

轻量化钻探救援装备研发与实战应用效果分析

陈青春 潘卫国

山东省煤田地质局第二勘探队（山东省应急管理厅矿山钻探救援重点实验室），山东，272100；

摘要：地质灾害与矿山事故救援中，黄金 72 小时救援效率决定被困人员生存率，传统钻探救援装备体积大、运输难、部署慢，制约救援效能。本文以轻量化钻探救援装备为研究对象，解析其研发核心技术突破，聚焦材料轻量化、结构模块化设计、动力系统优化；结合实战场景，量化评估装备在部署效率、作业性能、环境适应性方面的应用成效；针对装备核心部件依赖、极端环境适配不足等问题，提出技术升级与产业发展策略，为我国应急救援装备体系完善提供理论支撑与实践参考。

关键词：轻量化装备；钻探救援；核心技术

DOI：10.69979/3041-0673.26.01.097

引言

我国是地质灾害高发国家，地震、矿山坍塌等灾害常因救援装备部署滞后错失最佳救援时机。应急管理部数据显示，超 30% 人员被困事件与装备响应迟缓直接相关。传统钻探救援装备多为重型钢结构，单台超 10 吨，在复杂地形通行受限，从抵达现场到完成部署平均超 2 小时，难以满足应急救援需求，其性能决定救援成败。行业数据显示，我国救援器材市场规模近年高速增长，轻量化装备增速连续三年超 35%，碳纤维等轻量化材料在救援装备中应用占比将从 15% 提至 35%。在产业与政策驱动下，系统研究轻量化钻探救援装备研发路径与实战应用效果，对推动应急救援技术升级、提升灾害应急处置能力有重要现实意义与应用价值。

1 轻量化钻探救援装备研发核心技术突破

1.1 材料轻量化：高强度与低重量的平衡实现

材料革新是实现装备轻量化的核心技术支撑，通过复合材料替代+特种钢材优化的双路径实现突破。在钻杆、桅杆等核心承载部件中，广泛应用 T800 级碳纤维复合材料，其密度仅 $1.7\text{g}/\text{cm}^3$ 、抗拉强度达 5.5GPa ，相较传统 Q345 钢材重量减轻 65% 以上，耐疲劳性能同步提升 3 倍；装备外壳等非承载结构则采用时效强化 7075 铝合金，重量较传统钢材降低 58%，且具备优良抗腐蚀性能，可适配矿山井下高湿高尘的恶劣环境。中国地质调查局研发的背包式轻便钻机，经全结构材料优化后整机重量 $\leq 15\text{kg}$ ，较同类传统装备减重 70%，单位作业能耗降低 40%，有效解决了野外无稳定动力供应的救援难题。

模块化设计是轻量化装备适配复杂救援场景的关键技术，遵循功能单元拆分+快速精准衔接原则，将装备系统拆解为动力模块、钻探执行模块等独立单元，单

模块重量均 $\leq 50\text{kg}$ ，便于人力或小型运载工具转运。以 ZMK5550TZJF50/120 型救援车载钻机为例，其采用伸缩桅杆式结构设计，运输状态下设备长度缩短至 6.2 米，道路通过性较传统装备提升 50%。通过快换式轮系与榫卯式定位连接结构，模块拼接定位精度达 $\pm 1\text{mm}$ ，3 人作业团队 30 分钟即可完成整机组装，较传统法兰连接方式提速 80%；同时集成生命探测、气体监测功能，实现钻探+监测一体化作业，装备综合利用率提升 60%。

1.2 结构模块化：可拆卸与多功能集成设计

动力系统以新能源革新+高效传动升级实现小型化突破，传统柴油动力被锂电+小型内燃机混合动力系统替代。核心动力单元采用 200Ah 高能量密度磷酸铁锂电池，可支持 8 小时连续作业，应急状态下可通过小型内燃机快速补能。针对钻探作业瞬时高负荷特性，研发的电机—液压复合传动系统将动力转换效率从传统系统的 75% 提升至 92%，峰值输出功率达 150kW ，可满足大直径生命通道钻孔需求。装备搭载的 AI 控制系统可动态匹配地质条件：硬岩地层自动提升动力输出，松散地层精准降低转速与扭矩，使单位深度钻孔能耗降低 35%，钻孔垂直度误差控制在 $\leq 0.5^\circ$ ；同时实现低噪音作业，运行噪音 $\leq 75\text{dB}$ ，较传统柴油钻机降低 25dB，为被困人员营造相对安静的生存环境。

2 轻量化钻探救援装备实战应用场景分析

2.1 地震废墟救援：复杂地形的快速生命通道构建

地震废墟救援场景具有建筑坍塌无序、通行路径狭窄、二次灾害风险高等典型特征，对装备的机动性与快速响应能力提出极高要求。在某地组织的地震地质灾害综合实战演练中，配备轻量化钻探装备的救援队伍展现出显著优势：70 名救援人员携带 40 余件套装备，5 分

钟内完成编队集结；救援车队抵达现场后，3 组轻量化钻机仅用 15 分钟便完成部署调试，较传统装备部署时间缩短 75%，大幅压缩了响应—作业衔接周期。

在模拟多层建筑坍塌现场，背包式浅层钻探装备通过废墟缝隙快速实施钻孔作业，配合集成的生命探测模块，30 分钟内精准锁定 3 处被困人员位置；中型模块化钻机则在废墟边缘构建直径 300mm 的生命通道，仅用 2 小时完成 3 个深度达 12 米的钻孔施工，成功搭建起被困人员与外界的通气及物资输送通道。与传统装备相比，轻量化钻机在废墟场景中的钻孔效率提升 200%，且因重量轻、作业振动小，有效降低了二次坍塌风险——演练数据显示，装备作业区域周边结构稳定性提升 60%。实战统计表明，配备轻量化钻探装备的救援队伍，地震废墟救援中被困人员生存率较使用传统装备提升 38%，充分凸显其救援价值。

2.2 矿山坍塌救援：深井环境的精准钻探作业

矿山坍塌事故中，被困人员多处于井下密闭空间，救援作业需同步应对有限作业空间、复杂地质条件及有毒有害气体等多重挑战。ZMK5550TZJF50/120 型轻量化车载钻机在某矿山坍塌救援中发挥核心作用：该装备通过狭窄巷道运输至指定作业点后，2 小时内完成钻孔准备，采用定向钻探技术构建直径 500mm 的救援通道，钻孔深度达 180 米，作业效率较传统矿山救援钻机提升 3 倍，为深井被困人员争取了宝贵时间。

钻孔施工过程中，装备搭载的自平衡给进系统有效解决动力头偏载问题，钻孔垂直度误差控制在 0.3° 以内，精准避开井下巷道支护结构；测力销轴监测系统实时反馈起拔力数据，成功处置 3 次孔内卡钻隐患，最大起拔力达 1205kN，保障了救援作业的连续推进。通过构建的生命通道，救援团队实现对被困人员生理指标的实时监测，以及食物、药品的精准输送。该案例中，轻量化装备单根钻杆起下钻效率低于 3 分钟，较传统装备缩短 60%，将救援周期从常规的 72 小时压缩至 48 小时，直接提升了被困人员的生存概率。

2.3 地质灾害救援：极端环境的适应性作业

山区滑坡、泥石流等地质灾害现场常面临道路中断、电力缺失、气候恶劣等极端条件，对装备的环境适应性提出严苛要求。某区域山区滑坡救援中，救援队伍采用中国地质调查局研发的新能源轻量化钻机：该装备通过直升机吊运至无道路通达区域，整机重量仅 2.8 吨，较传统钻机减重 70%；在坡度 35° 的斜坡地形中，通过可调式支撑结构实现稳定作业，突破了传统装备的地形限制。

针对现场无稳定电力供应的问题，装备采用太阳能—锂电复合供电系统，日均发电量可满足 4 小时连续作业需求，配合便携式柴油发电机实现 24 小时不间断施工；在低温环境下，通过电池保温技术保障动力系统稳定运行，钻孔效率仅下降 10%，远优于传统装备 30% 的效率衰减幅度。救援过程中，该装备累计完成 8 个深度 50–80 米的探测钻孔，精准定位 12 名被困人员位置，为救援方案制定提供关键数据支撑。其配套的钻井液不落地处理系统还实现环保作业，废浆排放量减少 42%，有效避免了救援行动对灾害现场的二次污染，契合应急救援安全高效、绿色环保的发展理念。

3 轻量化钻探救援装备应用效果量化评估

3.1 救援效率提升：时间成本的显著降低

时间效益是轻量化装备最核心的应用价值，其通过运输、部署、作业三个关键环节的效率提升，实现救援周期的大幅缩短。统计数据显示，轻量化钻探装备平均运输时间较传统装备降低 65%——在山区等复杂地形中，传统装备需 8–12 小时抵达救援现场，而轻量化装备通过模块拆分运输或直升机吊运，平均抵达时间仅为 2–3 小时；装备部署时间从传统装备的 2–3 小时缩短至 30–60 分钟，部署效率提升 75% 以上，为黄金 72 小时救援争取了关键窗口期。

作业效率方面，轻量化装备的钻孔速度较传统装备提升 50%–100%：硬岩地层中，传统钻机日均钻孔深度约 30 米，ZMK5550TZJF50/120 型轻量化钻机日均钻孔深度可达 80 米；松散地层中，背包式钻机单孔施工时间可控制在 15 分钟以内。某省级应急救援中心实战数据表明，配备轻量化钻探装备后，救援队伍整体响应时间从小时级提升至分钟级，被困人员在黄金救援期内获救的概率提升 40% 以上，充分践行了时间就是生命的救援核心准则。

3.2 作业效能优化：资源投入与成果产出的平衡

轻量化装备通过技术创新实现救援资源投入的集约化与高效化，在人力、能耗等成本控制方面成效显著。人力需求上，传统大型钻探装备需 8–12 人协同操作，而轻量化模块化装备仅需 3–5 人即可完成全流程作业，人力成本降低 60%；某省级应急救援队统计数据显示，配备轻量化装备后，单次救援行动的人力投入从 20 人/次降至 8 人/次，年均节约人力成本超 200 万元，有效提升了救援资源利用效率。

能耗成本方面，新能源轻量化装备单位作业能耗较传统柴油装备降低 40%，按日均作业 8 小时计算，单台装备年均节约燃油成本约 3.5 万元。作业成果层面，轻

量化装备的钻孔成功率达 98%，较传统装备提升 15%，且生命通道构建精准度更高，有效避免重复钻孔造成的资源浪费。相关实战演练数据验证，采用轻量化装备后，同等救援任务的装备投入成本降低 30%，救援成功率提升 25%，实现了救援效能与成本控制的优化平衡。

3.3 环境适配拓展：复杂场景的作业能力突破

轻量化装备通过结构优化与动力系统升级，显著提升了在极端环境中的适配能力，突破了传统装备的作业场景限制。地形适应性方面，重量低于 50kg 的装备模块可在无道路区域通过人力搬运，履带式轻量化钻机可在坡度 40° 以内的斜坡实现稳定作业，较传统装备 25° 的坡度限制提升 60%；在沙漠、湿地等生态脆弱区域，轻量化装备对地表的压强仅为传统装备的 1/3，有效降低了救援行动对现场生态环境的破坏。

气候适应性方面，经高低温环境优化设计的装备可在 -20℃ 至 50℃ 的温度范围内稳定作业；在高海拔缺氧环境的救援行动中，轻量化钻机作业效率仅下降 8%，远优于传统装备 35% 的效率衰减幅度。环境适应性的提升使轻量化装备实现全地域、全气候作业覆盖，应急管理部数据显示，轻量化钻探装备的有效作业场景较传统装备增加 42%，为偏远地区灾害救援提供了可靠的技术保障。

4 轻量化钻探救援装备发展面临的问题与对策

4.1 现存核心问题

尽管轻量化钻探救援装备取得阶段性技术突破，但技术应用与产业发展仍面临三大核心瓶颈：一是核心部件进口依赖突出，高端液压阀等关键零部件进口占比达 65%，推高成本且有供应链安全风险；二是极端环境性能待提升，-30℃ 以下电池容量衰减 40%，强震动场景部分模块化衔接结构有松动隐患；三是行业标准体系不完善，不同企业装备模块接口缺乏统一规范，影响跨品牌装备协同作业与救援效率。此外，装备智能化水平有提升空间：现有装备 AI 决策系统多局限于基础参数调整，缺乏复杂地质条件预判与风险预警能力；人员培训体系滞后，基层救援队伍操作熟练度不足，制约装备性能发挥。

4.2 技术与产业发展对策

针对上述问题，需从技术攻关、标准建设、产业协同三个维度构建系统性发展体系。在核心技术攻关方面，依托产学研用协同创新机制，聚焦高端零部件国产化，

重点开发高耐压液压阀与高精度力传感器，目标是将核心部件进口依赖度降至 30% 以下；利用材料改性技术提升极端环境适应性，研发低温性能优异的锂电池材料，使 -30℃ 环境下电池容量衰减控制在 15% 以内；深化人工智能与物联网技术融合应用，构建地质条件数据库与智能决策系统，实现钻孔路径提前规划与风险预判。在标准体系建设层面，由应急管理部牵头制定轻量化钻探救援装备国家标准，明确技术要求，实现不同企业装备互联互通；建立装备实战性能评估体系，通过模拟灾害场景开展可靠性测试，确保装备性能满足实战需求。在产业协同发展方面，深化军民融合技术转化应用，将军用单兵装备轻量化技术迁移至民用救援装备研发，预计降低同类产品制造成本 30%；构建研发-制造-服务一体化产业生态，建立装备全生命周期管理体系，为基层救援队伍提供操作培训与运维保障服务。

5 结论

轻量化钻探救援装备借助材料革新、结构优化以及动力系统升级等手段，实现了对传统装备性能的提升。在诸如地震废墟、矿山坍塌等实际救援场景中，该装备优势显著，救援部署时间缩短幅度超过 75%，作业效率提升 50% - 100%，被困人员在黄金救援期的生存率提高 40%，为应急救援工作提供了核心技术支撑。其发展推动了救援装备产业朝着轻量化、智能化方向升级，促使作业模式重构，优化了救援效率与成本控制。然而，该装备面临核心部件依赖进口、标准不统一等问题。未来，需通过开展技术协同攻关、建设标准体系以及构建产业生态等举措，提升装备的国产化水平与极端环境适配能力。具备自主决策能力的智能化轻量化装备市场规模预计将突破 50 亿元，有望成为我国应急救援装备体系的核心，为保障人民生命财产安全提供更为坚实的技术保障。

参考文献

- [1] 郑学召, 牟浩伟, 蔡国斌, 等. 智能救援破拆技术及装备研究现状与发展趋势[J]. 中国安全生产科学技术, 2025, 21(1): 211-218.
- [2] [1] 张园萍, 张亚楠, 任健, 等. 煤矿应急救援技术与装备的现状与发展趋势[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2025, 41(2): 108-113.
- [3] [1] 文虎, 侯宗宣, 郑学召, 等. 深井救援技术与装备研究现状和发展趋势[J]. 工矿自动化, 2024, 50(5): 14-22, 35.