高校实验室电气火灾事故的调查与思考

邢 华奎[1]，吴 广峰[1]，胡 鑫杰[1]，王 先[2]
（1 华南理工大学机械与汽车工程学院，广东 广州 510641）
（2 广州维港环保科技有限公司 广东 广州 510665）

[摘 要]为了避免高等学校实验室发生电气火灾事故，防止人员伤亡和财产损失，本文以某高校实验室水循环真空泵引发的火灾事故为例，采用体视显微镜下观察、扫描电镜、金相组织观察、能谱分析等方法对线体特征进行观测，在上述方法不能肯定判断事故原因的情况下，通过从单根细铜线寻找蛛丝马迹，结合各种特征因素，最终科学准确地推断出火灾事故是由电源线连接处发生短路所致。此次火灾事故原因调查，不仅为高校实验室避免电气火灾事故发生提出了警示，也为其它电气火灾事故原因的调查分析提供了新的思路。

关键字：高校实验室；电气设备；线体特征；原因调查

[中图分类号] G312 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1647-9325(2023)-0037-13 **[收稿日期]**2023-03-25

引言

高校实验室是人和物最集中的区域，是科学研究、人才培养的重要基地，但由于高校学生流动性高、隐患种类数量多、人员安全意识不等、仪器设备更新不及时且使用率高等特点，给高校实验室安全管理带来了巨大的压力，也因此时常发生实验室事故，造成人员伤亡和财产损失的不良后果[1-3]。

本文从某高校实验室电气设备火灾事故着手，不仅为避免实验室电气火灾事故提出警示，还为事故调查提出了新的思考和思路，排除只要关闭设备开关不断开电源也不会发生电气设备火灾的误区。

一、事故发生概况

事故发生在 2022 年 7 月 24 日某高校环境学院的一间实验室，此实验室主要从事无机环境催化净化材料合成实验，事故发生当天有学生在实验室开展抽滤实验，晚上 21:59 分左右关闭抽滤设施后离开实验室,实验过程当中未使用遇水放热或与水反应的物质。

事故发生在 7 月 25 日凌晨，视频监控显示：

（1）2:54 分：洗手池旁的抽滤设备开始冒烟；

（2）3:01 分：出现明火，1 分钟后监控信息消失（空气开关跳闸）；

（3）3:52 分：有学生闻到烟味，随即向学校大门口保安求助，并和保安一起赶赴现场排查；

（5）4:14 分：发现实验室进门口实验台洗手池及附近着火。

事故未造成人员伤亡，洗手池及其旁边的沥水架、超声波清洗器以及实验台上架子受热损坏，直接经济损失为 1300 元左右。

二、事故现场取样及处理

通过对事故现场及周边环境进行排查，

回看视频录像，结合实验室提交的情况说明，推测引起火灾的原因极有可能是循环水真空泵。从事故现场将循环水真空泵整体取回，并进行拆解，拆解后主要分为三个部分：箱体、电机、电源线[4-5]。箱体主要用于盛放介质水，电机用于产生负压，电源线用于给电机供电，气体被不断的吸入、压缩、排出，循环水在其中起到“液体活塞”、散热、密封、冷却等作用[6]。拆解后如下图所示。

（a）水循环真空泵完整图

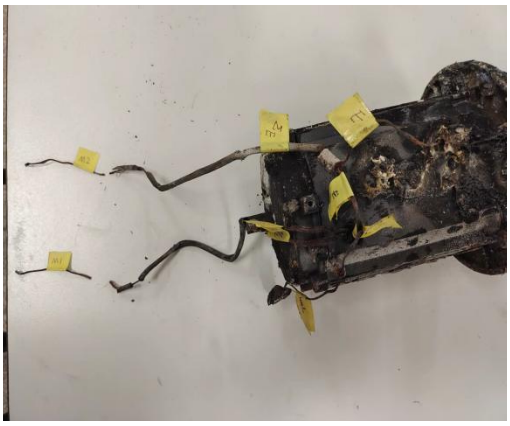
（b）燃烧拆解后图片

图 1 循环水真空泵拆解后照片

Fig. 1 picture of the disassembled circulating water vacuum pump

拆解后发现：电机线路的绝缘层已全部被烧失，铜线已裸露，两条引线可清晰分辨，接头处有明显的熔化痕迹，为便于区分命名为 M1、M2，对电机上的其他线路进行观察，未发现破损残缺的痕迹；对电源线进行观察，线路端部凹凸不平且碳化痕迹明显，熔痕将线路的各细铜丝熔在一起，分别命名为 i1、i2、i3。

由于当时处于未工作状态，怀疑由于线路短路引发火灾，于是将上述端部截取下来做进一步分析，如图 2 所示。



（a）电机引线 M1、M2

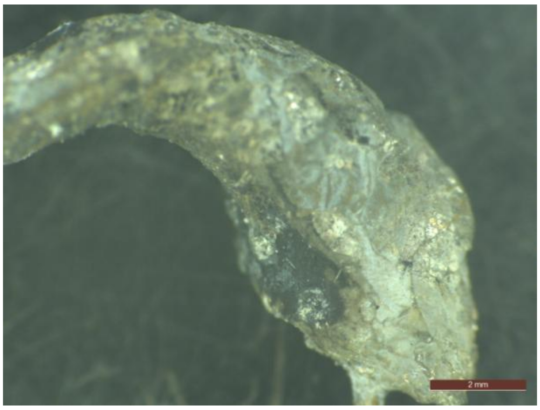
（b）电源线 i1、i2、i3

图 2 线路端部截取图片

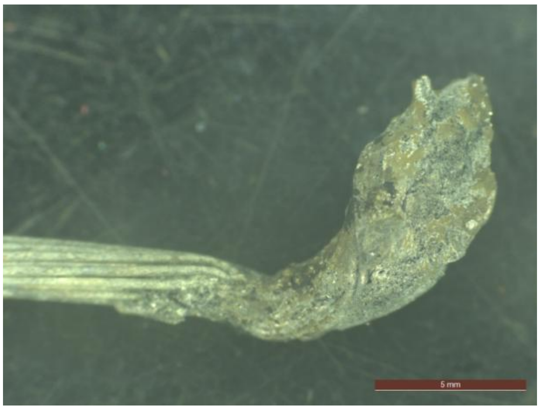
Fig. 2 cut-off picture of the end of the line

三、线路特征检测与分析

3.1 体视显微镜下特征观察



（a）正面 ×60



（b）背面 ×40

图 3　i2 熔断点体视图片

Fig. 3 i2 volume view of the fusing point

从图 3 中可以观察到，电源线 i2 端部多根细铜丝已熔融在一起，形成一个整体，熔融段长度约为 10 mm，表面有略微凸起也有小凹坑，个别部位被一层薄薄的熔融金属覆盖，一层覆盖一层有堆积现象，其他部位被燃烧产物碳化物所覆盖，露出金属光泽，并在端部形成了两个尖角，张开约 90°角。

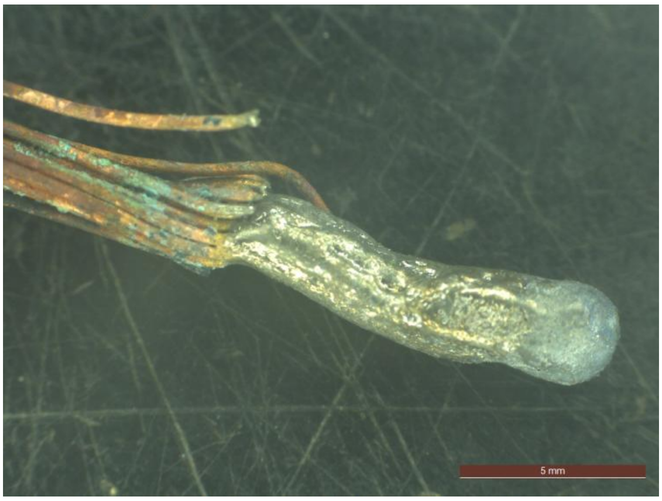


图 4　i3 熔断点体视图片 ×40

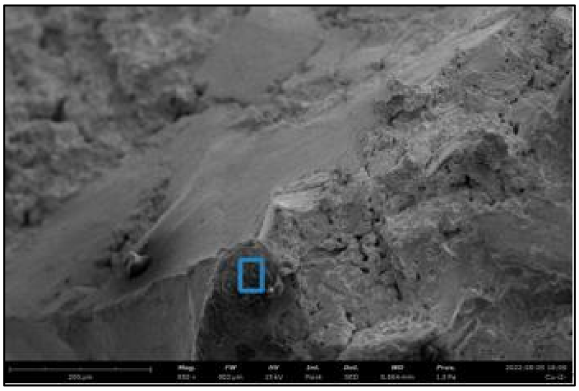
Fig. 4　i3 fusing point volume view picture × 40

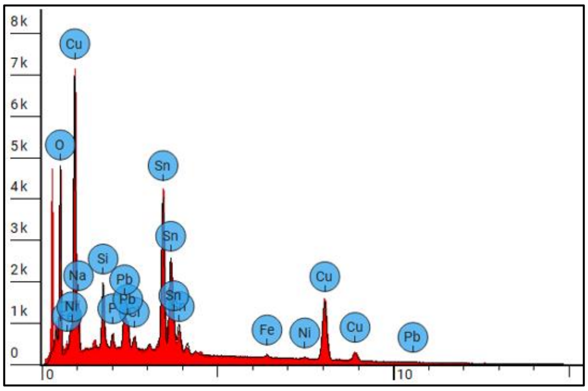
图 4 为经过超声波清洗后，i3 熔断点在体视显微镜下观察拍摄的照片，从图中可以观察到，熔化段与非熔化段界线明显，分界线左侧多股细铜丝可以逐根分离，单根铜丝端部也出现了熔化痕迹，在分界线右侧约 10 ㎜的范围内熔化的金属将铜线表面覆盖，多根铜线融合在一起，表面较为光滑，有金属光泽，在熔化段的端部形成了一个半球状熔痕[7]。

i2 和 i3 的端部形成了约 10 ㎜的熔痕，i2

端部熔痕是线径的 1.5 倍，表面有金黄色金属光泽，i3 端部形成了半球状熔珠，可以说明：此处在极短的时间内受到局部高温的作用。

3.2 扫描电镜特征分析





（a）i2 熔断点扫描电镜图 ×650 （b）i2 熔断点能谱分析图

图 5 i2 线路扫描电镜及能谱分析图

Fig. 5 i2 scanning electron microscopy and energy spectrum analysis

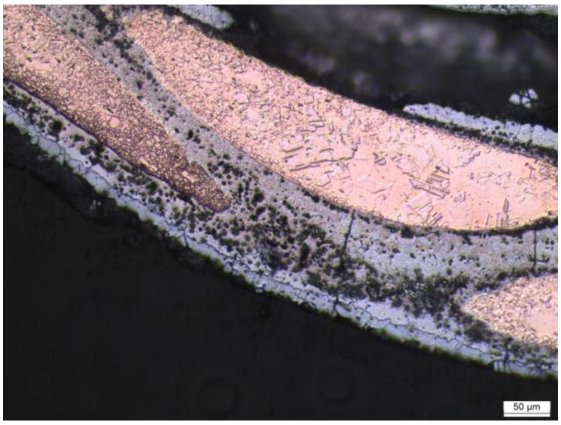
表一 i2 熔断点各元素所占比重

Table 1 the proportion of each element at the melting point of i2

Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Con c.	Weight Con c.
8	O	Oxygen	51.707	18.300
11	Na	Sodium	5.700	2.900
14	Si	Silicon	3.541	2.200
15	P	Phosphorus	0.876	0.600
17	Cl	Chlorine	0.765	0.600
26	Fe	Iron	0.486	0.600
28	Ni	Nickel	0.462	0.600
29	Cu	Copper	20.206	28.400
50	Sn	Tin	14.664	38.500
82	Pb	Lead	1.593	7.300

对 i2 线路做扫描电镜，从图中可以发现部分表面光滑，部分表面粗糙，图中线路短路的特征不明显，通过做能谱分析，发现端部主要含有 Cu 元素、O 元素、Sn 元素，其中 O 元素来源于铜丝在高温下与 O_2 发生反应生成的 Cu_2O，Cu 元素和 O 元素占原子数量的 51.7%和 20.2%，Sn 元素有可能来源于线体镀锡[8]。

3.3 金相微观组织形貌特征分析



（a）i2 熔断点金相组织 2000×

（b）i3 熔断点金相组织 2000×

图 6 金相组织图片

Fig. 6 metal lographic structure picture

从 i2 线路的金相显微组织图中可以观察到：金相磨面内只有少量孔洞，反而包裹线体产物中孔洞较多，呈现规则的圆形状，分布集中。

一次短路熔痕是线路自身原因引起的短路，在熔痕形成后，受周围环境影响，冷却速度快，熔化的金属迅速凝固，在熔化时所吸收的氧还没来得及与金属充分反应和溢出，就被截留在组织内部，由于燃烧产物相对较少，截留的气孔比较少也比较有规则，多呈现圆形或椭圆形。

从 i3 线路的金相显微组织图中可以观察到：熔痕中存在一个明显的分界线，一边是细小的柱状晶，一边是导线原始组织形态。

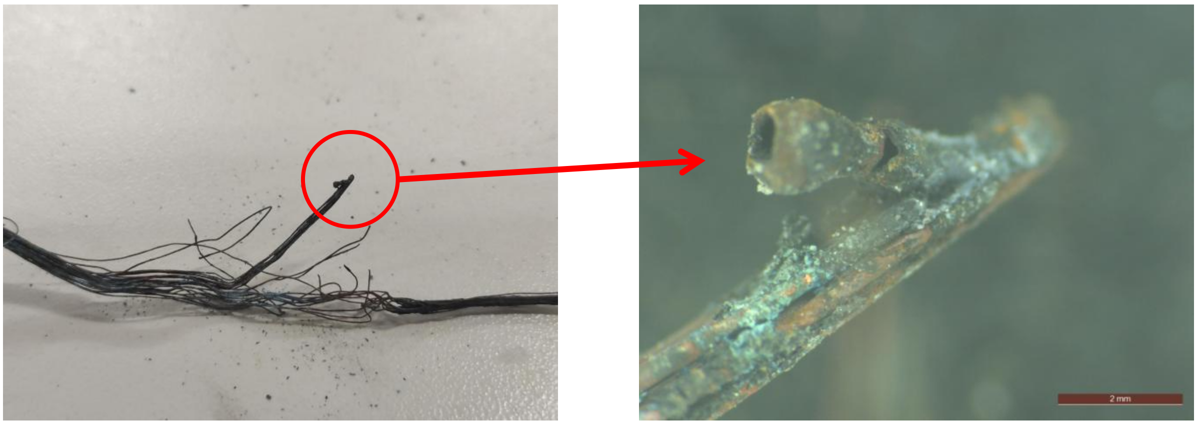
当铜导线发生短路时，在短路点温度高达 2000℃以上，可以瞬间使铜线熔化，由于这种高温转瞬即逝，因此可以形成一边是熔化痕迹，一边是完好导线；同时在晶粒还没长大时金属液滴已经凝固，因此一次短路熔痕的金相组织呈现细小的胞状晶或柱状晶[9]。

通过上述体视显微镜下观察、扫描电镜、能谱分析、金相组织分析，观察到一些一次短路熔痕的特征，但是特征并不是很明显，这些特征当中同时也包含着二次短路熔痕的特点，因此依据上述特征并不能肯定判断火灾起因是由于水循环真空泵一次短路造成，而 SEM 和金相是最能说明起因的有力方法，这使得事故调查达到了瓶颈，需要找到更有力的证据来说明事故起因。

3.4 单根细铜线特征分析

铜体线路是由多跟细铜丝组合而成，在整体线路特征不明显，调查遇到困难的情况下，分析转向更加细微的部分，对个别细铜丝进行细致观察，从而找到更加有力证明事故原因的蛛丝马迹。

（1）导线空腔



（a）空腔熔痕照片　　（b）空腔体式显微镜下局部放大图　×50

图 7　i1 线路空腔照片

Fig. 7　i1 line cavity photo

从图 7 中可以观察到，端部出现反向空腔痕迹，空腔的最大直径约为单根细铜丝的 3 倍，空腔表面圆润，形状规则，有向外扩张的趋势，里侧的小空腔直径约为单根铜丝的 2 倍，表面覆盖有燃烧产物，与之相连的几根细铜线可以清晰分辨，未熔融在一起。

根据上述特征可以推断：空腔是在极短时间内，受到极高温度的作用，内部气体或者液体体积急剧膨胀溢出，在铜线内部形成如图所示的空腔。

（2）单股细铜线出现小熔珠

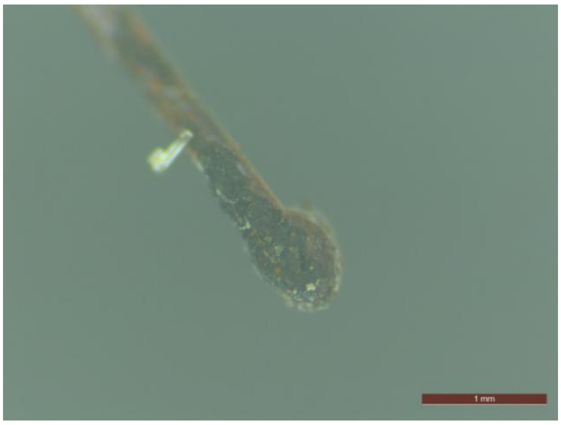


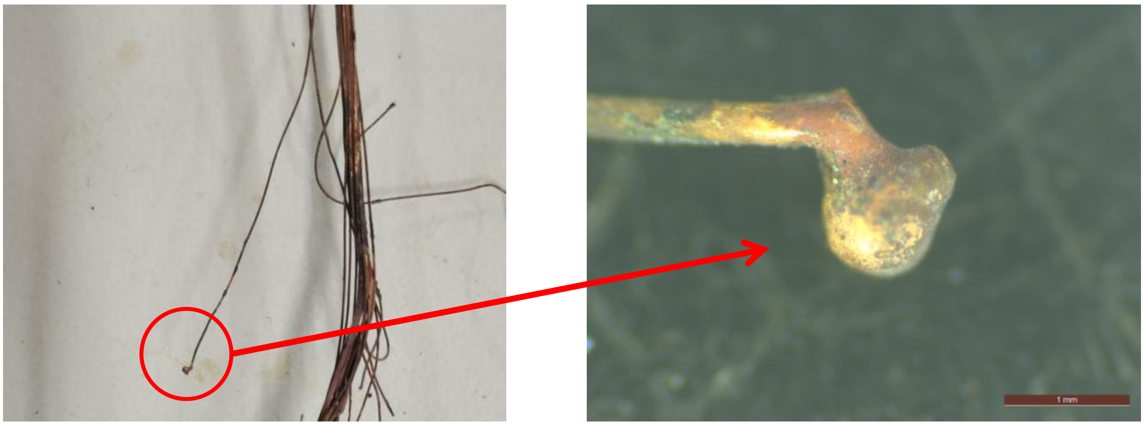
图 8　i2 线路细铜丝体视显微镜下熔珠放大图　×60

Figure 8　i2 Magnification of molten bead by visual microscope with fine copper wire

图 8 所示的单根细铜线形成了如同蝌蚪状的熔痕，头部呈现出规则的椭圆形熔珠，表面

粘着黑色碳化物。

此特征是由于线体在极短的时间内，受到高温作用熔化，又在极短的时间内冷却凝固，与线体连接良好，表面也比较圆润，形状较为规则[10]。



（a）单根细铜线端部熔珠　（b）熔珠体式显微镜下局部放大图　×60

图 9　i3 中单根细铜线熔痕

Figure 9　i3 shows a single fine copper line

从图 9 单根细铜线熔痕可以观察到，熔痕形状角度怪异，形成了一个略大于 90°的折角，熔珠的最大直径约为线径的 3.5 倍，在折角段有逐步扩大的现象，表面圆润，光泽明亮，分布着黑色碳化物斑点。

此特征是典型一次短路熔痕，线体在短时间内受到高温作用熔化，又在极短的时间内冷却，熔化的铜线没来得及掉落就悬挂在线体上。

（3）线体中间熔痕

（a）单根细铜线中间熔珠　（b）中间熔痕体视显微镜下局部放大图　×80

图 10　i3 细铜线中间熔珠

Fig. 10　i3 fine copper wire with molten bead in the middle

从图中细铜丝可以发现，在端部和中间部位均出现熔珠痕迹，中间的熔珠呈现较为规则的椭球状，表面略带毛刺，与细铜线通过较短的线体相连。

根据上述特征可以推断：线路在短时间内受到局部高温作用熔化，滴落在个别细铜丝上，快速冷却并粘结在线体上。

四、事故原因调查结论与思考

4.1 原因调查结论

通过体视显微镜、SEM、能谱以及金相分析，根据线路所存在的熔痕特征，结合设备多年服役，又是塑料材质，正常工作时处于振动且靠近水源等使用环境，以及学生实验完只关闭设备开关未拔掉电源，据此判断此次火灾是由于水循环真空泵电源线以及电源线与开关连接处发生短路，瞬间产生2000℃以上的电弧高温，破坏电源线绝缘层，点燃塑料箱体及周围可燃物引起。

4.2 思考与警示

在事故调查方面，除采用体视显微镜观察、扫描电镜（SEM）、金相分析、能谱分析等常规方法外，在不能肯定判断事故原因的情况下，对于由多根细铜丝组成的铜线，也可通过观察单根细铜丝等细微处呈现出来的特征，加以判断电气火灾事故具体原因[11]；

在避免高校实验室电气火灾方面，应加强学生安全教育，安排专人负责设备，定期进行检查维修，对于达到使用年限的仪器设备应及时报废，制定相应的安全操作规程，使用完毕的设备除应关闭设备电源，还应彻底断电[12]。

基金项目：华南理工大学 2021 年探索性实验项目“线齿轮参数测量方法探索”（C9212010）

作者简介：邢华奎，（1993-），男，河南周口人，硕士研究生，工程师，现就职于华南理工大学专职安全员，从事实验室安全管理、事故调查；（通讯作者）吴广峰（1982-），男，山东菏泽人，实验师，硕士，研究方向：机械基础实验教学、实验室安全管理、机械设计与制造；胡鑫杰（1991—），男，广州，硕士，工程师，主要研究方向为实验室管理；王先（1995-），女，广东广州人，学士学位，主要从事安全管理与项目管理。

参考文献：

[1] 罗瑛,郭定乾,等.高校实验室管理队伍建设探索[J].科学咨询(科技・管理),2022(09):4-6.

[2] 梁永红.高校实验室管理存在的问题及策略研究[J].科技风,2022(24):133-135.

[3] 安宇,郭子萌,王彪,等.高校实验室事故致因分析与安全管理研究[J].安全,2022,43(08):34-39+6.

[4] 魏嘉.火灾痕迹在火灾事故调查中的应用研究[J].消防界(电子版),2022,8(17):47-49.

[5] 钟雅.火灾事故调查中证据资料的收集方法[J].今日消

防,2022,7(06):103-105.

[6] 李洋.现代化火灾调查中信息技术应用研究[J].长江技术经济,2022,6(S1):242-244.

[7] GB/T 16840.4-2021, 电气火灾痕迹物证技术鉴定方法 第 4 部分：金相分析法[S].

[8] 王丽丽,刘奇.超细铜线的微观组织、结构及物相的检验方法研究[J].世界有色金属,2021(07):129-130+134.

[9] 陈晓坤,陈言.单芯铜线过电流故障电弧熔痕的微观特征研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(12):136-142.

[10] 田晴. 短路迸溅熔珠引燃能力和金相组织特征研究[D].西安科技大学,2021.

[11]李冉冉.高校实验室消防安全管理探讨[J].消防科学与技术,2015,34(02):277-280.

[12]赵志国.高校实验室火灾原因分析及预防措施[J].课程教育研究,2017(47):44.

Investigation and thinking of electrical fire accident in university laboratory

Xing Huakui 1, Wu, Guangfeng 1, Hu, Xinjie 1, Wang Xian 2

(1 School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641)

(2 Guangzhou Weigang Environmental Protection Technology Co., LTD. Guangdong Guangzhou 510665)

Abstract: In order to avoid electrical fire accident in the laboratory, to prevent casualties and property losses, this paper to a university laboratory water circulation vacuum pump fire accident as an example, using the body microscope observation, scanning electron microscope, observation, spectrum analysis method of line body features, in the above method cannot certainly determine the cause of the accident, from the single fine copper wire for clues, combined with various characteristic factors, finally scientific accurately infer fire accident is caused by the power cord connection short circuit. The investigation of the cause of the fire accident not only provides a warning for the university laboratories to avoid the electrical fire accidents, but also provides a new idea for the investigation and analysis of the cause of other electrical fire accidents.

Key words: university laboratory; electrical equipment; wire body characteristics; cause investigation