

# 细水雾对电气柜内部电气元件绝缘性能的影响

赵家豪

中国人民警察大学 河北 廊坊 065000

**摘要:**为探索细水雾扑灭电气控制柜内部火灾中电气元件功能失效问题,研究进行全尺寸模拟实验,以电气元件绝缘性为研究焦点,分析不同工况下细水雾灭火的效果,着重考察工作压力、流量系数和安装位置对电气柜内部电器元件的影响。实验发现,在工作压力为5MPa时电气元件受影响最小,而1MPa会导致安全性风险;流量系数越大,电气元件的绝缘电阻下降越快,可能导致电气元件低于 $0.5M\Omega$ 的危险;最终分析确定了工作压力为5MPa、流量系数为0.3的顶装细水雾灭火设置为最优方案。因此,在细水雾扑灭电气控制柜内部火灾中,选择适宜的工作压力和流量系数对保障电气元件的安全性至关重要,顶装细水雾灭火方案在此背景下表现出最佳效果。

**关键词:**细水雾;电气控制柜;绝缘电阻;电气元件

## 引言

近年来随着电气控制柜数量的增多,其火灾时有发生,火灾造成较为严重的电控柜设备烧损和巨大财产损失。2023年3月6日17时44分,博罗县湖镇镇上前村的博罗县联纺服装辅料厂发生火灾<sup>[1]</sup>。据消防部门初步调查,火灾由车间配电柜导致电气线路故障引起。配电柜火灾初期灭火存在一定困难,打开配电柜进行灭火的瞬间会导致大量空气进入配电柜参与燃烧,导致内部器件损坏更加严重,燃烧产生的大量有毒及腐蚀性烟气快速扩散到整个房间,对房间内其他未发生燃烧的仪器、设备造成次生危害,造成经济财产损失,严重的将危及人身安全。可见在电气柜火灾初期不损坏内部电气元件进行灭火非常关键,对内部电气元件的绝缘电阻研究十分必要。目前常用的灭火技术在受限空间内存在明显的缺点,如:七氟丙烷(FM200)对臭氧层有强烈的破坏作用;全氟己酮造价成本高;低压二氧化碳灭火效率低、浓度高时有毒;IG541高压系统较为庞大。高压细水雾灭火系统具有耗水量低、破坏性小、冷却效果好、无污染且具有电气绝缘性等优点。

细水雾发展到至今,可应用于包括电气类的各类火灾,对防治电气控制柜等受限空间火灾具有一定的应用前景。陈宝辉等<sup>[2]</sup>验证了细水雾绝缘能力良好,具有保护电气元件的带电绝缘能力;天津消防研究所使用细水雾对笔记本电脑、网络集线器、低压配电柜进行带电绝缘性研究,结果表明无论低压配电柜门是否开启都不会影响配电柜的正常工作,笔记本电脑在喷放35s时出现黑屏,无线连接标识在210s出现变暗、不工作等现象,但将它们晾干处理后都可回复正常<sup>[3]</sup>;Mawhinney等<sup>[4]</sup>进行细

水雾扑教程控交换机房火灾的试验,将细水雾喷头固定在交换机的顶部,结果表明,细水雾可以有效地扑救交换机火灾,且对交换机内部的电路模块起到保护作用,交换机设备可正常工作;杨立军等<sup>[5]</sup>研究不同喷射压力下细水雾扑灭油盘火的效果,得到不同喷射压力细水雾灭火的影响规律;王明武等<sup>[6]</sup>通过将细水雾作用在纸板上探究不同细水雾工作压力对电气设备绝缘安全性影响进行分析,发现绝缘电阻先下降后上升。通过前人研究可以看出,目前在细水雾抑制火灾的实验中,虽然能够有效抑制火势,但关于电器元件损坏的研究较少。在电气绝缘性研究中,国内外研究了细水雾对变压器、计算机、程控交换机房等电气类火灾的电气绝缘性,结果显示电气都没有发生短路、跳闸等现象,表明细水雾具有良好的电气绝缘性。但是,这些研究只停留在细水雾扑救电子设备的定性分析上,关于细水雾条件下电器元件绝缘程度的定量研究较少。

因此,本文针对电气控制柜内继电器、接触器和断路器3种电气原件的细水雾灭火技术的电绝缘性进行定量研究,为细水雾在电气柜灭火中的安全应用提供科学支持。

## 1 实验装置与实验方案

### 1.1 实验装置

模拟电气柜封闭空间试验台为 $0.68m$ (长) $\times$  $0.68m$ (长) $\times$  $1.8m$ (高)的受限空间。电气原件(实验中选取中间继电器、小型断路器和交流接触器)固定悬于电气控制柜中间,喷头选择2种安装方式,一种位于顶部,在距离电气原件 $100cm$ 的正上方;另一种位于侧壁,距离顶端 $30cm$ ,其内部布置示意图,如图1所示。

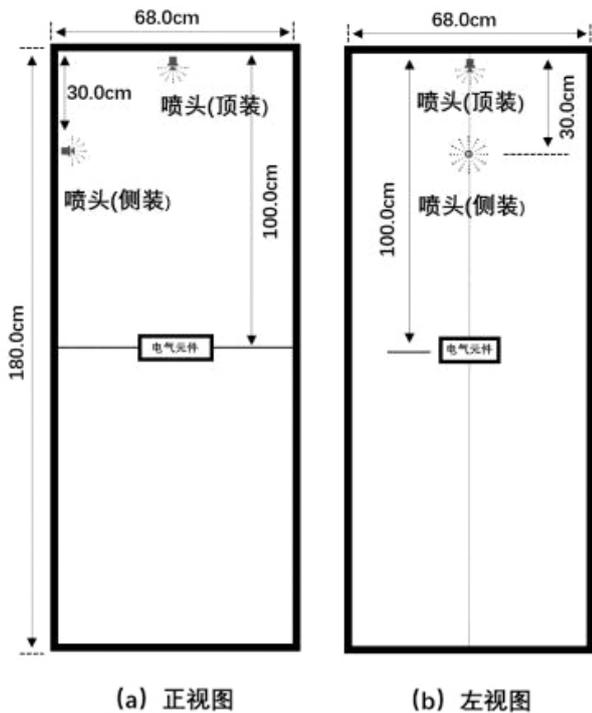


图1 电气控制柜内部布置示意图

1.2 实验方法

依据细水雾灭火系统技术规范GB50898-2013<sup>[7]</sup>, 在当喷头高度小于5m且采用全淹没应用方式的电缆场景中, 要求细水雾的喷雾强度不应低于2L/min·m<sup>2</sup>。喷雾强度W的计算公式如下:

$$W = (Nq) / S \tag{3.1}$$

$$q = K\sqrt{10P}$$

式中, W为喷雾强度, L/min·m<sup>2</sup>; N为细水雾喷头数量; q为喷头流量, L/min; S为保护面积, m<sup>2</sup>; K为喷头流量系数; P为喷头工作压力, MPa。本实验中喷头数量为1个, 保护面积为0.4624m<sup>2</sup>, 且实验使用细水雾喷头流量系数最小为0.3, 故通过公式(3.1)计算确定细水雾工作压力应大于0.95MPa。因此, 实验设置实验工况如表1所示。

表1 绝缘性能实验工况列表

工况	测试种类	安装位置	流量系数	工作压力/MPa
11	中间继电器	顶装	0.3	1
12				3
13				5
14				7
15				9
16			1.0	5
17			2.0	5
18			0.3	5
19			侧装	0.3

续表:

工况	测试种类	安装位置	流量系数	工作压力/MPa
M1	小型断路器	顶装	0.3	1
M2				3
M3				5
M4				7
M5				9
M6			1.0	5
M7			2.0	5
M8			0.3	5
M9			侧装	0.3
A1	交流接触器	顶装	0.3	1
A2				3
A3				5
A4				7
A5				9
A6			1.0	5
A7			2.0	5
A8			0.3	5
A9			侧装	0.3

为了形成特殊封闭环境, 整个试验过程须在防火玻璃关闭状态下进行, 以保证细水雾喷放的稳态性。本次实验的主要目的是研究细水雾条件下电气柜内部典型电气元绝缘电阻的变化规律, 因为环境温度和湿度均会影响绝缘电阻阻值的测量, 故本实验在室内进行, 且实验环境温度为15°C, 实验过程操作按如下步骤进行:

- 1) 绝缘电阻测试仪的接线端子分别连接电气元件的外壳和金属端, 开启放电。
- 2) 当绝缘电阻测试仪所测试绝缘电阻达到10<sup>13</sup>Ω时, 进行数据记录。维持绝缘电阻稳定在一个范围内上下波动并保持10s后, 开启细水雾发生装置, 持续喷放细水雾5min后, 关闭细水雾, 并继续监测2min绝缘电阻变化情况。
- 3) 结束放电, 保存、记录实验数据。打开模拟电气控制柜门, 开启风机, 待柜内水雾吹散, 内部湿度与外界环境一致时, 开始下一组实验。

2 实验结果与分析

2.1 绝缘失效判断规则

绝缘电阻是判断电气柜内部电气元件是否失效的一个重要参数。《电气设备绝缘电阻测试技术标准》Q/XCZJSBZ01-2013<sup>[8]</sup>规定, 对于正在通电运行工作中的电气柜, 其内部断路器和接触器等电气元件的绝缘电阻不能小于0.5MΩ, 低于此阈值电气柜内部电气元件则存在可能漏电或击穿的风险, 从而导致电气柜内部产生更多不必要的损失。

### 2.2 数据预处理

测量到的绝缘电阻数据，发现其均是以数量级进行变化，所以先对所有数据进行指数处理，即：

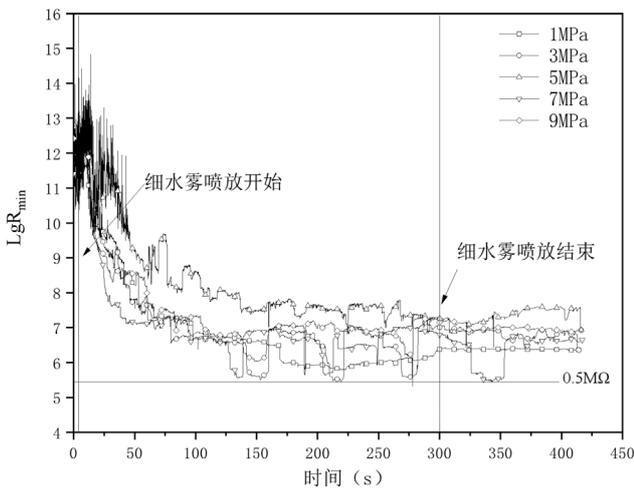
$$N = \log_{10} R$$

式中， $N$ 为绝缘电阻的以10为底的对数； $R$ 为绝缘电阻测量仪测试的电阻， $\Omega$ 。

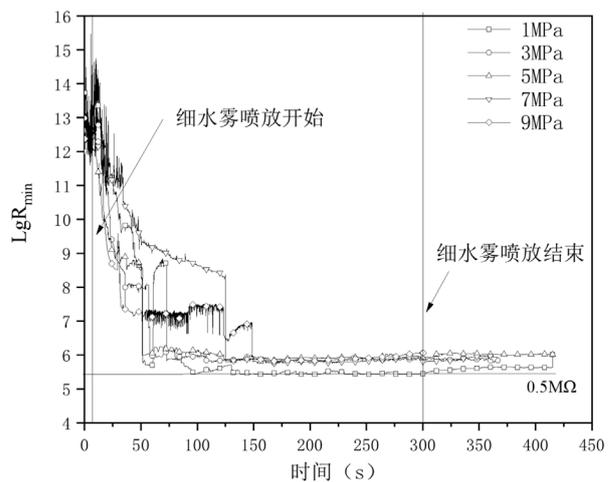
### 2.3 工作压力影响

图3为不同流量系数对中间继电器的绝缘电阻变化曲线和最小绝缘电阻值。从总体来看，不同工作压力下，绝缘电阻下降程度不一样，随着细水雾的持续喷放，绝缘电阻下降程度呈现逐渐缓慢趋势。由于细水雾逐渐接触到电气元件外壳表面，使得绝缘电阻迅速下降。当细水雾喷放140s时，电气元件的绝缘电阻趋于在一定范围内上下波动，且绝缘电阻都能够在0.5M $\Omega$ 以上。从图2中可以看出，(a)、(b)、(c)不同工作压力下的细水

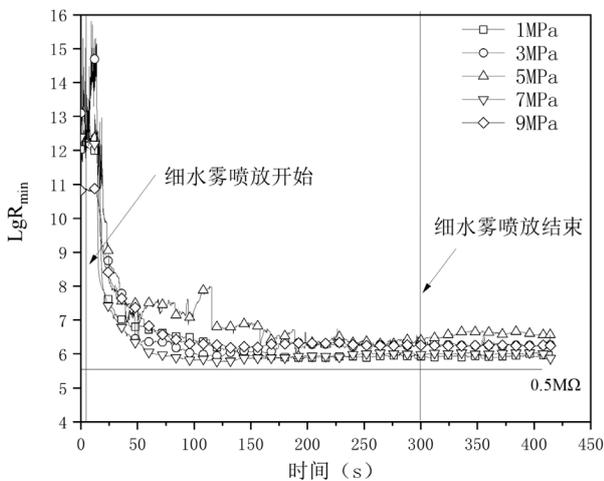
雾所造成电气元件的绝缘电阻不同，而5MPa的细水雾的绝缘电阻最高，其次为9MPa工作压力的细水雾导致下降电气元件绝缘电阻程度小。出现这种现象的主要原因为细水雾的工作压力越大，越易产生粒径较小的雾滴，雾滴滞空时间长，作用在电气元件上的细水雾越少，电气元件受影响程度越小，绝缘电阻越大。虽然随着工作压力增大，细水雾粒径会减少，但压力增大会使细水雾流量增多，雾通量增加，单位时间内细水雾沉降量增多，导致细水雾工作压力继续增大导致绝缘电阻小。因此，在此实验环境下，存在一个工作压力使得电气元件影响程度最小。从图2看出，除了继电器之外，其余电气元件随工作压力的增大，最小绝缘电阻值呈现出逐渐上升趋势，主要原因为细水雾工作压力越大，其细水雾雾滴粒径越小，使雾滴滞空性强，不易在快速落在电气元件外壳，使最小绝缘电阻值呈现上升趋势。



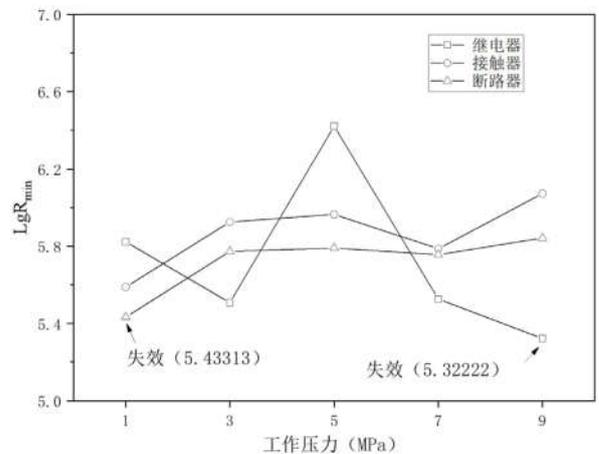
(a) 中间继电器



(b) 小型断路器



(c) 交流接触器



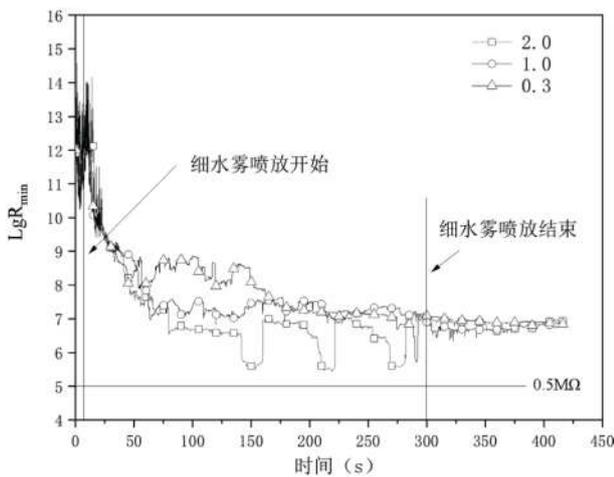
(d) 最小绝缘电阻值

图2 不同压力对电气元件的绝缘电阻变化

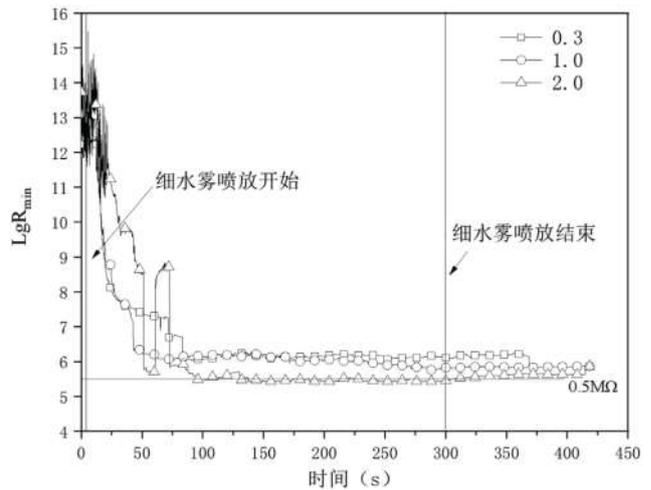
### 2.4 喷头流量系数影响

图3为不同流量系数下最小绝缘电阻变化图和最小绝缘电阻值。从图中可以看出,随着细水雾的持续喷放,绝缘电阻下降呈现逐渐缓慢趋势。仅分析流量系数对与电气元件的影响程度可看出,当流量系数较小(K=0.3)时,电气元件的绝缘电阻下降幅度较小,波动变化

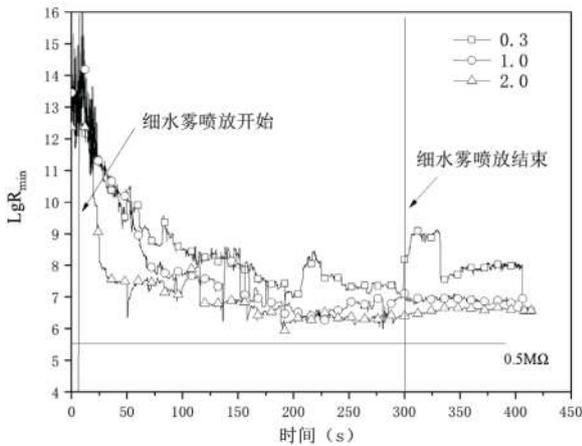
小;当流量系数为1.0时,电气元件下降幅度在流量系数为0.3与2.0之间,波动较明显;当流量系数为2.0时,电气元件下降幅度最大,有时波动剧烈,足以说明,细水雾喷头的流量系数越大,电气元件的绝缘电阻下降程度越高。因此,针对于此类受限空间扑救火灾时,应用于流量系数较小的喷头。



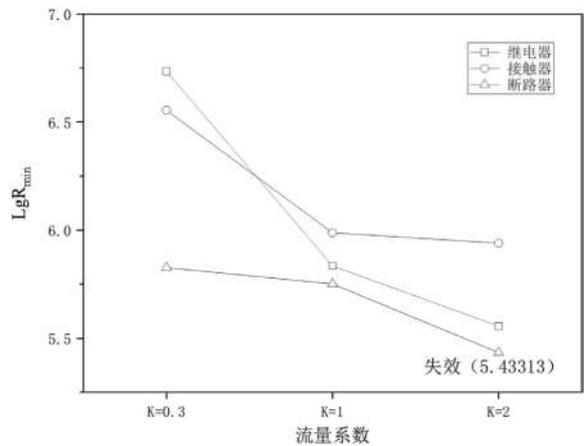
(a) 中间继电器



(b) 小型断路器



(c) 交流接触器



(d) 最小绝缘电阻值

图3 不同流量系数对电气元件的绝缘电阻变化

从图3可以看出,随喷头流量系数的增加,其电气元件的最小绝缘电阻值下降。主要原因为喷头流量系数的增加,其细水雾雾通量增加,同一空间内细水雾相互接触概率加大,易产生相对原本雾滴较大的雾滴,雾滴粒径较大,雾滴滞空性较弱,易快速落在电气元件外壳上,使最小绝缘电阻值呈现下降趋势。对于图中所标出的K=2的流量系数所产生最小绝缘电阻值低于0.5MΩ来讲,细水雾喷射97s时,出现绝缘安全性风险,因此建议少用流量系数大的喷头来用于电气控制柜。

### 2.5 喷头安装位置影响

图4为不同流量系数对中间继电器的绝缘电阻变化曲线和最小绝缘电阻值。从图中可以看出,细水雾喷放过程中,电气元件的绝缘电阻持续下降,直至稳定。虽然喷头的安装位置对稳定后的电气元件绝缘电阻影响程度基本一致,但不同喷头安装位置对于前期电气元件的绝缘电阻下降速度不同。明显看出,细水雾在喷放前期,侧装喷头的电气元件绝缘电阻下降程度比顶装喷头的电气元件绝缘电阻下降程度快,出现这种现象的主要原因为侧装喷头形成的部分细水雾喷射在电气控制柜内顶

部, 由于持续的喷放, 小粒径细水雾聚集最终形成大颗粒, 沉降速度加快, 最终使侧装的细水雾喷头在前期对电气元件绝缘电阻下降速度加快。将图4分开来看, 图4(b)、(c)都能保证电气元件的绝缘电阻在 $0.5M\Omega$ 以上, 而图4.9(a)在进行侧装喷头时, 电气元件绝缘电阻下降到 $0.5M\Omega$ 以下。根据Q/XCZJSBZ01-2013《电气设

备绝缘电阻测试技术标准》<sup>[8]</sup>的要求, 低压电缆、低压开关等绝缘电阻不应小于 $0.5M\Omega$ , 若低于该电阻值有漏电或击穿的危险, 应考虑停止释放细水雾。因此, 侧装喷头对电气元件具有一定的危险性, 不应在电气控制柜这类受限空间内使用。

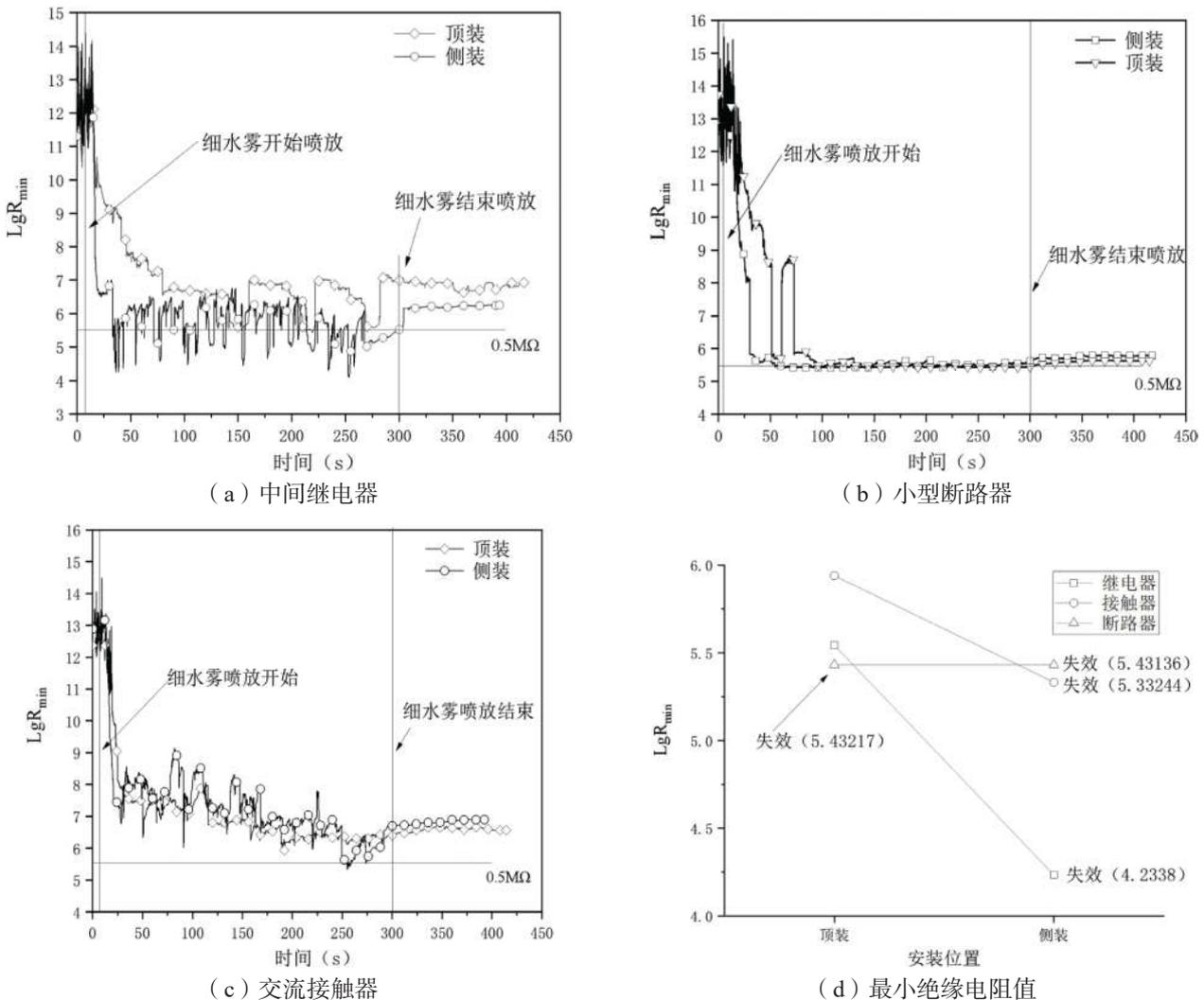


图4 不同喷头安装位置对电气元件的绝缘电阻变化

从图4可看出, 细水雾喷头安装在顶部向下进行喷射与喷头安装在侧壁进行垂直进行喷射所产生的绝缘电阻最小值完全不同。顶装喷头基本可将电气元件的最小绝缘电阻保证在 $0.5M\Omega$ 以上, 而侧装喷头都会有低于 $0.5M\Omega$ 的最小绝缘电阻值时刻, 主要原因在于侧装喷头所产生的细水雾, 一部分打在电气控制柜顶部, 随喷射时间增加, 细水雾聚集, 形成大液滴, 大液滴滞空性差, 易沉降, 落入电气元件表面上, 造成最小绝缘电阻低。

### 结语

为了研究细水雾对电气元件安全性影响程度, 设计了安全性实验场景布置以及实验工况, 开展了细水雾扑救电气控制柜火灾安全性实验研究, 进行了不同流量系数及工作压力的细水雾对内部电极与电气元件实验, 通过实验得到以下结论: (1) 在电气元件安全性实验中, 工作压力为 $5MPa$ 对电气元件影响程度最低, 其次为 $9MPa$ , 而 $1MPa$ 会对电气元件产生安全性风险; (2) 细水雾喷头的流量系数越大, 电气元件的绝缘电阻下降程

度越快,对于交流接触器来说当细水雾喷放50s时,流量系数为2的工况绝缘电阻下降幅度明显高于流量系数为0.3的工况;(3)在当细水雾喷头进行侧喷时会出现电气元件低于 $0.5M\Omega$ 的危险,但顶装喷头的工况出现绝缘电阻低于 $0.5M\Omega$ 次数少于侧喷工况,因此建议在电气控制柜内使用顶喷安装喷头。

#### 参考文献

[1]惠州消防.3人被拘留!博罗3起火灾责任人付出沉重代价[EB/OL].[2023-03.23].[https://mp.weixin.qq.com/s?\\_\\_biz=MzAwNzI5MTYxMQ==&mid=2651596123&idx=1&sn=8fbf8be19c32b703e7a49520a9cdce9e&chksm=80f8d2efb78f5bf96ed286c31d38c3894767db92f502dd4ceb95f9c20feaefa4052675cb3048&scene=27](https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzAwNzI5MTYxMQ==&mid=2651596123&idx=1&sn=8fbf8be19c32b703e7a49520a9cdce9e&chksm=80f8d2efb78f5bf96ed286c31d38c3894767db92f502dd4ceb95f9c20feaefa4052675cb3048&scene=27).

[2]陈宝辉,邓捷,孙易成,等.细水雾应用于变压器的带电绝缘性能研究[J].消防科学与技术,2020,39(1):67-69.

[3]孙震宁,谢天光,郝爱玲.细水雾喷放条件下的用电

安全性研究现状[J].消防科学与技术,2018,37(12):1687-1689+1699.

[4]Mawhinney J R.Water-mist fire Suppression systems for the telecommunication and utility industries[J].Fire Research News,1994,74;1-3.

[5]杨立军,富庆飞,王向东等.细水雾喷头喷射压力影响灭火性能的实验[J].北京航空航天大学学报,2009,35(03):361-365.

[6]王明武,陶波,李建伟等.细水雾扑救电气火灾有效性和安全性实验研究[J].消防科学与技术,2020,39(07):969-972.

[7]公安部天津消防研究所.GB 50898-2013细水雾灭火系统技术规范[S],北京:中国标准出版社,2024:8.

[8]Q/XCZJSBZ01-2013,《电气设备绝缘电阻测试技术标准》[S].