

保险机构隔爆性能的工艺预测研究

孔晓刚, 金飞, 隋军, 白刚, 原勇

(内蒙动力机械研究所, 内蒙古呼和浩特 010010)

摘要 本文对自紧式保险机构隔爆机理和工艺试验数据进行分析, 简明介绍了保险机构在装配过程中隔爆性能的工艺控制方法, 分析了保险机构隔爆性能相关影响因素的函数关系式, 明确了装配过程中的工艺控制参数, 并量化了检测要求, 通过隔爆试验数据的比较, 确定了保险机构的隔爆特征量和关系式, 旨在为实现保险机构隔爆性能的工艺预测提供借鉴。

关键词 保险机构; 隔爆性能工艺预测; 自紧式密封结构

中图分类号: TH16

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.002

0 引言

自紧式保险机构在生产中重复出现了隔爆失效的质量问题, 说明保险机构在装配工艺上存在不确定因素, 产品总装完成后无法保证其隔爆可靠性。如何在保险机构装配过程中有效地控制相关工艺参数, 通过确定一个隔爆特征量来提前预测产品装配后的隔爆性能, 成为保险机构隔爆失效的工艺攻关目标。基于此, 通过对保险机构的装配工艺研究与工艺试验考核, 确定隔爆特征量, 可以准确地判定保险机构的隔爆性能。

1 保险机构隔爆机理分析

1.1 自紧式密封结构及其作用机理

保险机构的隔爆原理基于自紧式密封结构, 在发生爆炸性气体泄漏时, 柱塞组件受火药燃烧瞬间形成的高压冲击力作用, 产生轴向运动, 使密封圈被进一步压紧, 实现自紧密封功能^[1]。自紧式密封结构是保险机构实现隔爆功能的核心, 其密封效果依赖于柱塞、密封圈及下体组件的精确配合, 密封圈在装配过程中需预压缩形成初始密封, 并在柱塞受压向下移动时进一步压紧, 最终形成自紧密封。但是受装配误差、零件公差以及柱塞偏移的影响, 密封圈一侧的压缩量可能不足, 导致密封失效。

1.2 影响隔爆性能的关键因素

隔爆性能的稳定性受到多个工艺参数的综合影响, 其中密封圈的截面直径 R 、柱塞下移量 S_1 、下体锥度 θ 以及柱塞组件的配合公差是影响隔爆效果的关键参数。函数关系分析表明, 柱塞下移量 S_1 直接决定了密封圈的压缩量, 而下体锥度 θ 影响柱塞的受力状态, 导致

柱塞在隔爆瞬间的偏移量 d_1 不同, 进一步影响密封效果。试验数据表明, 密封圈的初始压缩量 δ_1 必须满足最小阈值 0.4 mm , 以保障在隔爆条件下维持可靠的密封状态。工艺控制中应该借助优化柱塞的装配精度, 调整密封圈预压缩量以及精确匹配柱塞与下体锥面的几何关系, 保证隔爆特征量 ΔP 始终满足隔爆要求, 避免因参数偏差导致的泄漏失效。

2 保险机构隔爆失效机理与影响因素

2.1 保险机构隔爆失效的常见模式分析

保险机构的隔爆失效主要表现为密封失效和柱塞组件运动异常。密封失效的主要原因是密封圈的压缩量不足, 导致火压形成时密封圈无法提供足够的自紧力, 进一步造成泄漏。试验结果表明当密封圈的初始压缩量 δ_1 小于 0.04 mm 时, 隔爆效果不稳定, 泄漏概率大幅增加。柱塞组件运动异常也是影响隔爆性能的重要因素, 在火压冲击力作用下, 柱塞未能按照预定轨迹运动, 而是发生偏移或卡滞且导致密封面接触不均, 进一步造成局部泄漏。

2.2 柱塞组件偏移导致的泄漏失效机理

柱塞组件的偏移是导致隔爆失效的主要原因之一, 其根本机理在于装配公差的不匹配和柱塞组件的受力不均, 隔爆过程中火药燃烧产生的瞬时高压使柱塞组件沿轴向运动, 但由于制造和装配公差的影响, 柱塞可能产生径向偏移 d_1 , 导致密封圈的受力不均匀, 进一步形成泄漏通道。所以, 在工艺设计中, 必须严格控制柱塞组件的轴向下移量 S_1 及其公差范围, 以减少偏移对隔爆性能的影响。

2.3 影响隔爆性能的核心工艺参数

隔爆性能受多个关键工艺参数的影响，其中最重要的参数包括柱塞下移量 S_1 、密封圈初始压缩量 δ_1 、下体锥度 θ 及密封圈直径 R 。如图 1 所示，借助对多个批次的保险机构进行隔爆测试，发现密封圈直径、柱塞下移量及装配公差微小变化都会影响隔爆效果^[2]。当柱塞下移量 S_1 超出规定范围时，密封圈的压缩量不均匀，导致局部泄漏概率增加，下体锥度 θ 直接影响柱塞组件的运动轨迹，不同锥度角度会导致柱塞的受力方向发生变化，进一步影响密封圈的受力状态，依靠精确控制上述关键参数，并优化装配精度，可以有效提高保险机构的隔爆合格率并提升其安全性能。

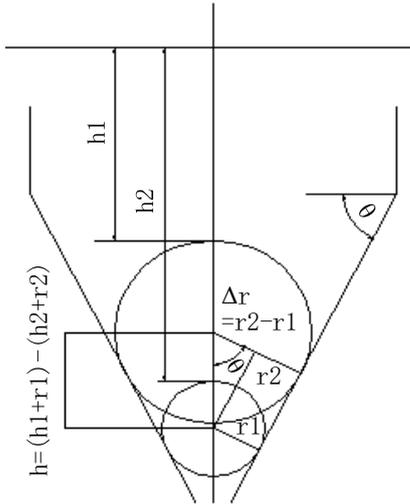


图 1 下体锥度与柱塞运动轨迹示意图

3 保险机构隔爆性能工艺控制方法

3.1 装配过程中的工艺控制策略

保险机构的隔爆性能受装配精度的直接影响，所以必须制定严格的装配工艺控制策略，以保证隔爆状态的稳定性。装配过程中柱塞组件与密封圈的配合精度决定了密封可靠性，特别是柱塞下移量 S_1 和密封圈初始压缩量 δ_1 必须在控制范围内。工艺试验表明密封圈压缩量过小会导致隔爆失效，而过大会影响装配可行性且导致装配应力增加，所以在工艺实施中采用高精度测量仪器，如百分表与深度尺，实时监测柱塞的下移量和密封圈的压缩量，保证其满足设计要求。装配过程中应采用高精度的定位装置，减少组件的装配偏差，避免因柱塞偏移导致的局部泄漏。

3.2 隔爆特征量的定义与量化标准

隔爆特征量是评价保险机构隔爆性能的重要参数，其主要指标包括隔爆压力变化量 ΔP 、柱塞下移量 S_1 以

及密封圈初始压缩量 δ_1 。工艺试验表明，当 $\Delta P > 0.16$ 且 $\delta_1 > 0.04$ 时，隔爆成功率达到 100%， ΔP 反映了柱塞组件在隔爆状态下的相对运动， δ_1 直接影响密封效果，而 S_1 决定了密封圈的最终压缩状态^[3]。基于大量实验数据，对隔爆特征量的测量标准进行了明确规定：密封圈压缩量需采用精密测量设备进行双重测量，保证误差在可接受范围内，柱塞的移动量需采用高精度测量平台进行监测，保障 Δh 与 S_1 的关系符合设计要求，如图 2 所示。

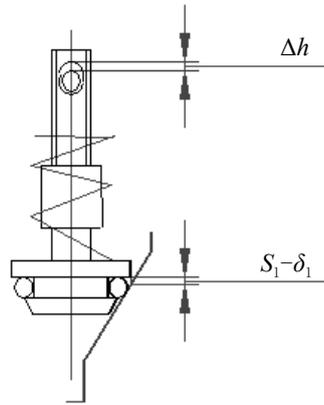


图 2 隔爆特征量测量示意图

3.3 保险机构装配工艺参数优化

装配工艺优化的核心在于减少工艺参数的波动，保障每个关键参数在标准范围内，通过对多个批次试验数据的分析，优化了密封圈截面直径 R 、柱塞尺寸 D_1 和下体锥度 θ 的公差范围，以减少装配偏差对隔爆性能的影响^[4]。试验表明，采用高精度 CNC 加工提高组件匹配精度后，柱塞组件的偏移量 d_1 减小，密封圈的压缩量均匀分布，提高了密封效果。在装配过程中采用动态调整方法，根据柱塞的实际下移量 S_1 进行微调，使隔爆特征量 ΔP 保持在最佳范围内，最终优化后的装配工艺保证了隔爆合格率达到 100%，证明了工艺优化的有效性。

4 保险机构隔爆特征量的测定与验证

4.1 隔爆特征量的数学建模与函数关系式建立

隔爆特征量是衡量保险机构隔爆性能的重要参数，其数学建模主要基于柱塞组件的下移量 S_1 、密封圈的初始压缩量 δ_1 以及柱塞预压力 Δh ，通过大量试验数据分析，建立了隔爆特征量与关键工艺参数之间的数学关系，如下所示：

$$\Delta P = \Delta h \cdot (S_1 \cdot S_1)$$

其中， ΔP 代表隔爆特征量， Δh 为柱塞预压力，

S_1 为柱塞下移量, S_r 为参考值。实验结果表明, 当 ΔP 的数值较小时, 隔爆成功率较高, 反之则存在隔爆失效风险。

此外, 柱塞组件的装配公差、密封圈的尺寸偏差均会影响隔爆特征量的数值, 因此在数学建模过程中, 需要综合考虑各个工艺变量的影响。

4.2 工艺试验数据分析与隔爆阈值确定

工艺试验中对多个批次保险机构的隔爆特征量进行数据分析, 发现当密封圈的初始压缩量且 $\delta_1 > 0.04$ 隔爆特征量 $\Delta P > 0.16$ 时, 保险机构的隔爆性能稳定。为了验证该阈值的可靠性, 对不同规格的保险机构进行了测试。

结果表明, 当 δ_1 小于该值时, 密封圈的压缩量不足, 导致密封失效; 当 ΔP 小于 0.16 时, 柱塞组件的运动存在异常, 无法保证密封效果。具体试验数据如表 1 所示, 该数据用于优化工艺控制标准, 并作为隔爆性能的判定依据。

表 1 隔爆特征量的试验数据统计

试验编号	柱塞预压 Δh (mm)	柱塞下移量 S_1 (mm)	密封圈初始压缩量 δ_1 (mm)	隔爆特征量 ΔP	试验结果
1	0.85	0.61	0.05	0.24	通过
2	0.77	0.6	0.04	0.18	通过
3	0.58	0.53	0.03	0.12	失败
4	0.5	0.5	0.02	0.08	失败

从试验数据可以看出, 当 ΔP 低于 0.16 时, 隔爆失效概率明显增加, 所以在装配过程中, 需要保障柱塞的预压量和密封圈的压缩量满足既定标准, 以保证隔爆性能的稳定性^[5]。

4.3 保险机构隔爆试验方法与合格率评估

为了进一步验证隔爆特征量的工艺控制效果, 进行了多批次保险机构的隔爆试验考核, 试验过程中采用标准化试验装置进行模拟火压环境测试, 并实时记录柱塞组件的运动轨迹及密封状态^[6]。试验结果表明, 借助优化装配工艺, 提高柱塞组件的装配精度, 并严格控制密封圈的初始压缩量, 可以有效提高隔爆合格率, 具体的试验数据如表 2 所示。

表 2 的试验数据表明, 在采用优化后的装配工艺后, 保险机构的隔爆合格率提高至 90% 以上, 符合工程应用需求。

进一步的试验结果显示, 当柱塞的预压量和下移量严格控制在指定范围内, 隔爆合格率可达 100%。这表明借助精确控制隔爆特征量, 可以有效提升保险机构的隔爆性能, 为批量生产提供可靠的工艺判定方法。

表 2 保险机构隔爆合格率统计

试验批次	试验数量 (台)	隔爆合格数量 (台)	隔爆不合格数量 (台)	隔爆合格率 (%)
A	8	8	0	100
B	10	9	1	90
C	12	11	1	91.7

5 结束语

通过对保险机构隔爆性能的工艺预测方法进行深入分析, 确定了影响隔爆性能的关键工艺参数, 并建立了数学模型与量化标准。研究表明, 密封圈的初始压缩量 δ_1 和隔爆特征量 ΔP 具有明确的临界值, 保险机构的隔爆性能稳定, 隔爆成功率可达到 100%。未来研究可进一步优化试验方法, 结合数字化检测技术并研究不同工作环境对隔爆性能的影响, 以提升保险机构在复杂环境下的适应性和安全性。

参考文献:

- [1] 武伟, 陈芷怡, 吕志超, 等. 基于 Modelica 的安全保险机构驱动装置系统仿真研究 [J/OL]. 弹箭与制导学报, 1-9 [2025-01-23]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=H9kNOCd8VPhzhQVeJxX5F3QOwOMI0jVBeXUCr-RWOHb1uh-4ACbc2oe2ROXKX_4VWTfHLqsRC1o6C4F1BtIHtK0dWE2xYqBZ8Uf3QkDInOXcJ-Md6LYeY9vtRktm8E-Yxzv8e262hYpOwMoS0br0rPtpRDObs4oYwKpiGMadFUfh769DGB1Pzw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [2] 阙文星, 冯恒振, 姜文忠, 等. 飞片式引信微爆炸序列传爆 / 隔爆性能仿真 [J]. 兵工学报, 2024, 45(S1): 10-19.
- [3] 葛兴飞, 严思梁. 矿用隔爆电机焊接螺栓材料性能及加工工艺研究 [J]. 煤矿机械, 2022, 43(10): 105-109.
- [4] 解瑞珍, 褚恩义, 戴旭涵, 等. 微起爆序列设计及传爆与隔爆性能 [J]. 兵工学报, 2021, 42(06): 1178-1184.
- [5] 于佳鑫, 李伟兵, 李军宝, 等. 多层隔爆结构对威力可控战斗部能量输出的影响 [J]. 兵工学报, 2024, 45(S1): 33-42.
- [6] 阙文星, 冯恒振, 姜文忠, 等. 飞片式引信微爆炸序列传爆 / 隔爆性能仿真 [J]. 兵工学报, 2024, 45(S1): 10-19.