

煤矿机电与智能化

煤矿井下 5G 电磁波瓦斯引燃机理及功率安全阈值

张 勇¹, 孟积渐¹, 陈湘源², 王晓峰², 陈晓晶³, 陈海舰³, 郭子文¹(1. 安标国家矿用产品安全标志中心有限公司 防爆与电气安全技术标准研究院, 北京 100013; 2. 国能榆林能源有限责任公司, 陕西 榆林 719054;
3. 中煤科工集团常州研究院有限公司, 江苏 常州 213035)

摘 要: 5G 技术凭借其大带宽、低时延和广连接等优势, 在煤矿行业的智能化转型中展现出巨大潜力。针对 5G 射频信号在煤矿井下使用可能引发瓦斯爆炸的潜在风险, 以及现行标准对 5G 射频应用的局限性展开系统性研究。首先, 对现有防爆标准进行了溯源与分析, 阐明其历史演进与适用范围, 并建立了煤矿井下射频设备发射端安全阈值评价体系。随后, 综合考虑低温等离子体动力学、电磁波传播理论和瓦斯爆炸反应动力学等因素, 构建了空气/甲烷混合气体环境中电磁波功率安全阈值的通用计算模型。通过半波振子天线的参数匹配设计, 实现了射频能量对放电电极的有效馈入, 并在试验室条件下完成了瓦斯点燃试验。结果表明, 射频能量能够引燃瓦斯, 且安全阈值受到调制方式、频率、温湿度、能量积聚、天线增益及多源叠加等多重因素的共同影响。研究发现, 5G NR 700 MHz 频段电磁波的功率安全阈值不低于 43.3 W; 以发射端作为评价指标时, 不需要考虑天线增益对安全阈值的影响。基于相关系数与天线分集的方法可有效量化多源叠加对安全评估的影响, 并指出在满足特定条件时可忽略多源叠加, 从而提升射频功率的利用效率。本研究明确了煤矿井下 700 MHz 频段 5G 基站的功率安全阈值, 为其他频段及射频设备的安全研究提供了参考, 并强调了修订相关标准的重要性, 以便在复杂井下环境中更加精准地评估电磁波引燃易燃气体的风险, 从而助力煤矿行业的智能化转型与安全生产。

关键词: 煤矿; 5G 技术; 射频电磁能; 防爆安全; 安全阈值; 低温等离子体; 多源叠加**中图分类号:** X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)03-1804-23

Ignition mechanism of methane by 5G electromagnetic waves and power safety thresholds in underground coal mines

ZHANG Yong¹, MENG Jijian¹, CHEN Xiangyuan², WANG Xiaofeng², CHEN Xiaojing³,
CHEN Haijian³, GUO Ziwen¹

(1. Explosion-proof and Electrical Safety Technical Standards Institute, China Mine Products Safety Approval and Certification Center, Beijing, 100013, China; 2. GuoNeng Yulin Energy Co., Ltd., Yulin 719054, China; 3. China Coal Technology & Engineering Group Corporation Changzhou Research Institute Co., Ltd., Changzhou 213035, China)

Abstract: 5G technology, with its advantages of high bandwidth, low latency, and extensive connectivity, has shown great potential in driving the intelligent transformation of the coal mining industry. This study systematically investigates the

收稿日期: 2024-11-14 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.1400

基金项目: 中国煤炭科工集团科技创新创业资金重点资助项目 (2022-2-ZD003)

作者简介: 张 勇 (1979—), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 研究员。E-mail: zhangyong509@126.com

通讯作者: 郭子文 (1996—), 男, 河南焦作人。E-mail: gzw19@tsinghua.org.cn

引用格式: 张勇, 孟积渐, 陈湘源, 等. 煤矿井下 5G 电磁波瓦斯引燃机理及功率安全阈值[J]. 煤炭学报, 2025, 50(3): 1804-1826.

ZHANG Yong, MENG Jijian, CHEN Xiangyuan, et al. Ignition mechanism of methane by 5G electromagnetic waves and power safety thresholds in underground coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(3): 1804-1826.



移动阅读

potential risk of methane gas explosions triggered by 5G RF signals in underground coal mines and the limitations of current standards for 5G RF applications. First, existing explosion-proof standards were traced and analyzed to clarify their historical evolution and scope. An evaluation system for the safety thresholds of RF device transmitters in underground coal mines was then established. Subsequently, a universal calculation model for electromagnetic wave power safety thresholds in air/methane mixtures was developed by integrating low-temperature plasma dynamics, electromagnetic wave propagation theory, and methane explosion reaction kinetics. Through parametric matching design of a half-wave dipole antenna, efficient RF energy coupling to the discharge electrode was achieved, and laboratory experiments were conducted to ignite methane gas. The results demonstrated that RF energy can ignite methane, and the safety threshold is influenced by multiple factors, including modulation mode, frequency, temperature and humidity, energy accumulation, antenna gain, and multi-source superposition. The study found that the power safety threshold for the 5G NR 700 MHz band is not lower than 43.3 W. When evaluating the safety threshold based on the transmitter, the impact of antenna gain can be neglected. A method based on correlation coefficients and antenna diversity was developed to effectively quantify the impact of multi-source superposition on safety evaluations, indicating that under certain conditions, the effect of multi-source superposition can be ignored, thereby improving the utilization efficiency of RF power. This study clarified the power safety threshold for 700 MHz 5G base stations in underground coal mines, provided a reference for the safety research of other frequency bands and RF devices, and emphasized the necessity of revising relevant standards. Such revisions aim to precisely assess the risk of RF signals igniting flammable gases in complex underground environments, thereby supporting the intelligent transformation and safe production of the coal mining industry.

Key words: coal mining; 5G technology; radio frequency electromagnetic energy; explosion-proof safety; safety threshold; low-temperature plasma; multi-source superposition

0 引 言

在当今科技高速发展的背景下, 5G 通信技术以其高带宽、低时延和大连接等特性, 正在深刻改变各行各业的生产和运作方式^[1-3]。作为新一代信息通信技术的代表, 5G 不仅能够大幅提升消费领域的用户体验, 还能够在工业领域、尤其是能源和矿业行业的智能化转型中发挥至关重要的作用。煤矿作为能源生产的重要组成部分, 长期以来存在高风险、高成本、生产环境复杂等问题。为了有效提升煤矿的生产效率和安全性, 推动煤矿智能化建设成为必然趋势, 而 5G 通信技术则为实现这一目标提供了强有力的技术支持。

煤矿井下的环境极为复杂, 矿井内存在瓦斯、煤尘等爆炸性气体, 这给设备的安全使用带来了极大的挑战。传统的有线通信方式虽然相对稳定, 但在井下环境中布线困难, 维护成本高, 且灵活性差, 难以适应现代化煤矿对高效、灵活通信系统的需求。因此, 5G 无线通信技术凭借其高效的无线传输能力和低时延的优势, 成为井下通信技术的首选。通过 5G 技术, 可以实现井下设备的无线连接, 支持高清视频监控、无人驾驶设备控制、传感器网络数据采集等多种功能, 从而为煤矿的智能化发展提供全面的通信支撑^[4-6]。

然而, 5G 技术在煤矿井下的应用并非毫无挑战。

井下环境的特殊性要求所有电气设备必须严格遵守相关防爆标准, 以防止电气设备在工作过程中产生火花或高温, 进而引发瓦斯或煤尘爆炸。对于射频电磁能防爆问题, GB/T 3836.1—2021《爆炸性环境 第 1 部分: 设备 通用要求》中要求井下射频设备的等效全向辐射功率(射频端口功率与天线增益之和)不得超过 6 W。除此之外, 由于基础研究不足, 国内井下设备准入时对于煤矿井下的 5G 基站, 增加了多源功率代数和不得超过 6 W 的要求, 进一步限制了 5G 基站发射功率。上述规定旨在防止射频设备在爆炸性环境中产生危险的电磁波能量, 从而避免可能的引爆风险^[7-8]。

但是, 射频功率的限制为 5G 技术在煤矿中的应用带来了诸多挑战。受此功率限制, 5G 基站在井下的信号覆盖范围显著缩小, 边缘速率明显降低。实际测试显示, 5G 在井下的最大通信距离仅为 100~200 m, 采掘工作面的传输距离甚至不足 30 m, 这与 5G 在地面环境下可实现的千米级传输形成了鲜明对比。受限于较短的通信距离, 想要实现整个矿井的信号覆盖, 煤矿需要部署大量的 5G 基站, 而这些基站不仅需要克服安装位置和条件的限制, 还会带来巨大的设备采购成本和高昂的维护费用, 给煤矿的日常运营带来巨大的压力。

除了 5G 通信基站外, 煤矿井下还广泛使用其他射频设备, 如用于地质勘探和安全预警的超前探测雷

达、无线传感器网络和人员定位系统等。这些设备在矿井安全和管理中起着重要作用,能够实时监测矿井中的瓦斯体积分数、地质结构变化、设备状态等关键信息,并及时发出预警,防止矿难事故的发生。然而,受射频功率限制的影响,这些设备的工作距离和探测精度同样受到严重制约。以超前探测雷达为例,受限于功率阈值,其探测距离较短,探测噪声较高,无法通过增加设备数量来有效提升性能。这不仅削弱了雷达的探测能力,还降低了井下作业的安全性。

综上所述,针对防爆安全与通信性能之间的固有矛盾,在保障井下作业安全的同时,提升 5G 通信技术的射频功率,充分发挥 5G 技术的使用效能,已成为煤矿智能化发展过程中亟待解决的关键问题,也是未来研究和技术创新的重要方向。

鉴于上述挑战,笔者对现有标准进行了全面的溯源与分析,深入探讨了其历史进步性和时代局限性。针对当前射频电磁能防爆指标不适用于 5G 高频信号的问题,综合考虑了低温等离子体动力学、电磁波传播理论与瓦斯爆炸反应动力学的相互作用,构建了空气/甲烷混合气体环境中电磁波功率安全阈值的通用计算模型。基于半波振子天线的参数匹配设计,实现了射频能量对放电电极的有效馈入,首次在试验室环境中利用射频能量成功引燃了瓦斯,从而以试验数据有力验证了理论预测模型的准确性。针对多源叠加效应,进行了深入的仿真和理论分析,提出了基于相关系数和天线分集的方法,用于评估何时需要考虑多源叠加效应,在确保安全的前提下进一步提升爆炸性环境中的射频功率使用。此外,本文还提出了各类射频设备准入的试验方法,并对未来的研究方向进行了

全面展望。

1 标准溯源与分析

1991 年,英国率先颁布了全球第 1 个射频电磁能防爆相关的国家标准,后续经过了 2 个版本的修订,在 2007 年被 IEC 60079 所采纳,2010 年 GB/T 3836 将 IEC 60079 的相关条款引进中国并沿用至今。进一步的技术溯源,发现英国标准的技术条款主要来源于 20 世纪 70—80 年代的研究成果^[9-17]。

在 20 世纪 70—80 年代的科学探索中(图 1),英国学者们针对苏格兰皇家海军发电站产生的电磁场是否会影响数公里外的天然气输送管道进行了系统的研究。Rosenfeld 博士构建了一个典型的 50 Ω 纯阻性电路,用来模拟射频传输中的特性阻抗环境,并将该电路直接接入 IEC 标准火花台(仅适用于 1.5 MHz 以下电路),在 10 MHz 频率范围内对连续波进行了防爆试验。通过这一试验,他测定了电磁波引燃瓦斯的最小电压。并提出假设:放电火花作为匹配负载与接收导体的内阻是共轭匹配的(此时电火花作为负载能获得最大的功率传递)。在数据驱动和假设基础上,计算了电火花的功率,并提议将匹配负载功率作为评估射频源安全性的指标。据此得出,对于 10 MHz 以下电磁波,引燃甲烷与空气的混合物所需的匹配负载功率为 12 W。后续地,取 2 倍安全系数后将射频电磁能防爆功率安全阈值定为 6 W,该指标得到了 BS 6566:1986 标准的采纳,同时将该指标扩展为 0.000 09~60 GHz 电磁波的功率限值,相关标准在 1991、2002、2004 年经历了细微的调整。2007 年,IEC 60079 标准也吸纳了这一系列的英国标准,并

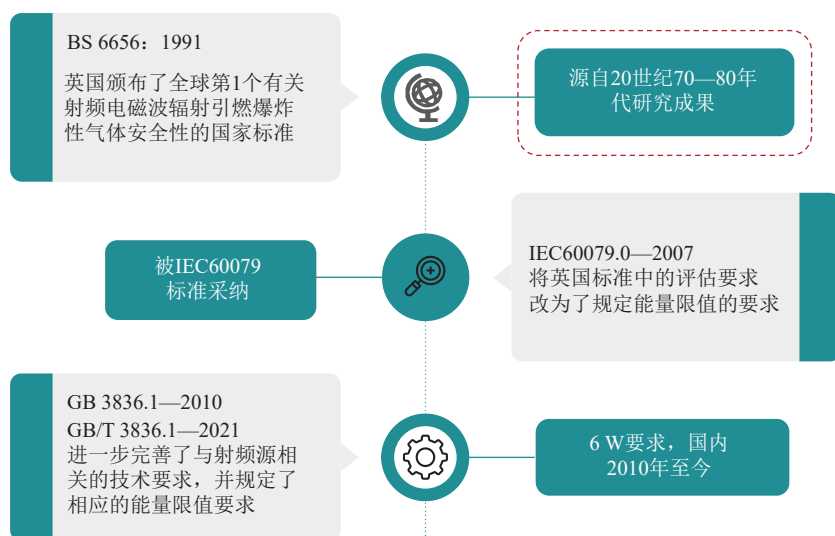


图 1 标准发展历程

Fig.1 History of standard development

将射频功率调整为阈功率。6 W 指标于 2010 年被 GB/T 3836 引用, 作为 I 类射频电磁能防爆的安全限值沿用至今。

相关研究成果与标准存在巨大的历史进步性, 有效避免了射频设备在爆炸性场所大量应用所造成的非预期安全事故。然而, 随着技术的发展尤其是 5G 通信技术的崛起, 这些标准的适用性与准确性面临了前所未有的挑战。现行标准所采纳研究成果主要存在以下 3 点局限性:

1) 相关试验方法不适用于 5G 技术: ① IEC 标准火花台规定了被测电路的频率不得超过 1.5 MHz, 但标准中却直接利用该装置进行了 10 MHz 电路的放电测量。实际上, 在上述试验中适当的超频所造成误差是可以接受的。但是随着频率的继续升高, 如现在煤矿井下广泛应用的 3.5 GHz 频段 5G 技术, 该频段射频能量由于反射现象而无法馈入放电电极, 进一步无法基于 IEC 标准火花台引燃瓦斯, 更无从测量射频功率安全阈值, 上述试验方法将完全不适用; ② 试验得出的安全阈值是基于假设条件的计算结果, 实际上, 射频放电与电磁波频率、放电间隙、气体组分、调制方式等密切相关的, 同理电火花的模拟阻抗也随着上述物理量的变化而变化, 直接假设电火花阻抗与天线内阻共轭匹配是不合理的, 该假设会对安全阈值造成较大偏差。③ 寄生电容和寄生电感随着频率的升高而产生, 对于 5G 高频, 很难构建标准中描述的 50 Ω 纯阻性电路, 这导致了电路中能量大部分将被辐射或反射消耗而无法用来产电火花。

2) 限值不适用 5G 频段: ① 标准中的试验结果是在 10 MHz 以下测得的, 但却无根据的将试验结果由 10 MHz 直接推广应用到 60 GHz 高频。实际上, 经过充分理论研究, 射频安全阈值随着频率大致应呈现“升高—降低—相对平缓—升高”的发展趋势, 以低频试验结果作为全频段限值存在不合理性; ② 随着通信技术的发展, 信号调制方式改变, 由 20 世纪 FM/AM 调制, 发展为今天 5G NR 调制, 调制方式的改变, 对射频放电和安全阈值也造成了较大的影响。

3) 相关评价指标存在极大的安全系数。射频电磁能在煤矿井下存在 3 种可能的场景引燃瓦斯。

场景一: 射频电磁能在瓦斯/甲烷混合气体中引发等离子体碰撞电离或电晕放电, 直接点燃瓦斯。理论分析表明, 触发该物理过程所需的电场强度高达百万伏特每米。由于煤矿井下用于信号传输的电磁波在空间中的电场强度无法达到此量级, 因此可以忽略此场景下的安全阈值。

场景二: 虽然用于通信的电磁能无法直接引燃瓦

斯, 但其利用有限的电压在极小的间隙内产生极高的场强, 并将能量以电火花的形式释放出来就存在引燃瓦斯的危险。此时, 如图 2 所示, 电磁波引燃瓦斯需要满足以下 4 个条件: ① 存在金属构件构成等效接收天线, 可以与空间中电磁波产生谐振; ② 接收天线上存在比较理想的放电间隙; ③ 放电间隙两端的感应电压满足间隙击穿条件; ④ 间隙击穿后产生的电火花能量大于引燃瓦斯所需的最小点火能量。事实上, 标准所采用的研究方法正是基于此场景。最初的标准正是将电火花能量作为安全阈值的评价指标, 但是值得注意的是, 此电火花能量是在假设条件下的计算值, 而不是测量值。

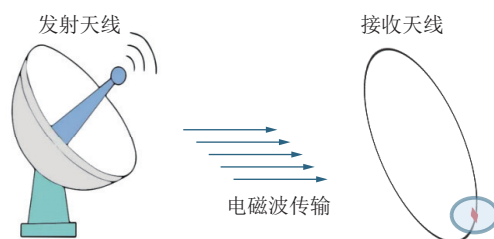


图 2 射频信号传输及火花产生示意

Fig.2 Schematic diagram of RF signal transmission and spark generation

场景三: 此场景同场景二的主要区别是不需要满足条件①而直接在发射天线处引燃瓦斯。英国学者的研究场景是探索发电站产生的电磁场是否会影响数公里外的天然气输送管道产生引燃风险, 由于射频源处于非爆炸环境中, 只需重点关注石油管道也就是接收天线的引燃风险即可。而 5G 基站在煤矿井下应用时, 射频源(发射天线)暴露在瓦斯/空气爆炸环境中, 存在射频源直接引燃瓦斯的危险。且本场景下所需要的射频源功率更低。

这一场景引发了标准中的另一个问题: 在最初的研究和标准中, 安全阈值以接收天线匹配负载(火花功率)作为评价指标; 随着标准的发展, 评价指标逐渐由接收天线匹配负载演变为射频源的阈功率。

上述的演变过程造成评价指标存在了极大的安全系数。如图 3 所示, 在现有评价体系下, 假设火花功率为 P , 即使在考虑假设成立、电磁波无损传输的条件下, 射频源的实际物理功率也不超过 $0.5 P$, 不符合客观物理规律。依据电磁波弗里斯传输共识与等离子体放电规律考虑, 接收天线至少需要 $10 P$ 的功率才能维持 P 功率的火花放电, 即使煤矿井下存在理想的金属导体构成等效接收天线, 射频源也需要 $300 \sim 5000 P$ 的功率才能使接收天线到 $10 P$ 的功率。

综上所述, 现行标准基于场景二形成的评价指标,

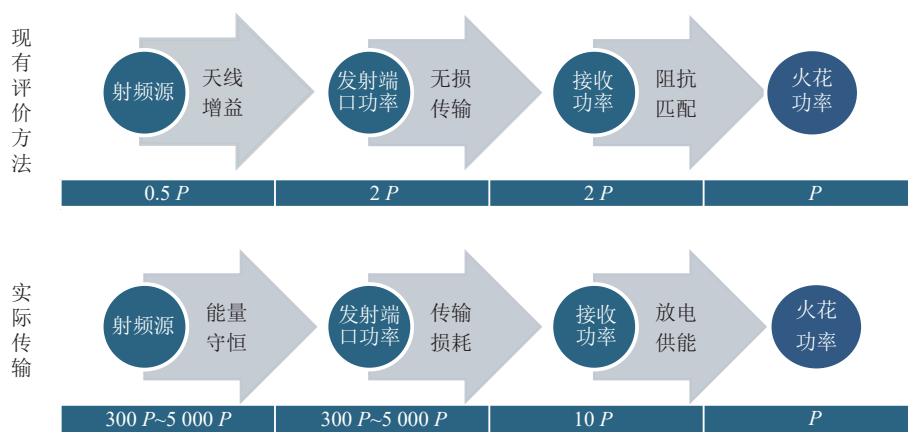


图3 电磁波能量传输链路

Fig.3 Electromagnetic energy transmission link

不仅存在过大的安全系数,也不适用于评估煤矿井下的射频设备,特别是 5G 技术。

由于中国煤炭开采和 5G 技术都处于引领世界的地位,5G 技术作为煤矿智能化的核心技术,国内众多学者针对 5G 射频电磁能防爆安全展开了大量研究,但无一例外难以避免以下 2 点问题^[18-23]:一是大量研究都是基于火花阻抗与天线阻抗相匹配展开的;二是没有任何一项研究经过了试验的验证,尚未有公开文献显示利用电磁波引燃瓦斯,并测得相关安全阈值。综上所述,本领域国内的相关论文不具有高价值的参考意义,在此不做赘述。

因此,面临着重新审视和更新这些标准的紧迫任务,以期更精准地评估现代通信技术下电磁波引燃易燃气体的潜在风险,同时推动相关领域知识体系的进一步完善与发展。接下来,笔者将深入阐述所采用的理论安全阈值研究方法及试验验证方法

2 理论安全阈值计算

基于前文的分析结果,直接考虑在发射天线上产

生电火花引燃瓦斯的情形。这不仅是因为发射天线直接暴露于爆炸性环境中,且引燃瓦斯所需的功率最小;还因为发射天线极易形成理想的放电间隙,如天线和同轴电缆的螺纹连接处。

本研究的总体技术路线如图 4 所示,旨在深入探索射频电磁波在煤矿井下引发瓦斯点燃的深层机制。通过精确的模拟计算与仿真分析来确定安全阈值,并设计试验装置以验证理论模型的可靠性。

在此研究框架下,首先依托低温等离子体动力学理论,构建了碰撞反应放电仿真模型,精确捕捉 5G 电磁波在特定井下环境中的传播行为及其触发瓦斯点燃的细节。该过程涵盖了对等离子体生成、维持以及瓦斯反应动力学的全面剖析,从而揭示理想的点火条件,并定量计算出实现点燃所需的临界电压 U_{ig} 和最优放电间隙 d ,为后续的能量耦合和安全评估奠定坚实基础。

随后,结合电磁波能量耦合传输仿真模型,将已确定的最小引燃电压 U_{ig} 转化为相应的最小引燃功率,即煤矿井下 5G 射频电磁能的功率安全阈值。

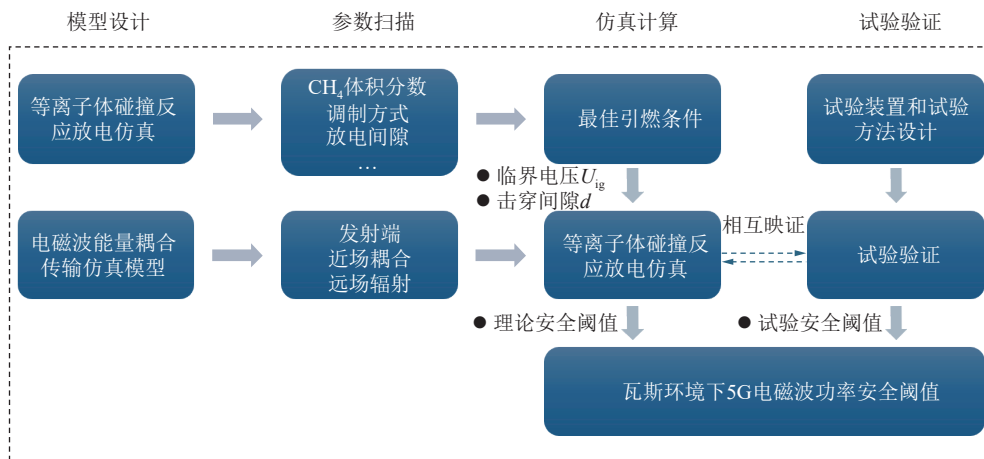


图4 煤矿井下射频电磁能安全阈值研究技术路线

Fig.4 Research technical route of safety threshold of radio-frequency electromagnetic energy in underground coal mine

2.1 等离子体碰撞截面数据库建立

等离子体碰撞截面通常是指在等离子体环境中,不同粒子(例如电子、离子以及中性粒子)发生碰撞时,衡量碰撞强度或碰撞概率的一个量化指标,一般以面积(m^2)为单位。该截面值往往基于试验测量或量子力学计算得到,不同的碰撞过程(如弹性碰撞、激发、离化、复合等)对应不同的碰撞截面。碰撞截面数据直接决定了粒子之间的碰撞频率和反应速率,从而对电子能量分布、离化效率以及各种激发态粒子的产生和演化起到关键作用。模拟中工作气体为空气和 CH_4 混合物,空气中 N_2 和 O_2 比例为4:1,根据瓦斯最佳爆炸浓度设置甲烷体积分数为8.3%;电极间隙中初始种子电子密度为 10^{15} m^{-3} ;气体压力和环境温度大小分别为1 MPa和300 K。由于空气相关反应比较复杂,在模拟计算中并不是所有的反应都对放电有重要作用,并且要实现稳态计算更加耗费时间。因此首先要对反应过程进行相关简化。根据研究目标,针对 $\text{N}_2/\text{O}_2/\text{CH}_4$ 三种气体建立了包括碰撞电离、激发、复合等过程的截面数据,在模拟中共考虑了29种物质(表1)和54个弹性、激发、电离等碰撞反应过程(表2—4)反应过程^[24-28]。

表1 模拟中考虑的物质种类

Table 1 Types of substances considered in the simulation

分子	带电粒子	自由基	激发态
N_2 、 O_2 、 O_3 、 CH_4 、 H_2 、 CH_3 、 CH_2 、 CH 、 CO 、 CO_2 、 CHO 、 CH_2O	N_2^+ 、 N_4^+ 、 O_2^+ 、 O_4^+ 、 CH_4^+ 、 CH_3^+ 、 CH_2^+ 、 CH^+ 、 e^- 、 O^- 、 O_2^-	N 、 O 、 H 、 OH 、	N_2A 、 $\text{N}_2\text{a1}$

2.1.1 N_2 截面数据库

N_2 截面数据文件中一共包含26个反应过程,包括弹性碰撞、激发、电离等过程,详细反应过程在表2中给出。

各个反应对应的截面在图5中给出,其中横轴为电子能量,纵轴为截面尺寸,表示碰撞概率的大小。

2.1.2 O_2 碰撞截面库

O_2 截面数据文件中一共包含17个反应过程,包括吸附、弹性碰撞、激发、电离等过程,详细反应过程在表3中给出。

各个反应对应的截面在图6中给出,其中横轴为电子能量,纵轴为截面尺寸,表示碰撞概率的大小。

2.1.3 CH_4 碰撞截面

CH_4 截面数据文件中一共包含11个反应过程,包括吸附、弹性碰撞、激发、电离等过程。

各个反应对应的截面在图7中给出,其中横轴为电子能量,纵轴为截面尺寸,表示碰撞概率的大小。

表2 N_2 截面数据中包含的反应过程

Table 2 Reaction processes included in N_2 cross-section data

序号	反应类型	反应	能量阈值/eV
R1	弹性	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2$	—
R2	激发	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2(\text{rot})$	0.02
R3	激发	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2(\text{v1})$	0.29
R4	激发	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2(\text{v1res})$	0.29
R5	激发	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2(\text{v2})$	0.59
R6	激发	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2(\text{v3})$	0.88
R7	激发	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2(\text{v4})$	1.17
R8	激发	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2(\text{v5})$	1.47
R9	激发	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2(\text{v6})$	1.76
R10	激发	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2(\text{v7})$	2.06
R11	激发	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2(\text{v8})$	2.35
R12	激发	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2(\text{A3})$	6.17
R13	激发	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2(\text{A3})$	7.00
R14	激发	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2(\text{B3})$	7.35
R15	激发	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2(\text{W3})$	7.36
R16	激发	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2(\text{A3})$	7.80
R17	激发	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2(\text{B3})$	8.16
R18	激发	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2(\text{a1})$	8.40
R19	激发	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2(\text{a1})$	8.55
R20	激发	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2(\text{w1})$	8.89
R21	激发	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2(\text{c3})$	11.03
R22	激发	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2(\text{E3})$	11.87
R23	激发	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2(\text{a1})$	12.25
R24	激发	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{N}_2(\text{Sum})$	13.00
R25	电离	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow 2\text{e}+\text{N}_2^+$	15.60
R26	电离	$\text{e}+\text{N}_2 \Rightarrow 2\text{e}+\text{N}_2^+$	18.80

2.2 一维流体动力学模型建立

2.2.1 仿真模型

建立气体放电击穿一维流体模型,研究给定电极结构和间距下模拟气隙放电从起始、发展到结束的全过程,用于分析放电的电磁能量分配。

图8a为放电模拟电路,图8b为电极结构,左侧电极电压随时间变化,右侧电极接地。电极电压如式(1)所示:

$$U(t) = U_{\text{bre}} \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

其中, U_{bre} 为击穿电压幅值; f 为电磁波频率; t 为时间。本节针对700 MHz正弦波的安全阈值进行研究,后续探索调制方式和频率对安全阈值的影响。

2.2.2 物理模型

放电特性及过程中各种粒子的产生和输运由典

表 3 O₂ 截面数据中包含的反应过程
Table 3 Reaction processes included in the O₂ cross-section data

序号	反应类型	反应	能量阈值/eV
R1	吸附	$\text{e}+\text{O}_2 \Rightarrow \text{O}+\text{O}^-$	—
R2	吸附	$\text{e}+\text{O}_2 \Rightarrow \text{O}+\text{O}^-$	—
R3	弹性	$\text{e}+\text{O}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{O}_2$	—
R4	激发	$\text{e}+\text{O}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{O}_2(\text{rot})$	0.020
R5	激发	$\text{e}+\text{O}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{O}_2(\text{v1})$	0.190
R6	激发	$\text{e}+\text{O}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{O}_2(\text{v1res})$	0.190
R7	激发	$\text{e}+\text{O}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{O}_2(\text{v2})$	0.380
R8	激发	$\text{e}+\text{O}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{O}_2(\text{v2res})$	0.380
R9	激发	$\text{e}+\text{O}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{O}_2(\text{v3})$	0.570
R10	激发	$\text{e}+\text{O}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{O}_2(\text{v4})$	0.750
R11	激发	$\text{e}+\text{O}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{O}_2(\text{a1})$	0.977
R12	激发	$\text{e}+\text{O}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{O}_2(\text{b1})$	1.627
R13	激发	$\text{e}+\text{O}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{O}_2(\text{e4.5})$	4.500
R14	激发	$\text{e}+\text{O}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{O}_2(\text{e6.0})$	6.000
R15	激发	$\text{e}+\text{O}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{O}_2(\text{e8.4})$	8.400
R16	激发	$\text{e}+\text{O}_2 \Rightarrow \text{e}+\text{O}_2(\text{e9.97})$	9.970
R17	电离	$\text{e}+\text{O}_2 \Rightarrow 2\text{e}+\text{O}_2^+$	12.060

表 4 CH₄ 截面数据中包含的反应过程
Table 4 Shows the reaction process in CH₄ cross section data

序号	反应类型	反应	能量阈值/eV
R1	吸附	$\text{e}+\text{CH}_4 \Rightarrow \text{CH}_3+\text{H}^-$	—
R2	吸附	$\text{e}+\text{CH}_4 \Rightarrow \text{H}_2+\text{CH}_2^-$	—
R3	弹性	$\text{e}+\text{CH}_4 \Rightarrow \text{e}+\text{CH}_4$	—
R4	激发	$\text{e}+\text{CH}_4 \Rightarrow \text{e}+\text{CH}_4(\text{V24})$	0.162
R5	激发	$\text{e}+\text{CH}_4 \Rightarrow \text{e}+\text{CH}_4(\text{V13})$	0.361
R6	激发	$\text{e}+\text{CH}_4 \Rightarrow \text{e}+\text{CH}_4(\text{A})$	9.000
R7	激发	$\text{e}+\text{CH}_4 \Rightarrow \text{e}+\text{CH}_4(\text{B})$	10.000
R8	激发	$\text{e}+\text{CH}_4 \Rightarrow \text{e}+\text{CH}_4(\text{C})$	11.000
R9	激发	$\text{e}+\text{CH}_4 \Rightarrow \text{e}+\text{CH}_4(\text{D})$	12.000
R10	电离	$\text{e}+\text{CH}_4 \Rightarrow 2\text{e}+\text{CH}_4^+$	12.600
R11	电离	$\text{e}+\text{CH}_4 \Rightarrow 2\text{e}+\text{CH}_3^++\text{H}$	14.300

型的流体模型来描述,电子、正离子、除背景气体外的中性物质和电子能量在固体壁上采用的边界条件为通量边界条件。

2.3 击穿电压确定与电压对放电的影响分析

在模拟中采用二分法确定击穿电压 U_{bre} 。为了获得击穿电压,在模拟中以电子密度随时间的演化为参考。击穿电压 U_{bre} 相应于电子密度上升和下降的转换点,即电子密度在模拟域中出现指数增长时发生击

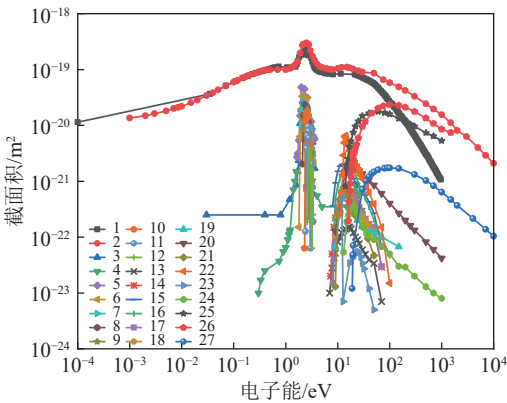


图 5 N₂ 相关反应碰撞截面
Fig.5 Collision cross-section of N₂-related reaction

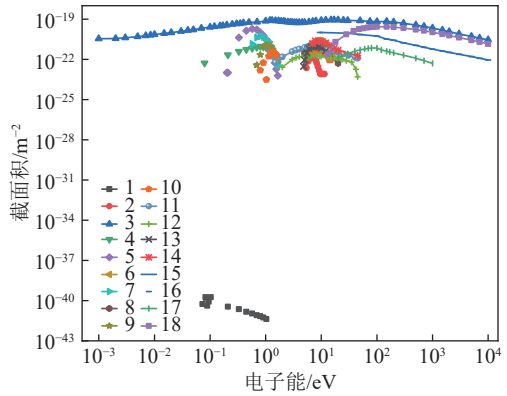


图 6 O₂ 相关反应碰撞截面
Fig.6 Collision cross-section of O₂ related reaction

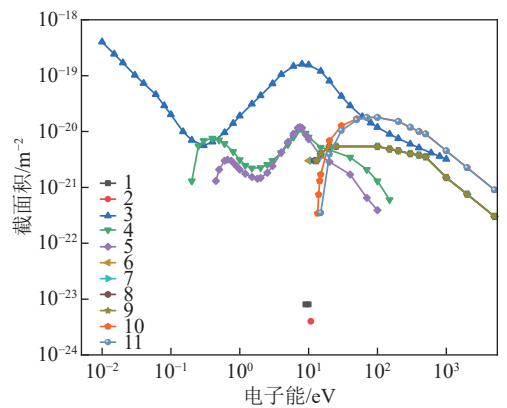


图 7 CH₄ 相关反应碰撞截面
Fig.7 Collision cross-section of CH₄ related reaction

穿。而击穿时间也会随放电间隙和放电类型变化。为了最小化计算负担,在给定的频率下电压不确定值为 3%。

首先研究了放电间隙 $d = 100 \mu\text{m}$ 的情况,将击穿电压 U_{bre} 设置为 100 V,计算上百个周期后发现,电子密度快速下降 (图 9 中黑色曲线),并在 500 ns 时其量级只有 10^{10} m^{-3} ,明显低于初始电子密度 10^{15} m^{-3} ,认为放电未击穿。随后将电压增加至 110 V,电子密度

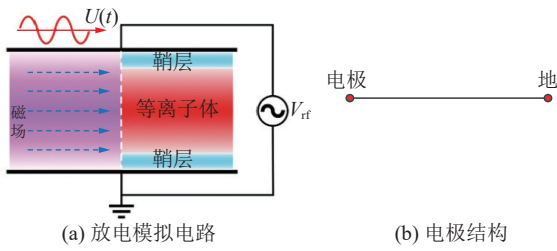


图 8 放电模拟电路和电极结构

Fig.8 Schematic diagram of the discharge analog circuit and electrode structure

随时间先减小后逐渐增加,并在 250 ns 时间范围内出现指数形式增加,其密度增至 10^{18} m^{-3} (图 5 中绿色曲线),此时放电击穿。因此能够使放电开始的击穿电压处于 100~110 V。根据二分法,再将电压峰值设置为 105 V,图 5 中红色曲线显示,在施加电压为 105 V 时,电子密度连续下降,500 ns 时下降约一个量级,此时认为放电也未击穿,因此击穿电压在 105~110 V。将电压增加至 108 V,从图中蓝色曲线可以看出,电子密度出现缓慢增长,并在 100 ns 时高于 10^{15} m^{-3} ,随后电子密度也指数增长,其密度略低于 $U_{\text{bre}}=110 \text{ V}$ 时的电子密度,此时也认为放电击穿。最终确定 $d =$

100 μm 时击穿电压为 $U_{\text{bre}}=108 \text{ V}$ 。在确定击穿电压过程中发现,电压升高,击穿时间提前,电子密度也增加。

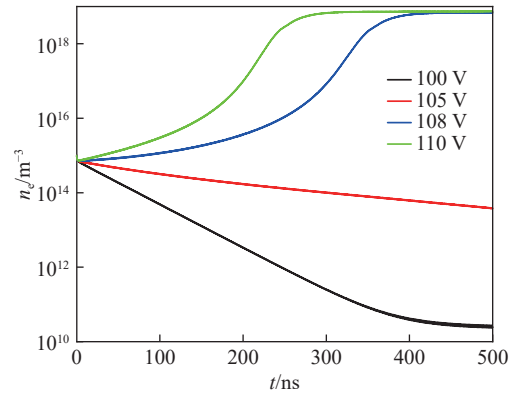
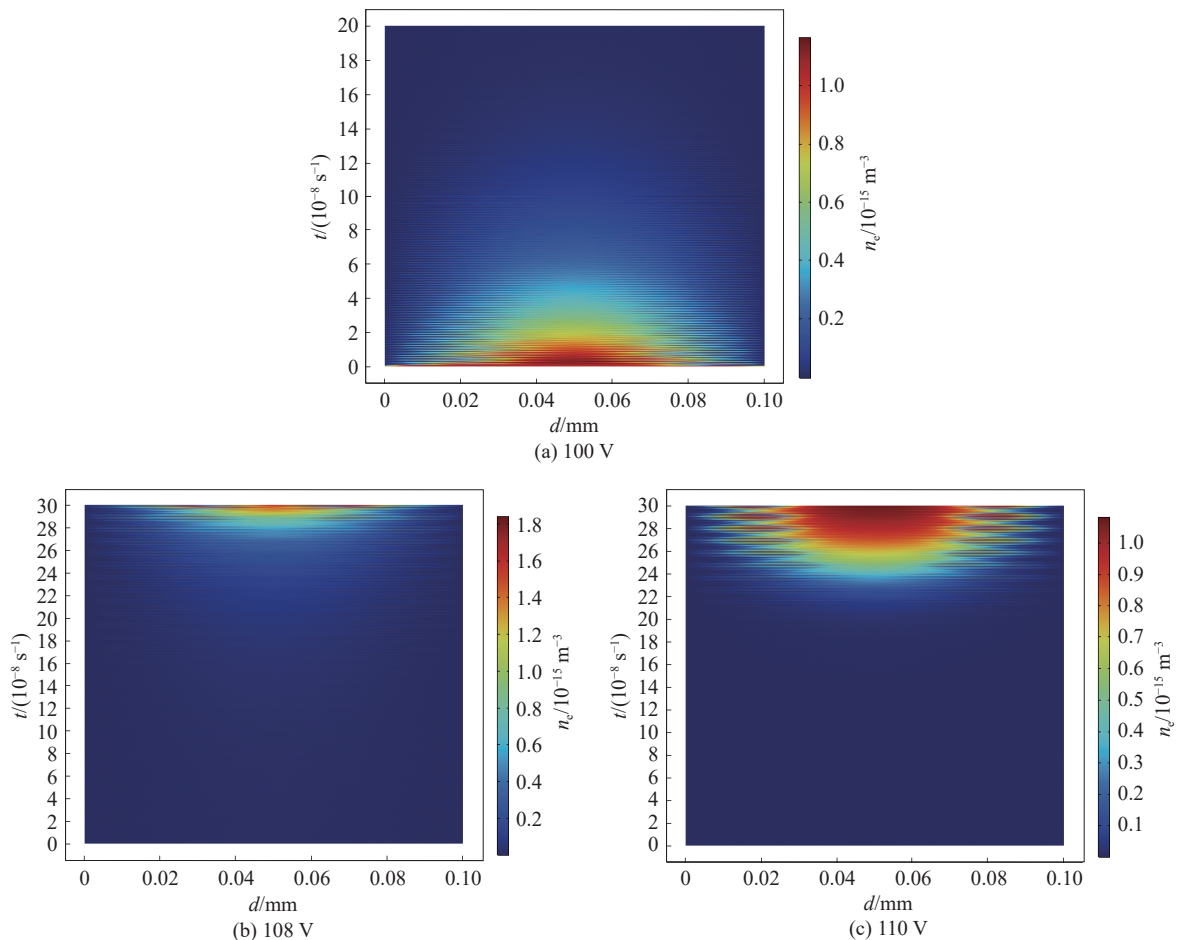
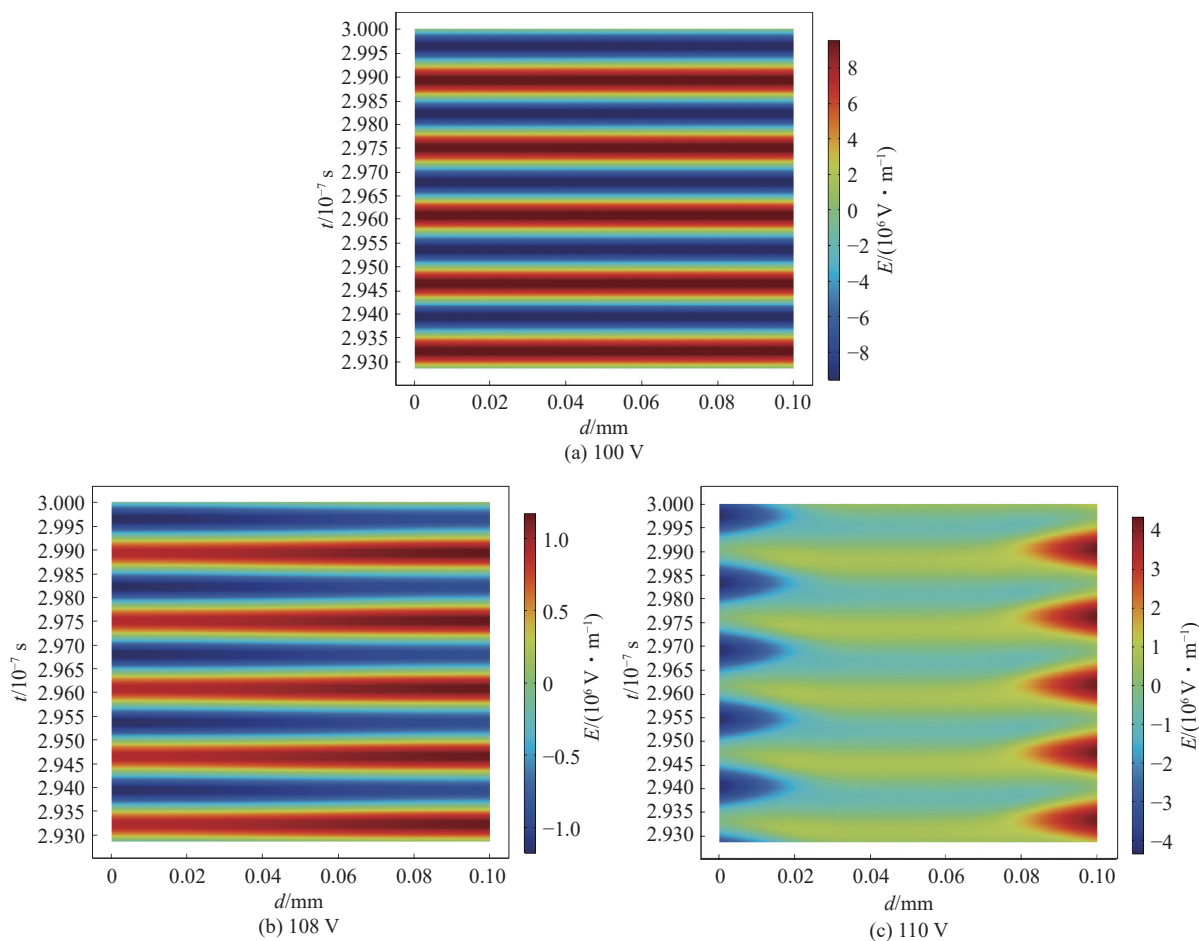


图 9 低于击穿电压、击穿电压和高于击穿电压下平均电子密度时间演化

Fig.9 Time evolution of average electron density at below, above and below breakdown voltage

为了进一步理解电压对放电的影响,图 10、图 11 和图 12 给出了不同电压下电子密度、电场和电离速率分布相图。图 10 为 300 ns 内电子密度时空分布相

图 10 不同电压下电子密度 n_e 时空演化Fig.10 Space-time evolution of electron density n_e at different voltages

图 11 不同电压下总电场 E 时空演化Fig.11 Space-time evolution of total electric field E at different voltages

图, 图 11 和图 12 分别为 292.5~300.0 ns 内电场和电离速率分布相图。

当电压低于击穿电压时, 图 10a 显示, 在间隙中间位置处, 电子密度在前 40 ns 出现略微增加, 随后减小。这是因为电子在电场作用下会进行迁移, 因此在施加电压前 20 ns, 间隙中间位置电子密度升高。而由于此时电压较低, 产生的电场也低, 如图 11a 所示, 电子不能从较低的电场中获得足够高的能量电离其他分子气体。如图 12a 所示, 此时电离速率很低, 其量级只有 $10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$, 因此不能形成电子雪崩。而由于空气中的氧气为电负性气体, 电子会被氧气吸附, 因此电子密度连续下降, 导致电子密度低于初始电子密度 10^{15} m^{-3} , 所以在图 10 中电子密度降低。由于电压低于击穿电压时没有等离子体形成, 因此间隙中电场不会受到等离子体扰动。

在击穿电压下, 此时间隙中的电场能够达到气体击穿需要的电场, 因此电子能够从电场中获得一定能量与分子气体发生电离反应, 由图 10b 可知, 随着时间增加, 电子密度缓慢增加。此外, 由于放电过程中空间电荷的积累, 放电过程中空间电荷场也增加, 导

致总电场增加。如图 11b 所示, 此时放电间隙中峰值电场已超过 $1 \times 10^6 \text{ V/m}$, 当间隙电场增加到足够高值时, 电子产生速率明显上升 (图 12b)。所以在 260 ns 左右, 电子密度出现明显增加, 并达到 10^{17} m^{-3} 量级。

当电压高于击穿电压时, 图 11c 显示, 间隙中电场更强。此时电子获得的能量更高, 产生的电子雪崩也更加剧烈 (图 12c)。因此, 在过击穿电压下, 电子密度更高, 放电击穿时间也提前。由于击穿电压和高于击穿电压 2 种情况下间隙中有等离子体形成, 因此电场受到明显扰动, 即电场发生畸变。

2.4 放电间隙扫描

同样采用二分法, 研究了间隙距离对击穿电压的影响。图 13 为 $f=0.7 \text{ GHz}$ 时击穿电压随间隙的变化。从图中可以看出, 击穿电压随间隙呈现出“U”型变化趋势, 即随击穿距离先减小后增加, 并在 $d=100 \mu\text{m}$ 处获得最小击穿电压。这就是说在 $U_{\text{bre}}=108 \text{ V}$ 时, 只有 $d=100 \mu\text{m}$ 时产生放电, 其他间隙距离均不产生放电。

由上可知, $f=0.7 \text{ GHz}$, $d=100 \mu\text{m}$ 时击穿电压最小, 因此也可以在此间隙下获得最小击穿能量。

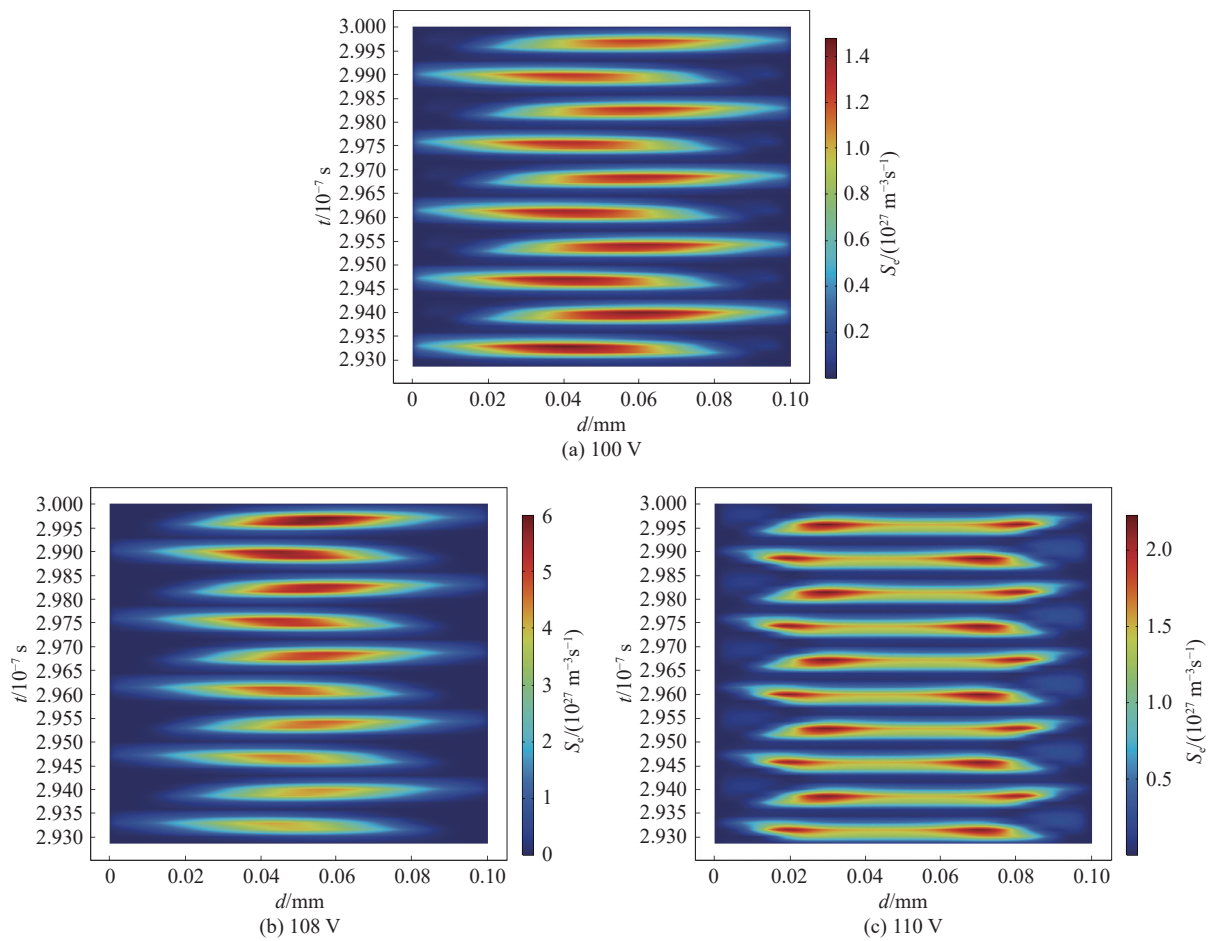
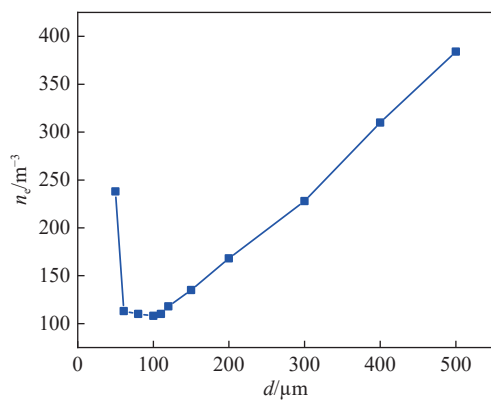
图 12 不同电压下电离速率 S_e Fig.12 Ionization rate S_e at different voltages

图 13 放电间隙对击穿电压的影响

Fig.13 Effect of discharge gap on breakdown voltage

2.5 放电特性分析与最小引燃电压确定

放电发生时,并不一定可以引燃瓦斯,这是由于放电火花的点燃是通过电火花将电能转化为热能传给爆炸性气体混合物引起的。任何放电都会引起爆炸性气体混合物的局部燃烧,形成焰芯。当放电能量不足时,提供的能量不足以补充燃烧从焰芯向四周扩散的能量损失,焰芯可能熄灭,燃烧就不能向四周扩散,宏观的燃烧或爆炸就不会发生。只有当放电给予

爆炸性气体混合物的能量达到一定数量级才会点燃,即爆炸性气体的最小点火能,可通过试验测定气体的最小点火能。在特定频率下通过放电间隙扫描识别最小击穿电压 U_{bre} 后,仅仅可以确定在该频段下的最佳放电间隙,还需在该间隙下,分析放电的电磁能量分配,从而确定电磁波的最小引燃电压。

如式 (2) 当计算得知火花放电释放的能量 Q_{spark} 大于爆炸性气体的最小点火能 Q_{min} 时,判定为可以发生爆炸,据此即可确定最小引燃电压 U_{ig} 。

$$Q_{\text{spark}} = \int_0^{t_{\text{min}}} U(t) I(t) dt \geq Q_{\text{min}} \quad (2)$$

其中, $U(t)$ 为放电时实际测得的电极两端电压; $I(t)$ 为放电时实际测得的电火花电流; t_{min} 为引燃瓦斯所需要的最小时间 200 μs ; Q_{min} 为引燃瓦斯所需要的最小能量 0.28 mJ。

通过建立等离子体碰撞反应放电仿真模型,可以得到瓦斯引燃所需要的最小引燃电压 U_{ig} 和最佳放电间隙 d 。

与确定击穿电压相似,模拟中同样采用二分法确定等离子体放电过程中的能量积累,从而确定 700 MHz

电磁波引燃瓦斯所需的最小电压。下面首先研究的是 $U=130\text{ V}$ 时微放电的特性。

2.5.1 间隙电压 $U=130\text{ V}$

1) 电子密度变化趋势。图 14 为放电间隙 $d=100\text{ }\mu\text{m}$ 时平均电子密度随时间的演化。如图所示, 在 $0\sim 2.5\text{ }\mu\text{s}$ 电子密度出现指数形式增加, 最终电子密度达到 10^{19} m^{-3} 量级, 这意味着放电击穿形成。在 $2.5\text{ }\mu\text{s}$ 后, 电子密度逐渐降低, 并在 $20\sim 25\text{ }\mu\text{s}$ 后基本保持不变, 即 $\frac{dn_e}{dt} \approx 0$, 因此放电达到稳态。稳态下平均电子密度约为 $1.1 \times 10^{19}\text{ m}^{-3}$ 。

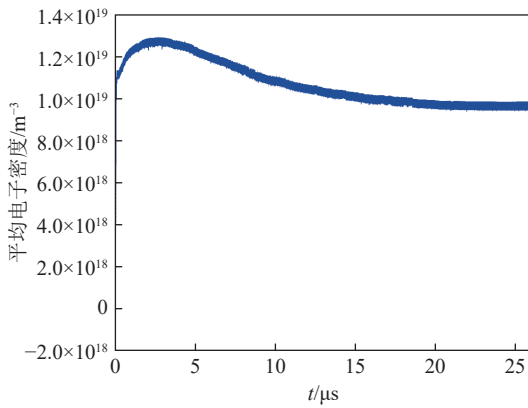


图 14 平均电子密度随时间演化

Fig.14 Evolution of average electron density over time

2) 稳态后微等离子体特性。从图 14 可知, 放电在 $20\text{ }\mu\text{s}$ 后基本达到稳态。为了进一步理解稳态后放电的演化, 图 15 给出了最后 5 个周期电子密度随时间的变化。其中白色线条表示鞘层大概位置。从图中得到, 鞘层宽度约为 $30\text{ }\mu\text{m}$, 明显小于电极间隙宽度 $100\text{ }\mu\text{m}$, 因此可以在放电间隙中形成准中性等离子体区。如图所示, 电子密度随时间呈现周期性变化, 并且峰值电子密度被限制在间隙中间位置, 这可以由

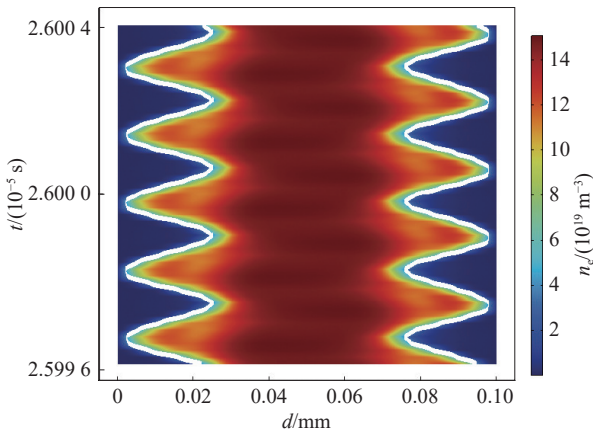


图 15 稳态后, 5 个周期内电子密度 n_e 时空演化

Fig.15 Spatio-temporal evolution of electron density n_e in 5 cycles after steady state

图 15 中电子密度空间分布进一步确认。图 15 显示, 在间隙中间位置处 ($r=0.05\text{ mm}$) 电子密度约为 $1.45 \times 10^{19}\text{ m}^{-3}$, 越靠近电极, 电子密度越低。此时电子密度为“钟形”分布。

电子被限制在等离子体间隙中间位置的行为可以通过高频电场中电子振荡解释。在振荡电场中电子速度 $V(t)$ 和位置 $x(t)$ 被定义为

$$V(t) = \frac{q_e E}{m_e \sqrt{\omega^2 + v_m^2}} \cos(\omega t + \phi) \quad (3)$$

$$x(t) = \frac{q_e E}{m_e \omega \sqrt{\omega^2 + v_m^2}} \sin(\omega t + \phi) \quad (4)$$

其中, q_e 为电荷量; E 为峰值电场强度; m_e 为电子质量; ω 为频率; v_m 为动量交换频率; ϕ 为初相位, $\phi = \arctan(v_m/\omega)$ 。

在大气压下, $v_m \gg \omega$, 因此得到电子振荡峰值 $A = \frac{q_e E}{m_e \omega v_m}$, 可见电子振荡峰值随频率增加而减小, 其量级为 10^{12} s^{-1} 。当 $U=130\text{ V}$, $d=100\text{ }\mu\text{m}$ 时, 峰值电场为 $1.08 \times 10^6\text{ V/m}$ 。因此计算得到该条件下电子振荡峰值 $A \approx 41\text{ }\mu\text{m}$, 因此电子被限制在间隙中间位置。

图 16 显示, 电场随时间出现周期性变化。尽管电场强度由电势梯度决定, 但等离子体中的电场不仅与电势有关, 还与放电产生的空间电荷相关。即等离子体电场等于外加电压产生的电场 (拉普拉斯电场) 和空间电荷电场之和, 并且空间电荷场要大于拉普拉斯电场, 因此放电稳态后, 电场的空间分布主要由空间电荷决定 (这将在下面解释)。从图中可以看出, 电场峰值位置主要位于电极附近 (即鞘层中), 而在间隙中 ($0.2\text{ mm} < r < 0.8\text{ mm}$) 电场相对较低, 但不为 0。

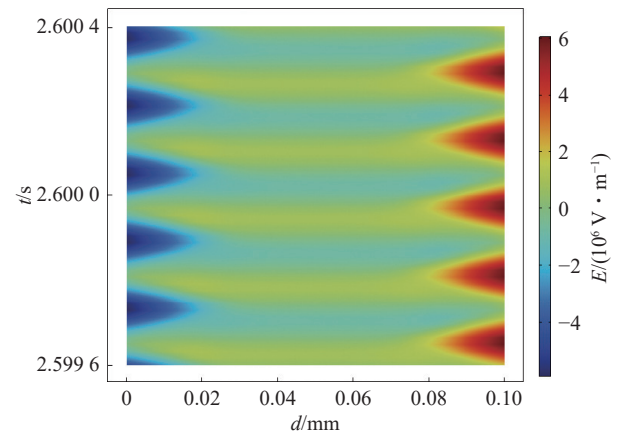


图 16 等离子总电场 E 分布

Fig.16 Plasma electric field E distribution

最后, 给出了稳态后等离子体产生速率时空分布情况 (图 17)。从图中可以看出, 峰值电子产生速率位

于等离子体区,而鞘层中电离速率却很低,并且一个周期内电离速率出现双通道分布。双电离通道的出现主要是因为在一个周期内电场方向发生改变,形成方向不同的2个电场通道。根据电离速率空间分布情况,将此时的微放电形式称为“ α ”模式放电。由于高压电极和接地电极二次电子发射系数不同,因此鞘层中电子产生速率不相等。在接地电极附件由于二次电子发射系数较高,离子撞击电极后产生发射的二次电子密度也高,这些电子在经历鞘层中电场加速后可以获得一定能量与其他原子或分子产生电离的效果比高压电极附近更强,因此右侧鞘层中电离更明显。

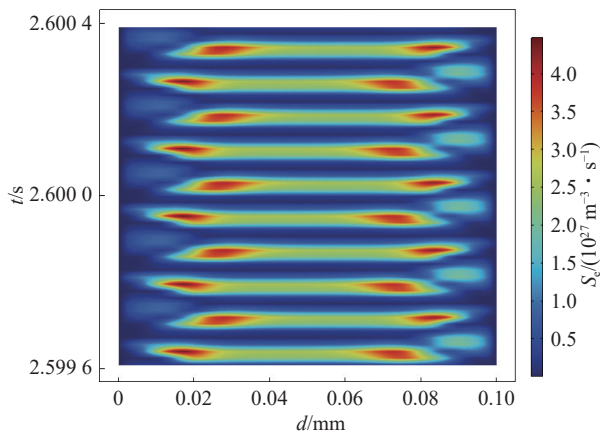


图 17 等离子产生速率 S_e 分布

Fig.17 Plasma generation rate S_e distribution

3) 电火花能量计算。为了计算在给定气体组分下,甲烷在爆炸能量(能量阈值)下的功率,图 18 中给出了等离子体功率 P 随时间的演化。

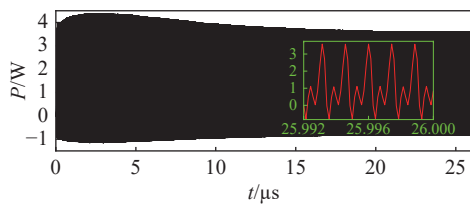


图 18 $U=130$ V 等离子体功率随时间的演化

Fig.18 Evolution of plasma power of $U=130$ V over time

电火花能量计算方法如式(5)所示

$$Q = \int U I dt \quad (5)$$

式中, U 为等离子体电势; I 为放电电流,放电电流等于电子电流与离子电流之和。

图 18 显示,在放电开始时,等离子体功率快速上升,并在 $2.5 \mu s$ 左右达到最大值 $4.4 W$,之后逐渐减小。放电时间增加,稳态后瞬时功率基板保持不变,此时瞬时功率为 $3.5 W$ 。通过积分得到 $0 \sim 26 \mu s$ 内等离子

体能量为 $2.9319 \times 10^{-2} mJ$,第 $26 \mu s$ 等离子体能量为 $1.0777 \times 10^{-3} mJ$ 。由于稳态后放电只是呈现周期性变化,其电子密度、功率等基本保持不变。因此,将 $27 \sim 200 \mu s$ 后的功率进行外推,即在这段时间内等离子体在每微秒时间内的能量与第 $26 \mu s$ 的能量相同。最终,计算得到临界击穿电压下 $200 \mu s$ 时间内等离子体的沉积能量约为 $0.2168 mJ$,这个能量尚未达到瓦斯爆炸的能量阈值 $0.28 mJ$ 。因此将适当提高电压,找到一个电压值,使得其能量沉积超过 $0.28 mJ$ 。

2.5.2 间隙电压 $U=180 V$

1) 稳态后微等离子体特性。为了找到等离子体能量超过 $0.28 mJ$ 的间隙电压,首先将电压提高到 $180 V$ 。

图 19 为 $U=180 V$ 时电子密度时空演化,其中白色曲线代表鞘层大概位置。从图中看出,电压增加,电子密度明显升高, $U=180 V$ 时电子密度比 $U=130 V$ 时电子密度高约 2 个量级。此外, $U=180 V$ 时的微等离子体电子密度分布与 $U=130 V$ 时电子密度分布也不同。高电压下,鞘层厚度明显减小,其厚度约为 $5 \mu m$ 。且峰值电子密度不再位于间隙中间位置,而是转移到 2 个电极附近。

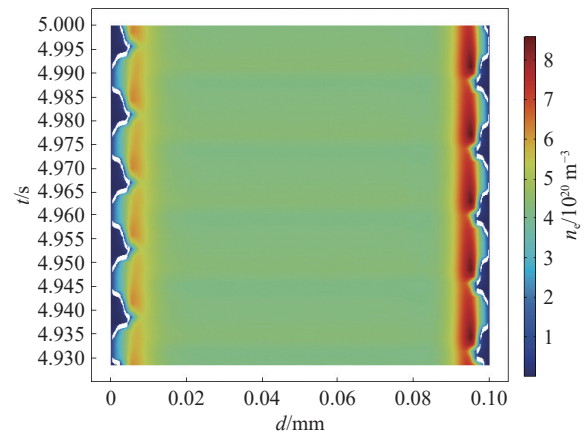


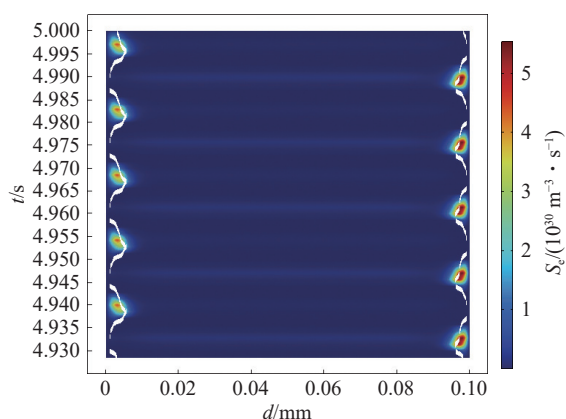
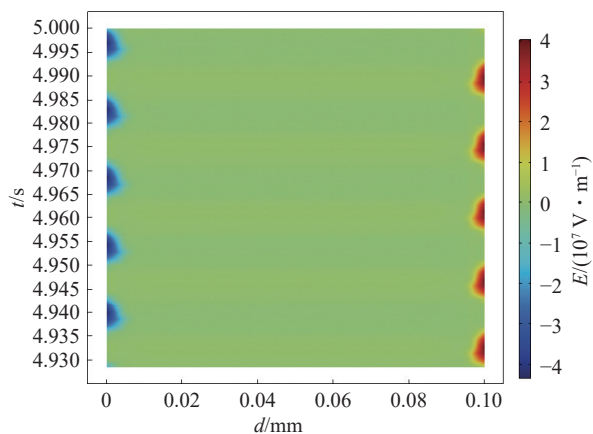
图 19 $U=180 V$ 时电子密度 n_e 分布

Fig.19 n_e distribution of electron density when $U=180 V$

图 20 为 5 个周期内电子产生速率时空演化。如图所示,高电压下电子产生速率主要位于鞘层中(图中白色曲线),而等离子体区电离速率很小。由电子产生速率分布可知 $U=180 V$ 时放电为“ γ ”模式。这说明电压升高到一定程度时,放电模式会发生转变。

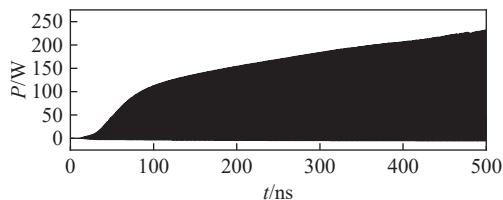
为了进一步解释高电压下电子密度分布,图 21 给出了总电场时空演化。图 21 显示,电压增加,电场明显增强,较强的电场势必会导致放电体积增加,

因此图 19 中微等离子体的鞘层厚度减小。由于高电压下放电增强,空间电场受到等离子体扰动更明

图 20 等离子产生速率 S_e 分布Fig.20 Plasma generation rate S_e distribution图 21 等离子总电场 E 分布Fig.21 Plasma electric field E distribution

显,因此在等离子体区电场几乎为 0。

2) 电火花能量计算。图 22 给出了 $U=180$ V 时等离子功率随时间的演化。 $U=180$ V 时, 500 ns 内等离子功率连续增加, 最高瞬时功率超过 200 W。对 500 ns 内功率进行积分, 得到该时间内等离子体能量约为 0.02 mJ。则 2 μ s 后等离子体能量必然会大于 0.28 mJ。因此只能减小电压。

图 22 $U=180$ V, 1 μ s 内等离子体功率时间演化Fig.22 Plasma power time evolution in 1 μ s with $U=180$ V

2.5.3 二分法寻找最小引燃电压

1) 间隙电压 $U=140$ V。当电压增加到 140 V, 经过对比发现, 电子密度、电子电流、电场等均增加, 但等离子体放电模式没有发生变化。因此本小节主要研究等离子体能量, 如图 23 和图 24 所示, 等离子体

功率与等离子体电势和放电电流相关。由于放电电流中电子电流远大于离子电流, 为了便于与 $U=140$ V 对比, 本小节以电子电流代替电子电流和离子电流之和。

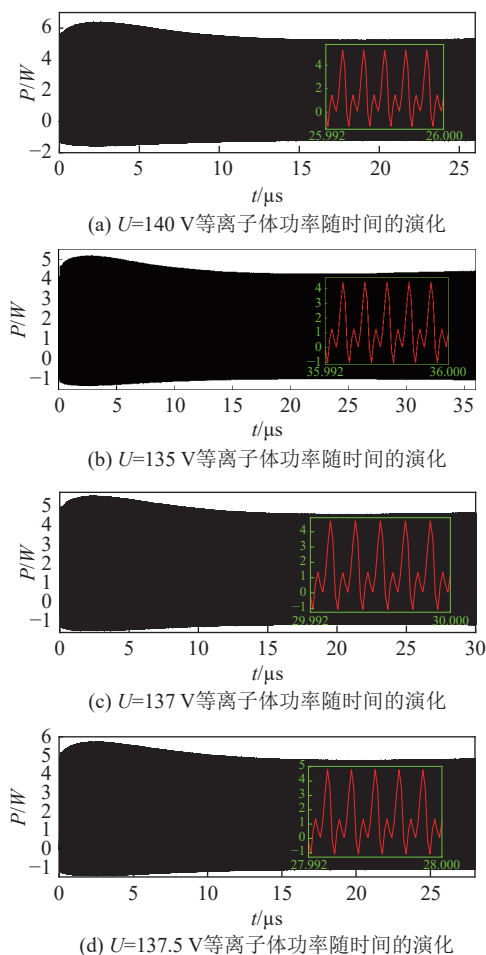


图 23 等离子体功率随时间的演化

Fig.23 Evolution of plasma power of over time

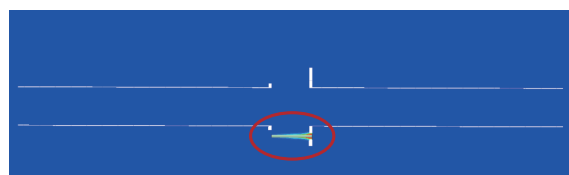


图 24 偶极子天线正常工作时的能量分布

Fig.24 Energy distribution of a dipole antenna in normal operation

图 23a 显示, 电压增加, 等离子体功率也增加。这是由于施加电压增加, 放电过程中等离子体电势和放电电流也增加。从图中看出, 3 μ s 左右等离子体峰值功率约为 6.4 W, 随后逐渐降低, 并在 15 μ s 时稳定在 5 W。与 $U=130$ V 等离子体能量计算方法相同, 仍采用外推法计算 $U=140$ V 时等离子体沉积的能量。通过积分得到 0~26 μ s 内等离子体能量为 4.432 7×

10^{-2} mJ。第 26 μs 等离子体能量为 $1.532\ 9 \times 10^{-3}$ mJ。因此 0~200 μs 内等离子体能量为 0.312 6 mJ。很明显, 该电压下对应的等离子体阈值能量高于 0.28 mJ, 因此 0.28 mJ 能量阈值对应的电压在 130~140 V。

2) 间隙电压 $U=135$ V。根据二分法, 下面将计算 $U=135$ V 时等离子体的能量。图 23b 显示, $U=135$ V 时等离子体功率相比于 $U=140$ V 时等离子体功率减小了约 1 W。这是因为较低电压下等离子体电势和放电电流减小所致。首先对 0~36 μs 内等离子体功率积分, 得到等离子体能量为 $4.717\ 6 \times 10^{-3}$ mJ, 第 36 μs 等离子体能量为 $1.297\ 4 \times 10^{-3}$ mJ, 所以 0~200 μs 内总能量为 0.259 9 mJ。由此可见, 0.28 mJ 能量阈值对应的电压在 135~140 V。

经计算发现, 电压每增加 10 V, 等离子体能量增加约 0.1 mJ, 所以能使得等离子体能量约为 0.28 mJ 的电压应在 135~138 V。下面计算 $U=137$ V 电压下等离子体能量。

3) 间隙电压 $U=137$ V。图 23c 显示, $U=137$ V 时等离子体峰值功率约为 5.6 W, 随着时间增加, 功率逐渐减小, 并在 15 μs 后稳定在 4.65 W。通过对前 30 μs 等离子体功率进行积分, 得到等离子体能量为 $5.068\ 42 \times 10^{-2}$ mJ。第 30 μs 等离子体能量为 $1.379\ 8 \times 10^{-3}$ mJ, 所以 0~200 μs 内等离子体能量为 0.276 9 mJ, 此能量略小于 0.28 mJ。

4) 间隙电压 $U=137.5$ V。图 23d 显示, $U=137.5$ V 时等离子体峰值功率约为 5.7 W, 随着时间增加, 功率逐渐减小, 并在 15 μs 后稳定在 4.75 W。通过对前 28 μs 等离子体功率进行积分, 得到等离子体能量为 $4.026\ 2 \times 10^{-2}$ mJ。第 28 μs 等离子体能量为 $1.401\ 7 \times 10^{-3}$ mJ, 所以 0~200 μs 时间内等离子体能量为 0.281 3 mJ, 此能量近似等于 0.28 mJ。

综上所述, 间隙距离和电源频率对击穿电压有明显影响。在 $f=700$ MHz 时, 间隙距离 $d < 100$ μm 时, 击穿电压随距离增加减小; 间隙距离 $d=100$ μm 时, 击穿电压最小; 间隙距离 $d > 100$ μm 时, 击穿电压上升。

由于 $f=700$ MHz, $d=100$ μm 时击穿电压最低, 相同电压下其他间隙中都不会发生放电。所以上述所有结果均是在间隙距离 $d=100$ μm 所得的结果, 因此该间隙下的计算得到的引燃电压即为最小引燃电压 U_{ig} , 700 MHz 频段的最小引燃电压 U_{ig} 为 137.5 V。

此外, 电压增加导致等离子体电势和放电电流增加, 因此等离子体功率和能量增加。而当电压过高时, 放电模式也发生改变, 即放电从较低电压下的“ α ”模式转换为高电压下的“ γ ”模式。

2.6 功率安全阈值确定

前文通过建立等离子体碰撞反应放电仿真模型, 可以得到瓦斯引燃所需要的最小引燃电压 U_{ig} 和最佳放电间隙 d 。本节构建电磁波能量耦合传输仿真模型, 在最佳引燃条件下, 根据等离子体碰撞确定的最小引燃电压 U_{ig} 推演功率安全阈值 P_{th} 。

以偶极子天线作为发射天线, 图 24 为正常工作情况下的场分布, 从场分布来看, 其馈电处 (红色圆圈内) 的电场最大、能量最为集中, 也就是在馈线处形成放电间隙时, 瓦斯更容易被引燃。实际上, 5G 基站在煤矿井下应用时, 馈电处也是最易形成放电间隙的部位, 除此之外, 天线本体因为腐蚀、冲击、制造等因素, 也可能造成放电间隙。

如图 25 所示, 图中左边为天线臂, 右边为馈电探针, 在发射天线能量集中处设置放电间隙为 100 μm , 以最小引燃电压 U_{ig} 作为瓦斯引燃的边界条件, 计算满足边界条件的射频源功率 P_{th} 。可见其场强分布非常均匀, 从场分布和能量传播来分析, 其建立了类似同轴线内外导体类似的模式, 从而形成了较为均匀的电磁场分布。

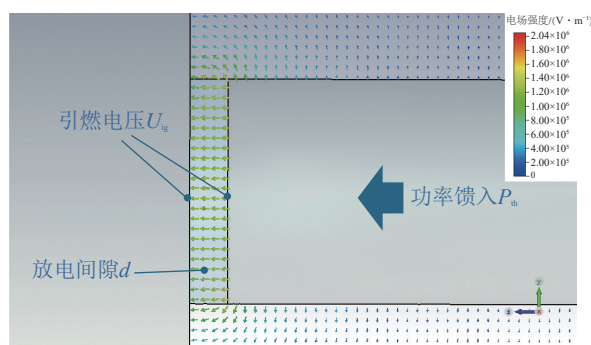


图 25 功率安全阈值仿真模型

Fig 25 Simulation model of power safety threshold

间隙电压的计算方式如下

$$U = \int E dl \quad (6)$$

本研究计算了放电间隙产生 135~189 V 电压所需馈入功率 (表 5), 根据理论分析结果, 700 MHz 频段电磁波 (正弦波形) 理论功率安全阈值为 47.3 W。

3 安全阈值试验验证

3.1 射频电磁能防爆专用试验装置

3.1.1 设计原则

由于高频信号因参数不匹配导致的能量反射问题, IEC 火花台不适用 1.5 MHz 以上频段射频信号, 若直接将射频能量接入 IEC 火花台, 则始终无法观察到瓦斯被引燃的现象。据此, 提出了射频电磁能防爆试

表 5 端口馈入功率与间隙电压关系

Table 5 Relationship between port input power and gap voltage

输入功率/W	间隙电压/V	输入功率/W	间隙电压/V
45.60	135.00	81.920	180.95
47.30	137.50	83.205	182.37
50.00	141.37	84.500	183.80
60.50	155.50	85.805	185.20
65.00	161.15	87.120	186.59
72.00	169.64	88.445	188.01
78.125	176.70	89.780	189.44

验装置主要应遵循的设计原则: ① 射频能量必须可以完全馈入到放电电极; ② 试验装置既可以模拟发射端引燃瓦斯的情况, 同时也可以模拟在近场和远场引燃瓦斯的情况; ③ 应便于观测点燃现象, 并同时可以记录瞬时射频源功率; ④ 应具有形成放电电极的电气间隙; ⑤ 爆炸性气体不能被非射频能量点燃, 如机械火花、电机火花、热表面等。

3.1.2 参数匹配设计

通过阻抗匹配设计, 本研究成功实现了射频能量对放电电极的有效馈入。基于偶极子天线设计了一套射频电磁能量点火测试装置, 如图 26a 所示。天线的每个臂长 71 mm, 直径 15 mm, 天线法兰直径 40 mm。馈入电极的直径为 0.3 mm, 长 15 mm。而天线法兰上的缺口用以形成放电间隙, 长度为 9 mm, 宽度为 5 mm。在该设计中, 最集中的能量位于馈线处, 因此在此处构建了微米级的放电间隙。

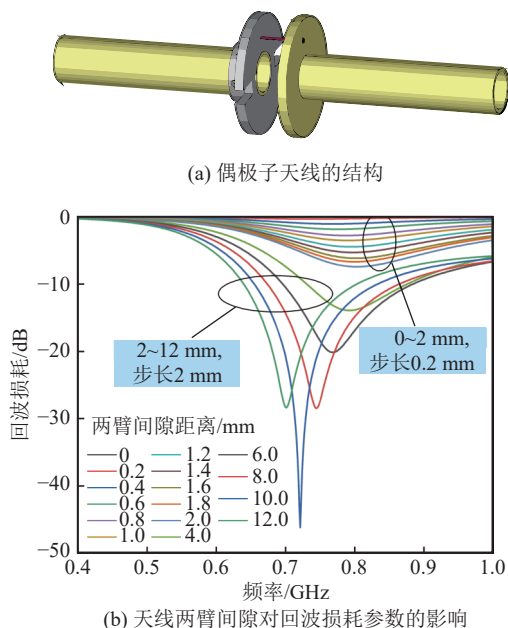


图 26 试验装置仿真设计

Fig.26 Simulation design of experimental device

如图 26b 所示, 考虑到 700 MHz 的工作频率, 需要考虑天线 2 个臂之间间隙对回波损耗参数的影响。如果间隙过小, 几乎所有的能量都会被反射; 根据偶极子天线理论, 间隙也不能过大, 否则会导致馈入后的 2 个臂的电流不平衡, 从而失去对称振荡器的特性。因此, 模拟中选择的最大间隙为 12 mm。模拟结果显示, 在 700 MHz 下, 天线两臂的间隙为 10 mm 时, 偶极子天线的回波损耗参数达到了 -28 dB, 此时约 99.84% 的能量能够传递到放电电极。基于这些结果, 选择了 10 mm 作为两臂之间的最佳间隙。

对于其他频段的试验装置设计, 方法基本相同, 主要通过调整关键部件的尺寸参数来实现优化。

3.1.3 试验装置设计

在构建模型之后, 为了便于试验, 本研究进行了额外的设计, 包括对金属结构进行密封, 创建一个封闭的点火室, 专门用于控制气体的注入, 确保试验结果的稳定和准确。对铜盘进行了加厚处理, 以增强旋转组件的平衡性, 特别是解决了由铜管质量引起的问题。引入了塑料轴承, 以实现更顺畅的旋转, 减少活动部件的磨损。精心安装了充气和排气阀, 以调节腔室内气体的流动和成分, 这对于维持精确的试验条件至关重要。

如图 27 所示, 详细的结构设计不仅展示了物理布局, 还突出了安全特性的集成, 例如防爆通风口, 以及用于密封的橡胶圈和增强结构完整性的 3D 打印外壳等功能部件。电机驱动天线的左臂旋转, 而右臂保持固定。钨丝焊接在馈入天线的同轴线上, 铜盘直接与天线的左臂电连接, 具有带槽结构。当电机旋转左臂时, 钨丝相对于铜盘滑动。这种交互产生了“接触-断开-接触”的循环, 当钨丝到达或离开铜盘的接口时, 形成了一个符合帕邢定律的放电间隙, 从而点燃甲烷气体。选择钨和铜作为放电电极, 旨在防止因电极摩擦引起的机械火花, 提升安全性和有效性。

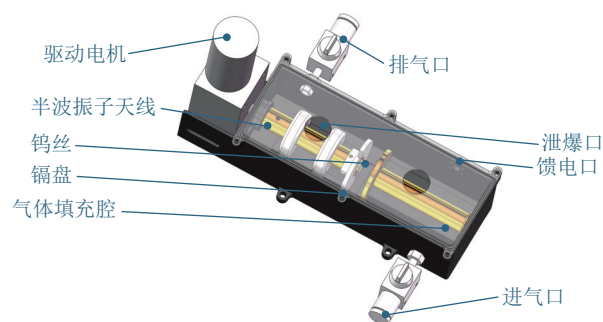


图 27 射频电磁能防爆专用试验装置

Fig.27 Rf electromagnetic energy explosion-proof special experimental device

3.1.4 试验装置参数

试验涉及的关键参数见表 6。

3.2 射频电磁能防爆专用试验方法

如图 28 所示,该试验电路由射频源、保护电路、测量电路和射频防爆试验装置组成。射频源由信号发生器和功率放大器构成,为试验提供具有多种调制方式的高功率射频信号。当钨丝和钨盘形成放电间隙时,偶极子天线可能处于阻抗不匹配的状态,导致高的电压驻波比和能量全反射,保护电路用于防止反射能量损坏射频源。测量电路由双向耦合器和功率计组成,用于测量射频信号的临界点火功率,即电磁波的安全阈值。为了防止射频辐射对人体造成伤害,试验装置放置在微波暗室内,操作人员在控制室进行

表 6 试验涉及的关键参数

Table 6 Key parameters involved in the experiment

序号	物理量	参数
1	回波损耗参数/dB	-28
2	电极材料	纯钨
3	电极尺寸/mm	长15, 直径0.3
4	法兰材料	钨
5	法兰直径/mm	40
6	法兰间距/mm	12
7	缺口间隙/mm	长9, 宽5
8	电机转速/(r · min ⁻¹)	400
9	甲烷体积分数/%	8.3±0.3

远程控制。

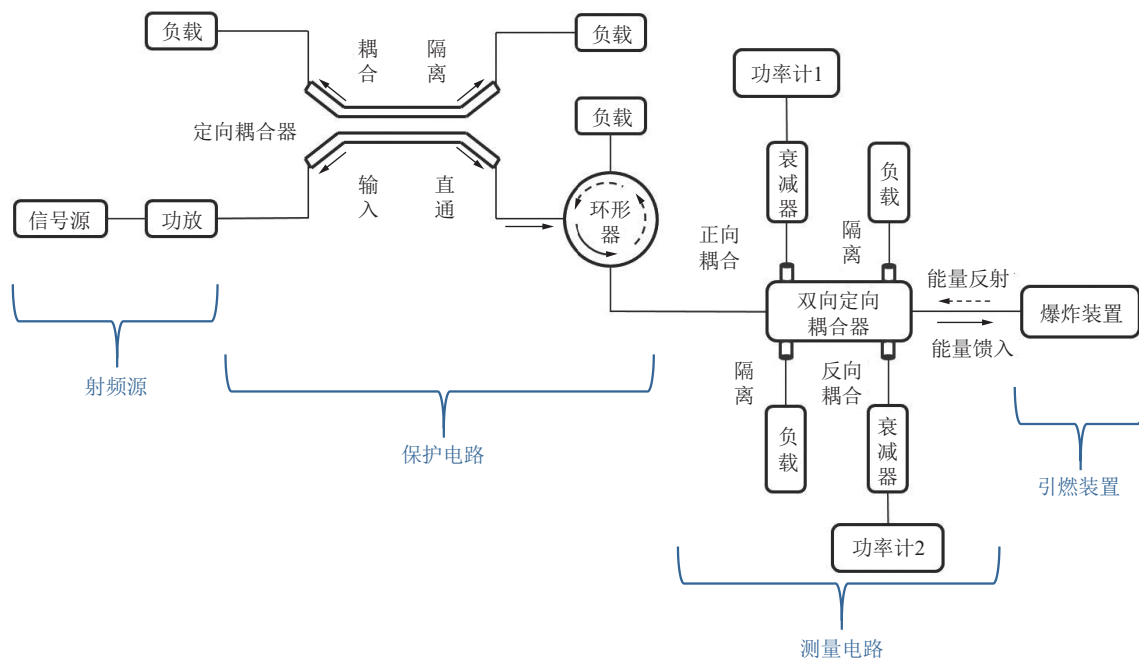


图 28 发射端射频电磁能防爆试验电路与试验方法

Fig.28 Radio-frequency electromagnetic energy explosion-proof experimental circuit and experimental method at the transmitting end

3.3 试验结果

3.3.1 试验现象

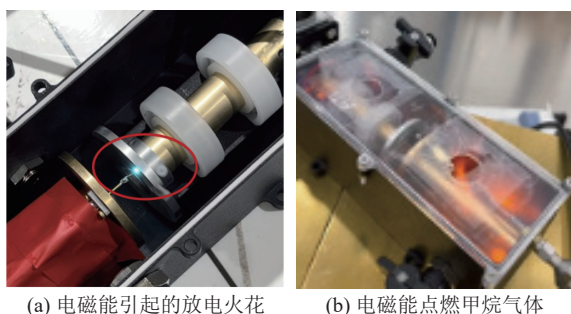
本研究系统地探索了在不同频段下利用射频电磁能引燃甲烷气体的情况,有效量化了在多种条件下所需的临界点火功率。图 29 展示了试验过程中观察到的关键现象:图 29a 显示了由射频电磁能产生的蓝色电火花,图 29b 则通过高速摄像机高精度地捕捉到了甲烷气体被引燃的瞬间。

需要强调的是,尽管射频电磁能比较容易产生电火花,但其存在并不必然导致甲烷气体的引燃。甲烷的点燃关键取决于电火花的能量水平。由于钨盘和钨丝的旋转速度相对较慢,此时钨丝和钨盘运动到最佳放电间隙时,可以认为在瓦斯热起燃时间内 (200 μs)

钨丝和钨盘的间隙是相对固定的。因此,射频电磁能是否能够引燃甲烷气体的关键因素转化为电磁波功率的充足性。

3.3.2 试验结果

在射频电磁能安全阈值测试中,装置内充入 8.3% 的甲烷/空气混合气体,这是甲烷最易引燃的体积分数。测试中,功率计 1 测量正向功率 W_f ,功率计 2 测量反向功率 W_r 。模拟结果显示,间隙电压由 W_r 决定,与 W_f 无关。因此,发生爆炸时,功率计 1 的读数 W_f 即安全阈值。利用第 2 章的试验装置和方法,在 100 次成功的甲烷点火试验中,700 MHz 频率下测得的边界点火功率为 49.7 W(图 30)。最高和最低点火功率差异极小,表明试验方法具有高度的可重复性。



(a) 电磁能引起的放电火花 (b) 电磁能点燃甲烷气体

图 29 射频电磁能瓦斯引燃试验现象

Fig.29 Phenomena of radio-frequency electromagnetic gas ignition experiment

需要指出, 点火概率随功率增加而提高, 因为更高的功率更可能使能量达到引燃甲烷所需的临界阈值。因此, 功率的微小增加也会显著影响点火概率, 这解释了 700 MHz 下观察到的现象。

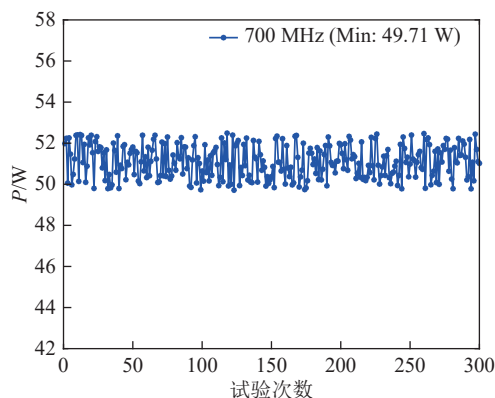


图 30 700 MHz 射频电磁能引燃试验

Fig.30 700 MHz radio-frequency electromagnetic energy ignition experiment

根据 IEC 60079 标准, 在交流电路上进行了火花测试, 产生 9 600 次火花未引起爆炸, 表明设备具备本质安全性。为确保数据可靠性, 将 700 MHz 频段的输入功率设为 49.6 W, 比边界点火功率低 0.1 W。试验步骤如下: 旋转速度约 200 r/min, 每转产生至少 4 次火花, 系统连续旋转 12 min, 累计 9 600 火花, 观察是否发生甲烷点火。多次重复试验中, 功率降低 0.1 W 未导致甲烷点燃。最后, 使用点火器确认了测试气体的可燃性。

因此, 可确认 700 MHz 频段的试验安全阈值为 49.7 W, 仿真模拟确认 700 MHz 频段的理论安全阈值为 47.3 W, 取两者之间的小值作为安全阈值, 则 700 MHz 频段安全阈值为 47.3 W。

4 多物理参数对安全阈值的影响分析

4.1 调制方式

5G 新无线 (NR) 电磁波采用正交频分复用 (OF-

DM) 与高阶正交幅度调制 (QAM) 等先进调制方式, 其数学表达式如下

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} [A_k \cos(2\pi f_k t) + B_k \sin(2\pi f_k t)] \quad (7)$$

式中, A_k 和 B_k 分别为第 k 个子载波的同相和正交分量; f_k 为子载波频率。

由于 5G NR 信号不等幅 (区别于正弦信号), 无法获得固定的电压幅值, 因此需要通过信号采集的方式获取信号, 直接进行信号功率的计算。

图 31 所示信号的中心频率为 700 MHz, 带宽为 20 MHz, 子载波 1 200 个, 信号功率 1 mW, 采样时间 20 μ s。信号频率为 700 MHz, 即信号周期为 1.4 ns, 所以信号在 20 μ s 内基本可以囊括信号的变化趋势。式 (8) 为 5G NR 信号功率由均方根值计算, 原始信号功率 1 mW, 可以通过增加放大因子调整信号功率, 在该技术路线下可以直接得到 5G 信号源的功率, 不需要经过电磁波仿真获得功率。

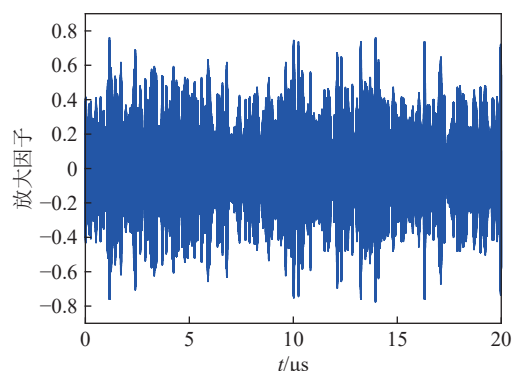


图 31 5G NR 调制信号 (700 MHz)

Fig.31 5G NR modulated signal (700 MHz)

$$P = \text{RMS} \left(\frac{A_1 S^2(t)}{50} \right) \quad (8)$$

式中: RMS 为均方根; A_1 为放大因子。

将输入信号改变为 5G NR 调制波, 采用第 3 节的理论安全阈值仿真模型进行计算。与 700 MHz 情况相同, 5G NR 调制信号在 $d=100 \mu\text{m}$ 时获得最小击穿电压, 如图 32 所示。

与 700 MHz 情况不同的是, 正弦波形在 47.3 W 时已经引燃了瓦斯, 但 5G NR 在 52.8 W ($A_1=237$) 时刚刚产生了间隙击穿。

当放大因子 $A_1=245$ 时, 此时信号功率为 56.5 W, 放电功率变化如图 33 所示。放电在 10 μ s 后逐渐熄灭, 可以认为每 20 μ s 重复一次放电-熄灭的过程。20 μ s 时间内等离子体能量约为 0.000 7 mJ, 外推得到 200 μ s 内等离子体能量约为 0.007 mJ, 远小于空气/甲

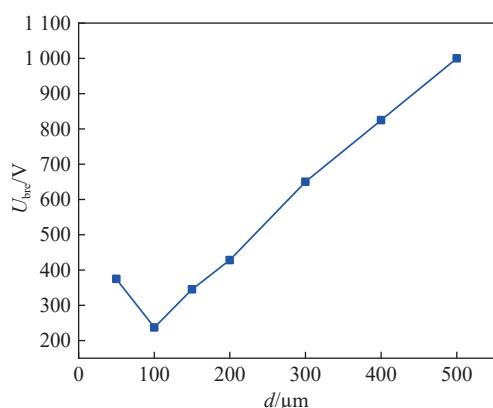


图 32 放电间隙对击穿电压的影响 (5G NR)

Fig.32 Effect of discharge gap on breakdown voltage (5G NR)

烷的引燃阈值 0.28 mJ。所以信号功率为 56.5 W 时, Air/8.3%CH₄ 混合气体仍不会发生爆炸。5G NR 调制信号比正弦波信号更难引燃 Air/8.3%CH₄ 混合气体, 对于 700 MHz 来说, 5G NR 的安全阈值大于 47.3 W。

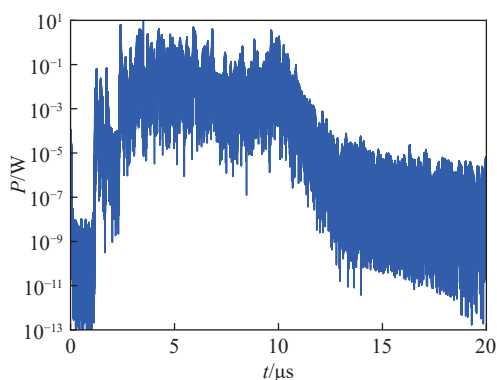


图 33 放电功率随时间的变化 (5G NR)

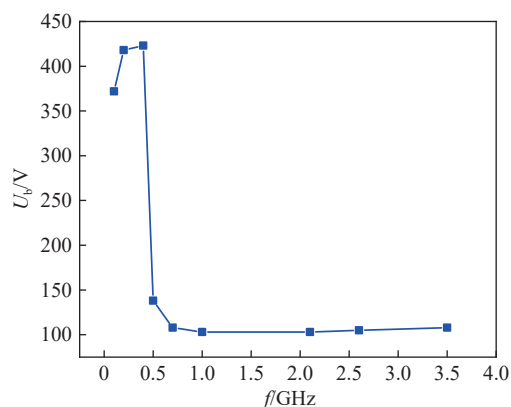
Fig.33 Variation of discharge power over time (5G NR)

通过上述分析可知, 相较于 700 MHz 的连续射频信号, 波形调制后的击穿电压明显更高, 这可从能量守恒的角度加以解释。在连续射频情况下, 当计算放电过程中的等离子体能量时, 需要对功率进行积分。功率在气体击穿前极小, 击穿后功率值显著增加, 且在放电稳定后其大小几乎保持不变。因此, 只需在 200 μs 内提供很小的瞬时功率即可达到击穿阈值。然而, 对于波形调制后的信号, 即 5G 信号下的放电, 分析放电过程发现, 此时放电并非连续发生, 只有当电压达到或超过临界击穿电压时才会产生放电; 当电压低于临界击穿电压时, 放电减弱甚至熄灭, 导致等离子体功率出现较大波动。为了在 5G 信号波形下实现放电击穿, 必须提高瞬时峰值电压以触发放电, 并在整个 5G 信号波形中维持相对较高的电压。因此, 相较于标准正弦波情况, 其所需功率也相应增加。

4.2 频率

激励源频率的变化将对放电现象、特征以及放电

条件和结果产生显著影响, 其根源在于击穿机制随频率变化而发生转变。在交流激励源 (如电场) 下, 为使放电不受频率影响, 电极间的带电粒子必须在 1/4 周期内完全到达电极, 避免在电极间形成空间电荷。否则, 放电过程将受到前一周期残留空间电荷的影响。如果交流电场的频率较低 (如 50 Hz), 由于击穿过程可在 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ s 内完成, 此瞬间电场变化极小, 即电场变化周期远大于电离和复合所需时间。因此, 每半个周期都会经历击穿、维持和熄灭的过程。在这种情况下, 放电现象和本质与直流放电无实质性区别, 正负电极的电荷将随着电场换向而交替变化。然而, 随着电场频率的升高, 情况将显著不同。对煤矿井下常用的典型频段进行击穿电压扫描, 可以得出如图 34 所示的曲线。在 0.000 09~3.5 GHz 频段, 击穿电压呈现先上升再下降的趋势。实际上, 这种现象是可以被解释的。

图 34 频率对击穿电压的影响 (Air/CH₄)Fig.34 Effect of frequency on breakdown voltage (Air/CH₄)

随着频率的增加, 电场中会出现 2 个关键的临界频率, 分别为 f_1 和 f_2 , 对应不同的放电击穿机制。

当频率达到 f_1 时, 在半周期内, 正离子刚好在电极间往返一次但未能到达电极。若频率 $f > f_1$, 正离子将在电极间振荡, 无法抵达电极表面, 导致空间电荷积累增强。与此同时, 新的电子通过碰撞电离使离子密度不断增加, 直至气体发生击穿。由于正离子无法到达电极, 电极上的 γ 过程作用显著减弱, 因此此时的击穿机制与直流电场下的放电有明显区别。由此, f_1 被视为基于正离子运动行为的频率界限。

当频率继续升高至 f_2 时, 电子也无法响应电场变化到达电极, 而是在电极间来回振荡。电子的振荡增加了与气体分子的碰撞次数, 显著提高了电离能力。正离子由于质量较大, 更难以响应电场变化, 形成高密度的空间电荷, 进一步增强了放电效应。在适当的电场强度下, 会产生大量电离, 导致气体击穿放电。由

于带电粒子均无法到达电极,击穿过程与电极上的 γ 过程无关。 f_2 因此成为区分击穿机制的另一频率界限。

当交流电场频率 $f < f_2$ 时,电子仍可通过电场驱动的漂移运动进入电极并消失,击穿机制受“迁移过程控制”。而当 $f > f_2$ 时,电子无法到达电极,只能通过扩散、复合或附着等方式消失,其中扩散过程是关键速率控制步骤,因此此时的击穿机制称为“扩散过程控制”。

需要指出的是,除上述临界频率 f_1 和 f_2 外,高频放电的击穿机制还与电离频率 ν_i 有关。综合考虑这 2 个临界频率和平均电离速率 ν_i 的影响,可将放电过程分为以下 4 种情况:

1) 当 $f < f_1$ 且 $f \ll \nu_i$ 时,电子在电场半周期内能引发大量气体分子电离,正离子可穿越整个间隙,击穿机制与静态电场类似。

2) 当 $f_1 < f < f_2$ 时,击穿受迁移过程控制,正离子无法到达电极。

3) 当 $f > f_2$ 时,电子也无法到达电极,而在电极间振荡,击穿受扩散过程控制。

4) 当频率增至微波波段且 $f \gg \nu_i$ 时,电子受电磁场振荡的驻波影响,此时属于微波放电。

“700 MHz”在工信部定义中的频段范围为:上行 703~743 MHz(中心频点 723 MHz);下行 758~798 MHz(中心频点 778 MHz)。根据以上分析和计算结果,不同频段、不同调制信号的射频电磁波安全阈值具有以下不等式关系:

1) 778 MHz(sine) < 723 MHz(sine) < 700 MHz(sine)

2) 778 MHz(5G NR) < 723 MHz(5G NR) < 700 MHz(5G NR)

3) 778 MHz(sine) < 778 MHz(5G NR)

4) 723 MHz(sine) < 723 MHz(5G NR)

5) 700 MHz(sine) < 700 MHz(5G NR)

综上所述,对“700 MHz”频段范围 5G 电磁波而言,778 MHz 正弦波的安全阈值是最小的。将输入信号频率改为 778 MHz,采用第 3 节的理论安全阈值仿真模型进行计算。仿真结果显示,778 MHz 的安全阈值大于 43.3 W。即“700 MHz”频段范围 5G 电磁波的安全阈值应为 43.3 W。

4.3 温湿度

温湿度对射频电磁波功率安全阈值的影响分为 2 类,一类是温湿度对气体放电的影响,一类是温湿度对电磁波传输衰减系数的影响。

4.3.1 温湿度对气体放电的影响

湿度对气体放电的起始和发展特性具有显著影

响。随着空气湿度的增加,空气中所含的水分子增加,将对气体放电碰撞电离系数 α 、电子附着系数 η 、光子的吸收系数 μ 、电子的迁移速度 v_e 等带来不同的影响。当湿度增加时,电子的附着系数和复合系数均增大。电子更容易被水分子吸附形成负离子,亦更易与正离子发生复合,导致电子密度降低。电子密度的降低使碰撞电离系数减小,空间中的有效电离度下降。因此,空气湿度的增加会导致击穿电压升高。

井下的温度变化范围对气体放电影响较小,不做针对性分析。

4.3.2 温湿度对电磁波传输衰减系数的影响

温湿度对电磁波传输衰减系数的影响基于 WirelessInsite 软件进行仿真验证,场景设置为井下巷道,总长 500 m、宽 5 m、高 4 m,在巷道中央位置布置全向天线作为射频源,随机选 10 个点验证接收功率,接收功率越小,则说明电磁波在对应条件下的衰减系数越大。

如图 35a 所示,对于不同温度环境下的同一空间位置,其位置的辐射功率随温度变化不大,但总体趋势为温度越高接收功率越低,即温度越高电磁波在空间中的衰减越大。如图 35b 所示,对于不同湿度环境下的同一空间位置,其位置的辐射功率随湿度变化不大,但总体趋势为湿度越高接收功率越低,即湿度越高电磁波在空间中的衰减越大。

温度和湿度与电磁波在空间中的传输衰减系数呈正相关,即随着温度和湿度的升高,电磁波在空气中的传输衰减增大,但总体上温湿度对电磁波传输衰减系数影响较小。值得注意的是,温湿度对电磁波衰减系数的影响主要提高了近场和远场引燃瓦斯的安全阈值,对发射端安全阈值不造成影响。

总之,井下的高温高湿环境可进一步提高电磁波引燃瓦斯所需的功率,增大安全系数。

4.4 能量积聚放电风险

前文所述考虑的瞬时放电,煤矿井下金属构件众多且复杂,若存在能量积聚放电,则会极大的降低本研究计算所得的安全阈值,本节进行能量积聚放电风险分析。

射频能量异常接收并积聚产生放电,能量接收系统至少需同时满足以下 4 个条件:

1) 金属构件成为等效天线,与空间中的电磁波发生谐振,耦合射频能量。

2) 等效天线的输出端存在整流电路,将射频信号整流为直流。

3) 存在储能电容,用于储存整流后的能量。

4) 整流电路后端存在放电间隙,以释放储存的

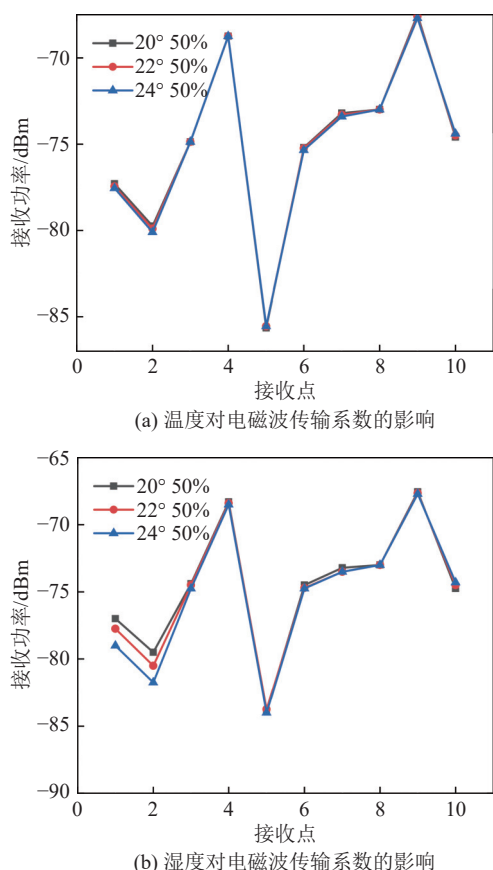


图 35 温湿度对电磁波传输系数的影响

Fig.35 Effect of temperature and humidity on the electromagnetic wave transmission coefficient

电能。

以上每一个条件都需要经过精密的人为设计才有可能实现,同时满足4个条件的偶发概率甚低,可以不考虑射频能量积聚风险。

4.5 天线增益

我国的 GB/T 3836.1 标准中,阈功率被定义为等效全向辐射功率 (EIRP),即发射端口功率与天线增益之和,其中 EIRP 表示天线在特定方向上的辐射能力。

英国学者的研究主要探讨发电站产生的电磁场是否可能影响数公里外的天然气管道,进而引发点火风险。在这一情境下,射频源位于非爆炸性环境中,研究的焦点是天然气管道(即接收天线)的引燃风险。由于接收端是主要关注点,采用接收天线匹配负载作为安全阈值的评价指标是合理且具有先进性的。更高的 EIRP 意味着接收天线可能接收到更多能量,增加了引燃的风险。因此,在英国的 BS 50427 标准中,对接收端设定 6 W 的限制指标是合理的。

然而,当 5G 基站应用于煤矿井下时,情况发生了显著变化。此时,射频源(发射天线)直接暴露于瓦斯/空气的爆炸性环境中,存在射频源直接引燃瓦斯的风

险,且所需的射频源功率更低。需要强调的是,天线无法放大端口功率,阈功率并非实际的物理功率值,而是反映天线在特定方向上的辐射能力。根据本研究结果,在煤矿井下环境中,发射天线成为最具危险性的因素。要在近场和远场引燃接收端的瓦斯,所需的射频源功率远高于在发射端直接引燃所需的安全阈值。

因此,从发射端的角度来看,基于能量守恒的基本原理,采用阈功率进行安全评估会引入过大的安全系数,导致过度的限制,妨碍 5G 技术在煤矿井下的有效应用。换言之,当以发射端作为评价指标时,继续使用阈功率限制已不适用。

综上所述,在过去关注接收端安全风险的情况下,采用阈功率作为评价指标是合理且具有先进性的。然而,当主要关注发射端的安全风险时,继续使用阈功率作为评估标准已不再适宜。因此,在以发射端为中心的安全评估中,不再以阈功率作为评价指标,而应直接考虑发射端口的实际功率。

4.6 多源叠加

煤矿井下常见同一基站具有多根天线以及多个基站同时工作的场景。由于基础研究不足,国内对井下 5G 基站进一步增加了同基站多源阈功率代数 and 不得超过 6 W 的限制。实际上,多源叠加引起的危险主要在接收端导致点火,并不会直接改变发射端的安全阈值。然而,由于井下多个基站和多个端口同时工作,若存在多源叠加的风险,可能形成等效的超大功率射频源,间接降低单端口的功率阈值。因此,本节针对多基站或单基站多端口的情况,基于 CST 全波仿真手段研究多源叠加对安全阈值的影响。如图 36 所示,仿真设计试验组和对照组,以对比极化方式、相位、频率和相对位置关系对多源叠加的影响。

如图 37 所示,对照组为单天线发射、单天线接收;试验组为 4 根天线发射、单根天线接收。通过查看接收天线端口电压来获取接收天线的接收功率。

仿真出现了以下 4 种典型结果:

- 1) 当发射天线彼此距离较近且同时激励 1~4 单元时,接收天线的接收功率约为单个激励时的 16 倍,远超多源代数叠加之和 (4 倍)。
- 2) 当发射天线 1~2 与 3~4 单元相位差为 180° 且同时激励 1~4 单元时,接收天线的接收功率为零。
- 3) 在其他情况下,接收天线的接收功率介于零与多源代数叠加之和 (4 倍) 之间。
- 4) 接收天线接收到的功率与发射天线的功率相比存在数量级上的差异。

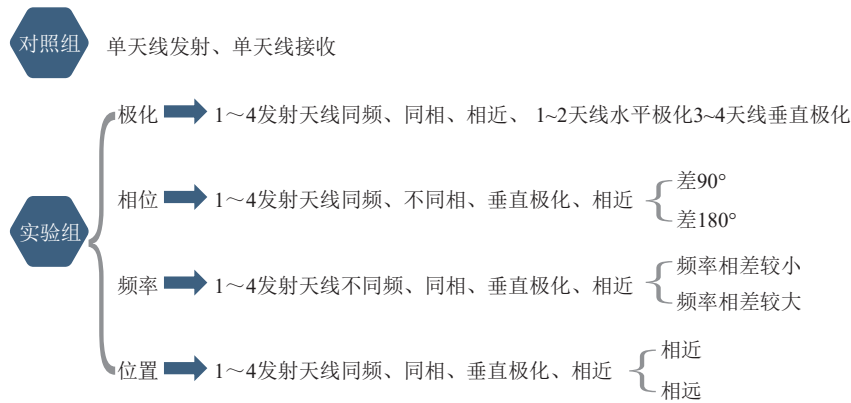


图 36 多源叠加仿真参数设计

Fig.36 Multi-source superposition simulation parameter design

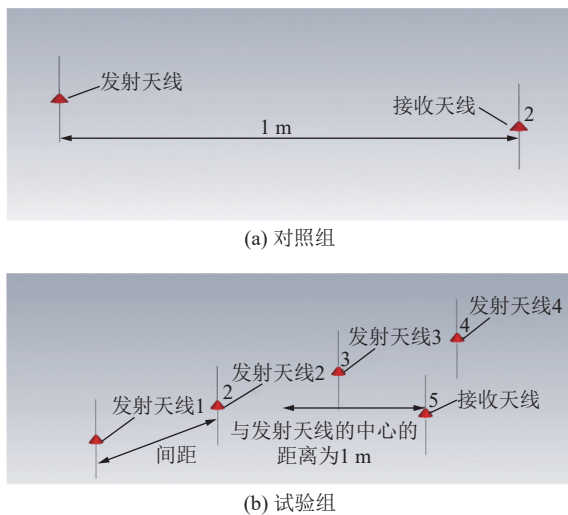


图 37 多源叠加仿真试验

Fig.37 Multi-source superposition simulation experiment

结果 1) 主要归因于天线间距较近所产生的波束赋形效应; 结果 2) 由于相位差为 180° , 对称位置的来波相互抵消; 结果 3) 和 4) 是常见现象, 但假设射频源数量不断增多并存在多源叠加现象时, 接收天线上也不可避免地产生引燃风险。假设有 n 个射频发射天线, 单个接收天线, 接收天线与每个射频源谐振接收到信号为 $f_i(f, \phi, A)$, 且 $f_i(f, \phi, A)$ 是关于电磁波频率 f 、信号幅值 A 和相位 ϕ 的函数, 接收天线与 n 个射频源同时谐振接收到信号为 $F(x)$, 接收天线接收到的信号为 $F(x)$, 如式 (9) 所示, $F(x)$ 是 n 个 $f_i(f, \phi, A)$ 的矢量累加。若射频源是相关函数, 则在接收天线上谐振形成的 $f_i(f, \phi, A)$ 也是相关的, 此时式 (9) 表现出代数叠加的形式, $F(x)$ 有叠加出极大值的风险; 相反, 若射频源是非相关函数, 则 $F(x)$ 很难叠出极大值。

$$F(x) = \sum_{i=1}^n f_i(f, \phi, A) \quad (9)$$

因此, 本文提出在满足以下原则的情况下, 可忽略多源叠加效应。

略多源叠加效应。

1) 满足天线分集的多天线系统。① 空间分集。两天线距离远大于波长 (5 个波长); ② 角度分集。两天线的波束指向方向相反; ③ 时分分集。两天线不同时工作, 电磁波完全不同步; ④ 极化分集。两天线工作在正交极化。

2) 相关性系数小于 0.1 的多天线系统。实际上, 满足天线分集的多天线系统也是低相关性系数多天线系统, 相关性系数按式 (10) 进行计算。

$$\rho_{ij} = \frac{|\iint_{4\pi} \bar{F}_i(\theta, \phi) \cdot \bar{F}_j^*(\theta, \phi) d\Omega|^2}{\iint_{4\pi} |\bar{F}_i(\theta, \phi)|^2 d\Omega \cdot \iint_{4\pi} |\bar{F}_j(\theta, \phi)|^2 d\Omega} \quad (10)$$

式中: \bar{F}_i 、 \bar{F}_j 分别为天线 i 、 j 的方向性函数; Ω 为立体角; θ 、 ϕ 分别为立体坐标中的极角、方位角。

一般认为, 接收天线的能量接收效率很难超过 10%(通常不会超过 1%), 所以射频天线低于 10 个时, 接收天线上形成多源相关叠加后的能量也很难超过单射频源的功率, 但是天线非相关可以进一步保障接收端安全性。但是对于 10 个以上的多源天线, 特别是大规模 MIMO, 必须要通过相关性系数来评价多源叠加。

5 结论与展望

5.1 结论

本研究针对现行电磁波防爆标准在 5G 射频电磁能应用中的显著局限性进行了深入探讨, 主要问题包括试验方法的不适用性、高频段阈值推广的不合理性、评价指标的安全系数过大, 以及对多源叠加效应的缺乏明确性。因此, 迫切需要重新审视并更新这些标准, 以确保在煤矿井下复杂环境中能够精准评估电磁波引燃易燃气体的潜在风险, 从而促进 5G 技术的安全应用。

1) 本研究项目基于低温等离子体动力学和电磁

波传输理论, 构建了瓦斯/空气混合气体电磁波安全阈值的通用计算模型, 并设计了射频电磁能防爆安全试验装置, 实现了理论阈值与试验阈值之间的有效验证。研究表明, 电磁波的安全阈值与多个因素密切相关, 包括频率、调制方式、气体成分以及放电间隙。具体而言, 5G NR 700 MHz 频段电磁波的安全阈值测得为 43.3 W。笔者为井下射频电磁能防爆安全阈值提供了研究方法, 对于其他频段 5G 信号及其他调制方式射频设备的功率安全阈值还需针对性研究。

2) 在井下射频电磁能的防爆指标中, 本研究强调应仅考虑发射端的能量, 而不应将天线增益纳入评价, 同时不应采用阈功率作为评价指标。此外, 对于满足天线分集条件或相关性系数小于 0.1 的多天线系统, 可以在安全评估中忽略多源叠加效应。

3) 在煤矿井下部署 5G 基站时, 除需满足功率安全阈值、多天线系统相关性系数低于 0.1 以及基站本体符合防爆标准等基本要求外, 还应确保天线与基站之间的连接可靠, 以避免产生不可控的放电间隙。此外, 应采取硬件措施保障射频功率不超过设定限值, 并防止直流电流泄漏等问题, 从而进一步确保 5G 基站在煤矿井下运行的系统安全性。

综上所述, 本研究为 5G 射频电磁能在煤矿井下的安全应用提供了科学依据, 明确了安全阈值的影响因素, 并为未来的标准制定和技术应用提供了重要参考。希望本研究能够促进煤矿行业的智能化建设与安全生产, 为相关领域的后续研究奠定坚实基础。

5.2 展 望

在不断发展的技术背景下, 确保射频电磁能的安全应用已成为亟待解决的重要课题。

1) 未来的研究需聚焦于多频段、多调制方式与多场景的探索, 从而为各种应用场景制定更为适用的安全阈值, 以应对新兴环境下的安全挑战, 并推动标准的修订与完善。

2) 针对射频电磁能防爆检验方法与检验装置的研究也需加强。建立科学、系统的检验方法将有助于提升射频设备的安全性, 确保在实际应用中能够有效评估其引燃风险。同时, 完善试验装置设计, 确保其能够在高频和复杂环境下准确测试射频能量的防爆特性, 是未来研究的重要方向。

3) 考虑到射频电磁能防爆标准在无线充电等新兴技术中的不适用性, 必须开展针对性研究, 以制定适应这些新技术的安全标准和评估体系。

通过这些努力, 期待为射频电磁能在各行业的安全应用奠定坚实的基础, 并推动相关领域的进一步发展。

致谢 感谢清华大学电机系付洋洋副教授、蒋园园博士后、赵志航博士后对等离子体放电提供的指导和帮助; 感谢电子科技大学电子科学与工程学院欧阳骏教授对电磁波传输理论提供的指导和帮助。

参考文献(References):

- [1] 王国法, 赵国瑞, 胡亚辉. 5G 技术在煤矿智能化中的应用展望[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 16–23.
WANG Guofa, ZHAO Guorui, HU Yahui. Application prospect of 5G technology in coal mine intelligence[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 16–23.
- [2] 王国法, 庞义辉, 任怀伟, 等. 智慧矿山系统工程及关键技术研究与实践[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 181–202.
WANG Guofa, PANG Yihui, REN Huaiwei, et al. System engineering and key technologies research and practice of smart mine[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 181–202.
- [3] 王国法, 杜毅博, 任怀伟, 等. 智能化煤矿顶层设计研究与实践[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 1909–1924.
WANG Guofa, DU Yibo, REN Huaiwei, et al. Top level design and practice of smart coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1909–1924.
- [4] 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 1–27.
WANG Guofa. New technological progress of coal mine intelligence and its problems[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 1–27.
- [5] 葛世荣, 张帆, 王世博, 等. 数字孪生智采工作面技术架构研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 1925–1936.
GE Shirong, ZHANG Fan, WANG Shibo, et al. Digital twin for smart coal mining workplace: Technological frame and construction [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1925–1936.
- [6] 刘峰, 曹文君, 张建国, 等. 我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 1–15.
LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming, et al. Current technological innovation and development direction of the 14th Five-Year Plan period in China coal industry[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 1–15.
- [7] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 爆炸性环境 第 1 部分: 设备 通用要求: GB/T 3836.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [8] MENG J J, GUO Z W, ZHANG Y, et al. Analysis of electromagnetic wave ignition mechanism and calculation of power threshold in underground coal mine[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2024, 38(2): 234–249.
- [9] ABDEL-SALAM M. Positive wire-to-plane coronas as influenced by atmospheric humidity[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, IA-21(1): 35–40.
- [10] KNIGHT P. Radio-frequency ignition hazards: The power available from non-resonant structures[R]. London: British Broadcasting Corporation, BBC Research Department Report No. RD 1982/3, 2012.
- [11] ROBERTSON S S J, LOVELAND R J. Radio-frequency ignition hazards: A review[J]. IEE Proceedings A Physical Science, Meas-

- urement and Instrumentation, Management and Education, Reviews, 1981, 128(9): 607.
- [12] MADDOCKS A J, JACKSON G A. Measurements of radio frequency voltage and power induced in structures on the St Fergus gas terminals[J]. *Radio and Electronic Engineer*, 1981, 51(4): 187.
- [13] BURSTOW D J, LOVELAND R J, TOMLINSON R, et al. Radio frequency ignition hazards[J]. *Radio and Electronic Engineer*, 1981, 51(4): 151.
- [14] KNIGHT P. Radio frequency ignition hazards: the choice of reference antenna for available-power calculations[R]. London: British Broadcasting Corporation, BBC Research Department Report No. RD 1982/16, 1982.
- [15] ROSENFELD J L J, STRACHAN D C, TROMANS P S, et al. Experiments on the incendivity of radio-frequency, breakdown discharges (1.8–21 MHz c. w.)[J]. *Radio and Electronic Engineer*, 1981, 51(4): 175.
- [16] FOUAD L, ELHAZEK S. Effect of humidity on positive corona discharge in a three electrode system[J]. *Journal of Electrostatics*, 1995, 35(1): 21–30.
- [17] KUO C J, CHAN T F. Two-color Fourier analysis of iterative algorithms for elliptic problems with red/black ordering[J]. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, 1990, 11(4): 767–793.
- [18] 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.
- [19] 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]. *Industry and Mine Automation*, 2023, 49(2): 1–5.
- [20] 冯柳, 高鹏飞, 张立亚, 等. 电磁波能量安全性分析测试平台的设计[J]. *矿业科学学报*, 2019, 4(5): 441–447.
FENG Liu, GAO Pengfei, ZHANG Liya, et al. The design of analysis and test platform for electromagnetic wave energy security[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 4(5): 441–447.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 田子建, 王帅, 李晨鑫. 矿井 10 MHz 以下通信射频设备安全距离的研究[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(8): 1417–1420.
TIAN Zijian, WANG Shuai, LI Chenxin. Safe distance for telecommunication radiofrequency transmitter with frequency below 10 MHz in underground mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(8): 1417–1420.
- [24] ZHANG J W, WANG H G, LIU C L, et al. A dynamical model of microwave window breakdown at vacuum/dielectric interface[J]. 2019, 26(9): 093511.
- [25] SHIMAMURA K, YAMASAKI J, MIYAWAKI K, et al. Propagation of microwave breakdown in argon induced by a 28 GHz gyrotron beam[J]. 2021, 28(3): 033505.
- [26] LEVKO D, RAJA L L. Breakdown of atmospheric pressure microgaps at high excitation frequencies[J]. 2015, 117(17): 173303.
- [27] KROKER T, KOLB T, SCHENK A, et al. Catalytic conversion of simulated biogas mixtures to synthesis gas in a fluidized bed reactor supported by a DBD[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2012, 32(3): 565–582.
- [28] SCARDUELLI G, GUELLA G, ASCENZI D, et al. Synthesis of liquid organic compounds from CH₄ and CO₂ in a dielectric barrier discharge operating at atmospheric pressure[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2011, 8(1): 25–31.