



文章编号:1671-251X(2021)03-0009-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2021010066

煤矿 5G 通信系统安全技术要求和检验方法

郑小磊^{1,2}, 梁宏^{1,2}



扫码移动阅读

(1. 中煤科工集团常州研究院有限公司, 江苏 常州 213015;
2. 国家安全生产常州矿用通讯监控设备检测检验中心, 江苏 常州 213015)

摘要:用于煤矿井下的 5G 通信系统必须取得安全标志证书。为更好地推动煤矿智能化建设和煤矿 5G 技术发展,让送审企业提前熟悉煤矿 5G 通信系统技术要求和检验要求,缩短送审周期,研究了煤矿 5G 通信系统安全技术要求和检验方法。从基本要求、组网要求、5G 通信技术要求、防爆安全要求、抗干扰要求等方面论述了煤矿 5G 通信系统安全技术要求,并针对需重点关注的问题提出相关建议。针对煤矿 5G 通信系统,重点关注系统组网方式判别、核心网检验、抗干扰性能检验;针对 5G 基站和终端,重点关注 5G 技术指标的检验和防爆安全要求。对煤矿 5G 通信系统管理问题、5G 基站多天线功率叠加后阈功率的计算问题、抗干扰技术难点、传输速率和时延的技术要求和检验方法、天线一体化基站的检验、矿用 5G 上下行带宽存在的问题进行了探讨。

关键词:煤矿 5G 通信系统; 5G 基站; 5G 终端; 安全标志; 安全技术要求; 检验方法

中图分类号:TD655 文献标志码:A

Safety technical requirements and inspection methods of coal mine 5G communication system

ZHENG Xiaolei^{1,2}, LIANG Hong^{1,2}

(1. CCTEG Changzhou Research Institute, Changzhou 213015, China;

2. The State Work Safety Changzhou Inspection and Testing Center for

Mine Communication and Monitoring Devices, Changzhou 213015, China)

Abstract: The 5G communication system used in coal mines must obtain a safety mark certificate. In order to better promote the intelligent construction of coal mines and the development of 5G technology in coal mines, help the companies to understand the technical requirements of coal mine 5G communication system and inspection requirements in advance, shorten the review period, this paper studies the safety technical requirements and inspection methods of coal mine 5G communication system. The safety technical requirements of coal mine 5G communication systems are discussed in terms of basic requirements, networking requirements, 5G communication technology requirements, explosion-proof safety requirements and anti-interference requirements. Moreover, relevant suggestions are made for the issues that need to be focused on. In terms of the coal mine 5G communication system, this paper focuses on the system networking mode discrimination, core network inspection and anti-interference performance inspection. In terms of 5G base stations and terminals, this paper focuses on the inspection of 5G technical indicators and explosion-proof safety requirements. The issues such as coal mine 5G communication system

收稿日期:2021-01-22;修回日期:2021-03-05;责任编辑:胡娴。

基金项目:国家级安全生产监管监察技术支撑能力建设项目(2018ZX001)。

作者简介:郑小磊(1986—),男,江苏如东人,工程师,现主要从事煤矿通信、监控设备的安标技术审查和检验、计量校准工作,E-mail:413991538@qq.com。

引用格式:郑小磊,梁宏.煤矿 5G 通信系统安全技术要求和检验方法[J].工矿自动化,2021,47(3):9-13.

ZHENG Xiaolei,LIANG Hong. Safety technical requirements and inspection methods of coal mine 5G communication system[J].

Industry and Mine Automation,2021,47(3):9-13.

management issues, 5G base station multi-antenna power superposition threshold power calculation issues, anti-interference technical difficulties, the technical requirements and inspection methods of transmission rate and delay, the inspection of antenna-integrated base stations, and the problems of 5G upstream and downstream bandwidth in mines are also discussed in this paper.

Key words: coal mine 5G communication system; 5G base station; 5G terminal; safety signs; safety technical requirements; inspection methods

0 引言

5G 是第五代移动通信技术的简称,是新一代蜂窝移动通信技术^[1]。与 4G 相比,5G 采用大规模多输入多输出(Multi Input Multi Output,MIMO)、上下行解耦、波束成形、密集网络等技术,实现了更快网速和更大网络容量^[2],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^[3],成为特殊行业机器人、无人驾驶、虚拟现实、超清视频、设备远程操控、矿井安全监测等应用的技术基础^[4]。

目前,煤矿正处于由人力劳动、机械化向信息化、自动化、智能化升级转型的关键时期。5G 技术将发挥其网络优势,赋能煤矿生产管理新范式,加速绿色、高效、安全的智慧矿山建设^[5]。由于煤矿井下有瓦斯等易燃易爆气体,直接将地面 5G 技术应用于煤矿井下有很大的安全风险。根据《中华人民共和国安全生产法》和《煤矿安全规程》等的规定,纳入安全标志管理未取得煤矿矿用产品安全标志的产品不得使用^[6]。因此,用于煤矿井下的 5G 通信系统必须取得安全标志证书。

安标国家矿用产品安全标志中心于 2020 年 6 月 17 日发布了《关于发布煤矿 5G 通信系统安全技术要求、安全标志管理方案的通知》,确定了 5G 通信系统的煤矿行业准入准则。2020 年 7 月到 8 月,安标国家矿用产品安全标志中心按照新产品审核发放模式,陆续发放了 KT606(5G)矿用无线通信系统、KT28E(5G)矿用无线通信系统和 KT659(5G)矿用无线通信系统的安全标志证书。煤矿 5G 通信系统安全标志证书的发放,标志着 5G 技术正式开始应用于煤矿井下。由于 5G 是新技术,目前取证的产品没有针对煤矿井下安全生产特点进行研发,而是对地面 5G 产品进行了防爆改造,仅用于矿井语音通信和视频图像传输^[7]。

根据现行的管理方案,煤矿 5G 通信系统设备中,重点关注下井的 5G 基站和 5G 终端,其他传输类设备为常规矿用设备,本文不再论述。对于 5G 基站和 5G 终端,重点关注 5G 技术指标的检验和防爆安全要求;对于 5G 通信系统,重点关注组网方式判别、核心网检验和抗干扰性能检验;系统和单机的

其他常规技术要求本文不再论述。

1 煤矿 5G 通信系统安标管理方案

煤矿 5G 通信系统按照安标新产品审核发放模式 II 进行审核和发放。在满足《煤矿 5G 通信系统安全技术要求》和《矿用产品安全标志审核发放实施规则(通讯系统及装置)》(ABGZ-MA-HAA-2017-01)的前提下,发放 2 a 有效期的安全标志新产品证书。随着煤矿 5G 技术的发展,安标管理方案可能会作出相应调整。

煤矿 5G 通信系统产品名称型号执行 MT 286—1992《煤矿通信、自动化产品型号编制方法和管理方法》的规定,对于符合要求的煤矿 5G 通信系统及组成设备,在原型号后加(5G)以示区别,例如 KT28E(5G)和 KT659(5G)。

煤矿 5G 通信系统接入公网的设备应按国家有关规定取得进网许可证,在原型机上进行防爆改造后接入公网的设备,应在受控件明细表中注明原型机的名称、型号和进网许可证号,受控类别为 C 类。

有源天线应单独申办矿用产品安全标志,产品名称规范为“功率放大器”。无源天线暂不办理安全标志,作为基站的受控部件,其技术指标应在基站技术文件中明确。

在保证安全性能和降低风险的前提下,开展煤矿井下 5G 产品安标申请的受理和审核发放工作,满足了企业取得煤矿 5G 通信系统安标证书的需求。

2 煤矿 5G 通信系统安全技术要求

2.1 基本要求

煤矿 5G 通信系统和组成设备性能要满足《煤矿安全规程》、MT/T 1115—2011《多基站矿井移动通信系统通用技术条件》、MT 209—1990《煤矿通信、检测、控制用电工电子产品通用技术要求》、GB 3836 系列标准等的规定,同时满足井上和井下的安全隔离要求。这是基本要求,其他无线通信系统同样要满足。

2.2 组网要求

煤矿 5G 通信系统应能实现独立组网、独立运

行,在外部网络故障或断开时,应能安全、独立、稳定运行,保证无线通信及数据传输的可靠、稳定。这是煤矿 5G 通信系统的特殊要求,在送审前需要自行评估是否满足要求。不管是否接入公网,独立组网、专网运行是前提条件。如果要接入公网才能实现系统功能,则不满足安标技术要求。

2.3 5G 通信技术要求

(1) 组网方式:分为非独立组网(NSA)和独立组网(SA)2 种^[8]。

(2) 通信类别及制式:5G NR。

(3) 工作频段:应为国家允许频段范围,相关信息应在产品技术文件中明确,如果设备工作时应用了不同的无线通信类别、制式及频段,应分别进行说明。目前国家已经公布的频段如下。中国移动:2 515~2 675,4 800~4 900 MHz;中国电信:3 400~3 500 MHz;中国联通:3 500~3 600 MHz;中国广电:698~806,4 900~5 000 MHz。

(4) 基站和终端的技术性能参数:基站和终端需要明确最大输出功率、发射端口数量、配接天线数量及配接方式、天线特性(如 MIMO、全向或定向、增益、功率放大等)、接收灵敏度、在无遮挡情况下无线信号的最大通信距离等性能参数。

(5) 进网许可证:国家对接入公用电信网使用的电信终端设备、无线电通信设备和涉及网间互联的电信设备实行进网许可制度。未获得工信部颁发的进网许可证的设备,不得接入公用电信网使用和在国内销售。因此,接入公网的设备应按国家有关规定取得进网许可证。

2.4 防爆安全要求

本节主要是针对 5G 基站和 5G 终端的防爆安全要求,核心要求是射频闕功率。闕功率是指发射机的有效输出功率与天线增益的乘积。

(1) 射频闕功率。系统中组成设备的发射闕功率应满足 GB 3836. 1—2010《爆炸性环境 第 1 部分:设备 通用要求》中 6. 6. 1 节的规定^[9]。技术文件中应明确可能产生的最大发射闕功率、严酷条件及确定依据。对于采用多天线的设备,应考虑无线信号的叠加,明确无线信号叠加的最严酷条件及确定依据。根据 GB 3836. 1—2010《爆炸性环境 第 1 部分:设备 通用要求》的规定,发射闕功率以硬件(包括固化不可调的程序)的最大值为依据。

(2) 天线要求。具备增益功能的天线,增益后的发射闕功率应满足防爆安全要求。在技术文件中应明确天线的具体指标,至少应包括天线类型(无源或有源)、天线类别(单极化、双极化、阵列天线等)、覆盖方向(全向、定向等)等参数,明确天线增益,单

极化天线、双极化天线和阵列天线等要明确各端口增益,如为有源天线,需明确功率放大倍数。由于目前 5G 采用的是多天线技术手段,存在射频功率叠加的问题,检验中心和企业需要考虑多射频端口功率叠加的问题,叠加后的总闕功率不能超过 6 W。同时,不允许企业通过软件降低发射功率的手段来满足闕功率不大于 6 W 的要求。

2.5 抗干扰要求

仅用于语音通信及视频信号传输的煤矿 5G 通信系统应满足 MT/T 1115—2011《多基站矿井移动通信系统通用技术条件》中的电磁兼容试验要求。如果防爆改造前的原型机已取得进网许可证,可根据防爆改造具体实施情况,在电磁兼容评定的基础上确定电磁兼容试验。

2.6 重点关注问题

(1) 独立组网要求:不论煤矿 5G 通信系统是否接入公网,都需要满足独立组网、独立运行的要求。如果需要接入公网,建议选型的时候选择带入网许可证的产品。

(2) 5G 基站的选型:在满足使用需求的前提下,必须满足 GB 3836. 1—2010《爆炸性环境 第 1 部分:设备 通用要求》中闕功率的限值要求,同时还要考虑多射频端口的无线功率叠加问题。因此,在基站选型时,要特别注意发射功率,比如华为微站 Book RRU,其自身的标称发射功率就达到 10 W,还没算上天线的增益,已经不能满足闕功率要求。

(3) 5G 基站配套天线的选型:闕功率是有效输出功率与天线增益的乘积,因此,在选定基站型号后,要选择合适增益的天线,经天线增益后的叠加总闕功率不能超过 6 W。

(4) 抗干扰要求:煤矿 5G 通信系统在设计阶段就要考虑抗干扰要求,避免后续反复试验。如果试验时发现样机不能满足要求,可能需要在设计层面进行整改,会影响整体检验进度。

(5) 后备电源的配备:虽然 MT/T 1115—2011《多基站矿井移动通信系统通用技术条件》仅对基站的后备电源进行了要求,但建议送审时考虑井下其他设备的后备电源问题。如果仅基站配备后备电源,其他设备不配备后备电源,则无线通信系统在断电后无法正常工作。目前井下设备均为大功耗设备,普通电池不能完全满足使用时间要求,建议配备井下大容量隔爆型不间断电源作为后备电源。

3 煤矿 5G 通信系统检验方法

3.1 煤矿 5G 通信系统的组成

典型的煤矿 5G 通信系统主要由 5G 核心网、基

站控制器(Base Station Controller, BBU)、基站接入器(汇聚站)、矿用 5G 基站、矿用 5G 终端(包含手机和客户前置设备(Customer Premise Equipment, CPE))等组成,如图 1 所示。

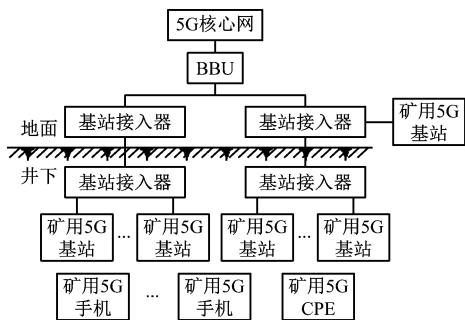


图 1 典型的煤矿 5G 通信系统架构

Fig.1 Typical coal mine 5G communication system architecture

3.2 检验环境和仪器

针对煤矿 5G 通信系统,应选用符合要求的电磁屏蔽室和电波暗室作为检验环境,以排除外界的电磁波干扰。

测量无线信号制式的 5G 信号分析仪的测量频率范围应满足要求,特别注意分析带宽要大于测量信号带宽。目前在用的 5G 信号的最大带宽为 160 MHz,因此,建议选择测量带宽为 200 MHz 的测量设备。

其他通用型测量仪器如万用表、光功率计、测距仪、示波器等应满足相关标准和量值溯源的要求。

3.3 系统检验方法

3.3.1 系统组网方式判别

根据第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)的组网方式定义,核查系统的实际组网方式与标准系统构架图的一致性,初步判断系统的组网方式。将专用测试终端的入网模式调整为 NSA 或 SA 模式,根据系统能否正常通信来判断其组网方式。

3.3.2 核心网检验

以企业的 5G 独立核心网设备为基础搭建 5G 专用网络,不与公网连接。用专用 5G 手机终端(用系统专用卡)测试 5G 数据通信功能,判断该核心网是否为 5G 独立核心网。如果系统需要接入公网,则在以上检验的基础上,跳过 5G 独立核心网设备,用基站或基站控制器直接连接国内运营商 5G 专线网络,通过装有运营商手机卡的专用 5G 手机终端进行检测,判断该系统是否具备公网 5G 数据通信功能。

3.3.3 抗干扰性能检验

针对仅用于语音通信及视频信号传输的煤矿 5G 通信系统,应按照 MT/T 1115—2011《多基站矿

井移动通信系统通用技术条件》中 5.9 节要求的抗干扰性能进行试验,即不低于 1 级的射频电磁场辐射抗扰度试验、不低于 1 级的电快速瞬变脉冲群抗扰度试验、不低于 1 级的浪涌(冲击)抗扰度试验,试验中可出现下降或失效,但试验结束后系统无需人为干预即可自行恢复^[10]。

针对对实时性、可靠性要求较高的煤矿 5G 通信系统,应参照执行 AQ 6201—2019《煤矿安全监控系统通用技术要求》中电磁兼容的相关规定。

3.3.4 其他技术指标和功能

其他技术指标和功能按 MT/T 1115—2011《多基站矿井移动通信系统通用技术条件》有关要求要求进行试验。

3.4 5G 基站和终端检验方法

3.4.1 5G 技术指标的检验

(1) 通信类别及制式检验。目前矿用 5G 基站是对地面 5G 基站直接进行防爆改造,将 RRU 放置于隔爆外壳后,对射频端口进行本质安全处理,通过矿用用射频同轴电缆将射频信号引出后接入天线进行发射。针对这种天线外置的设备,可以通过射频电缆直接连接 5G 信号分析仪的方式来直接测量。在电磁屏蔽室中,将 5G 信号分析仪调到 NR (5G) 档位,通过射频电缆连接基站,观察 5G 信号分析仪能否正确解调 5G NR 信号,并结合波形图、星座图、误差向量幅度(Error Vector Magnitude, EVM)等指标来综合判定通信类别与制式。

针对无天线的手机等终端,可以通过在屏蔽室中与经过通信类别及制式检验的基站进行双向通信来辅助验证。

(2) 工作频段及最大有效输出功率检验。对于基站和有天线的终端设备,通过馈线直接引入 5G 信号分析仪,将被测设备配置为专用的测试模式,确保满容量最大发射功率发射,通过仪器直接读取信道功率和工作频段。

针对无天线的终端类,如果终端不具备测试端口,则将手持终端放置于电波暗室转台桌子上,按照水平、垂直方向放置并分别旋转 360°,用信号分析仪扫描其信道功率(保持最大值状态下),记录最大发射功率值和工作频段。

(3) 天线参数检验。有源天线:作为独立产品,应单独办理矿用产品安全标志,并按相关标准进行检验。检验过程中,通过图纸和样品核实方式,确定有源天线是否存在放大可调情况,如果存在,应确定天线最大可调范围。

无源天线:应按产品结构及图纸要求,严格核查天线是否存在有源电路或实际为有源天线。如果存

在有源电路,应按有源天线方案审查;如果为无源天线,则进行目测和内部结构检查,并核查通过中国合格评定国家认可委员会(CNAS)认证、中国计量认证(CMA)的第三方检测检验机构出具的3a内的天线检测报告,进行增益、单极化、双极化等类别判断及定向和全向天线等的核实。

3.4.2 阈功率的计算

对于无天线的终端类设备,阈功率即为最大有效输出功率。针对有天线的多端口基站类设备,阈功率计算方法如下:

(1) 非阵列天线:假设射频通道数量为 N ,天线前端处有效输出功率均为 P_e ,对应天线增益均为 G_T ,阈功率为 P_{th} ,则发射端电磁波的最大阈功率为 NP_{th} ,即 NP_eG_T 。

(2) 阵列天线:假设 N' 阵列天线前端处有效输出功率均为 P'_e ,天线增益均为 G'_T ,阈功率为 P'_{th} ,则发射端电磁波的最大阈功率为 $N'^2P'_{th}$,即 $N'^2P'_eG'_T$ 。

3.4.3 其他技术指标

其他技术指标按MT 209—1990《煤矿通信、检测、控制用电工电子产品通用技术要求》和GB 3836系列标准中的有关要求进行试验。

4 问题探讨

4.1 煤矿5G通信系统管理问题

目前已经取得安标证书的仅为5G无线通信系统,但是5G作为煤矿井下的“新基建”,如果仅用于语音通信及视频信号传输,将不能充分发挥5G的技术优势,造成资源的极大浪费。随着5G应用场景的不断丰富,相关管理机构和检验机构需要提早进行调研和规划,尽快制定应用于远程操控、无人驾驶等方面的5G产品的审核发放规则和检验方法。

针对已经取得安标证书的煤矿5G通信系统,需要密切追踪井下实际使用情况,如果发现存在安全隐患和风险,应及时调整审核发放规则和检验方法。

4.2 5G基站多天线功率叠加后阈功率的计算问题

目前多天线基站的阈功率计算采用的是简单而粗暴的直接叠加方式。虽然从防爆安全角度来说,这是最安全有效的方法,但是直接叠加造成的后果是基站的5G射频发射功率被限制得很小。

现在井下5G基站普遍采用的是标称发射功率为250 mW的微基站,经过防爆改造后,考虑馈线损耗和隔离元器件的损耗,实际发射功率更小,实际测试最大通信距离仅为100~200 m,边缘传输速率只有10 Mbit/s左右。井下布置5G基站的时候,由于传输距离较短,基站布置密度大,增加了组网成本和

维护工作量。

因此,应尽快研究科学合理的功率叠加模型,以促进煤矿5G技术的后续发展。

4.3 抗干扰技术难点

采用电容和电感滤波是提高设备抗干扰能力的常见而有效的方法。但是,电容和电感是储能元件,在进行本质安全处理时必须限制电容和电感值。因此,在满足防爆本质安全要求的前提下提高煤矿5G通信系统的抗干扰能力,是亟需解决的技术难题。

4.4 传输速率和时延的技术要求和检验方法

目前煤矿行业未对5G通信系统的传输速率和时延提出要求,因为现有的5G技术主要用于无线通信,对传输速率和时延要求不高。随着煤矿5G技术的不断发展,5G技术后续将会应用于远程控制、无人驾驶、机器人巡检等场景,这些应用场景对传输速率和时延要求非常高。因此,应尽快开展相关试验设备调研和检验方法的研究工作。

4.5 天线一体化基站的检验

由于功耗等原因,目前煤矿井下5G基站是通过增加隔爆外壳的方式来实现防爆改造。由于金属外壳的屏蔽作用,无线信号不能有效输出,必须通过馈线将信号引出至天线进行发射。这种结构的基站可以采用通过馈线接入5G信号测试仪的方式来测试。随着5G技术的发展,后续可能会出现天线与基站深度融合的一体化基站,这种基站无法采用常规的馈线测试方法,必须提前研究空中下载(Over-The-Air,OTA)测试方法^[11]。

4.6 矿用5G上下行带宽存在的问题

地面用5G设备主要用于下载数据,上传数据的需求没有下载大,因此,地面用5G技术具有下行带宽远大于上行带宽的技术特点。矿用5G设备主要用来上传井下数据,上行带宽需求远大于下行带宽。因此,需对地面用5G设备的上下行带宽进行改造才能满足煤矿使用需求。

5 结语

介绍了煤矿5G通信系统安标管理方案,针对煤矿5G通信系统现行的安全技术要求进行了论述,指出应重点关注独立组网要求、5G基站的选型、5G基站配套天线的选型、抗干扰要求、后备电源的配备。对煤矿5G通信系统、5G基站和终端的检验方法进行了研究,并对后续5G技术应用于煤矿的一些难点进行了分析。本文的分析和研究有助于送审企业提前熟悉煤矿5G通信系统技术要求和检验要求,缩短送审周期,为煤矿5G技术的发展贡献力量。

参考文献(References):

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 杨永明. 未来 5G 与能源的深度融合研究[J]. 新能源经贸观察,2018(7):86-93.
YANG Yongming. Research on the in-depth integration of 5G and energy in the future[J]. Energy Outlook, 2018(7):86-93.

[5] 申雪,卜小平,余文科. 基于 5G 技术的“智慧矿山”建设研究[J]. 中国电子科学研究院学报,2020,15(7):620-624.
SHEN Xue, BO Xiaoping, YU Wenke. Study on intelligence mine construction based on 5G technology [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2020, 15(7):620-624.

[6] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局. 煤矿安全规程[M]. 北京:煤炭工业出版社,2016.
State Administration of Work Safety, National Coal Mine Safety Administration. Coal mine safety regulations[M]. Beijing:China Coal Industry Publishing House, 2016.

[7] 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.

[8] 孟庆勇. 5G 技术在煤矿井下应用架构探讨[J]. 工矿自动化,2020,46(7):28-33.
MENG Qingyong. Probe on 5G architecture applied in coal mine underground [J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(7):28-33.

[9] GB 3836. 1—2010 爆炸性环境 第 1 部分:设备 通用要求[S].
GB 3836. 1-2010 Explosive atmospheres-Part 1: Equipment-General requirements[S].

[10] MT/T 1115—2011 多基站矿井移动通信系统通用技术条件[S].
MT/T 1115-2011 General specifications of the multi-base station mobile communication system in the mine [S].

[11] 李勇,徐黎,李文. 5G 基站天线 OTA 测试方法研究[J]. 移动通信,2018,42(6):7-10.
LI Yong, XU Li, LI Wen. Research on OTA testing method of 5G base station antennas [J]. Mobile Communications, 2018, 42(6):7-10.