

# 真空断路器电离辐射危害研究

王忠立 路建超 杨海峰 胡新梅 赵 丽 郭 强

中图分类号: R144 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2013)05-0573-04

**【摘要】** 目的 探讨真空断路器耐压测试过程中存在的职业病危害因素及其防护情况。方法 通过职业卫生与放射卫生调查,分析其生产工艺,并对工作现场进行职业危害因素识别、监测和个人剂量监测。结果 真空断路器分闸状态下进行测试时,测量点改造前周围辐射水平明显高于国家标准,改造后周围辐射水平基本符合国家标准,且改造前后具差异有统计学意义( $P < 0.01$ )。结论 真空断路器分闸状态下进行测试时,符合 X 射线产生的基本原理,产生伴生 X 射线。建议加强工作人员防护,制定相关国家标准。

**【关键词】** 耐压测试; 电离辐射; 有效剂量; 伴生 X 射线

真空开关从 20 世纪 60 年代进入电力系统应用以来,由于性能优良,发展迅速,产量不断上升。但真空开关在使用和测试过程中是否产生辐射危害,一直存在争议,且国内外对此鲜有报道。近年来我们通过对数家真空电器企业断路器耐压测试工艺进行职业卫生与放射卫生调查,基本上弄清楚了真空断路器耐压测试过程中存在的电离辐射危害和辐射防护问题,为企业放射风险管理提供可靠的技术支持。

## 1 材料与方法

1.1 研究对象 以甲、乙、丙三家企业生产工艺中涉及到的 13 台(甲企业 6 台、乙企业 5 台、丙企业 2 台)

作者单位: 陕西宝鸡市疾病预防控制中心 陕西 宝鸡 721016  
作者简介: 王忠立(1972-),男,主治医师,从事职业卫生与职业病诊断工作。

有待进一步探讨。另外,除医疗照射以外,工业照射的年集体有效剂量以及人均年有效剂量也不容忽视,但是由于很多职业类别的样本量偏少,再有一些单位反馈个人剂量元件也不规范,造成部分时段的个人剂量数据缺失,因此具体数据这里不再做分析,但这部分放射工作人员的防护问题也不容忽视,建议有关部门加强对这部分放射工作人员的管理。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国主席令第 52 号. 中华人民共和国职业病防治法[S]. 2011.
- [2] 中华人民共和国卫生部. GBZ 128-2002 职业外照射个人剂量监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社 2002.

耐压测试设备为主要研究对象。操作人员 35 人。

1.2 仪器设备 个人剂量监测使用的仪器设备主要有 RGD-3B 型热释光剂量仪, TLD-2000B 型远红外精密退火炉, TLD-2000A 型光子探测器。现场检测使用的仪器设备主要有 FD-3013H 型 X- $\gamma$  辐射仪, FJ-347A 型 X- $\gamma$  辐射仪, 451B 型加压电离室辐射巡测仪, RJ-5 型工频电场(近区)场强仪。仪器设备均经计量部门检定,并在有效期使用。

1.3 方法 外照射个人剂量监测依据 GBZ 128-2002 进行监测。剂量计佩戴周期为 90 天,全年监测 4 个周期。监测质量控制按 GBZ 207-2008 进行。工作场所辐射水平监测评价以辐射防护基本标准 GB 18871-2002 为依据,参照 GBZ 130-2002、GBZ 138-2002 及 GBZ 117-2006 的要求在耐压测试操作位和设备周围设置检测点,检测点距地面 1.0 m,距周围

- [3] 中华人民共和国卫生部. GBZ 207-2008 外照射个人剂量系统性能检验规范[S]. 北京: 中国标准出版社 2008.
- [4] 中华人民共和国卫生部. GB 8170-2008 数值修约规则与极限数值的表示和判定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [5] 谢萍, 覃志英, 刘丽, 等. 2003~2007 年广西部分放射工作人员个人剂量监测结果分析[J]. 中国职业医学, 2009, 36(5): 426-428.
- [6] 程晓军, 田崇彬, 楚彩芳, 等. 河南省 2003~2007 年放射诊疗工作人员个人剂量水平调查[J]. 中国辐射卫生, 2009, 18(3): 310-312.
- [7] 中华人民共和国卫生部. GB 18871-2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

防护网(墙) 30 cm,使用上述辐射巡测仪进行检测,结果与上述国家标准要求相比较对符合程度做出评价。工频电场以 GB/T 189.3-2007 为依据进行检测点距地面高 1.5 m,调整探头方向,找出场强显示最大点,进行记录。

1.4 数据处理 利用 SPSS13.0 对结果进行统计学处理。

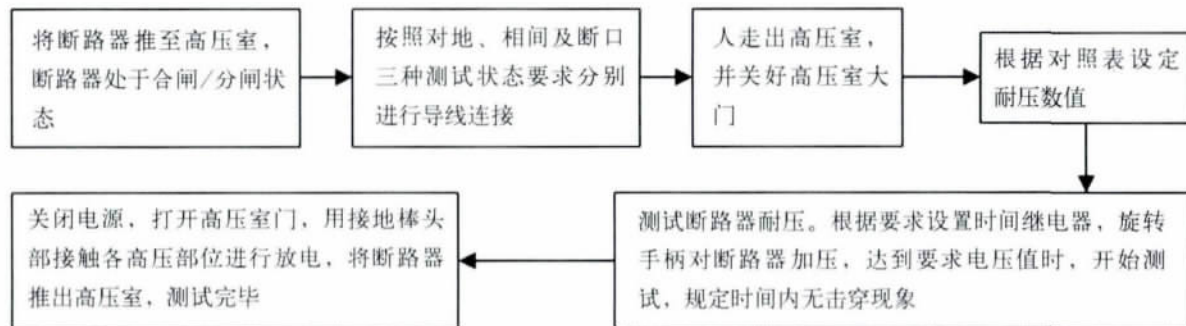


图 1 断路器耐压测试工艺流程图

2.1.2 职业危害因素识别 在断路器开关处于分闸状态下进行耐压测试时,其原理符合 X 射线产生的原理,因此在其测试过程中可产生 X 射线。电离辐射与空气作用,产生臭氧等有害气体。测试过程使用 380 V 普通工业电源供电,可产生工频电场。臭氧等由于产生量少,测试间上部敞开,因此未进行检测。2011 年前三家企业均未进行个人剂量监测。

2.1.3 改造前后防护情况 甲企业防护室大小为 3 m×2.5 m×2.0 m,顶部敞开,改造前为普通三合板隔断;改造后使用铁皮内包铅皮防护,防护门与防护壁有铅皮裸露现象,防护门关闭不严,且铅皮防护当量

## 2 结果

### 2.1 现场职业卫生与放射卫生调查

2.1.1 生产工艺 本调查检测的 13 台断路器耐压测试设备工作条件:高压为 48 kV~200 kV,电流 70 mA~50 A,持续时间 50 s~5 min。每天 8 h 工作日内设备开启测试时间合计约 30~120 min。断路器耐压测试工艺流程见图 1。

不详,总体上相对简陋;测试时断路器距四周防护壁约 1.0~1.5 m。乙、丙企业防护室大小为 4 m×3.5 m×3.5 m,改造前四周为约 2.0 m 高铁网防护;改造后使用铁皮内层加铅皮防护,顶部敞开,无铅皮裸露,防护门关闭严实,铅皮防护 2 mm 铅当量,相比较甲企业防护情况较好;测试时断路器距四周防护壁约 1.5~2.5 m。

2.2 2012 年断路器耐压测试操作人员个人剂量监测结果(表 1) 3 家企业从事断路器耐压测试人员共 35 人,2012 年仅乙企业 10 人进行了个人剂量监测,总检测率 28.57%,所有放射工作人员年有效剂量均未超过 1 mSv。

表 1 2012 年断路器耐压测试操作人员个人剂量监测结果

应监测人数	实际监测人数	监测率(%)	有效剂量范围(mSv)	集体有效剂量(人·mSv)	人均年有效剂量(mSv/a)
35	10	28.57	0.23~0.58	3.53	0.35

### 2.3 断路器耐压测试场所辐射水平测试结果

2.3.1 甲企业断路器耐压测试场所辐射水平测试结果(表 2、表 3) 每台耐压测试设备操作位设 1 个监测点,观察窗设 1 个点,四周防护壁各设 2 个点(共 8 个点),防护门中央各设 1 个点,防护门四周缝隙各设 1 个点(共 4 个点),依据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002),并参照《工业 X 射线探伤放射卫生防护标准》(GBZ 117-2006)的要求,四周防护壁外 30 cm 处空气比释动能率不大于  $2.5 \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ ,人员操作位的监督区空气比释动能率不大于  $15 \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。结果可见,甲企业改造前,断路器处于分闸状态时,三种不同测试方式测试过程中操作位和设备周围辐射水平明显高于国家标准,与改造

后相比较差异有统计学意义( $P < 0.01$ );断路器处于合闸状态时,三种不同测试方式下操作位和设备周围辐射水平均符合国家标准,且均为本底水平,与改造后相比较差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。改造后,断路器处于分闸状态时,测试过程中,铅玻璃观察窗外和北侧铅防护壁外 30 cm 仍超过国家标准,其余结果均符合国家标准要求。

2.3.2 乙、丙企业断路器耐压测试场所辐射水平测试结果(表 4、表 5) 每台耐压测试设备操作位设 1 个监测点,改造前四周防护铁网外各设 2 个点(共 8 个点);改造后观察窗、四周防护壁、防护门中央及门四周缝隙设点与甲企业相同。两企业改造前,断口测试(断路器处于分闸状态)操作位和防护铁网外测试结

果均明显高于国家标准,与改造后相比较差异有统计学意义( $P < 0.01$ )。相间和对地测试(断路器处于合闸状态)操作位和防护铁网外测试结果均符合国家标准,

与改造后相比较差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。改造后三种不同测试方式下操作位、四周防护壁、观察窗、防护门中央、及门四周缝隙外测试结果均符合国家标准。

表 2 甲企业改造前 6 台耐压测试设备周围辐射水平测试结果( $\mu\text{Gy/h}$ )

测试状态	测量位置	$\bar{x} \pm s$	剂量率范围
断口、相间及对地测试 (均处于分闸状态)	操作位	13.120 $\pm$ 4.924	7.10 ~ 20.00
	普通玻璃观察窗外 30 cm	113.500 $\pm$ 46.029	65.00 ~ 185.00
	普通防护壁外 30 cm	50.917 $\pm$ 15.174	32.00 ~ 75.00
	普通防护门中央外 30 cm	53.845 $\pm$ 17.256	30.50 ~ 76.50
	普通防护门缝外 30 m	56.167 $\pm$ 23.025	28.00 ~ 85.00
断口、相间及对地测试 (均处于合闸状态)	操作位	0.108 $\pm$ 0.019	0.09 ~ 0.14
	普通玻璃观察窗外 30 cm	0.138 $\pm$ 0.048	0.09 ~ 0.21
	普通防护壁外 30 cm	0.128 $\pm$ 0.008	0.12 ~ 0.14
	普通防护门中央外 30 cm	0.125 $\pm$ 0.011	0.11 ~ 0.14
	普通防护门缝外 30 m	0.138 $\pm$ 0.026	0.11 ~ 0.17

表 3 甲企业改造后 6 台耐压测试设备周围辐射水平测试结果( $\mu\text{Gy/h}$ )

测试状态	测量位置	$\bar{x} \pm s$	剂量率范围
断口、相间及对地测试 (均处于分闸状态)	操作位	0.352 $\pm$ 0.320	0.11 ~ 0.90
	铅玻璃观察窗外 30 cm	0.446 $\pm$ 0.290	0.18 ~ 0.90
	铅防护壁外 30 cm	1.730 $\pm$ 1.652	0.25 ~ 3.90
	铅防护门中央外 30 cm	0.360 $\pm$ 0.276	0.16 ~ 0.850
	铅防护门缝外 30 m	0.844 $\pm$ 1.097	0.25 ~ 2.80
断口、相间及对地测试 (均处于合闸状态)	操作位	0.104 $\pm$ 0.017	0.09 ~ 0.13
	铅玻璃观察窗外 30 cm	0.110 $\pm$ 0.019	0.09 ~ 0.14
	铅防护板壁 30 cm	0.112 $\pm$ 0.013	0.10 ~ 0.13
	铅防护门中央外 30 cm	0.108 $\pm$ 0.015	0.10 ~ 0.14
	铅防护门缝外 30 m	0.124 $\pm$ 0.018	0.10 ~ 0.15

2.4 工频电场测试结果 三家企业 13 台耐压测试设备在测试过程中,断路器周围防护室或防护网外工频电场强度在 34 ~ 135 V/m 之间,其测量最大值也远

低于国家标准<sup>[1]</sup>,因此该工频电场对人体基本不造成危害。

表 4 乙、丙企业改造前 7 台耐压测试设备周围辐射水平测试结果( $\mu\text{Gy/h}$ )

测试状态	测量位置	$\bar{x} \pm s$	剂量率范围
断口测试(分闸状态)	操作位	7.130 $\pm$ 7.303	1.70 ~ 18.00
	防护铁网外 30 cm	11.788 $\pm$ 16.393	0.90 ~ 60.00
相间测试(合闸状态)	操作位	0.115 $\pm$ 0.018	0.09 ~ 0.15
	防护铁网外 30 cm	0.122 $\pm$ 0.014	0.10 ~ 0.15
对地测试(合闸状态)	操作位	0.175 $\pm$ 0.056	0.10 ~ 0.25
	防护铁网外 30 cm	0.191 $\pm$ 0.068	0.11 ~ 0.30

表 5 乙、丙企业改造后 7 台耐压测试设备周围辐射水平测试结果( $\mu\text{Gy/h}$ )

测试状态	测量位置	$\bar{x} \pm s$	剂量率范围
断口测试(分闸状态)、相间和对地测试(合闸状态)	操作位	0.107 $\pm$ 0.010	0.10 ~ 0.12
	铅玻璃观察窗外 30 cm	0.102 $\pm$ 0.023	0.08 ~ 0.15
	铅防护壁外 30 cm	0.101 $\pm$ 0.012	0.09 ~ 0.13
	铅防护门中央外 30 cm	0.102 $\pm$ 0.016	0.09 ~ 0.14
	铅防护门缝外 30 cm	0.111 $\pm$ 0.014	0.08 ~ 0.13

### 3 讨论

3.1 X 射线产生的原理 X 射线机主要由球管、电源以及控制电路等组成,而球管又由阴极灯丝(Cath-

ode) 和阳极靶(Anode) 以及真空玻璃管组成,电源又可分为高压电源和灯丝电源两部分,其中灯丝电源用于为灯丝加热,高压电源(通常大于 20 kV,一般在 50 ~

450 kV) 的高压输出端分别加在阴极灯丝和阳极靶两端,提供一个高压电场使灯丝上活跃的电子加速流向阳极靶,形成一个高速的电子流,轰击阳极靶面后,99% 转化为热量,1% 由于康普顿效应产生 X 射线。球管要求要有良好的真空、绝缘特性,阴极要有能产生电子的装置,阳极必须有高熔点高密度的材料作为靶材(钨、钼、镍等)<sup>[2]</sup>。

3.2 断路器耐压测试产生伴生 X 射线的原理 真空断路器依靠真空灭弧室在真空中来开断电流,毫无疑问,在开断电流过程中会产生强烈的 X 射线<sup>[3]</sup>。而在断路器开关处于分闸状态下进行耐压测试时,在加高压过程中,真空断路器的动、静触头分别处于高压的阴阳两极,阴极触头温度增高,会产生一定量的热电子,在高压作用下,向阳极高速运动并撞击阳极,而触头材料主要由钨、钼、镍、铬等材料制成。因此在分闸状态下进行耐压测试时,其测试原理符合 X 射线产生的原理,可以推断在真空断路器合、分闸过程中和分闸状态下进行耐压测试过程中会产生一定量的伴生 X 射线,我们的监测结果也验证了此项推断。相关资料<sup>[4-5]</sup>也证明在真空断路器真空度测试过程中,在真空中两个触头之间加一定高压可能产生 X 射线,且随着电压的增高和触头之间距离的减小,射线量和强度增加。

3.3 真空断路器测试产生的伴生 X 射线特点 断路器测试过程与普通 X 射线机比较,所加高压值范围大,电流强,每次测试持续时间长。因此根据相关资料<sup>[6]</sup>,可推断其测试过程产生的伴生 X 射线出线量大且持续时间长,波长、能量范围相对较广。既有软 X 射线和硬 X 射线,又有连续光谱的 X 射线和线状光谱的特征 X 射线。

3.4 断路器使用和耐压测试过程中伴生 X 射线的防护 从监测结果可以看出,改造前,断路器处于分闸状态进行耐压测试时,其监测结果绝大多数明显高于国家标准,最大达十余倍;进行改造后,断路器耐压测试过程中操作位及周围的辐射水平显著降低,与改造

前差异有统计学意义( $P < 0.01$ ),且绝大多数监测点均符合国家标准,仅个别监测点略高于国家标准。因此四周防护 2 mm 厚的铅皮足以进行防护,适当增加防护距离(操作人员、其他工作人员及公众至少离开测试断路器 1 m 以上)也可以降低周围辐射水平,从而降低防护成本。乙企业 10 人个人剂量监测结果年有效剂量均低于 1 mSv,一方面是由于实际开机测试时间短,人员受照时间短,所接受有效剂量低,另一方面也说明改造效果明显。

3.5 建议 进一步加强辐射防护工作,定期对工作场所进行监测和评价,加强个体防护和辐射防护知识的宣传学习,加强个人剂量监测工作,对工作人员按照放射工作人员体检要求进行健康监护。甲企业应进一步对其防护室进行改造维护。另外由于真空断路器的广泛使用,并不断向更高电流和电压领域扩展,建议制定真空断路器伴生 X 射线监测与防护相关国家标准。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国卫生部. GBZ 2.2-2007 工作场所有害因素职业接触限值,第 2 部分:物理因素[S]. 北京:中国标准出版社,2007.
- [2] 吴恩惠. 医学影像学第四版[M]. 北京:人民卫生出版社,2002:2-3.
- [3] 王季梅. 论开发 750kV 超高压真空断路器的必要性[J]. 电力设备,2004,5(9):3.
- [4] Toshiba HV6FS Vacuum Circuit Breaker Instruction ... - CTi Automation [EB/OL]. <http://www.google.com.hk/search?newwindow=1&safe=strict&site=&source=hp&q=Vacuum+circuit+breaker+test+process+associated+with+the+X+ray&btnK=Google+%E6%90%9C%E7%B4%A2>.
- [5] JOHN HOWELL. Maintenance of medium-voltage vacuum circuit breakers[Z]. 1990,3:123.
- [6] 刘保昌. 实用医学辐射防护学[M]. 北京:军事医学科学出版社,2004:4-7.

(收稿日期:2013-05-18)

## 论文中法定计量单位的书写要求

本刊法定计量单位实行国务院 1984 年 2 月颁布的《中华人民共和国法定计量单位》,并以单位符号表示。具体使用参照 1991 年中华医学会编辑出版部编辑的《法定计量单位在医学上的应用》一书。正文中时间的表达,凡前面带有具体数据者应用 d、h、min、s,而不用天、小时、分钟、秒。注意单位名称与单位符号不可混合使用,如  $\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{天}^{-1}$  应改为  $\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ;组合单位符号中表示相除的斜线多于 1 条时应采用负数幂的形式表示,如  $\text{ng/kg/min}$  应采用  $\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$  的形式;组合单位中斜线和负数幂亦不可混用,如前例不宜采用  $\text{ng/kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$  的形式。在叙述中,应先列出法定计量单位数值,括号内写旧制单位数值;但如同一计量单位反复出现,可在首次出现时注出法定计量单位与旧制单位的换算系数,然后只列法定计量单位数值。