

煤矿井下无线电波防爆安全阈值及测试方法

潘涛 彭铭 徐会军 张高敏

5G、WiFi6、UWB、ZigBee等矿井移动通信系统、人员和车辆定位系统（图1—图3）是煤矿智能化建设的基础，在煤矿安全生产中发挥着重要作用。为防止5G、WiFi6、UWB、ZigBee等无线设备发射较大功率的无线电波引起煤矿井下瓦斯爆炸，GB/T 3836.1—2021《爆炸性

环境 第1部分：设备 通用要求》规定煤矿井下无线电波防爆安全功率阈值为6 W。无线电波防爆安全功率阈值规定的低，有利于电气防爆安全，但减小了无线的覆盖半径，增加了系统的投资和维护工作量。GB/T 3836.1—2021《爆炸性环境 第1部分：设备 通用要求》修改采用了IEC 60079-0—

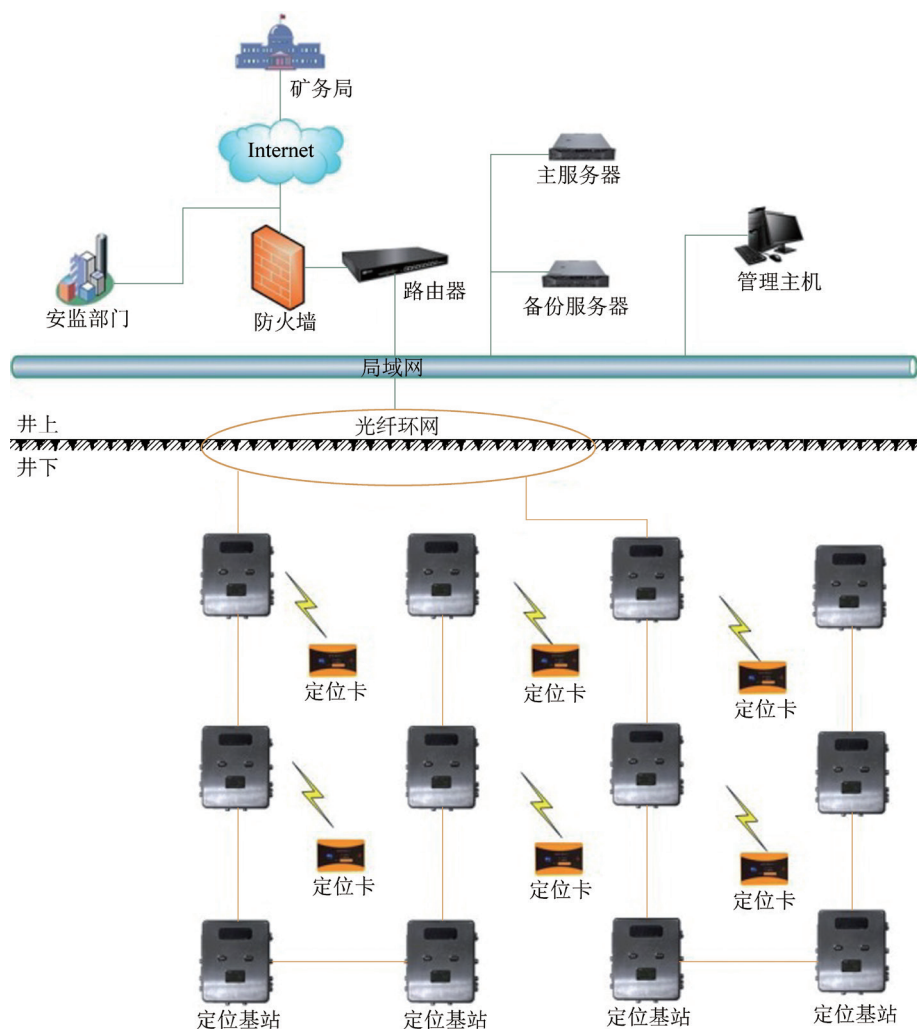


图1 煤矿井下人员精确定位系统示意

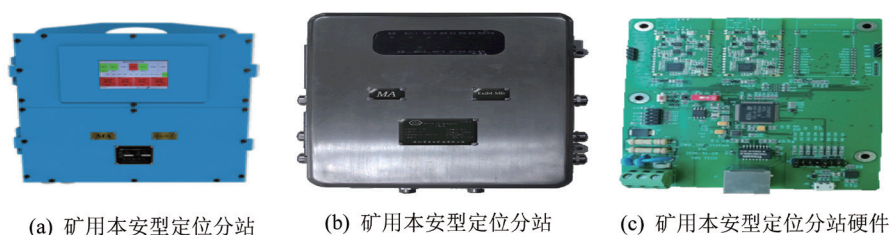


图2 煤矿井下人员精确定位基站

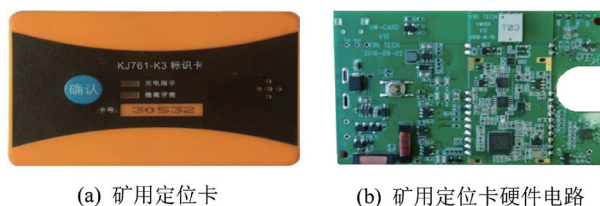


图3 矿用定位卡

2017《Explosive atmospheres-Part 0:Equipment-General requirements》(爆炸性环境 第0部分:设备一般要求)。IEC 60079-0—2017又参考了CLC/TR 50427—2004《Assessment of inadvertent ignition of flammable atmospheres by radio-frequency radiation—Guide》(无线电波辐射意外点燃易燃环境的评估——指南)的相关内容。但GB/T 3836.1—2021和IEC 60079-0—2017有关用于评估无线电波防爆安全的实际测量和测试方法的内容较少,特别是在没有理论分析和试验验证的情况下,删除了CLC/TR50427—2004中“煤矿井下没有起重机等细长结构时,煤矿井下无线电波防爆安全功率阈值应为8 W”的规定。因此,笔者将基于CLC/TR50427—2004,介绍煤矿井下无线电波防爆安全阈值及其实际测量和测试方法,以便5G、WiFi6、UWB、ZigBee等矿井无线通信系统的研发和检测检验,并提出煤矿井下无线电波防爆安全功率阈值应为8 W。

无线电波防爆安全阈值

爆炸性环境分类

在一定浓度的爆炸性气体环境中,当放电火花的功率或能量超过一定阈值时,就会引起爆炸性气

体燃烧和爆炸(简称点火)。不同爆炸性气体和蒸汽的易燃性分组及代表性气体分别为:I、甲烷,IIA、丙烷,IIB、乙烯,IIC、氢气。不同组的放电火花功率和能量阈值,则根据每组的代表性气体来确定。

射频放电点火

射频放电性质及电火花能量转移到周围气体是一个复杂的过程。电火花点燃爆炸性气体的能力,可以由电火花跨越结构中的断点处所能提取的功率或能量来描述。无线电波防爆安全功率和能量阈值是最严格条件下的数值,只有比CLC/TR50427—2004中规定的防爆安全阈值数值更高的功率或能量,才会点燃爆炸性气体。

不同的爆炸性气体,热启动时间不同。热启动时间是电火花所产生的能量在其周围小体积气体中积累,但没有显著热耗散的时间。当电火花持续时间小于热启动时间的50%时,决定电火花点火的主要因素是放电火花能量;当电火花持续时间大于热启动时间50%时,决定电火花点火的主要因素是放电火花的功率。上述2种情况均可通过热启动时间内的平均功率来考虑。因此,如果放电火花是由脉冲传输引起的,其脉冲持续时间少于热启动时间的50%,且脉冲之间的间隔大于热启动时间,则放电点火所需的峰值功率大于平均功率。甲烷热启动时

间大约为200 μs ，丙烷的热启动时间大约为100 μs ，乙烯的热启动时间大约为80 μs ，氢气的热启动时间约为20 μs 。

无线电波防爆安全阈值

连续传输和脉冲持续时间超过热启动时间的脉冲传输，如果超过了表1给出的无线电波防爆安全功率阈值，将会导致点火。

脉冲雷达和其他脉冲比热启动时间短，并且间隔时间大于热启动时间的传输，单个脉冲中的能量为首选要求，不同气体组别的无线电波防爆安全能量阈值分别为：I为1 500 μJ ，IIA为 950 μJ ，IIB为250 μJ ，IIC为50 μJ （大多脉冲雷达传输的脉冲持续时间比热启动时间短，也可能会遇到较长的脉冲传输，如果脉冲持续时间超过热启动时间的50%，则应寻求专家指导，除非使用上述阈值表明没有危险）。

煤矿井下没有起重机等细长结构，电路、水管、铁轨的纵向导体不具备环形天线特征，因此，煤矿井下无线电波防爆安全功率阈值应为8 W。

用于评估无线电波防爆安全的实际测量和测试方法

无线电波场强测量方法

对于具有放电火花点火危险环境下的场强测量，应考虑以下4个可能对潜在危险评估产生重大影响的因素：

(1) 场强测量应在作为接收天线结构的某一

位置进行，该位置的场强值应能代表该结构上的场强值。测量应在结构建立前的现场进行，或在与发射机大致相同的距离和类似方向的空地上进行，以免因发射机的方向性而产生误差。该结构的存在会由于再辐射而影响其附近的场；如果测量是在发射机附近进行的，即在近场（靠近发射机的区域，在近场区时，场强与距离相关性很复杂，相互耦合效应也会影响可提取功率），则应征求专家意见。虽然，在地面潮湿时可能会有较高的场强，但地面条件变化的影响已被证明是不重要的，即使地面干燥或为混凝土，也不需要实测场强进行修正。

(2) 对于频率不低于30 MHz的水平极化传输，应在与相关结构平均高度相似的高度进行场强测量。

(3) 应考虑不频繁传输的可能性，例如来自移动发射机发射无线电波的可能性，并及时做出安排，以确保所有相关发射机都在运行。

(4) 如果通过设置一个测试发射机来模拟拟建的发射机，则应考虑功率的差异和距离的差异因素对实测场强进行校正，并采取预防措施，防止人体暴露于强烈的无线电波环境下而被辐射。

可提取功率测量方法

可提取功率是在作为接收天线的结构中，穿过断点处连接的电阻负载消耗的功率（当结构调谐到发射机发射的无线电波的频率时，结构的阻抗只呈现电阻值，可提取功率达到最大，负载电阻等于结构的阻值）。可以使用以下2种方法之一，通过直接测量来确定在无线电波辐射下的结构断点处的可提取功率。

表1 无线电波防爆安全功率阈值

气体组别	功率阈值 / W	热启动时间（平均时间） / μs
I	6（对于细长结构，如起重机） 8（对于所有其他结构）	200
IIA	6	100
IIB	3.5	80
IIC	2	20

(1) 电压和电流的频率选择性测量：在特定传输频率下的可提取功率应根据在结构断点处测量的电压和电流值计算，如图4所示。

(2) 宽带功率测量：应使用专门为射频点火危险评估开发的仪器，测量可输送到固定电阻负载的总功率(来自所有发射机)，这种方法提供了一种在不高于10 MHz频率下的简单评估，并能够迅速地获得结构中不连续处所测的总可提取功率。

传输测试方法

在测试无线电波传输时，应将临时的低功率发射机设在与拟建发射天线地点方向相同的替代地点。为了给现场提供足够强度的信号，测试发射机

的输出功率可能需要50~100 W。

可燃性测试方法

应进行可燃性测试以确定从结构中提取的功率是否足以引起结构断点处周围的易燃气体或蒸气的点燃。在低于1.5 MHz的频率下，这些测试应使用BS EN 50020《Electrical apparatus for potentially explosive atmospheres — Intrinsic safety ‘i’》(潜在爆炸性环境用电气设备——本质安全‘i’)，或图5中描述的火花测试装置进行。通过将火花测试装置的两端跨接在结构断点处，必要时通过外部调谐电抗使其谐振，以便在结构断点处获取最大电压。对于在危险区域中的操作，设备

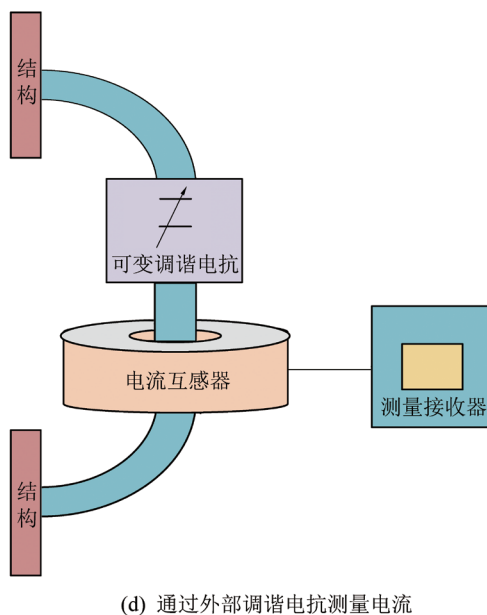
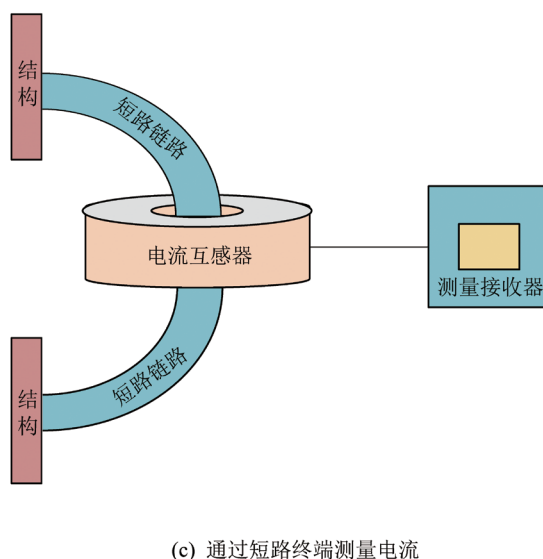
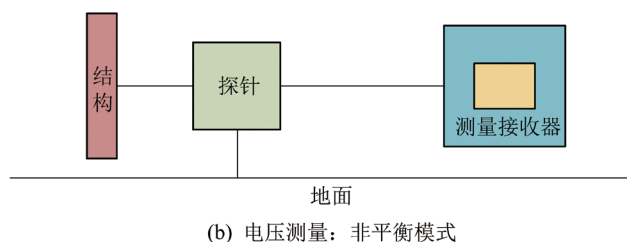
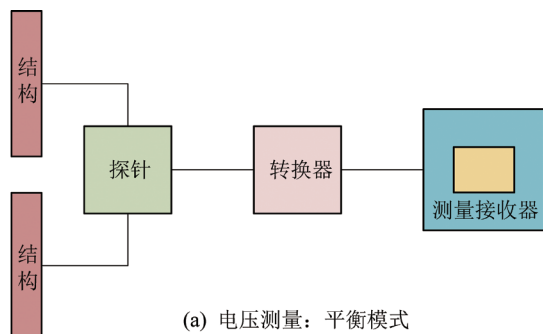


图4 可提取功率测量装置

表2 气体组别和最易燃的混合物代表性气体(与空气的体积百分比%)

气体组别	代表性气体	最易燃混合物 (与空气的体积百分比%) ^a
I ^a	甲烷 ^b	8.3±0.3
II A	丙烷	5.25±0.25
II B	乙烯	7.8±0.5
II C	氢气	21±2

注：^a 这些气体 / 空气的比例可以改变，以达到最大的易燃度。^b 第 I 类是指矿井中的瓦斯（主要是甲烷气体）。

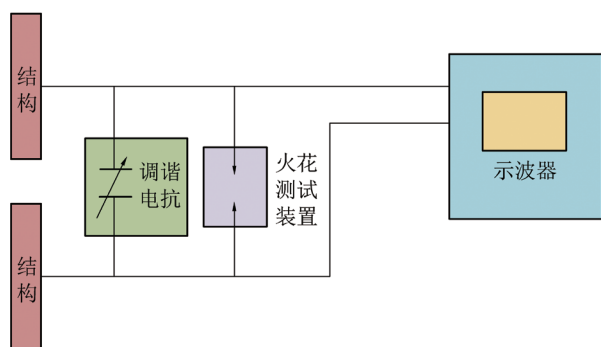


图5 可燃性测试装置

外壳应用惰性气体持续净化或其他有效措施，以防止点燃设备外壳外部易燃浓度的气体或蒸气，以及用于测试的气体在外部产生潜在爆炸性环境。

应使用易燃气体或蒸气最易点燃的浓度，例如空气中甲烷体积分数为8.3%，氢气体积分数为21%，见表2。

所有实际的现场测试必须在安全和操作人员的充分合作及指导下进行。试验方案应由与试验区域的安全运行密切相关的所有人员制定和讨论。例如，有些试验可能涉及法兰的分离、阀门的拆卸等，因此有必要为不完整结构的支撑和进行试验人员的安全提供足够的保障。如果在危险区域进行测量，拟用于测量目的的仪器应已获准在测试区域内使用，并获得适当的工作许可。

总结

(1) GB/T 3836.1—2021修改采用了IEC 60079-0—2017，IEC 60079—0-2017参考了CLC/TR 50427—2004的相关内容。CLC/TR 50427—

2004规定了煤矿井下无线电波防爆安全阈值、实际测量和测试方法。用于评估煤矿井下无线电波防爆安全的测量方法包括无线电波场强测量方法、可提取功率测量方法、传输测试方法和可燃性测试方法等。

(2) GB/T 3836.1—2021和IEC 60079-0—2017有关用于评估无线电波防爆安全的实际测量和测试方法的内容较少；特别是在没有理论分析和试验验证的情况下，删除了CLC/TR 50427—2004中煤矿井下没有起重机等细长结构时，煤矿井下无线电波防爆安全功率阈值应为8 W的规定。

(3) CLC/TR 50427—2004规定：煤矿井下没有起重机等细长结构时，煤矿井下无线电波防爆安全功率阈值应为8 W；煤矿井下有起重机等细长结构时，煤矿井下无线电波防爆安全功率阈值应为6 W。实际情况是：煤矿井下没有起重机等细长结构，电路、水管、铁轨的纵向导体不具备环形天线特征。因此，煤矿井下无线电波防爆安全功率阈值应为8 W。

■ 责任编辑：李金松

作者简介：

第一作者：潘涛，教授级高级工程师，现任国家能源集团信息技术有限公司智能矿山工程研究中心总经理。

作者单位：国家能源集团信息技术有限公司；中国矿业大学（北京）机电与信息工程学院；中国科学院上海微系统与信息技术研究所无线传感网与通信重点实验室。