

基于投诉数据的电子雷管质量问题统计分析 & 工程对策

刘金城 任泰昌 张宁 邹磊
江西省新余国泰特种化工有限责任公司 江西新余 338011

DOI:10.32629/ems.v8i6.20604

[摘 要] 为解决电子雷管使用过程中质量问题频发的工程难题,基于中部某省民爆企业近年来 653 起工业电子雷管客户质量投诉数据,采用内容分析法对问题类型、根本原因进行系统分类与深度剖析。结果表明:雷管拒爆及盲炮(37.8%)、检测异常(23.9%)、起爆器故障(15.0%)是三大核心问题,合计占比 76.7%;现场操作不规范为首要原因(42.6%),其中线路使用不规范和装药工艺错误最为突出;产品自身质量问题占 31.5%,主要表现为芯片(电子控制模块)铆接虚接、芯片模组损坏、引火药头震碎。异常样品保留率仅 12.7%,严重制约问题追溯。针对上述问题,从工程应用角度提出标准化作业强制推行、产品可靠性提升、环境适应性方案建立、用户培训与追溯体系完善四方面对策。

[关键词] 电子雷管;质量问题;拒爆;统计分析;工程对策

引言

电子雷管凭借高精度、高安全性、可编程等优势,已在隧道掘进、矿山开采、水下爆破等领域广泛应用,年使用量已突破 6 亿发。然而,拒爆、检测异常、起爆器故障等问题日益增多,不仅造成工期延误和经济损失,更可能引发安全事故。在隧道掘进中,雷管拒爆可能导致掌子面破坏;矿山开采中,盲炮处理增加成本并威胁作业安全;水下爆破中,起爆器故障可能导致整个爆破网络失效。系统分析电子雷管实际使用中的质量问题,揭示其成因并提出工程对策,具有重要意义。

目前,国内学者围绕电子雷管起爆技术已开展了较系统的研究,从产品结构、应用场景、拒爆失效机理等方面梳理了技术发展现状,指出了起爆系统可靠性和环境适应性方面的不足^[1]。针对工程应用中暴露的拒爆问题,胡敏等^[2]以某露天矿为例,分析了水孔环境下雷管与起爆具间距过大导致起爆能衰减的拒爆机理,并提出了加长管体等对策。然而,这

些研究多为定性讨论,基于大规模实际投诉数据的系统统计分析仍较为缺乏。基于此,本文以 653 起客户投诉数据为基础,对质量问题进行系统分类与深度剖析,提出针对性工程对策。

1 数据来源与方法

研究数据来源于中部某省民爆企业的《质量问题投诉统计表与处理单》,共收录工业电子雷管使用质量问题投诉 653 起,产品覆盖全国 30 余个省市,涉及五家芯片厂家品牌。每起投诉均包含客户信息、现场地点、问题反馈、售后调查处理情况等完整信息。

采用内容分析法对投诉数据进行分类编码,按问题类型、问题原因、涉及产品、作业环境等维度统计分析,计算各类问题的频次和占比,结合售后处理记录追溯根本原因。

2 统计结果与分析

2.1 问题类型分布

653 起质量问题可分为六大类型,分布情况如表 1 所示,帕累托图如图 1 所示。

表 1 电子雷管质量问题类型分布

问题类型	数量/起	占比/%	累计占比/%	典型表现
雷管拒爆及盲炮	247	37.8	37.8	雷管入孔后未爆、盲炮
检测异常	156	23.9	61.7	入孔后检测不到、桥丝异常、无电流、短路
起爆器故障	98	15.0	76.7	通讯异常、起爆器卡死、数据上传延迟、版本异常
结构标识问题	72	11.0	87.7	二维码缺失/不清晰、线卡无法闭合、脚线断裂
数据系统问题	51	7.8	95.5	无法授权、UID 不存在、数据上传失败、重码
炸药未被引爆	29	4.5	100	雷管响但炸药未爆、残药

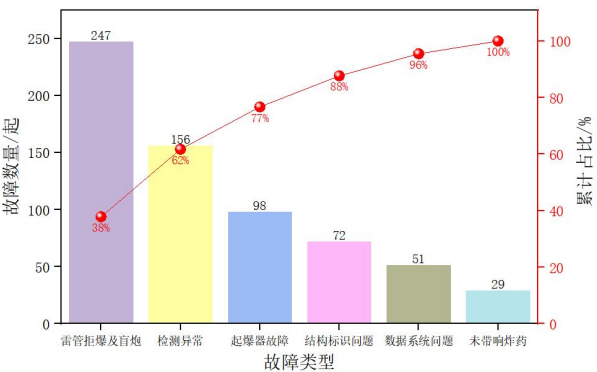


图 1 电子雷管现场使用故障类型帕累托图

表 2 拒爆及盲炮与检测异常问题原因分析

原因类别	数量/起	占比/%	具体表现
现场操作不规范	172	42.6	使用铁质/铝质爆破母线（38 起）、正向装药（正起爆药卷）导致挤压（45 起）、线路接头氧化腐蚀（29 起）、粗暴装药脚线受损（32 起）、未完成组网检测便实施起爆（28 起）
产品自身质量问题	127	31.5	芯片与电极塞铆接虚接/断开（35 起）、爆后芯片模组损坏（28 起）、引火药头震碎（31 起）、线卡防水性差（18 起）、二维码缺陷（15 起）
环境地质因素	61	15.2	岩层裂隙/溶洞挤压（38 起）、水孔导致漏电（15 起）、高温高湿环境（8 起）
用户管理问题	43	10.7	未保留异常样品（28 起）、不配合调整方案（9 起）、培训不到位（6 起）

注：部分案例涉及多个原因，合计数量大于拒爆、盲炮与检测异常问题总数（403 起）

现场操作不规范为首要原因（42.6%），其中线路使用不规范和装药工艺错误最为突出。许多施工单位为降低成本使用铁质/铝质起爆母线替代铜芯爆破线，或反复使用旧线导致接头氧化。铜芯爆破线具有良好的导电性能和柔韧性，是保证起爆稳定性的基础，使用铁质/铝质起爆母线会导致电阻大幅增加，影响起爆能量的有效传递。在正向装药方式下，雷管位于药卷前端，先爆孔的爆轰波和岩石位移会对后爆孔雷管形成强烈冲击挤压，导致芯片损坏或药头破碎。在小断面巷道掘进中，这一问题尤为突出，秦绍兵等采用层次分析法对拒爆原因进行评价发现，延期时间设置不合理是主要影响因素，其次是电子雷管自身特性^[3]。

产品自身质量问题占 31.5%，主要表现为生产工艺缺陷和设计可靠性不足。引火药头震碎、芯片模组损坏在统计中分别有 31 起和 28 起，反映出电子雷管在冲击载荷下的薄弱环节。有研究通过水下爆炸方法对延时过程中的工业电子雷管进行冲击实验，发现当冲击波峰值压力达到 158.12 MPa 时会导致储能电容受损失效，药头在冲击波峰值压力 121.53~158.12 MPa 下发生破坏，这为本研究中大量药头震碎和芯片模组损坏案例提供了机理解释^[4]。铆接虚接问题与电子引火元件铆接工序的控制水平密切相关。

由表 1 和图 1 可见，雷管拒爆及盲炮为首要问题，占比高达 37.8%，其次为检测异常（23.9%）和起爆器故障（15.0%），三类合计占比 76.7%，呈显著的“二八”分布特征，按照帕累托原则，这三类问题应作为防控重点，是影响使用可靠性的核心因素。在工程中，雷管拒爆直接影响爆破效果，增加二次破碎成本；检测异常导致装药后无法组网起爆；起爆器故障在延时爆破中尤为致命。

2.2 问题原因分析

通过对 247 起雷管拒爆及盲炮和 156 起检测异常问题的深度追溯，归纳出四大类根本原因，如表 2 所示。

2.3 售后处理效果评估

售后处理的主要方式及效果如下：（1）现场技术跟进（287 起）：通过调整延期方案、规范装药、更换起爆跳线等措施，一次性处理成功率 86%；（2）设备置换与升级（98 起）：起爆器故障解决率 92%；（3）产品退换处理（23 起）：批次性问题退换货率 100%；（4）客户培训与解释（156 起）：后续问题复发生率降低 45%。

异常样品保留率仅 12.7%（403 起中仅 51 起保留），严重影响根本原因追溯。这一现象在行业中被认为是普遍存在的问题，反映了用户质量意识和追溯体系的严重缺失。

3 工程问题讨论

3.1 现场操作不规范的工程影响

起爆线路方面，铁质/铝质爆破母线导电性能远低于铜线且易氧化腐蚀生锈，导致起爆能量衰减。电爆网路中起爆电源功率应能保证全部电雷管准爆，线路电阻超标将使流经各雷管的电流达不到准爆要求，从而引发拒爆。装药方面，正向装药使雷管暴露于爆轰波和岩石位移的强烈冲击中。反向装药方式下，起爆药卷靠近眼底，雷管聚能穴朝向眼口，爆轰波传播方向与岩石抛掷方向一致，有利于能量充分利用，可在一定程度上降低拒爆概率。

3.2 产品可靠性的工程需求

芯片与电极塞铆接处虚接、芯片模组损坏、引火药头震碎反映产品在满足工程需求方面存在不足。延期状态下电子雷管电子控制模块的失效机制研究表明, 钽电容在 $1.495 \times 10^5 \text{ g}$ 过载时即出现电压下降现象, 过载越大短路失效越明显; 芯片在 $4.155 \times 10^5 \text{ g}$ 过载后检测异常^[6]。这从机理上解释了为何小断面隧道爆破中电子雷管拒爆率较高—爆破过程中产生的冲击加速度远超普通元器件的承受能力。

在冲击可靠性研究中, 吴红波等通过构建单次冲击与叠加冲击实验系统, 发现部分电容在受到冲击后电压持续下降, 会增加长延期起爆网络的拒爆风险; 钽电容正面抗冲击能力明显优于侧面^[6]。这一发现对电子雷管的封装结构设计具有重要指导意义。此外, 铆接处线芯松动、焊盘脱落等问题在装药震动和受力条件下被放大, 线卡防水性能不足是水下环境下漏电的主要原因。

3.3 环境适应性的工程挑战

复杂岩层条件下爆破应力波传播路径改变, 对后爆孔形成异常挤压。在岩溶发育区进行深孔台阶微差爆破时, 溶洞和裂缝可能贯通相邻炮孔, 先爆孔产生的冲击波容易通过裂缝破坏后爆孔的起爆网络, 产生拒爆。水孔作业中, 使用防水型雷管并采用反向装药, 可在一定程度上改善起爆成功率。

4 工程对策建议

4.1 强制推行现场作业标准化

(1) 强制线路标准: 全面禁用铁质/铝质爆破母线, 强制使用 0.52 mm 铜芯标准爆破线, 接头不超过 3 个并做绝缘抗氧化处理。(2) 规范装药工艺: 全面推行反向装药, 雷管在药卷内打结固定, 配备专用牵引绳防止脚线磨损。(3) 建立作业前检查清单, 检查合格后方可起爆。

4.2 提升产品可靠性设计

针对产品自身质量问题, 结合工程应用需求, 建议: (1) 强化铆接工艺控制: 引入视觉检测系统监控铆接质量, 针对深孔爆破开发加强型铆接结构。(2) 提升抗挤压性能: ①优化芯片封装结构, 借鉴相关实验中钽电容正面抗冲击能力优于侧面的发现^[6], 合理设计芯片和电容在管壳内的布局方向, 并根据岩层条件选用不同抗挤压等级的产品。②使用抗冲击性能的电子控制模块, 近年来, 电子雷管电子控制模块的冲击可靠性研究取得了多方面进展, 包括抗过载加载测试方法^[5]和冲击动态响应评价体系^[6]的建立, 为产品抗冲击设计提供了量化依据。(3) 改进线卡防水设计: 优化密封结构, 选用流散性更好的硅脂, 水下工程采用双层密封结构。

4.3 建立环境适应性爆破方案库

(1) 制定岩层特征分类标准, 对应推荐延期方案和装药参数^[3]。(2) 开发数字化爆破设计软件, 集成岩层识别、方案推荐、效果预测功能。(3) 针对水下、高温高湿、小断面等特殊环境, 研发专用产品并制定专项规程。

4.4 完善用户培训与质量追溯体系

(1) 建立三级实操培训体系: 初级(操作规范)、中级(故障诊断)、高级(方案设计), 爆破员通过认证方可上岗。(2) 推行“异常样品必分析”制度: 客户保留异常雷管寄回分析, 7 个工作日内出具报告。(3) 搭建在线技术支持平台, 实现 7 × 24 h 远程诊断。

5 结论

(1) 基于 653 起电子雷管质量投诉统计分析, 雷管拒爆及盲炮 (37.8%)、检测异常 (23.9%)、起爆器故障 (15.0%) 是三大核心问题, 合计占比 76.7%。

(2) 问题根本原因中, 现场操作不规范为首要因素 (42.6%), 产品自身质量问题次之 (31.5%), 环境地质因素 (15.2%) 和用户管理问题 (10.7%) 也是重要原因。

(3) 售后处理中异常样品保留率仅 12.7%, 严重制约问题根本原因分析和精准改进。

(4) 从工程应用角度, 建议采取四方面对策: 强制推行现场作业标准化、提升产品可靠性设计、建立环境适应性爆破方案库、完善用户培训与质量追溯体系。

[参考文献]

- [1] 冷振东, 范勇, 涂书芳, 等. 电子雷管起爆技术研究进展与发展建议[J]. 中国工程科学, 2023, 25(01): 142-154.
- [2] 胡敏, 张俊杰, 姚煜国, 等. 新屋田露天矿拒爆原因分析及解决方案[J]. 现代矿业, 2022, 38(8): 81-84. DOI:10.3969/j.issn.1674-6082.2022.08.019.
- [3] 秦绍兵, 杨友才, 刘雨欣. 小断面巷道掘进爆破电子雷管拒爆风险评价研究[J]. 现代矿业, 2024, 40(10): 67-71.
- [4] 周恩, 李洪伟, 孙翼, 等. 工业电子雷管储能电容和点火药头的抗冲击性能[J]. 工程爆破, 2025, 31(06): 155-163. DOI:10.19931/j.EB.20240132.
- [5] 叶紫阳, 吴红波, 杨仕春, 等. 延期状态下电子雷管电子控制模块的高过载加载实验[J]. 高压物理学报, 2025, 39(01): 100-110.
- [6] 吴红波, 叶紫阳, 汪鑫齐, 等. 电子雷管电子控制模块冲击动态响应与可靠性[J]. 含能材料, 2025, 33(12): 1448-1457.
- 作者简介: 刘金城, 出生年月: 1998 年 5 月, 男, 汉族, 学历: 研究生, 籍贯: 湖南省岳阳市, 职称: 工程师, 研究方向: 从事火工品设计开发、技术与质量管理等工作。