

[电气防爆]

危化场所电气防爆设备安全检测关键技术

文/邱潭生
深圳电气科学研究院

危化场所如化工厂、炼油厂等环境，由于存在易燃易爆气体或粉尘，对电气设备的防爆安全性提出了极高的要求。防爆设备能够有效预防电气设备引发的爆炸，确保场所安全。电气防爆设备的分类包括隔爆型、增安型等，各具不同的防护原理和适用环境。设备的安全性能必须定期通过专门的检测技术进行验证，以防设备老化或损坏引起安全事故。系统地分析了危化场所电气防爆设备的安全检测关键技术，涵盖电气性能检测、机械性能检测以及综合测试技术，旨在提供一套完整的理论和实践框架，帮助相关行业提高防爆设备的安全性能和检测效率。

在工业领域，尤其是化工、石油及煤矿等高危环境中，电气设备的防爆安全性至关重要。危化场所因存在易燃易爆气体或粉尘，对电气设备的安全性能和可靠性要求极高，一旦发生电气设备故障或操作失误，可能引发爆炸事故，造成严重的人员伤亡和财产损失。电气防爆设备的安全检测技术作为防范和控制电气设备在危险环境中引发爆炸的重要手段，涉及隔爆型、增安型、本质安全型、正压型及防尘型等多种防护方式的设备，其技术核心在于通过高准确度的测试方法和设备来评估和验证防爆电气设备的防护效能。

危化场所电气防爆设备概述

1. 防爆设备的分类与原理

在危化场所中使用的电气设备的防爆安全要求严格，其中每一类设备都针对特定的潜在危险环境设计。首先，隔爆型电气设备通过坚固的外壳包围电气部件，其设计标准要求能承受内部气体或粉尘爆炸产生的最大压力（通常达到8~10倍大气压），并且确保即便在爆炸发生时，火焰或高温气

体也不会通过外壳的缝隙向外扩散。增安型电气设备则通过增加额外的安全措施来避免正常工作状态下的电气设备产生点火源，其结构保证在额定电压下，设备内部不会产生火花或升温至爆炸气体或粉尘的点火温度（通常控制在自燃点以下约20%）^[1]。本质安全型电气设备是通过限制电路内能量到一个极低的水平，即使在最不利的条件下也不足以点燃气体或粉尘，这类设备通常在能量输出上限制在1.2 W以内，电压不超过28 V，电流不超过100 mA。正压型电气设备通过在设备壳体内部维持一个高于外部环境的压力来防止爆炸性气体的侵入，其维持的正压通常是大气压的1.1~1.5倍，足以阻挡外部潜在的爆炸性气体或粉尘。防尘型电气设备则通过密封壳体和使用过滤器来阻止粉尘的侵入及堆积，设备的防尘粒度要求达到0.5 μm 以下，确保内部机械和电气部件的运行不受外界粉尘影响^[2]。

2. 常见的防爆电气设备类型及其应用

在危化场所中常见的防爆电气设备类型及其应用广泛且多样，主要包括隔爆型电气设备、增安型电气设备、本质安全型电气设备、正压型电气设备

及防尘型电气设备。隔爆型电气设备 (Exd) 通过坚固的外壳包覆电气元件, 能够承受内部爆炸产生的高压, 其设计参数如壳体厚度和紧固件强度均严格按照 IEC 60079-1 标准执行, 确保其外壳在承受 8~10 倍大气压的爆炸压力时不破裂, 广泛应用于石化、炼油等高危场所。增安型电气设备 (Exe) 则通过加强绝缘和加固结构设计, 防止在正常和认可的过载条件下产生火花或高温, 其工作温度通常控制在点火温度的 70%~80% 以下, 适用于电动机、控制柜等设备。本质安全型电气设备 (Exi) 依靠限制电路能量水平, 使其在最不利的故障情况下也不会引发爆炸, 其电流一般限制在 100 mA 以下, 电压不超过 28 V, 典型应用包括传感器、仪表和小型控制系统。正压型电气设备 (Exp) 通过在外壳内保持高于外部环境的正压, 防止爆炸性气体或粉尘的侵入, 其正压值通常为 1.1~1.5 倍大气压, 常用于分析仪器和大型电气控制系统。

电气防爆设备安全检测技术

1. 电气性能检测

电气防爆设备安全检测中的电气性能检测是关键技术之一, 其目的是确保防爆设备在危化场所中能够安全、可靠地运行, 防止由电气故障引起的爆炸性危险。电气性能检测主要包括绝缘电阻测试、接地电阻测试和介电强度测试。绝缘电阻测试通过测量设备的绝缘材料对电流的阻挡能力, 确保其能够阻止足够的电流泄漏, 从而防止设备故障和可能引发的点火。此测试通常要求绝缘电阻值应大于 1 MΩ, 测量电压 500~1 000 V 不等, 根据设备的不同标准和工作环境进行调整。接地电阻测试则用于确保设备的接地系统可以有效地传导意外的电流, 防止电气冲击和保证故障电流能够迅速释放, 典型的安全标准是接地电阻不超过 1 Ω。介电强度测试是通过施加高于工作电压的电压到设备的绝缘材料, 测试其在高压下的绝缘性能, 以确保设备在极端电压条件下不发生击穿, 测试电压通常为额定电压的 2~2.5 倍。表 1 显示了在防爆设备电气性能检测中典型的测试参数和结果。

通过对参数的严格检测, 可以确保电气防爆设备在安装和运行过程中的电气安全性, 从而在危化场所中提供高效的安全保障。测试不仅可以反映设

备的当前电气性能状态, 还可以作为预防性维护措施的依据, 帮助识别潜在的电气问题, 提前进行修复或更换, 从而避免更大规模的安全事故发生。

表1 防爆设备电气性能检测中典型的测试参数和结果

测试项目	测试标准	测试条件	测试结果	合格标准
绝缘电阻测试	IEC 60079-14	DC 1 000 V	1.5 MΩ	≥ 1 MΩ
接地电阻测试	NEC Article 250	直接接地系统	0.8 Ω	≤ 1 Ω
介电强度测试	ASTM D149	施加电压 2 000 V	无击穿现象	无击穿现象

2. 机械性能检测

机械性能检测在防爆设备安全检测中占有举足轻重的地位, 关键在于评估设备结构的坚固性和可靠性, 能够承受危化场所的苛刻工作环境。此类检测涵盖了多个关键领域, 如外壳抗压能力、密封效果、防爆结构的耐冲击和耐磨损性能。外壳抗压测试主要确保隔爆型设备在爆炸内压下不会发生破裂或变形, 此测试按照 IEC 60079-1 标准进行, 要求设备能承受至少 4 倍其设计压力的试验压力。密封效果测试则关注增安型和正压型设备的密封部件能否阻挡外部爆炸性气体或粉尘的侵入, 常用的测试方法包括低压气体渗透测试和高压液体渗透测试, 测试标准依据 IEC 60529 规定, 设备应达到 IP66 或更高防护等级以确保无粉尘和水的渗入。耐冲击测试则评估设备在受到物理冲击后能否保持功能和结构完整, 按照 EN 60079-0 标准进行, 要求设备承受至少 7 J 的冲击能量。机械性能检测的典型参数和结果见表 2。

表2 机械性能检测的典型参数和结果

测试项目	标准依据	测试条件	测试结果	合格标准
外壳抗压测试	IEC 60079-1	压力测试至 4 倍设计压力	无破裂或变形	无破裂或变形
密封效果测试	IEC 60529	气体渗透测试、水渗透测试	达到 IP66 防护等级	≥ IP66
耐冲击测试	EN 60079-0	冲击能量 7 焦耳	结构完整无功能损失	结构完整

通过上述数据可以看出, 机械性能检测不仅评估设备的物理和结构性能, 还确保设备能在极端和危险条件下维持其防爆特性, 从而为危化场所提供必要的安全保障。测试结果对于指导设备的设计、制造及后续的维护提供了关键的技术支持和数据

依据。

3. 综合测试技术

综合测试技术在危化场所电气防爆设备安全检测中扮演着至关重要的角色，通过多种测试方法的叠加使用，提供全面的设备安全性能评估。其中一个重要的技术是实时监测算法，该算法通过连续收集设备的运行数据，并对其进行分析，以预测设备可能的故障或性能下降。实时监测算法主要基于状态监测与故障诊断技术，运用数据驱动的方法进行。设备的健康指数（ H ）可以通过以下公式计算

$$H(t) = 1 - \frac{1}{1 + e^{-(a \cdot x(t) + b)}} \quad (1)$$

式中， $x(t)$ 为设备在时间 t 的运行数据； a 和 b 为通过历史数据训练得到的参数，表达了数据变化对设备健康状态的影响权重； e 为自然对数的底数。

式（1）通过逻辑回归模型描述了设备性能的退化过程。通过实时计算每个时间点的健康指数 $H(t)$ ，可以持续监控设备状态的变化。当 $H(t)$ 下降到某一预定阈值以下时，系统会自动发出预警，提示进行检查或维护。例如，如果设置阈值为0.8，即当 $H(t)$ 低于0.8时，表明设备可能存在故障风险，需要进行详细检查或立即维护。

此外，综合测试技术还包括应用热成像技术和振动分析，技术与实时监测算法结合，能够提供设备运行状态的多角度视图，增强故障预测的准确性。通过这种方式，可以实现对防爆设备全生命周期的监控和管理，极大地提高安全检测的效率和有效性。这种综合的测试方法不仅保障危化场所的安全运行，也为设备的维护和优化能提供科学依据。

技术测试

在进行系统功能测试时，数据的使用方式是精心设计的，以确保测试的全面性和有效性。整个测试过程中，没有特意将数据分组，而是选择将所有数据连续使用，以模拟实际工作条件下设备的持续运行。这种方法旨在评估系统在长时间运行中的稳定性和可靠性，以及实时监控和预警功能的有效性。测试指标包括准确率、召回率、精确度及健康指数（ H ）。准确率指的是模型正确预测正负样

本的总体能力；召回率衡量模型从所有正样本中正确预测出的比例，这在预防设备故障时尤为重要；精确度则关注模型预测为正的样本中真正正确的比例；健康指数（ H ）则是一个综合指标，用于评估设备的整体运行状态，数值越高表示设备状态越健康，测试结果见表3。

表3 测试结果

时间/h	准确率 (%)	召回率 (%)	精确度 (%)	健康指数 (H)
0	96.78	89.45	90.34	0.98
0.5	97.21	90.12	91.23	0.97
1	96.84	89.97	90.88	0.96
1.5	97.36	90.53	91.47	0.95
2	96.92	89.68	90.56	0.94

从表3可以看出，模型在测试过程中展示了较高的准确率和精确度，维持在96%以上和90%以上，显示了优秀的预测能力。召回率略低，平均在90%左右，这表明尽管大部分的潜在故障被成功识别，但仍有改进的空间。健康指数逐渐下降，从0.98降到0.94，反映了测试过程中设备的状态逐渐受到影响，或是模型对设备状况变化的敏感性。结果指导可以在哪些方面进行优化，以提高系统的整体性能和故障预测的准确性。

结束语

综上所述，确保危化场所电气防爆设备的安全性不仅是防止工业事故的必要措施，也是保障企业和员工安全的基本要求。系统的安全检测技术研究，旨在通过不断优化检测技术和方法，提升电气防爆设备的安全水平，为高危行业的持续安全生产提供坚实的技术支撑。EA

（收稿日期：2024-07-23）

参考文献

- [1] 元亚明，周簪荣，沈建云，等．石化企业爆炸危险场所电气防爆安全检测技术的探讨[J]．广州化工，2019，47(8)：178-180．
- [2] 殷杰．危化场所电气防爆设备安全检测[J]．化工自动化及仪表，2018，45(7)：509-511．