

Reliability and Safety Analysis in Fuze Process Design

Shaoping Wang Chengguang Guo

Xi'an Institute of Mechanical and Electrical Information Technology, Xi'an, Shaanxi, 710065, China

Abstract

Fuze is an important component of ammunition systems, and its stability directly affects the success rate of weapon launch and operational safety. Under complex battlefield conditions, fuses must be able to be used accurately and reliably under predetermined conditions, and safety accidents caused by accidental triggering must be avoided. Therefore, conducting systematic reliability and safety research on it is not only related to combat effectiveness, but also crucial for ensuring personnel safety and preventing secondary injuries. In this context, this article provides an overview of the foundation of fuse and fuse process design, explores the reliability and safety in fuse process design, proposes a collaborative analysis and optimization strategy for reliability and safety, and conducts case analysis and application research, aiming to provide written reference and inspiration for relevant designers.

Keywords

Fuze process design; Reliability; safety

引信工艺设计中的可靠性与安全性分析

王少平 郭晨光

西安机电信息技术研究所, 中国·陕西 西安 710065

摘 要

引信是弹药系统的重要组成部分, 其性能的稳定性直接关系到武器发射的成功率和作战安全性。在变化复杂的战场条件下, 引信必须能够在预定条件下准确可靠地使用, 而且要避免因意外触发而引发的安全事故。为此, 对其进行系统的可靠性和安全性研究, 不但关系到作战效能, 更是保障人员生命安全、防止次生伤害的关键。在此背景下, 本文概述了引信及引信工艺设计基础, 探究了引信工艺设计中的可靠性与安全性, 提出了可靠性与安全性的协同分析与优化策略, 并开展了案例分析与应用研究, 旨在为相关设计人员提供书面参考与借鉴。

关键词

引信工艺设计; 可靠性; 安全性

1 引言

为提高引信的智能化和对外界的适应能力, 需要融入先进的科技手段, 如微电子技术、传感器技术和智能控制算法等, 并将可靠性评估与安全性分析相结合, 从设计、制造、贮存到服役等各个阶段进行严格把控, 保证引信的各种功能参数都处于最佳状态, 以保证其在复杂的战斗条件下能够准确响应指令, 并将突发事件的危险性降到最低, 确保作战任务的高效执行与人员安全。

2 引信及引信工艺设计基础

引信又称信管, 装在炮弹、炸弹、地雷等上的一种引爆装置。引信是利用目标信息和环境信息, 在预定条件下引爆或引燃弹药战斗部装药的控制装置(系统)。典型引信结构由三部分构成: 机械机构(含保险栓、击发组件等, 负责

物理保险与机械能传递)、含能元件(包括雷管、传爆序列, 是实现能量输出的核心)、电子模块(由传感器、控制器组成, 完成目标探测与起爆逻辑控制), 如图一典型引信结构示意图所示。引信工艺设计是从设计方案转化为实物产品的全过程技术规划, 需要满足高精度(装配容差达到微米)、高安全(抗意外引爆)和高可靠(适用于极限条件)等多个方面的需求, 涵盖材料选取、加工和性能试验等多个阶段, 是实现“平时安全、战时可靠”的前提^[1]。

3 引信工艺设计中的可靠性分析

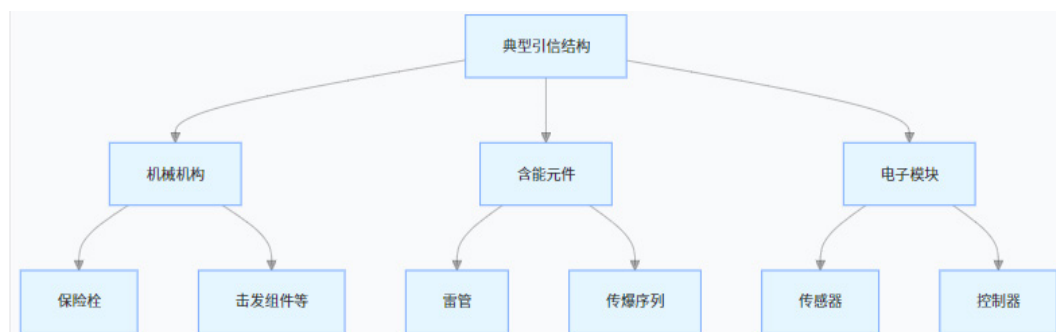
3.1 影响引信可靠性的工艺因素

在构件制作过程中, 加工精度是核心变量: 以深孔钻孔为例, 如果钻孔过程中存在 0.02 mm 的轴向误差, 就会引起套管的壁厚不均, 从而引起传爆失效。目前, 国内外研究主要集中于金属材料的表面改性, 而金属材料的表层存在着较大的起伏(5-8 μ m, 实测误差大于 3 μ m), 将严重降低其耐腐蚀性能, 且在潮湿和高温条件下易发生锈蚀而造成机械卡死。装配工艺的稳定性同样关键, 如果压力超过设定值

【作者简介】王少平(1992-), 男, 中国陕西咸阳人, 硕士, 工程师, 从事引信工艺设计及试制研究。

(如规定 500-600 N, 实际达 800 N), 将引起弹性形变, 导致安全装置释放延迟。清洁度不够(如残余 0.1mm 以上的金属碎片)会引起过早爆炸或瞎火。而含能物质加工过程

对炸药爆炸效果的影响则更加直观, 药剂混合的过程中, 由于搅拌速度的变化, 引起颗粒级配不均匀, 炸药爆炸威力的基准偏差大于 15%。



图一：典型引信结构示意图

3.2 可靠性分析方法与模型

在定性层面, 以“故障模式与影响分析”为基本手段, 对“工艺环节 - 故障模式 - 影响范围”进行系统的梳理, 可识别关键风险点, 例如“焊接工艺虚接→电路断路→引信拒爆”, 并通过风险优先数排序确定改进优先级。在定量分析方面, 通过建立“顶事件 - 中间事件 - 底事件”的逻辑关系模型, 对过程参数进行定量描述。以引信作用时间偏差为例, 顶事件为“作用时间超差 $\pm 10\text{ms}$ ”, 底事件可追溯至“弹簧刚度偏差”“装配间隙波动”等工艺因素, 采用布尔代数方法对各个底层过程的贡献进行量化分析。采用快速寿命试验 (ALT) 方法, 对主要加工参数 (温度、振动应力等) 施加异常荷载, 构建“应力 - 寿命”关系函数, 预测其在常态条件下的服役寿命^[2]。

3.3 工艺可靠性提升策略

利用 Taguchi 法对核心工艺参数进行优化, 即通过正交试验优选出“压药压力 25 MPa+ 保压时间 8s”的最佳组合, 将传爆率的平均值由 12% 降低到 5%。引入数字化建模工具, 对深孔成形过程中零件的力学性能进行数值仿真, 从而减少零件制造过程中 40% 的试错量。基于智能控制实现流程的最优控制, 在系统中配置大量的物联网传感设备, 实现对环境的温度 ($\pm 1^\circ\text{C}$)、湿度 ($\pm 2\%$)、压力 ($\pm 0.5\%\text{FS}$) 等多个参数的在线监控, 当超过临界值时, 会发出警报。在高风险生产环节 (如含能装配) 中实施了自动控制, 并用机械臂代替人力, 使因错误造成的失败率低于 0.1%。除传统的试验方法, 增加环境应力筛选 (ESS), 通过随机振动 (20-2000Hz) 与高低温冲击暴露工艺潜在缺陷。构建工艺 - 可靠性的关联数据库, 绑定历史失效案例与工艺参数偏差, 形成预测模型, 提高预警准确率。

4 引信工艺设计中的安全性分析

4.1 影响引信安全性的工艺因素

在设计制造过程中, 由于存在的各种因素导致了引信的安全事故, 核心风险点集中在三个方面。第一, 含能材料

处理工艺。混合过程中搅拌速率超出了临界值, 会产生摩擦发热, 引起药物的局部发热, 从而导致自燃; 压药压力变化, 会造成药柱内的浓度分布不均匀, 出现“热点”现象, 严重时会引起爆破事故。第二, 机械加工工艺的精度缺陷。如保险栓的尺寸误差 (设计为 0.01mm, 而在实践中达到 0.03mm), 会造成保险机构卡滞或过早失效; 击发组件的表面粗糙度超标 ($R_a > 1.6\mu\text{m}$) 会使部件的摩擦系数增大, 从而导致早爆。第三, 装配工艺的操作规范执行不到位。如果在含能部件的组装过程中没有按照要求使用防静电工具 (比如用普通扳手代替铜制扳手), 则静电放电量可能达到 0.1 mJ 以上, 超出药剂感度阈值; 清洁度控制失效液会在振动环境中形成撞击火源。

4.2 安全性分析与评估方法

引信工艺安全性分析需构建“识别 - 量化 - 分级”的完整体系。基于“过程要素偏离→危害情景→结果影响程度”的链式分析方法, 可以实现对风险的精确识别。比如, 在“高温焊电、保险丝烧断、意外起火”的情况下, 这种情况在变异矩阵法中被划分为“极高风险” (风险等级 I 级), 需要进行强制性改造。采用“发生概率”与“后果严重度”双重评分的方法, 将工艺环节划分为“禁止级” (如手工混药, 风险值 > 80)、 “限制级” (如半自动装配, 风险值 40-80) 和“允许级” (如全自动压药, 风险值 < 40)。运用事故树分析聚焦追溯性评估, 将“意外起爆”作为顶事件, 反向推导“药剂感度过高→包覆工艺缺陷→涂覆厚度不足”等底事件, 量化评价各个过程节点的贡献度, 从而为改善方案提供针对性的指导。

4.3 工艺安全性保障措施

确保引信工艺的安全性, 需通过“技术防控+管理规范”双重保障。在技术方面, 对危险工艺进行自动化改造, 使用机器人进行能量物料的运输和组装, 降低人工接触; 采用静电清除技术 (离子风枪+接地监测), 实现过程中静电电压小于 50 V, 低于药剂的点燃临界值 (一般 $> 100\text{V}$)。在参数控制的过程中, 实行闭环管理: 压药工序采用伺服压力机

(控制精度 $\pm 1\text{MPa}$)，与红外线测温(对药柱的温度进行实时监控，超过 50°C 就会停止运转)；焊接工艺引入激光探伤技术，保证无虚焊和漏焊(检测精度达 0.01mm)，防止电路的非正常发热。在管理层面上构建全程可溯源系统：利用区块链对各生产环节(压药时间、操作人员、设备编号等)进行实时监控，达到“工艺数据-产品批次-安全责任”的精确关联。建立相应的等级体系，对含能工艺的操作人员进行理论和实践的双重考核(合格率必须达到 100%)，并且每季进行一次复训，以提高操作人员的规范意识^[3]。

5 可靠性与安全性的协同分析与优化

在引信工艺设计中，要想实现可靠性与安全性的协同优化，需要打破“单一目标最优”的固定思维，构建“约束-平衡-增益”的闭环体系。在系统设计过程中，将可靠性要求(如响应时间误差 $\leq 5\text{ms}$)和安全性约束(如火灾发生率 $<0.01\%$)转化为能够量化的工艺参数边界。以电子引信焊接工艺为例，采用多目标优化方法，对“焊缝温度-焊点强度-钢绞线抗温性能”Pareto 优化问题进行求解，并在 $220^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 范围内，实现焊点拉剪与消除因高温引起的早期爆炸工艺执行层面对过程实施级的智能化协调控制，借助“数字化孪生”技术，对系统进行可靠度和安全度的实时耦合调控。在监测含能材料装配压力超过最佳可靠值(如设计 25MPa ，实际 28MPa)的情况下，将压力调整到一个安全临界值($\leq 30\text{MPa}$)再启动补偿机制(延长保压时间 2s)，以保证传爆序列密度满足要求。在验证方面，需要建立“双维综合试验体系”，将振动、冲击等可靠性增强实验与静电、冲击等安全极限实验相结合。比如，在 $20\text{-}2000\text{Hz}$ 的环境下，实现对引信工作可靠性(触发成功率 $\geq 99.5\%$)和保险机制安全性的同步监测，确保引信在实际应用中达到最优状态，实现可靠性与安全性的双赢局面。

6 案例分析与应用研究

美军“标枪”导弹引信曾因装配工艺存在偏差，在实战中出现 12% 的瞎火率。借助故障树分析(FTA)发觉，关键问题是传爆序列装配时轴向间隙超出标准(设计要求为 $0.02\text{-}0.05\text{mm}$ ，实际偏差达到了 0.1mm)，后续采用定位

精度在 $\pm 0.005\text{mm}$ 的自动化压装设备，还引入在线激光测隙系统，实现将间隙波动控制在 0.03mm 以内的目标，可靠性提升至 99.8% 。国内特定型号迫击炮弹引信在高温环境试验时频繁早爆，实施 HAZOP 分析后，查明是雷管药剂包覆工艺中涂覆厚度不一致(标准 $5\text{-}8\mu\text{m}$ ，实际某些局部仅为 $2\mu\text{m}$)，造成高温环境下药剂吸潮敏感度急剧上升。改进后采用静电喷涂工艺，还添加上恒温恒湿固化环节，高温安全性试验通过率从 72% 增长到了 100% 。某军工企业针对引信电子模块焊点虚连问题，采用 DOE 实验优化焊接工艺参数，时间从 0.8s 延长至 1.2s)，结合超声探伤测定，促使焊点失效概率从 3.2% 降低为 0.5% 。(如表 1 所示。)

表 1 案例分析评估表

案例	问题根源	改进工艺措施	效果指标
标枪导弹引信	传爆序列轴向间隙超差	自动化压装 + 激光测隙	可靠性从 $88\% \rightarrow 99.8\%$
迫击炮弹引信	药剂包覆厚度不均	静电喷涂 + 恒温固化	高温安全性从 $72\% \rightarrow 100\%$
电子模块焊点	焊接参数不合理	优化电流/时间 + 超声检测	失效概率 $3.2\% \rightarrow 0.5\%$

7 结语

综上所述，引信工艺设计中的可靠性与安全性分析，对于提高作战效率、保障作战安全具有重要意义。通过对制造过程中各种关键技术要素的系统研究，建立相应的计算模型与优化方案，并以实例加以检验，能够为引信设计工作提供科学依据与实践指导。今后，随着科技水平的不断提高，引信的可靠性和安全性也会得到进一步提高，为国防现代化建设提供更加坚实的保障。

参考文献

- [1] 汪柯,郑监,施长军,郭莎,任新联,胡宏伟.全电子引信抗过载研究现状[J].探测与控制学报,2025,47(01):15-23.
- [2] 徐利平,王大鹏,许嘉晨,文帅.伪码引信高速实时可配置宽带正交解调方法[J].探测与控制学报,2024,46(04):13-18.
- [3] 赵平伟,刘树洁,郑晨皓,李艳萍,李楠.基于数字射频存储平台的调频毫米波引信自动测试系统[J].探测与控制学报,2024,46(04):178-183.