煤矿用纤维增强复合材料隔爆外壳的安全性研究*

刘隽宁,刘得英,赵军,任飞,辛丽娜,柴妤卓

(国能神东煤炭集团有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯市 017209)

摘要:为满足煤矿井下设备轻量化与防爆安全需求,采用玻璃纤维/环氧树脂复合材料(GF/ER)制备出一种容积为19.5 L的Ⅰ类非金属轻型隔爆外壳,并通过材料性能测试、有限元仿真及多项防爆安全试验分析GF/ER型隔爆外壳的综合性能。结果表明:GF/ER型隔爆外壳满足煤矿井下设备对高力学强度、高阻燃性(V-0级)和抗静电性的要求;GF/ER型隔爆外壳的拉伸性能、弯曲性能及冲击强度变化率均小于10%,表明其具有优异的耐久性和环境适应性;在参考压力测试中,GF/ER型隔爆外壳的最大爆炸压力达0.496 MPa,极限承压能力为3.1 MPa,远超标准要求的1.5 MPa;在工作载荷下,GF/ER型隔爆外壳隔爆面间隙变形小于0.15 mm,结构稳定可靠;与同等尺寸金属隔爆箱相比,GF/ER型隔爆外壳实现了超过50%的减重效果,显著降低井下作业负担,提升了移动设备续航能力。研究成果为矿用装备轻量化提供了可行的技术路径和理论依据。

关键词:纤维增强复合材料;GF/ER型隔爆外壳;物理化学特性;防爆安全;有限元分析

中图分类号:TD52 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)01-0255-09

Study on the Safety of Explosion-Proof Enclosure of Fiber Reinforced Composite Material for Coal Mine

LIU Junning, LIU Deying, ZHAO Jun, REN Fei, XIN Lina, CHAI Yuzhuo

(Guoneng Shendong Coal Group Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 017209, China)

Abstract: In order to meet the requirements of lightweight and explosion-proof safety of coal mine equipment, a type Ⅰ non-metallic lightweight explosion-proof enclosure with a volume of 19.5 L was prepared by glass fiber/epoxy resin composite (GF/ER). The comprehensive performance of GF/ER explosion-proof enclosure was analyzed by material performance tests, finite element simulation and multiple explosion-proof safety tests. The results show that the GF/ER explosion-proof enclosure meets the requirements of high mechanical strength, high flame retardancy (V-0 grade) and antistatic property of underground coal mine equipment. The change rates of tensile properties, bending properties and impact strength of GF/ER explosion-proof enclosure are less than 10%, indicating that it has excellent durability and environmental adaptability. In the reference pressure test, the maximum explosion pressure of the GF/ER explosion-proof enclosure is 0.496 MPa, the ultimate bearing capacity is 3.1 MPa, far exceeding the standard requirement of 1.5 MPa. Under the working load, the gap deformation of the GF/ER explosion-proof enclosure is less than 0.15 mm, and the structure is stable and reliable. Compared with the same size metal explosion-proof box, the GF/ER explosion-proof enclosure achieves more than 50% weight reduction effect, significantly reduces the burden of downhole operation, and improves the endurance of mobile equipment. The research results can provide a feasible technical path and theoretical basis for the lightweight of mining equipment.

Key words: Fibre reinforced composite material, GF/ER explosion-proof enclosure, Physical and chemical properties, Explosion-proof safety, Finite element analysis

0 引言

现阶段,以碳纤维[1-3]、玻璃纤维[4-7]增强树脂基复合材料为代表的先进复合材料具有质轻高强、抗疲劳、耐腐蚀、制造工艺灵活、可整体成型、可设计性强、易于实现结构/功能一体化等优势,已成为提升国民经济与国防建设核心竞争力的关键材料,在航空航天、风电、汽车、能源等领域正在或已经取代金属材料成为结构材料主体。近几年,复合材料的用量增长明显,例如,碳纤维及其复合材料在全球的需求量以每年约15%的速度增长,航空航天、汽车、风电、体育休闲、压力容器、新能源等是复合材料的主

* **收稿日期**:2024-12-13

作者简介:刘隽宁(1982—),男,内蒙古乌拉特中旗人,高级工程师,主要研究方向为煤矿机电设备及辅助运输。E-mail:liujunning1011@163.com

要应用领域,且增长迅速[8]。

BULLEN 等[9]研究发现,大型客机 B787 和 A350 的复合材料用量分别达到 50%和 52%,无人机所用复合材料占机体结构总重的 60%~90%,兆瓦级风电叶片采用全复合材料结构,复合材料氢气瓶、复合材料电缆芯、新能源汽车用到的复合材料电池箱等也在逐渐推广应用[10-11]。CHWAL 等[12]分析发现,复合材料替代铝合金可以减重 20%,替代钛合金可以减重 40%,替代钢可以减重 50%。复合材料的应用已经成为众多领域衡量产品先进性的标志之一。

为推动产业升级和转型,解决安全与环保问题,国家对矿业技术、设备及其材料提出了新要求,其中设备的轻量化需求尤为迫切。例如,煤矿机器人、无人飞行器、移动式电气设备等煤矿井下移动设备常采用铸铁、钢板或者铸钢等作为结构材料,具有质量大、耐腐蚀性差等缺点,严重影响了设备的电能消耗,增加了井下人员的劳动强度,降低了作业安全性,且维护成本高,因此,亟待采用轻质高强耐腐蚀的非金属材料进行替换。纤维增强树脂基复合材料常应用于隔爆外壳等防爆设备上,有望成为矿山智能装备减重提效的重要材料[13-14]。

煤矿井下环境属于Ⅰ类爆炸性气体环境,传统隔爆外壳多采用铸铁、钢板或铸钢等作为结构材料,其核心优势在于具备防爆能力,即可以抑制设备内部火焰传播到外部,避免设备成为爆炸性环境中的点燃源。而采用纤维增强树脂基复合材料设计的隔爆外壳,能否具备符合防爆标准的力学性能、能否达到抑制内部火焰传播的设计要求以及是否能适应煤矿特殊环境,仍需进一步探索研究。

纤维增强树脂基复合材料主要由高性能的增强纤维与树脂基体组成,且二者种类多样[15-16]。本文基于综合性能、环境友好度及成本等因素,选择 E 玻璃纤维作为增强材料,环氧树脂作为基体材料,采用真空辅助树脂传递模塑工艺(液体成型方式)制备出玻璃纤维/环氧树脂复合材料(GF/ER)隔爆外壳,容积达 19.5 L。对该隔爆外壳进行有限元计算、材料测试、防爆测试及极限压力测试,分析其综合性能,研究结果可为矿用装备轻量化设计提供依据。

1 隔爆外壳的制备及试验方法

1.1 GF/ER 型隔爆外壳的制备

GF/ER 型隔爆外壳制备过程主要包括灌注成型、机加修型、组装粘接、打孔装配等,具体的工艺流程如图 1 所示。首先,玻璃纤维预成型体经数控裁切机裁切完成后,在箱体凸模上进行逐层铺设,铺设成型后合模抽真空,检测真空度达到工艺要求后,进行环氧树脂灌注,待模具真空抽气口出现环氧树脂,及时关闭抽气阀,使模腔充满环氧树脂、玻璃纤维且浸润充分。然后,按照热固化工艺要求将模具送入加热烘箱,进行加热固化,固化完成后,脱模修整。随后,通过数控加工中心对箱体箱盖法兰外缘、中间隔板、联通节孔、螺栓孔进行加工。最后,对中间隔板、视窗、联通节、开关、4P 端子保险支架依次进行粘接并组装,得到 GF/ER 型隔爆外壳,如图 2 所示。

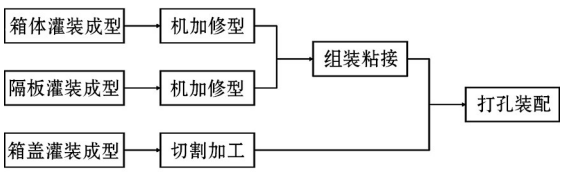


图 1 GF/ER 型隔爆外壳制备工艺流程

Fig.1 Process flow of GF/ER explosion-proof enclosure preparation



图 2 GF/ER 型隔爆外壳

Fig.2 GF/ER explosion-proof enclosure

1.2 GF/ER 型隔爆外壳的物理化学特性测试

1.2.1 力学性能测试

按照《塑料-拉伸性能的测定:第 4 部分:各向同性和正交异性纤维增强塑料复合材料的试验条件》(ISO 527—4:2023)相关规定,利用拉力试验机测试并计算 GF/ER 型隔爆外壳的拉伸强度、拉伸模量和断裂伸长率。

1.2.2 热稳定性测试

将功率 140 W 的陶瓷加热片置于 GF/ER 型隔爆外壳内部中心,下方垫设陶瓷坩埚以实现热量向四周均匀传递。采用 16 路热电偶监测陶瓷加热片

从通电到传热稳定的全程温度变化,其中,大腔体内壁均匀安置 9 个热电偶,小腔体内壁均匀安置 4 个热电偶,大盖和小盖外表面分别安置 2 个和 1 个热电偶,采用温度巡检仪采集温度数据。通过差示扫描量热分析法(DSC)测定氮气氛围下 GF/ER 型隔爆外壳的玻璃化转变温度,温度范围为 0～250 ℃,升温速率为 20 ℃/min。

1.2.3 阻燃性能测试

将 GF/ER 型隔爆外壳置于温度为(23±2) ℃,相对湿度为(50±10)%的条件下调节至少 48 h;将两组 5 个条形试样置于温度为(70±2) ℃的空气循环烘箱中调节至少(168±2) h,然后在干燥箱中冷却至少 4 h。分别按照《固体非金属材料暴露在火焰源时的燃烧性试验方法清单》(GB/T 11020—2005)和《电工电子产品着火危险试验 第 16 部分:试验火焰 50 W 水平与垂直火焰试验方法》(GB/T 5169.16—2017)规定,测试 GF/ER 型隔爆外壳的阻燃性能,垂直燃烧分级的评价标准见表 1。

表 1 垂直燃烧分级的评判标准

Table 1 Evaluation criteria of vertical burning classification

材料分级	单个试样的余焰时间/s	任何处理过的5个试样的总余焰时间/s	单个试样在施加了第二次火焰后的余焰时间加上余灼时间/s	任一试样的余焰和/或余灼是否蔓延至夹持夹具	燃烧颗粒或滴落物是否引燃棉垫
V-0	≤10	≤50	≤30	否	否
V-1	≤30	≤250	≤60	否	否
V-2	≤30	≤250	≤60	否	是

1.2.4 抗静电性能测试

将 GF/ER 型隔爆外壳放置于环境温度为(23±2) ℃,相对湿度为(50±5)%的环境下 24 h,试验也在此条件下进行。在 GF/ER 两端施加(500±10) V 直流电压,60 s 后测定其表面电阻值。

1.2.5 耐久性测试

(1) 耐高低温湿热性能测试。

将 GF/ER 型隔爆外壳按顺序分别在 130 ℃温度下放置 4 h,在室温下放置 0.5 h,在－40 ℃温度下放置 1.5 h,在室温下放置 0.5 h,在温度 70 ℃、95%RH 下放置 3 h,在室温下放置 0.5 h,在－40 ℃温度下放置 1.5 h,在室温下放置 0.5 h。重复上述步骤两次,并考察测试前后 GF/ER 型隔爆外壳的拉伸性能、弯曲性能、简支梁冲击强度的变化规律。

(2) 耐盐雾性能测试。

按照《塑料制品:湿热、水雾和盐雾暴露影响的测定》(ISO 4611—2010)相关规定,将 GF/ER 型隔爆外壳放置在温度 35 ℃,pH=6.5～7.2 条件下 168 h,考察测试前后 GF/ER 型隔爆外壳的拉伸性能、弯曲性能、简支梁冲击强度的变化规律。

1.3 隔爆外壳的安全性测试

1.3.1 参考压力测试

隔爆外壳电气腔使用“引入装置＋转接头”的方式连接进气孔、出气孔、火花塞、测压传感器;腔盖由金属盖替代,并钻孔 4 个用来连接上述部件。样品制备合格后,以正常工作姿态放置在防爆罐内,连接好管路和线路。气体选择甲烷和空气的混合气,甲烷浓度为(9.8±0.5)%。按照《爆炸性气氛 第 1 部分:防爆外壳提供的设备保护》(IEC 60079—1:2014)相关规定进行参考压力测定,记录其爆炸压力,取最大爆炸压力作为参考压力最大值。

1.3.2 耐化学试剂性能测试

按照《爆炸性环境 第 0 部分:设备 一般要求》(IEC 60079—0:2017)第 26.11 条的规定,将隔爆外壳放置于恒温槽中,注入 IRM902 油,将隔爆外壳全部淹没,调整恒温槽温度为 50 ℃,持续(24±2) h 后取出样品。随后,将恒温槽清洗后,注入含水量为 35%的聚合水溶液,构成阻燃液压液,再次完全浸没隔爆外壳,调整至 50 ℃并浸泡(24±2) h,取出后在实验室静置 24 h,观察其外观情况。

1.3.3 耐热/耐寒性能测试

按照 IEC 60079—0:2017 第 26.7 条、第 26.8 条、第 26.9 条的规定,将隔爆外壳置于高低温交变湿热试验箱,在温度 95 ℃、相对湿度 90%条件下放置 28 d。取出后在室温下静置 24 h,再将其置于高低温交变湿热试验箱 24 h,工作温度为－5 ℃,观察其外观情况。

1.3.4 抗冲击测试

按照 IEC 60079—0:2017 第 26.4.2 条的规定,隔爆外壳分别在上限温度 80 ℃和下限温度－10 ℃下进行抗冲击测试,冲头质量为 1 kg,视窗冲击高度为 0.7 m,其余部位冲击高度为 2 m,观察其外观

情况。

1.3.5 防护测试

按照《防护等级(IP代码)标准》(IEC 60529)的规定,检测直径为1 mm的试验金属线是否能伸入到隔爆外壳内;在压差为2.0 kPa,抽气速率为0.2 L/h时,试验8 h,检测隔爆外壳内是否进尘;用淋水装置进行试验,摆管角度为±180°,流量为4.3 L/min,摆管直径为1 m,试验10 min,检测隔爆外壳内是否进水。

1.3.6 水压测试

按照IEC 60079—1:2014第15.2.3.2条的规定,采用静压法对隔爆外壳进行测试,水压1.0 MPa,加压时间10 s,观察其外观情况。随后对隔爆外壳进行水压破坏性试验,即持续增大水压,直至外壳箱体破坏为止。

1.3.7 有限元计算

依据隔爆外壳的三维模型,经局部处理后建立隔爆外壳的有限元模型。模型主要由外箱体、箱体加强筋、隔板、大盖、观察玻璃窗、观察窗固定卡圈、小盖、螺栓和金属直通节组成。模型节点总数为267 388个,单元总数为181 482个,其中隔爆箱单元总数为173 316个,使用线性六面体,单元的类型为SC8R;金属件单元总数为8 076个,使用线性六面体,单元类型为C3D8R;在计算过程中使用梁单元模拟螺栓的等效方法,梁单元总数为90个,使用线性线,单元类型为B31;根据工艺方提供的材料参数,为各部件赋予以四轴布为基材的材料属性。箱体和加强筋为一体式铺层加工,计算模型中设为严格绑定约束;中间隔板和箱体之间依靠胶接连接,因模型可体现胶接层间的剪切力大小,故同样设置为绑定约束;金属件和箱体之间的连接按接触方式施加预紧力,预紧力的取值采用保守数值;盖板和箱体之间以螺栓连接,模型中以梁单元代替螺栓,梁和螺栓孔内壁设MPC约束,箱体和盖板间设接触约束。为了减小边界条件的影响,在计算大腔承压时,将固支边界条件设于远端,靠近大腔区域采用影响较小的铰接约束;整体承压计算时,在法兰边均匀布置铰接约束。载荷作用于腔体内表面,压强稳定时间为10 s,持续作用时间为50 s。

1.3.8 火焰烧蚀测试

按照IEC 60079—1:2014第19.4条的规定,隔爆外壳的平面接合面和止口接合面平面部分的间隙为0.1~0.15 mm。试验气体为甲烷,浓度为(9.8±0.5)%,点燃50次,观察隔爆外壳内部传爆情况。

1.3.9 内部点燃不传爆测试

按照IEC 60079—1:2014第15.3条的规定,试验气体采用特定浓度的甲烷-氢气混合气:整体浓度为(12.5±0.5)%,其中甲烷的体积占比为(58±1)%,氢气的体积占比为(42±1)%。试验前拆除隔爆外壳的衬垫并进行间隙调整,待样品内、外爆炸性气体混合物浓度符合规定后,对每个隔爆腔体各开展5次试验,观察隔爆外壳内部传爆情况。

1.3.10 电容测试

按照IEC 60079—0:2017第26.14条的规定,隔爆外壳在温度为21.1 ℃、相对湿度为46.7%的环境中放置1 h后,测量3次引入口压紧螺母与铁板之间的电容值,并取平均值。

2 结果与讨论

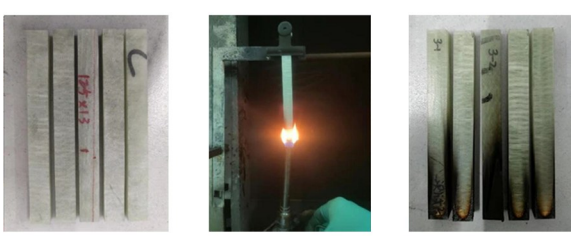
2.1 GF/ER型隔爆外壳的物理化学特性测试结果

以玻璃纤维和环氧树脂为原料,采用真空灌注工艺制备的复合材料GF/ER的物理化学性能见表2,GF/ER型隔爆外壳的垂直燃烧试验过程如图3所示。可以看出,GF/ER型隔爆外壳的力学性能、阻燃性能及抗静电性能均满足相关要求。随后,对其进行耐久性能测试,结果见表3。由表3可知,GF/ER型隔爆外壳经过高低温湿热,以及盐雾测试后,其拉伸性能、弯曲性能和简支梁冲击强度降低不明显(均小于10%),部分性能甚至还有所提高,说明GF/ER型隔爆外壳的耐久性能优异。

表2 GF/ER型隔爆外壳的物理化学特性

Table 2 Physical and chemical properties of GF/ER explosion-proof enclosure

项目	拉伸强度/MPa	拉伸模量/GPa	断裂伸长率/%	垂直燃烧等级	表面电阻/Ω
测试结果	351	20.4	2.95	V-0	1.53×10^{9}
是否达到要求	达到	达到	达到	达到	达到



(a)测试前 (b)测试中 (c)测试后

图3 GF/ER型隔爆外壳的垂直燃烧试验

Fig.3 Vertical burning test of GF/ER explosion-proof enclosure

表 3 GF/ER 型隔爆外壳的耐久性测试结果

Table 3 Durability test results of GF/ER explsion-proof enclosure

项目	拉伸模量	拉伸强度	断裂伸长率	弯曲模量	弯曲强度	无缺口简支梁冲击强度
处理前	55.0 GPa	1 342 MPa	2.44%	44.9 GPa	1 482 MPa	396 kJ/m²
耐高低温湿热性能测试后	56.5 GPa	1 326 MPa	2.35%	47.8 GPa	1 459 MPa	395 kJ/m²
耐紫外性能测试后	57.0 GPa	1 331 MPa	2.34%	49.9 GPa	1 531 MPa	366 kJ/m²
耐盐雾性能	54.2 GPa	1 324 MPa	2.44%	46.6 GPa	1 437 MPa	391 kJ/m²
耐高低温湿热性能测试后变化率	2.7%	−1.2%	−3.7%	6.5%	−1.6%	−0.3%
耐紫外性能测试后变化率	3.6%	−0.8%	−4.1%	11.1%	3.3%	−7.6%
耐盐雾性能测试后变化率	−1.5%	−1.3%	0	3.8%	−3.0%	−1.3%

玻璃化转变温度(T_g)指高分子材料链段具备运动能力的临界温度,当温度高于 T_g 时,高分子材料从玻璃态变为高弹态,链段发生运动,材料的力学性能明显降低。因此,对于以承载为主的高分子及其复合材料,其可承受的最高温度要低于 T_g。相比于《爆炸性环境第 1 部分:设备通用要求》(GB/T 3836.1—2021)标准中规定的塑料材料的温度指数,T_g 是结构复合材料中更为常用的参数值。GF/ER 型隔爆外壳的 DSC 曲线如图 4 所示,可知 GF/ER 型隔爆外壳的 T_g 为 91.8 ℃,验证了 GF/ER 型隔爆外壳在长期使用的稳定性和安全性。综上所述,以 GF/ER 为基材制备煤矿用隔爆外壳具有初步的可行性。

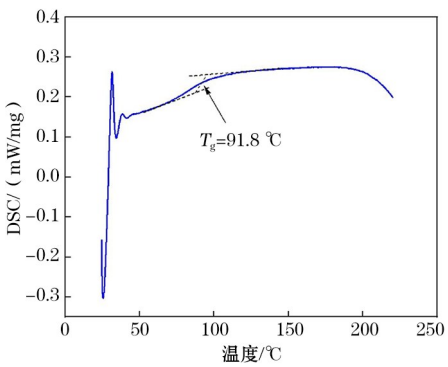


图 4 GF/ER 型隔爆外壳的 DSC 曲线

Fig.4 DSC curve of GF/ER explosion-proof enclosure

2.2 GF/ER 型隔爆外壳的安全性测试结果

隔爆外壳的尺寸和机械稳定性是其在煤矿井下长期稳定运行、保障矿井安全生产的关键因素。GF/ER 型隔爆外壳的参考压力测试结果见表 4 和图 5,可以看出,箱体没有出现影响防爆功能的永久变形或损坏,其中,大腔参考压力最大值为 0.496 MPa,小腔参考压力最大值为 0.416 MPa。水压测试后的外观如图 6 所示。由图 6 可知,GF/ER 型隔爆外壳未发现永久性变形或损坏,且水没有通过外壳壁泄漏,表明其机械稳定性和密封性良好。为了验证 GF/ER 型隔爆外壳能承受的极限压力,继续对其进行水压破坏性试验,直至箱体破坏为止。结果表明,当静压力为 3.1 MPa 时,隔爆外壳开始出现裂缝损坏。因此,GF/ER 型隔爆外壳能承受的极限压力为 3.1 MPa,符合防爆外壳对压力的要求(不小于 1.5 MPa)。冲击试验结果如图 7 所示,可以看出,GF/ER 型隔爆外壳在经过冲击后未产生任何损坏,表明其机械稳定性良好。

表 4 参考压力测试结果

Table 4 Result of the reference pressure test

试验部位	试验气体名称及浓度	爆炸压力/MPa
大腔	CH_4/空气:9.49%	0.492
	CH_4/空气:9.47%	0.496
	CH_4/空气:9.48%	0.488
小腔	CH_4/空气:9.47%	0.409
	CH_4/空气:9.49%	0.412
	CH_4/空气:9.51%	0.416

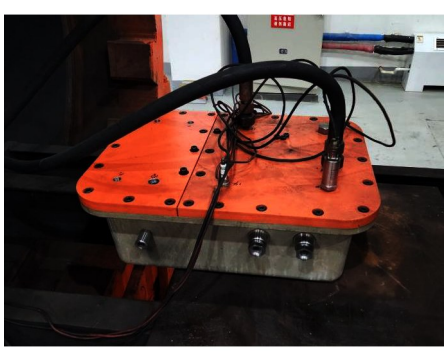


图 5 GF/ER 型隔爆外壳在参考压力测试后的照片

Fig.5 Photograph of the GF/ER explosion-proof enclosure after the reference pressure test



图 6 GF/ER 型隔爆外壳在水压测试后的外观照片

Fig.6 Photograph of the GF/ER explosion-proof enclosure after the water pressure test



图 7 GF/ER 型隔爆外壳在冲击试验后的照片

Fig.7 Photographs of the GF/ER explosion-proof enclosure after the impact test

通过有限元计算分析 GF/ER 型隔爆外壳的强度与刚度。图 8 至图 10 分别为 GF/ER 型隔爆外壳大腔、小腔和双腔在受载不同压力时的应变云图、位移云图和隔爆面间隙的变形云图，最终仿真结果如图 11 所示。从图中可以看出，随着静压力从 1.0 MPa 提高到 3.0 MPa 时，GF/ER 型隔爆外壳的最大位移、最大应变及隔爆面间隙均逐渐变大，但其最大应变均未超过材料的断裂应变(2.4%)，即隔爆外壳在施加静压力的工况下，发生了弹性变形，但隔爆外壳未发生破坏性的断裂，且隔爆面间隙均小于0.15 mm，因此，GF/ER 型隔爆外壳满足 IEC 60079 要求的强度和刚度。隔爆外壳的热稳定性及阻燃特性能够有效降低电气设备的安全风险。GF/ER 型隔爆外壳在经过高温(95 ℃)和低温(−5 ℃)测试后，外观无可见变形或影响防爆型式的损坏(见图 12)，表明其热稳定性和尺寸稳定性良好。另外，GF/ER 型隔爆外壳在经过火焰烧蚀后，进行内部点燃不传爆试验，试验结果见表 5。GF/ER 型隔爆外壳罐体未见火花，满足火焰烧蚀试验和内部点燃不传爆试验要求。

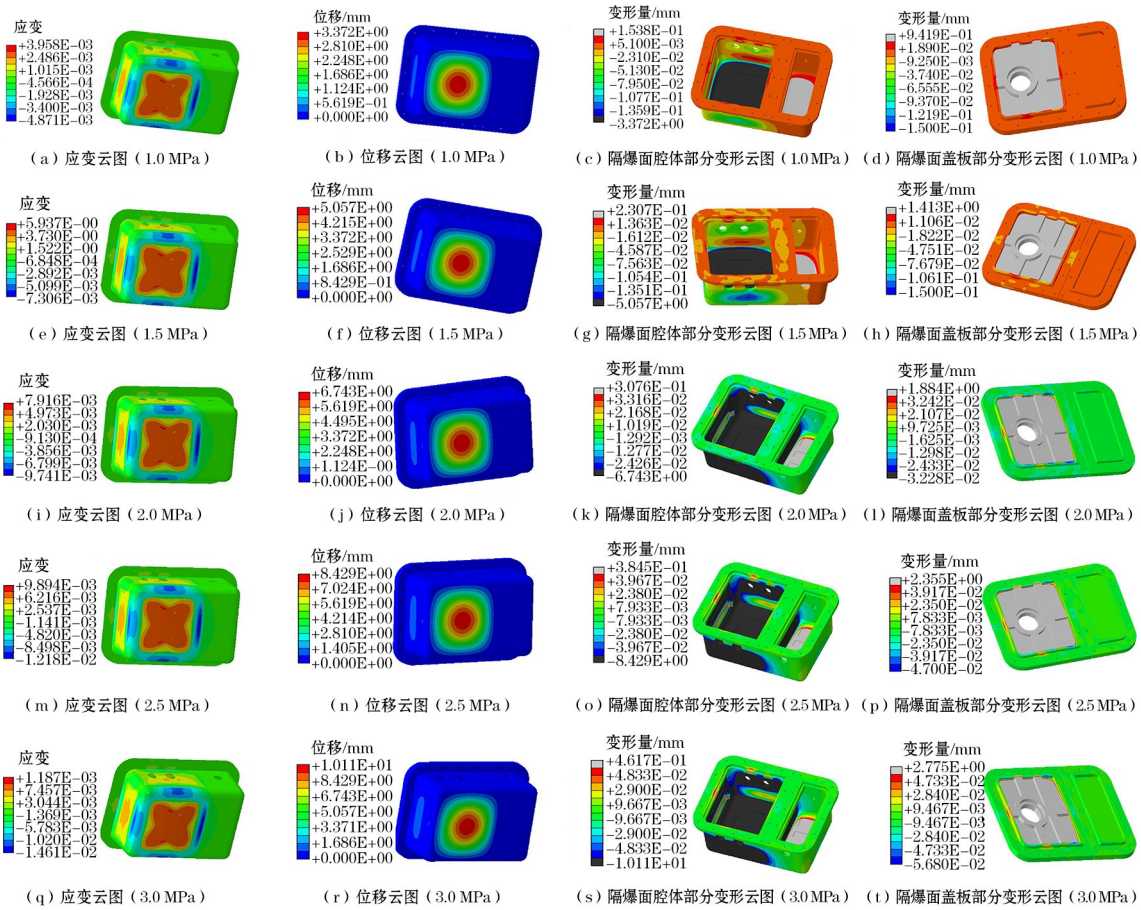


图 8 GF/ER 型隔爆外壳大腔在受载不同压力下的变形云图

Fig.8 The deformation cloud diagrams of the large big cavity of GF/ER explosion-proof enclosure under different pressures

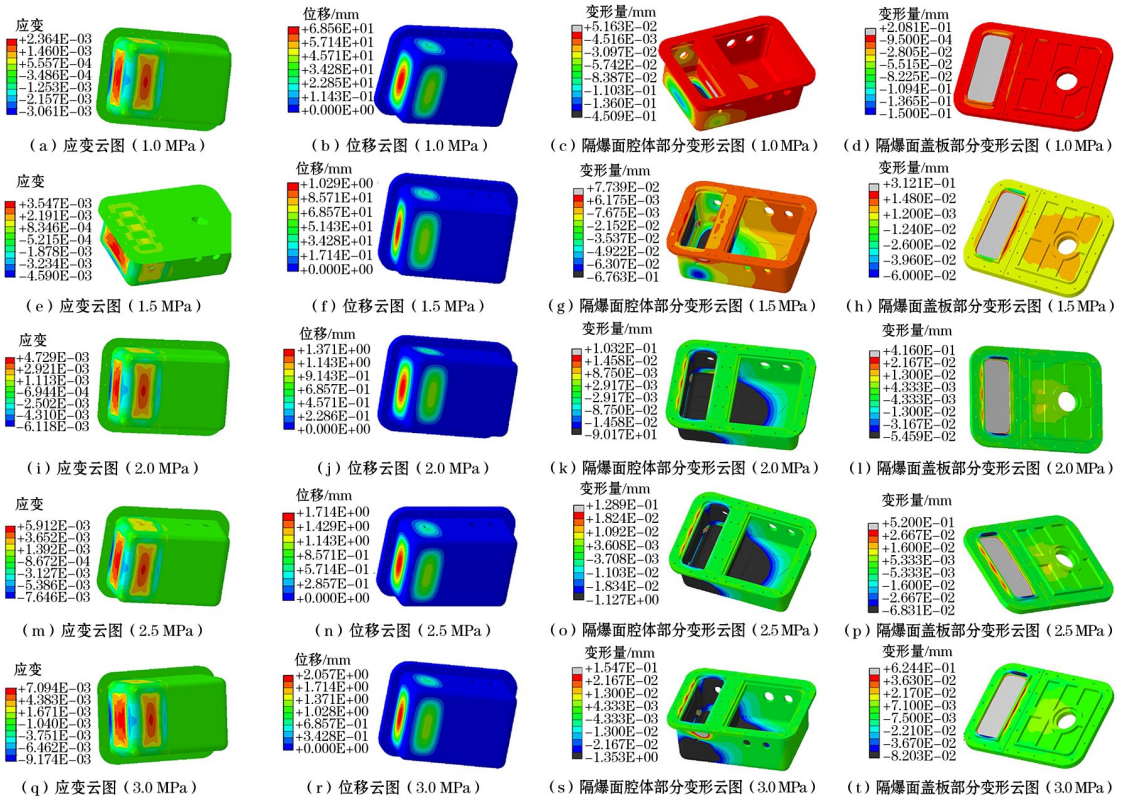


图 9　GF/ER 型隔爆外壳小腔在受载不同压力下的变形云图

Fig.9　The deformation cloud diagrams of the small cavity of GF/ER explosion-proof enclosure under different pressures

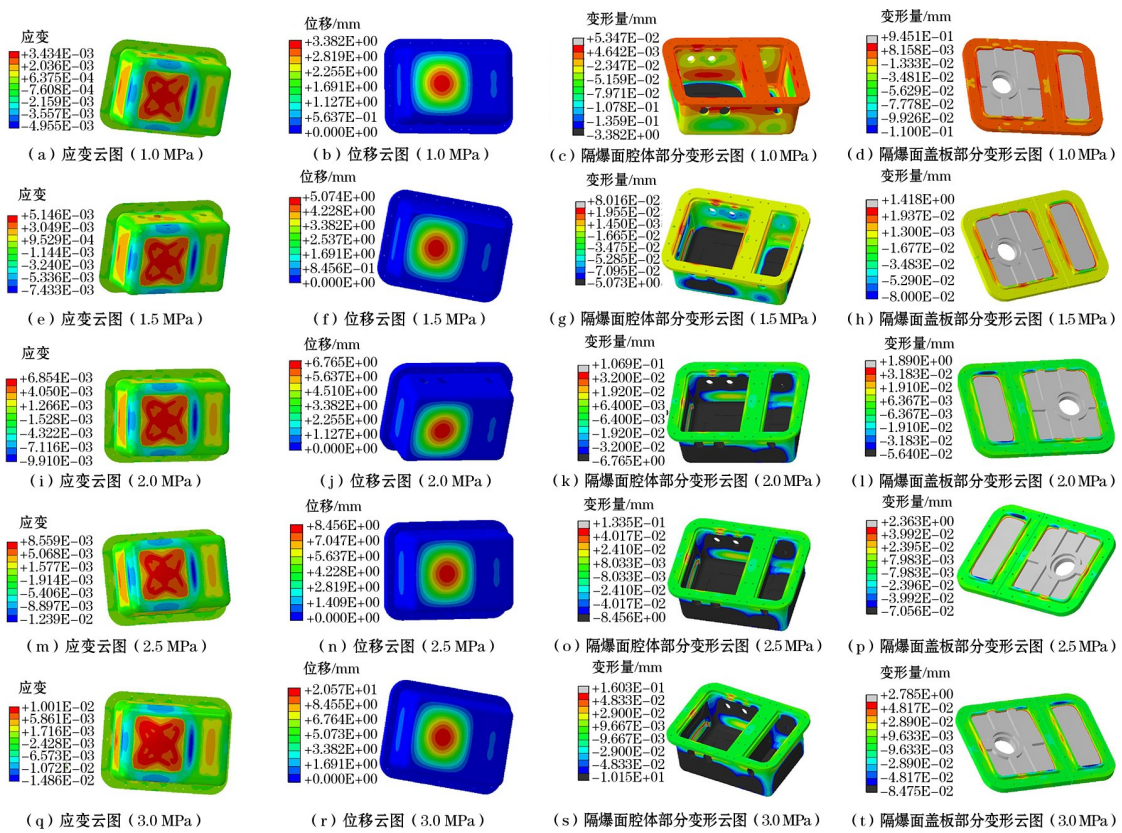


图 10　GF/ER 型隔爆外壳双腔在受载不同压力下的变形云图

Fig.10　The deformation cloud diagrams of the dual cavities of GF/ER explosion-proof enclosure under different pressures

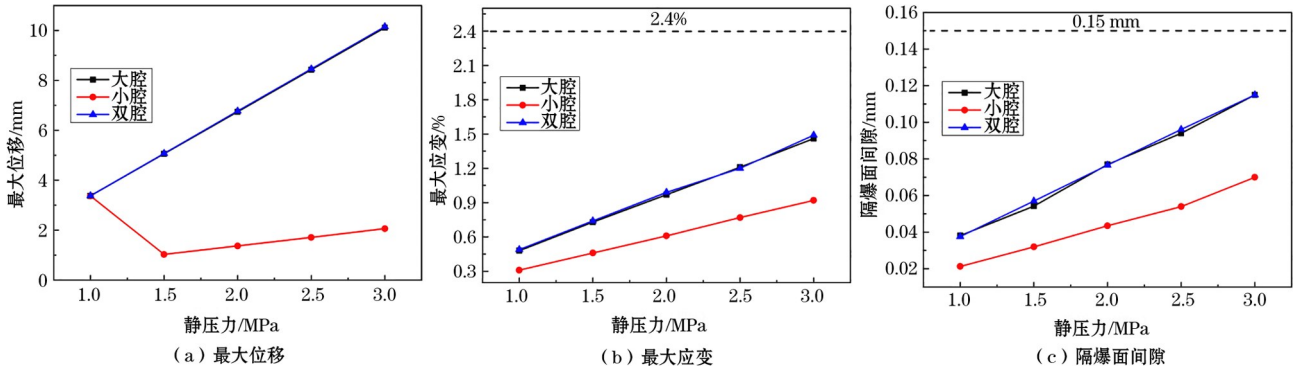


图 11 GF/ER 型隔爆外壳大腔、小腔和双腔在受载不同压力下的仿真结果

Fig.11 The simulation results of large cavity, small cavity and dual cavities of GF/ER explosion-proof enclosure under different pressures

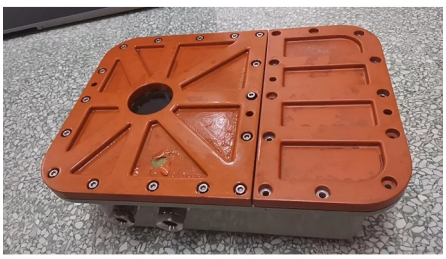


图 12 GF/ER 型隔爆外壳在经过耐热和耐寒试验后的图片

Fig.12 Photograph of the GF/ER explosion-proof enclosure after thermal and cold resistance tests

表 5 GF/ER 型隔爆外壳内部点燃不传爆试验结果

Table 5 Results of the internal ignition non-transmission test in the GF/ER explosion-proof enclosure

气体名称及浓度	试验结果	结论
(CH_4-H_2)/空气:7.29%/5.25%	未传爆	合格
(CH_4-H_2)/空气:7.28%/5.30%	未传爆	合格
(CH_4-H_2)/空气:7.21%/5.03%	未传爆	合格
(CH_4-H_2)/空气:7.31%/5.20%	未传爆	合格
(CH_4-H_2)/空气:7.16%/5.14%	未传爆	合格

耐化学试剂试验结果如图 13 所示。



图 13 GF/ER 型隔爆外壳的耐化学试剂试验结果

Fig.13 Results of the chemical resistance test of GF/ER explosion-proof enclosure

由图 13 可知,GF/ER 型隔爆外壳在经过 IRM902 油和阻燃液压液浸泡后,无可见变形或损坏,表明其耐化学稳定性良好。在外壳防护测试中,GF/ER 型隔爆外壳无进尘现象、无进水现象,且直径为 1.04 mm 的试验金属线无法伸入到外壳内,表明其满足标准要求。

3 结论

针对煤矿井下Ⅰ类爆炸性环境对轻量化非金属隔爆外壳的需求,本文基于玻璃纤维/环氧树脂复合材料(GF/ER),通过有限元计算、多种物理化学特性测试及防爆安全验证试验,研究了其在煤矿井下应用的可能性,主要结论如下。

(1) 建立了 GF/ER 型隔爆外壳的设计与制造工艺流程,并对其进行了全面的力学性能分析。结果表明,GF/ER 型隔爆外壳的拉伸强度为 351 MPa,拉伸模量为 20.4 GPa,断裂伸长率为 2.95%,垂直燃烧等级达到 V-0,表面电阻值为 1.53×10^9 Ω,满足煤矿井下设备对高强度、高阻燃性和抗静电性的要求。

(2) GF/ER 型隔爆外壳耐久性测试结果表明,其拉伸性能、弯曲性能及冲击强度变化率均小于 10%,表明 GF/ER 型隔爆外壳具有优异的耐久性和环境适应性。此外,通过 DSC 测试确定其玻璃化转变温度为 91.8 ℃,确保了其长期使用的稳定性和安全性。

(3) 通过参考压力测试、内部点燃不传爆测试、火焰烧蚀测试等一系列防爆安全试验,证实了 GF/ER 型隔爆外壳具备有效的防爆能力。大腔最大爆炸压力达 0.496 MPa,小腔最大爆炸压力达 0.416 MPa,且未出现永久变形或结构损伤;极限承压能力

为3.1 MPa,远超标准要求的1.5 MPa。同时,该GF/ER型隔爆外壳实现了超过50%的减重效果,减轻了井下人员劳动强度,并提升了移动式设备的续航能力。

(4) 利用有限元仿真分析了不同载荷条件下GF/ER型隔爆外壳的应变与位移分布情况。结果显示,在静压力从1.0 MPa增至3.0 MPa时,GF/ER型隔爆外壳的最大应变均未超过材料的断裂应变(2.4%),且隔爆面间隙保持在0.15 mm以内,表明其在实际工况下的机械稳定性和密封性良好。

(5) GF/ER型隔爆外壳的成功设计为煤矿智能装备的轻量化转型提供了切实可行的解决方案。未来将进一步优化纤维增强复合材料的比例和成型方式,进一步提高其综合性能,并考虑更复杂的工作环境因素影响,开展更深入的模拟和实地测试,推动其在更多矿用防爆设备中的应用。

参考文献(References):

[1] GUO F L, HUANG P, LI Y Q, et al. Multiscale modeling of mechanical behaviors of carbon fiber reinforced epoxy composites subjected to hygrothermal aging[J]. Composite Structures,2021,256:113098.

[2] ZHENG H, ZHANG W J, LI B W, et al. Recent advances of interphases in carbon fiber-reinforced polymer composites:a review[J]. Composites Part B:Engineering, 2022,233:109639.

[3] WERKEN N V D, TEKINALP H, KHANBOLOUKI P, et al. Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites:state of the art and perspective[J]. Additive Manufacturing,2020,31:100962.

[4] KURUVILLA S, RENUKAPPA N, SURESHA B. Dynamic mechanical properties of glass fiber reinforced epoxy composites with micro and nanofillers[C]//Techno-Societal 2018: Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Technologies for Societal Applications-Volume 2. Heidelberg: Springer International Publishing,2020:337-347.

[5] ASOODEH F, AGHVAMI-PANAH M, SALIMIAN S, et al. The effect of fibers' length distribution and concentration on rheological and mechanical properties of glass fiber-reinforced polypropylene composite[J]. Journal of Industrial Textiles,2022,51(5):8452-8471.

[6] MORAMPUDI P, NAMALA K K, GAJJELA Y K, et al. Review on glass fiber reinforced polymer composites[J]. Materials Today:Pro-ceedings,2021,43:314-319.

[7] RAJAK D K, WAGH P H, LINUL E. Manufacturing technologies of carbon/glass fiber-reinforced polymer composites and their properties: a review[J]. Polymers, 2021,13(21):3721.

[8] ZHANG J, LIN G, VAIDYA U, et al. Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications[J]. Composites Part B: Engineering,2023,250:110463.

[9] BULLEN G N. Advanced materials for aerospace and space applications[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2014,7(1):146-155.

[10] MISHNAEVSKY L, BRANNER K, PETERSEN H N, et al. Materials for wind turbine blades: an overview[J]. Materials,2017,10(11):1285.

[11] OSTACHOWICZ W, MCGUGAN M, SCHRÖDER-HINRICHS J U, et al. MARE-WINT: new materials and reliability in offshore wind turbine technology[M]. Heidelberg:Springer Nature,2016.

[12] CHWAŁ M, STAWIARSKI A, BARSKI M, et al. Evaluation and defect detection in L-shaped GFRP laminates by infra-red thermography[J]. Materials, 2024, 17 (12):2830.

[13] 王国法,孟令宇.煤矿智能化及其技术装备发展[J].中国煤炭,2023,49(7):1-13.
WANG Guofa, MENG Lingyu. Development of coal mine intelligence and its technical equipment[J]. China Coal, 2023,49(7):1-13.

[14] 石智军,李泉新,姚克.煤矿井下智能化定向钻探发展路径与关键技术分析[J].煤炭学报,2020,45(6):2217-2224.
SHI Zhijun, LI Quanxin, YAO Ke. Development path and key technology analysis of intelligent directional drilling in underground coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(6):2217-2224.

[15] FU Y T, YAO X F. A review on manufacturing defects and their detection of fiber reinforced resin matrix composites [J]. Composites Part C:Open Access, 2022, 8:100276.

[16] DE B, BERA M, BHATTACHARJEE D, et al. A comprehensive review on fiber-reinforced polymer composites: raw materials to applications, recycling, and waste management[J]. Progress in Materials Science, 2024, 146:101326.