结构进行研究,对称振子天线金属结构安全电场强度为202.9 V/m,最小安全距离为0.2 m。仿真结果表明:在距离发射天线小于0.2 m的区域电场分布极不均匀,在距离发射天线大于0.2 m的区域电场分布较均匀;在距离发射天线大于0.2 m的区域导致瓦斯爆炸的最小射频功率为27.45 W。

**关键词:**矿井5G; 安全功率; 对称振子; 射频设备; 最小点火能; 安全电场强度; 最小安全距离

中图分类号: TD655.3 文献标志码: A

Safety power analysis of metal oscillator structure in mine 5G radiation field

DONG Hongtao<sup>1</sup>, TIAN Zijian<sup>2</sup>, HOU Mingshuo<sup>2</sup>, ZHAO Hui<sup>3</sup>, WEI Ruoxi<sup>3</sup>

(1. Shaanxi Binchang Xiaozhuang Mining Co., Ltd., Xianyang 713500, China; 2. School of Artificial Intelligence, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;  
3. Shaanxi Binchang Mining Group Co., Ltd., Xianyang 712000, China)

**Abstract:** There are flammable and explosive gases such as gas underground in coal mines. The electromagnetic waves radiated by the 5G wireless communication system base station antenna are absorbed by the underground metal structure, generating discharge sparks at the metal structure breakpoint. When the energy of the electric spark reaches the minimum ignition energy of gas, an explosion may occur, which limits the application of 5G technology in coal mines. In order to evaluate the safety of the RF power of 5G wireless communication base stations, the relationship between RF power, maximum radiation field strength, and distance is obtained by analyzing the coupling of electromagnetic waves with metal structures. Using the minimum ignition energy as the safety criterion, it can be concluded that when the receiving power of the antenna load is less than 2.625 W, it can ensure that it will not cause gas explosions. The analysis shows that 700 MHz should be given priority as the 5G working frequency band in coal mines underground. By analyzing the directional coefficient, it is concluded that a symmetrical oscillator antenna metal structure with an arm length to wavelength ratio of 0.65 should be chosen for research. The safe electric field strength of the symmetrical oscillator antenna metal structure

收稿日期: 2023-07-22; 修回日期: 2023-12-06; 责任编辑: 胡娟。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074305)。

作者简介: 董红涛(1975—), 男, 内蒙古通辽人, 高级工程师, 从事矿井智能化系统应用研究工作, E-mail: [359072147@qq.com](mailto:359072147@qq.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: [13911550940@126.com](mailto:13911550940@126.com)。

引用格式: 董红涛, 田子建, 侯明硕, 等. 金属振子结构在矿井5G辐射场中的安全功率分析[J]. 工矿自动化, 2023, 49(12): 108-113.

DONG Hongtao, TIAN Zijian, HOU Mingshuo, et al. Safety power analysis of metal oscillator structure in mine 5G radiation field[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(12): 108-113.



扫码移动阅读

is 202.9 V/m, and the minimum safe distance is 0.2 m. The simulation results show that the electric field distribution is extremely uneven in areas less than 0.2 m away from the transmitting antenna. The electric field distribution is relatively even in areas more than 0.2 m away from the transmitting antenna. The minimum radio frequency power that causes a gas explosion in an area greater than 0.2 m from the transmitting antenna is 27.45 W.

**Key words:** mine 5G; safe power; symmetric oscillator; RF equipment; minimum ignition energy; safe electric field strength; minimum safe distance

## 0 引言

随着我国经济的快速发展,煤炭开采量呈现出逐年增多态势,国家对煤矿安全开采提出更高要求。传统的井下无线通信方式不能满足煤矿智能化建设的要求,5G具有传输速率高、网络频谱宽、时延低、可靠性高、容量大等优势,成为井下新一代无线通信技术的较佳选择<sup>[1,2]</sup>。但是,5G通信技术采用的频段较高,高频电磁波在煤矿井下衰减大,导致信号覆盖距离短。如果通过增大基站天线发射功率的方式实现煤矿井下5G信号覆盖,那么巷道内的金属结构会吸收5G通信基站辐射的电磁波,可能会在结构断裂点处发生放电。当放电能量达到瓦斯气体的最小点火能时,可能导致瓦斯爆炸<sup>[3-5]</sup>。因此,国外对煤矿井下无线射频设备辐射功率进行了严格限制,制定了相关标准<sup>[6-8]</sup>。国内也制定了GB/T 3836.1—2021《爆炸性环境 第1部分:设备通用要求》<sup>[9]</sup>,规定煤矿井下爆炸性环境中使用的无线发射设备的射频功率(发射器的有效输出功率与天线增益的乘积)不得大于6 W。

目前国内关于井下电磁安全研究尚处于起步阶段。孙继平等<sup>[10]</sup>针对金属结构处于基站天线近远场时的能量耦合情况,提出了磁耦合共振和电磁波辐射谐振能量耦合2种电磁波能量耦合模型。彭霞<sup>[11]</sup>研究了矿井电磁环境中金属结构断点发生摩擦对瓦斯安全性的影响,得到射频辐射场中刮擦射频放电火花点燃瓦斯气体的门限功率为0.168 W。刘晓阳等<sup>[12-13]</sup>探讨了5G辐射系统的多个发射天线之间功率叠加增大点燃瓦斯气体可能性的问题,并对井下金属结构等效接收天线的放电火花安全性进行了研究。梁伟峰等<sup>[14]</sup>指出煤矿井下若没有能作为接收天线的细长结构物体(如起重机)时,连续无线电波防爆安全功率阈值应为8 W。孙继平等<sup>[15]</sup>进一步指出,国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)在参考欧盟标准时,错误地将无线电磁波安全防爆点火功率阈值修改为射频设备的辐射功率,从而使得GB/T 3836.1—2021《爆炸性环境第1部分:设备通用要求》中的规定限制了射频设备

在煤矿井下的使用。张勇<sup>[16]</sup>针对电磁波辐射近场区的放电进行了仿真分析,结果表明在近场区域金属结构断点处可感应到较大电势差,但无法发生击穿空气的放电情况。

本文基于天线理论,通过分析金属结构耦合电磁波的方式,得出金属结构的放电功率与电场强度的关系;结合瓦斯气体的最小点火能,得出安全电场强度和最小安全距离,进而得到发射天线的安全射频功率。

## 1 井下金属结构能量耦合特性

将金属结构类比为接收天线,耦合电磁波的过程类比为接收天线吸收电磁波,金属结构断点处的放电结构类比为天线负载,金属结构耦合电磁波的过程如图1所示。

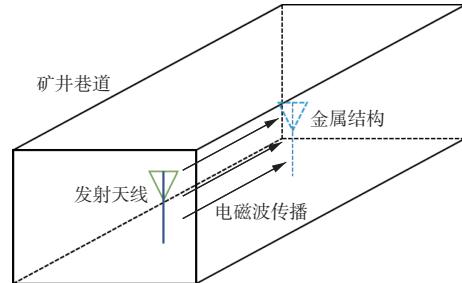


图1 金属结构耦合电磁波的过程

Fig. 1 The process of coupling electromagnetic waves with metal structures

### 1.1 接收天线负载的接收功率

根据天线理论<sup>[17-18]</sup>,电磁环境中接收天线负载可接收到的功率 $P_s$ 为

$$P_s = S_i A_e e_1 e_2 \quad (1)$$

$$S_i = \frac{1}{2} \frac{E^2}{z} \quad (2)$$

$$A_e = \frac{G_s \lambda^2}{4\pi} \quad (3)$$

$$G_s = \eta_i D_s \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (5)$$

式中: $S_i$ 为接收天线处入射电磁波功率密度; $A_e$ 为接

收天线的等效面积;  $e_1$  为接收天线的阻抗匹配效率;  $e_2$  为接收天线的极化匹配效率;  $E$  为接收天线处的电场强度;  $z$  为自由空间的波阻抗;  $G_s$  为接收天线的增益;  $\lambda$  为电磁波波长;  $\eta_i$  为天线系数;  $D_s$  为接收天线的方向性系数;  $c$  为真空中的光速;  $f$  为入射电磁波的频率。

金属结构耦合电磁波发生放电时的等效放电电路如图 2 所示<sup>[19]</sup>。 $U_0$  为金属结构感应到电磁波后产生的等效电动势,  $R_0$  为放电回路的等效电阻,  $L$  为放电回路等效电抗,  $R$  为等效放电电阻,  $C$  为金属结构断点处等效电容。整个放电回路总阻抗  $Z = R_0 + j\omega R + \frac{R}{j\omega CR + 1}$  ( $\omega$  为电流角频率), 其实部为  $R + \frac{R}{1 + (R\omega C)^2}$ , 虚部为  $j\left(\omega L - \frac{R}{1 + (R\omega C)^2}\right)$ 。当阻抗虚部为 0 时, 放电回路发生谐振, 接收天线的阻抗匹配效率  $e_1=100\%$ , 天线负载接收到的功率最大。

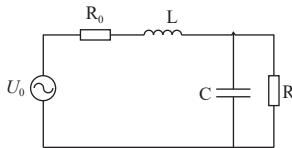


图 2 等效放电电路

Fig. 2 Equivalent discharge circuit

天线的极化是指天线在给定方向(一般指最大电场强度方向)上所辐射电磁波的极化。电磁波的极化状态可分为线极化(又分为垂直极化和水平极化)、圆极化和椭圆极化。接收天线与发射天线若具有相同极化特性, 则极化匹配效率  $e_2=100\%$ , 接收天线可接收入射电磁波的全部能量。

当接收天线的阻抗匹配和极化匹配时, 根据式(1)—式(5)得到接收天线负载可接收到的功率为

$$P_s = \frac{\eta_i D_s E^2 c^2}{960\pi^2 f^2} \quad (6)$$

## 1.2 发射天线产生的最大电场强度

根据天线理论可知, 发射天线在最大电场强度方向(该方向上任意一点的电场强度是该点垂直平面上的最大值)产生的电场强度为

$$E_r = \frac{\sqrt{60P_0G_0}}{r} \quad (7)$$

式中:  $P_0$  为发射天线的辐射功率;  $G_0$  为发射天线的增益;  $r$  为电场中的点与发射天线中点的距离。

将辐射功率  $P_0$  与发射天线的增益  $G_0$  的乘积定义为射频功率  $P_r$ , 即

$$P_r = P_0G_0 \quad (8)$$

将式(8)代入式(7), 得到发射天线在最大电场

强度方向上产生的电场强度  $E_r$  与射频功率  $P_r$  的关系:

$$E_r = \frac{\sqrt{60P_r}}{r} \quad (9)$$

## 2 井下安全能量分析

放电火花能否点燃可燃气体, 主要取决于放电火花在热起燃时间内释放的能量能否超过气体的最小点火能。将金属放电结构类比为天线负载, 即天线负载接收到的功率为金属结构的放电功率, 根据式(6), 天线负载的接收功率与天线的效率、方向性系数、电场强度和电磁波频率有关。下文将对最小点火能、金属的结构、电磁波频率和安全电场强度进行分析讨论。

### 2.1 最小点火能

文献[10-13]采用 GB/T 3836.27—2019《爆炸性环境 第 27 部分 静电危害试验》判断瓦斯的最小点火能<sup>[20]</sup>, 该标准规定: 在甲烷-空气最易引燃体积分数比为 8.0%~8.6% 的条件下, 该混合气体的最小点燃能量为 0.28 mJ。但电磁环境与静电环境中的引燃情况不一样, 静电环境中是由于金属尖端感应到上万伏电压从而发生火花放电, 而电磁环境中金属结构的尖端无法感应到上万伏电压, 因此不应选择最小点燃能量为 0.28 mJ 作为判断标准。本安电路的放电火花发生在低电压情况下, 与电磁环境中金属结构放电相似, 因此应选择本安电路中判断引燃甲烷-空气混合气体的功率和能量标准。

根据 GB/T 3836.4—2021《爆炸性环境 第 4 部分: 由本质安全型“i”保护的设备》标准<sup>[21]</sup>, 在甲烷-空气最易引燃体积分数比为 8.0%~8.6% 的条件下, 点燃甲烷-空气混合气体的最小能量为 525 μJ。因此, 放电结构在热起燃时间内释放的火花能量小于 525 μJ, 即可保证不会引燃瓦斯气体。GB/T 3836.1—2021《爆炸性环境 第 1 部分: 设备通用要求》中规定 I 类设备(甲烷-空气混合气体环境)的热起燃时间为 200 μs, 若金属结构产生火花的功率小于 2.625 W, 则在热起燃时间内火花释放的能量小于最小点火能。根据上文分析, 将放电结构等效为接收天线负载, 即天线负载的接收功率需小于 2.625 W, 满足该条件可确保不会引起瓦斯爆炸。

### 2.2 金属结构选择

不同天线结构的方向性系数不同, 由式(6)可知, 接收天线的方向性系数越大, 接收到的功率也越大。对称振子天线是结构最简单的天线, 矿井设备中的金属结构很容易形成等效对称振子天线。当对称振子天线的臂长  $l$  与波长  $\lambda$  的比值为 0.65 时, 其最

大方向性系数为3.29,因此选择臂长 $l$ 与波长 $\lambda$ 的比值为0.65的对称振子天线进行研究。

### 2.3 频率选择

煤矿井下煤尘和粉尘浓度高,不利于高频电磁波传输。《工业和信息化部关于调整700MHz频段频率使用规划的通知》<sup>[22]</sup>指出,将原用于广播电视业务的702~798MHz频谱资源重新规划用于移动通信系统<sup>[14]</sup>。700MHz频段与常用的2.6,3.5,4.9GHz频段相比,具有信号传输损耗低、无线传输距离远、绕射能力强等优点。因此,煤矿井下应优先选择700MHz作为5G工作频段,以提高矿井无线传输距离和绕射能力,增强系统稳定性和可靠性,减少基站用量、组网成本和维护工作量。

### 2.4 安全电场强度和安全距离

金属结构放电释放的功率小于2.625W,即接收天线负载接收功率小于2.625W,可保证电火花不会点燃瓦斯。将 $P_s < 2.625\text{ W}$ , $D_s = 3.29$ , $\eta_i = 100\%$ , $f = 700\text{ MHz}$ 代入式(6),得 $E < 202.9\text{ V/m}$ ,表明对称振子天线金属结构周围的电场强度小于202.9V/m时,金属结构耦合电磁波产生的放电火花不会点燃瓦斯,因此安全电场强度 $E_a = 202.9\text{ V/m}$ 。

由式(9)可知最大电场强度与到发射天线的距离关系,若发射天线在某一点处产生的最大电场强度小于或等于安全电场强度,即 $E_r \leq E_a$ ,则可保证该点的金属结构产生的电火花不足以引起瓦斯爆炸,此时该点到发射天线中点的距离 $r$ 为最小辐射安全距离,距离大于 $r$ 的区域为辐射安全区域。

## 3 仿真验证

利用物理场仿真软件COMSOL建立宽6m、高4m、深10m的巷道仿真模型,在巷道中心位置放置发射天线,如图3所示。

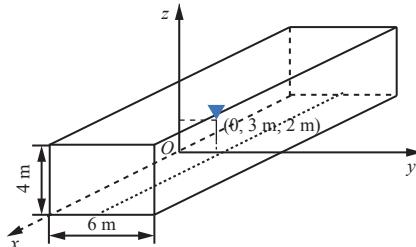


图3 巷道仿真模型

Fig. 3 Roadway simulation model

选择半波对称振子天线作为发射天线,其增益为1.64,其他仿真参数设置见表1。

### 3.1 半波对称振子发射天线产生的电场

对半波对称振子发射天线产生的电场进行仿

表1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter settings

项目	参数
射频功率/W	6, 24, 48
电磁波频率/MHz	700
巷道厚度/m	0.1
巷道材料	混凝土
电磁波极化方式	垂直极化
巷道相对介电常数	5.31
巷道电导率/(S·m <sup>-1</sup> )	0.066

真,射频功率为6W的发射天线产生的电场强度等值面分布如图4所示。

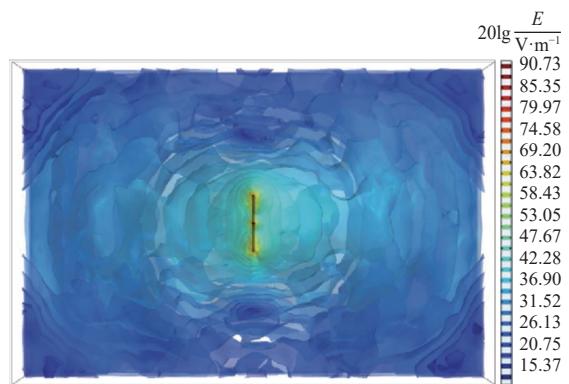


图4 电场强度等值面分布

Fig. 4 Equivalent surface distribution of electric field strength

由图4可知,电场强度与发射天线的距离成反比,在靠近天线的区域电场强度较大,在远离发射天线的区域电场强度较小。在靠近天线的区域电场分布极不均匀,在天线中点和两端电场强度较大;在远离天线的区域(大概半个波长之外),电场分布较均匀,呈圆形向外逐渐减小,中轴线上电场强度比两侧略大。

### 3.2 不同射频功率的发射天线产生的电场

对不同射频功率的发射天线产生的电场进行仿真,射频功率 $P_r$ 依次取6,24,48W,从中轴线上距离发射天线中点0.1m开始,每隔0.1m采集该点的电场强度。将仿真结果与根据式(9)得到的计算值进行对比,结果如图5所示。可看出距离发射天线越近的位置电场强度越大;在距离发射天线小于0.2m的区域电场强度仿真值与计算值相差较大,这是由于发射天线近场区域电场分布极不均匀导致的,电场仿真结果也验证了这一点;而在距离发射天线大于0.2m的区域电场强度仿真值与计算值相差较小,且电场分布较均匀。因此,在距离发射天线大于0.2m的区域可近似用式(9)计算电场强度。

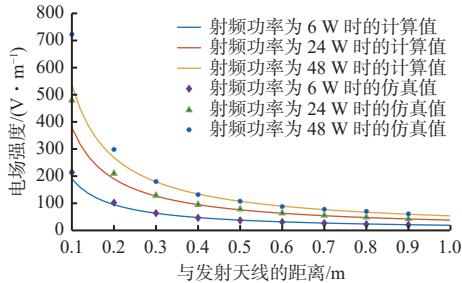


图 5 电场强度与发射天线距离的关系

Fig. 5 The relationship between electric field strength and transmitting antenna distance

### 3.3 结果分析

由仿真结果可知,在距离发射天线小于 0.2 m 的区域电场分布较复杂,不适合用式(6)计算天线负载的接收功率,因此本文分析距离发射天线大于 0.2 m 的区域。距离发射天线越近的位置电场强度越大,天线负载接收到的功率也越大,因此应将  $r = 0.2$  m 设置为最小安全距离。此外,在距离发射天线小于 0.2 m 的区域不存在任何金属结构也符合实际情况。若最小安全距离  $r = 0.2$  m, 安全电场强度  $E_a = 202.9$  V/m, 最大电场强度满足  $E_r < E_a$ , 则根据式(9), 发射天线的射频功率  $P_r = 27.45$  W, 表明在距离发射天线大于 0.2 m 的区域, 发射天线射频功率  $P_r = 27.45$  W 时, 金属结构不会因耦合电磁波产生电火花导致瓦斯气体发生爆炸。

### 4 结论

1) 通过分析金属结构耦合电磁波的方式, 将放电结构等效为接收天线的负载, 放电功率等效为天线负载接收到的功率, 得出在极化匹配和阻抗匹配的条件下接收天线负载接收到的功率, 即火花功率。

2) 通过分析甲烷-空气混合气体的最小点火能, 得出天线负载的接收功率小于 2.625 W 时, 可确保不会引起瓦斯爆炸。通过分析方向性系数, 得出应选择臂长与波长比值为 0.65 的对称振子金属结构进行研究。煤矿井下应优先选择 700 MHz 作为 5G 工作频段。通过计算得出安全电场强度  $E_a$  为 202.9 V/m。

3) 仿真结果表明: 在距离发射天线小于 0.2 m 的区域电场分布极不均匀, 在距离发射天线大于 0.2 m 的区域电场分布较均匀; 在距离发射天线大于 0.2 m 的区域导致瓦斯爆炸的最小射频功率为 27.45 W, 该结果可为制定 5G 无线通信基站射频功率阈值提供参考。

### 参考文献(References):

[1] 孙继平. 煤矿信息化与自动化发展趋势[J]. 工矿自动

化, 2015, 41(4): 1-5.

SUN Jiping. Development trend of coal mine informatization and automation[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(4): 1-5.

[2] 孙继平, 陈晖升. 智慧矿山与 5G 和 WiFi6[J]. 工矿自动化, 2019, 45(10): 1-4.

SUN Jiping, CHEN Huisheng. Smart mine with 5G and WiFi6[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(10): 1-4.

[3] 孙继平. 煤矿智能化与矿用 5G[J]. 工矿自动化, 2020, 46(8): 1-7.

SUN Jiping. Coal mine intelligence and mine-used 5G[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(8): 1-7.

[4] 陈晓贝, 魏克军. 全球 5G 研究动态和标准进展[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 16-19.

CHEN Xiaobei, WEI Kejun. Global research and standardization progress of 5G[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 16-19.

[5] 霍振龙, 张袁浩. 5G 通信技术及其在煤矿的应用构想[J]. 工矿自动化, 2020, 46(3): 1-5.

HUO Zhenlong, ZHANG Yuanhao. 5G communication technology and its application conception in coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(3): 1-5.

[6] BS 6656: 2002 Assessment of inadvertent ignition of flammable atmospheres by radio-frequency radiation-Guide[S].

[7] CLC/TR 50427: 2004 Assessment of inadvertent ignition of flammable atmospheres by radio-frequency radiation-Guide[S].

[8] IEC 60079-0: 2017 Explosive atmospheres-Part 0: Equipment-General requirements[S].

[9] 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].

[10] 孙继平, 贾倪. 矿井电磁波能量安全性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(6): 1002-1008.

SUN Jiping, JIA Ni. Safety study of electromagnetic wave energy in coal mine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(6): 1002-1008.

[11] 彭霞. 矿井电磁波辐射能量对瓦斯安全性的影响[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4): 542-547.

PENG Xia. Electromagnetic wave radiation energy influences on safety of gas in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4): 542-547.

[12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 张勇. 煤矿井下无线射频近场谐振耦合防爆电磁能仿真分析[J]. 煤矿安全, 2022, 53(8): 134-138.  
ZHANG Yong. Simulation analysis of explosion-proof electromagnetic energy coupled with radio frequency near field resonance in underground coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(8): 134-138.
- [17] 李褚益. 微波技术与微波电路[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2007.  
LI Chuyi. Microwave technology and microwave
- circuits[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2007.
- [18] 钟顺时. 天线理论与技术[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2015.  
ZHONG Shunshi. Antenna theory and techniques[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015.
- [19] EXCELL P S, MADDOCKS A J. Assessment of worst-case receiving antenna characteristics of metallic industrial structures. Part 1: Electrically-small structures[J]. Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineers, 1986, 56(1): 27-32.
- [20] GB/T 3836.27—2019 爆炸性环境 第 27 部分 静电危害试验[S].  
GB/T 3836.27-2019 Explosive atmospheres-Part 27: Electrostatic hazards-Test[S].
- [21] GB/T 3836.4—2021 爆炸性环境 第 4 部分: 由本质安全型“i”保护的设备[S].  
GB/T 3836.4-2021 Explosive atmospheres-Part 4: Equipment protection by intrinsic safety "i"[S].
- [22] 工业和信息化部. 工业和信息化部关于调整 700 MHz 频段频率使用规划的通知 [EB/OL]. [2023-06-10]. [https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/txy/art/2020/art\\_4d7d0b8cf92b448e9817eea55efb2ea7.html](https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/txy/art/2020/art_4d7d0b8cf92b448e9817eea55efb2ea7.html). Ministry of Industry and Information Technology. Notice of the Ministry of Industry and Information Technology on adjusting the use plan of the 700 MHz frequency band [EB/OL]. [2023-06-10]. [https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/txy/art/2020/art\\_4d7d0b8cf92b448e9817eea55efb2ea7.html](https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/txy/art/2020/art_4d7d0b8cf92b448e9817eea55efb2ea7.html).

(上接第 107 页)

- [19] 卢恒, 张传宝, 仵振华, 等. 综放工作面过空巷矿压显现规律及控制技术研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(6): 47-59.  
LU Heng, ZHANG Chuanbao, WU Zhenhua, et al. Study on ground pressure and control technology of a fully mechanized top coal caving longwall face passing a pre-driven roadway[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(6): 47-59.
- [20] 王同旭, 周永晖, 江东海. 坚硬顶板断裂释放能量及其对煤层扰动影响研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(4): 30-38.  
WANG Tongxu, ZHOU Yonghui, JIANG Donghai. Study on energy released from hard roof fracture and its influence on coal seam disturbance[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology

(Natural Science), 2022, 41(4): 30-38.

- [21] 徐刚, 张春会, 蔺星宇, 等. 基于分区支承力学模型的综放工作面顶板矿压演化与压架预测[J]. 煤炭学报, 2022, 47(10): 3622-3633.  
XU Gang, ZHANG Chunhui, LIN Xingyu, et al. Predicting ground pressure evolution and support crushing of fully mechanized top coal caving face based on zoning support mechanical model[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(10): 3622-3633.
- [22] 李金华, 郑承先, 谷拴成, 等. 直接顶-基本顶耦合作用下采场顶板断裂力学模型研究与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(7): 123-129.  
LI Jinhua, ZHENG Chengxian, GU Shuancheng, et al. Research and application of fracture mechanics model of stope roof under the coupling of direct roof and basic roof[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(7): 123-129.