

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2024.02.005

气云爆炸条件下消防炮的抗爆性能研究*

张佳庆^① 黄玉彪^① 陈清^② 王永旭^② 李斌^②

①国网安徽省电力有限公司电力科学研究院电力火灾与安全防护安徽省重点实验室(安徽合肥,230031)

②南京理工大学化学与化工学院(江苏南京,210094)

[摘要] 以换流变压器站变压器燃爆防控及消防应用为背景,针对变压器在失控条件下可能发生的燃爆事故,通过设计模拟试验,完成变压器燃爆事故的模拟。进而对现有消防设备消防炮的功能可靠性和抗爆性能进行验证。结果发现,在高温、高压的气云爆炸火球范围内,消防炮的抗爆性能无法满足实际需要,在变压器爆炸后存在功能损失的情况。发现了消防炮自身的抗爆薄弱环节,提出了消防炮抗爆设计及安装改进建议。可为换流变压器站的抗爆型消防炮设计提供基础数据参考。

[关键词] 特高压输电;气云爆炸;消防炮;抗爆性能

[分类号] TQ569

Explosion Resistance Performance of Fire Cannons under Gas Cloud Explosion Conditions

ZHANG Jiaqing^①, HUANG Yubiao^①, CHEN Qing^②, WANG Yongxu^②, LI Bin^②

①Anhui Province Key Laboratory for Electric Fire and Safety Protection, State Grid Anhui Electric Power Research Institute (Anhui Hefei, 230031)

②School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] In converter transformer stations, transformers may experience explosion accidents under uncontrolled conditions. By simulating transformer explosion accidents through experiments, the reliability and anti-explosion performance of the fire cannon were verified. It was found that, within the range of high-temperature and high-pressure gas cloud explosion fireballs, the anti-explosion performance of fire cannon cannot meet practical needs. There is a loss of function after the explosion of the transformer. Weak links in the explosion resistance of the fire cannon were identified, and suggestions for the explosion resistance design and installation improvement of the fire cannon were proposed. It could provide conferences for the design of anti-explosion fire cannon in converter transformer stations.

[KEYWORDS] ultra-high voltage transmission; gas cloud explosion; fire cannon; anti-explosion performance

0 引言

特高压输电是世界上最先进的输电技术,由于输送容量大、送电距离长、线路损耗低、占用土地少,被誉为电力高速公路。在输电线路的建设过程中,需要考虑经济输送距离,完成输电站总体布局,统筹解决电力资源与负荷中心分布的不均匀性问题^[1]。

在输电线路变电站的建设过程中,油浸变压器是最常见、选用最多的电力变压器。油浸变压器使

用变压器油作为绝缘和冷却介质。变压器油是由不同分子量的碳氢化合物组成的混合物。在变压器的运行中,在高温、电场和电弧作用下,这些化合物中的C—H、C—C键发生断裂,会产生氢气和甲烷、乙烷、乙烯、乙炔之类的烃类气体;同时,固体绝缘分解,也会产生一氧化碳。在正常情况下,即使变压器内部这种可燃气体含量较高,也不会引起燃烧。但在故障电弧的作用下,变压器油分解,变压器内部可燃气体剧增,压力瞬间增大,导致器身结构破坏,从而变压器油、可燃气体等混合物喷出,引发器身内残

* 收稿日期:2023-07-06

基金项目:国网安徽省电力有限公司科技项目(B3120523000D)

第一作者:张佳庆(1987—),男,博士,教授级高级工程师,主要从事电气设备火灾防控研究。E-mail:dkyzjq@163.com

通信作者:李斌(1984—),男,博士,副研究员,主要从事多相流、云雾爆轰的研究。E-mail:libin@njust.edu.cn

留的变压器油继续分解和爆燃。当泄露的热解产物混合气体与空气混合后点燃,可能会发生更严重的二次爆炸,对人员和设备造成危险,给社会经济带来严重损失^[2-5]。

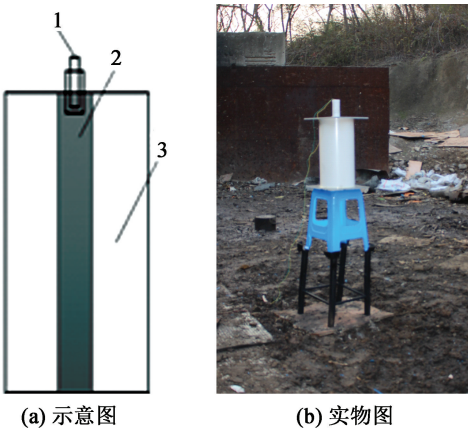
为避免这一类事故的发生,在变电站的设计施工中,本质安全设计和安全措施方面的考虑尤为重要^[6]。在此基础上,一旦事故发生,将事故控制在一定范围内,减少事故带来的损失和防止事故扩大化也是一项重要课题。消防炮是远距离扑救火灾的重要消防设备,主要用来扑救石油化工企业、飞机库、邮轮、油码头、海上钻井平台和储油平台等可燃易燃液体集中、火灾危险性大、消防人员不易接近的场所的火灾。针对变压器油气云爆炸事故,重点开展消防炮在变压器油气云爆炸作用下的响应情况研究,能够为指导此类工况下消防炮的设计改造、提供新型的变压器油爆炸消防措施奠定基础。

1 变压器油气云爆炸模拟试验

1.1 变压器油气云爆炸试验装置设计

基于已有的变压器爆炸事故数据,在静爆载荷作用下,变压器内的绝缘油会喷射而出,喷射过程伴随火光出现,喷射形成的云雾最大扩散距离为 3.0~3.5 m。在此条件下,利用气云爆炸方法设计相关容器并模拟变压器内部的爆炸过程。

结合已有气云爆炸模拟试验的经验^[7-11],设计模拟试验装置如图 1 所示。



1 - 雷管;2 - 中心装药;3 - 绝缘油。
图 1 试验装置

Fig. 1 Experimental device

试验场地为南京理工大学静爆试验场。试验前,将地面平整压实,将模拟试验装置放置在离地悬空 1.6 m 处。起爆药装填至模拟试验装置中心,利

用雷管引爆中心装药,使得油料抛撒成云雾。云雾在抛撒过程中边分散、边燃爆,实现变压器装置失控爆炸的全过程模拟。

1.2 典型变压器油气云爆炸过程

利用设计的变压器油抛撒装置,通过系统试验确定变压器油气云爆炸的设计参数。具体试验工况如表 1 所示。

表 1 试验工况参数

Tab. 1 Parameters of test conditions		
工况	试验油量/L	中心装药质量/g
1 [#]	10	575
2 [#]	10	590
3 [#]	15	781
4 [#]	15	790
5 [#]	20	1 013

考虑到实际变压器油的喷射距离为 3.0~3.5 m 和云雾边缘的燃爆超压约为 100 kPa 这 2 个参数指标,变压器试验油量选择在 10~20 L 时,能够实现需要的变压器油的喷射半径。

根据试验需求,采用高速摄像机、红外热成像仪和超压测试系统,分别捕捉变压器油气云爆炸全过程、温度场数据和超压场数据。高速摄像系统为日本 Photron 公司的 UX100 型高速摄像机,拍摄速率为 2 000 s⁻¹;红外热成像仪为美国 Flir 公司的 A615 防爆型,拍摄速率为 30 s⁻¹,记录温度范围为 0~2 000 ℃;超压测试系统为美国 PCB 公司的 113 系列传感器和瑞士 ELSYS 公司的数据采集系统,采集频率 1 MHz。

通过系统模拟试验,获得合适的变压器油抛撒效果。典型的变压器油抛撒和燃爆过程图像如图 2 所示。

研究发现,当变压器油的试验油量为 10 L 及以

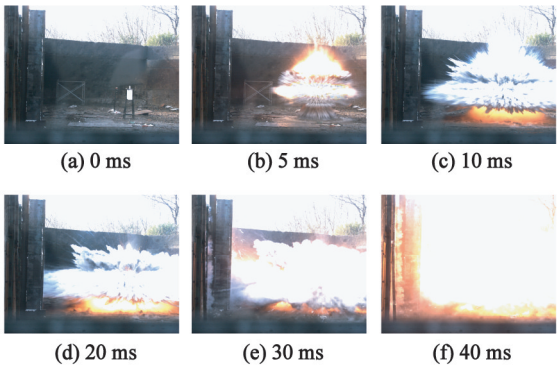


图 2 变压器油典型爆炸过程

Fig. 2 Typical explosion process of the transformer oil

上时,油料抛撒及燃爆半径均在 3.5 m 左右,符合变压器燃爆模拟试验的需求。距爆源不同位置处的压力如表 2 所示。

表 2 变压器油气云爆炸压力分布

Tab. 2 Pressure distribution in gas cloud explosion of the transformer oil

工况	距离/m			
	2	4	5	7
1 [#]	133.3	95.7	68.2	46.9
2 [#]	137.5	88.1	67.5	42.6
4 [#]	206.8	72.6	56.8	32.4
5 [#]	162.7	96.6	65.3	51.8

从变压器油抛撒半径和实测压力可以看出,变压器油气云爆炸过程中距爆源 2 ~ 7 m 均能够实现超压从 30 ~ 130 kPa 的覆盖范围,在此范围内能对人员和设备造成不同程度的伤害。对比已有变压器油气云爆炸事故数据可知,利用自行设计的变压器油抛撒装置,能够较好地模拟变压器油爆炸的实际情况。

2 消防炮抗气云爆炸性能试验

2.1 消防炮抗爆性能试验设计

基于建立的典型变压器油气云爆炸模拟试验方法,结合外场中变压器油气云爆炸的实际过程,以市场上通用的消防炮为模型,开展消防炮抗爆性能试验研究,评估消防炮抗爆效果并提出改进建议。

在试验装置一侧互成 90°的 2 条线布置地面传感器,分别距装置 1、2、4、5、7 m,与地面平齐。消防炮系统放置于距爆心 5 m 的压力测点处。试验时,将高速摄像机、超压测试系统、红外热成像仪放置在安全距离处,对样品进行拍摄,并获得冲击波压力和温度场数据。每次试验结束后,对消防炮进行功能性验证,主要验证遥控控制与水流喷射是否正常。

2.2 试验结果分析

2.2.1 消防炮抗气云爆炸过程

以消防炮为研究对象,高速摄像机记录的气云爆炸过程如图 3 所示。

从图 3 可以看出,变压器油的燃爆对消防炮的作用是一个瞬时过程。50 ms 时,发生爆燃的绝缘油云雾便完全包裹住消防炮及附属部件。随后,中心火焰向四周迅速扩散。200 ms 时,火焰处于最旺盛的阶段,会对消防炮造成巨大破坏。此时,消防炮

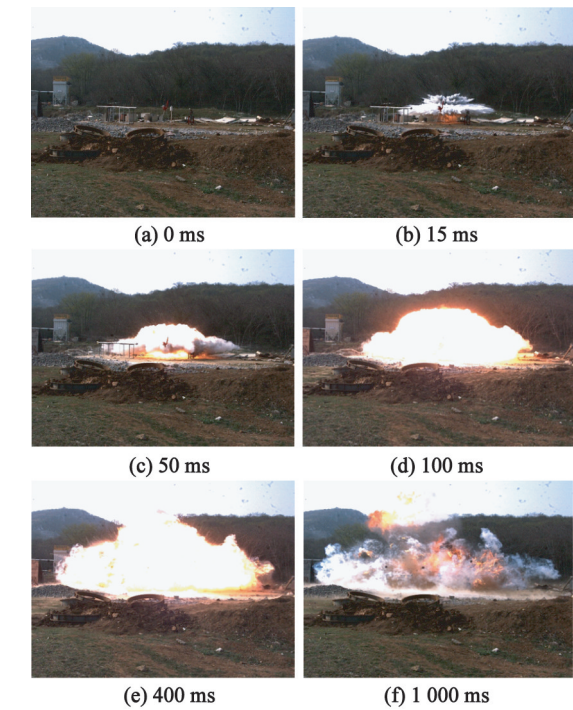


图 3 气云爆炸过程高速摄像记录
Fig. 3 High speed camera images in the process of gas cloud explosion

的抗爆能力主要依靠消防炮的机械强度。随后,消防炮持续受到云雾燃爆火焰的高温作用,高温可持续 800 ms。此时,温度场的持续作用会影响消防炮的耐久性。

2.2.2 爆炸状态场测试结果

1) 冲击波超压场。气云爆炸的冲击波超压见表 3。

表 3 气云爆炸的冲击波超压

Tab. 3 Overpressure of shock waves in gas cloud explosion

距离/m	冲击波超压/kPa
1	93.33
2	129.93
4	85.13
5	75.09
7	53.99

可以看出,消防炮系统的迎爆面冲击波超压约为 95 kPa,压力随着爆心距的增大而先增大、后减小。距离爆心 1 m 处的冲击波超压比较小,这是因为该测点处于云雾中心区域,空气含量相对较少,发生爆燃后的燃烧不充分。压力最大值出现在 2.0 m 处,在此距离内,云雾燃爆会对消防炮造成较大的破坏。

2) 温度场。气云爆炸过程中消防炮炮头和电

机处的温度见图 4。

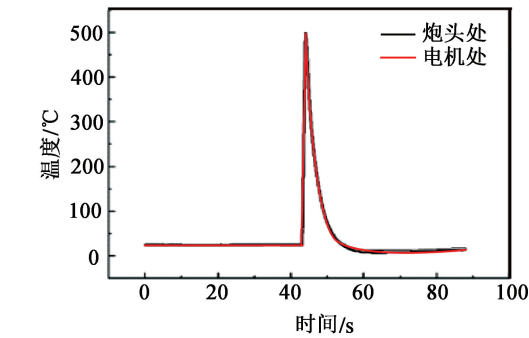


图 4 消防炮周边气云爆炸温度曲线

Fig.4 Temperature around fire cannon in gas cloud explosion

从图 4 可以看出:常规型消防炮炮头处的最高温度为 490.00 ℃;电机处最高温度为 498.75 ℃;温度持续时间均超过 10 s。

2.2.3 气云爆炸前后消防炮状态分析

试验前、后消防炮及关键部件的照片对比如图 5 所示。



图 5 消防炮气云爆炸前、后对比照片

Fig.5 Comparative photos of fire cannon before and after gas cloud explosion

通过系统检查和分析发现,由于消防炮线缆未做金属铠装防爆设计,仅用耐高温管道进行包裹,在压力和高热的耦合作用下,线缆出现破损情况,在发生燃爆事故时极易出现通讯失效和控制失灵的情况。经过功能性测试发现,目前消防炮的远程控制功能和喷水功能正常,但由于线缆破损和控制机构

受强振动冲击,存在失能风险。由于炮头以及电机裸露程度较大,更易受燃爆过程的压力载荷作用,在高温的作用下,出现了电机损坏的情况,此时消防炮将彻底无法使用。

2.3 基于消防炮抗爆试验结果的消防炮防爆措施

根据气云爆炸条件下消防炮抗爆性能研究结果,结合文献调研工作^[12-14],提出消防炮防护要求和结构设计及安装的改进措施如下:

- 1) 为保证发生燃爆事故时可以起到灭火作用,消防炮应安装在距爆心 3 m 以上的位置。
- 2) 消防炮需要固定在地面或其他固定物上,除需用膨胀螺栓固定外,还需对连接处进行加固处理,使消防炮更加牢固。
- 3) 为满足燃爆事故发生时通讯及控制正常,需要对消防炮的连接线缆进行加固处理,以防受到冲击后插头脱落。如焊接、注胶等加固措施。
- 4) 在发生燃爆事故时,消防炮上负责控制转向的电机存在失效的可能,需设计保护装置进行保护,降低冲击波对消防炮的破坏作用。
- 5) 消防炮的连接线缆绑扎成束且固定牢靠,线缆除了进行耐高温处理外,还需进行金属铠装保护设计,以确保在发生燃爆事故时不会出现断裂、短路的情况。

3 结论

围绕特高压输电站变压器安全问题,开展了气云爆炸条件下消防炮抗爆性能研究,得到结论如下:

- 1) 自行设计了变压器油气云爆炸试验装置,并完成了试验效果验证,能够较好地模拟真实变压器爆炸相关参数。
- 2) 针对消防领域常用的消防炮,开展了抗气云爆炸试验,通过冲击波压力、热威力及样品状态对比分析发现,现有消防炮在气云爆炸条件下损伤明显,最薄弱环节在线缆处,安装方式同样需要改进。
- 3) 基于试验研究结果,提出了消防炮防爆措施,用于指导未来抗爆型消防炮的研制。

参 考 文 献

[1] 刘振亚. 中国电力与能源 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
LIU Z Y. Electric power and energy in China [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.

[2] 刘建勇. 特高压直流换流站火灾预防与监测方法 [J].

消防技术与产品信息, 2013(9): 12-16.

[3] 黄孟超, 杨建国. 浅议变压器火灾探测及灭火技术[J]. 科技展望, 2016, 26(20): 122.

[4] 陈现涛, 郭建生, 凤四海, 等. 泡沫枪管径对泡沫发泡性能影响的试验研究[J]. 消防科学与技术, 2018, 37(7): 931-933.

CHEN X T, GUO J S, FENG S H, et al. Experimental study on the influence of diameter of foam nozzle on foam foaming property [J]. Fire Science and Technology, 2018, 37(7): 931-933.

[5] 侯晓静. 消防泡沫(水)炮射程影响因素分析对比研究[J]. 安全、健康和环境, 2020, 20(9): 29-32.

HOU X J. Comparative study on the influencing factors of fire foam (water) cannon range[J]. Safety, Health & Environment, 2020, 20(9): 29-32.

[6] 石荣. 基于 CFD 技术的远射程消防水炮性能优化[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.

SHI R. Performance optimization of a long range fire water cannon on CFD technology [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.

[7] HUMMEL D, IVAN L. Near-field investigation of the explosive dispersal of radioactive material based on a reconstructed spherical blast-wave flow[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2017, 172: 30-42.

[8] ZHENG B, WANG Z F. Primary study on the model of dispersal of the thermobaric explosive [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 246/247: 509-513.

[9] ZHENG B, WANG Z F. The analysis on explosion dispersal mechanism of the thermobaric explosive [C]//2013 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics. Chengdu, 2013: 360-364.

[10] 何超, 栗宝华, 施长军, 等. 圆台形 FAE 装置抛撒初期燃料运动特性研究[J]. 爆破器材, 2021, 50(4): 30-34, 39.

HE C, LI B H, SHI C J, et al. Fuel movement characteristics of cone-shaped FAE device at the initial stage of spreading [J]. Explosive Materials, 2021, 50(4): 30-34, 39.

[11] 尤祖明, 王永旭, 张莹, 等. JP-10 燃料燃爆特性及无约束爆炸状态场参数试验研究[J]. 爆破器材, 2020, 49(3): 49-52.

YOU Z M, WANG Y X, ZHANG Y, et al. Experimental study on explosion characteristics and unconfined blast parameters of JP-10 fuel [J]. Explosive Materials, 2020, 49(3): 49-52.

[12] 陈宝辉, 李波, 吴传平, 等. 特高压变压器消防能力提升设计方案及分析[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(8): 1134-1137.

CHEN B H, LI B, WU C P, et al. Analysis of improvement strategies for the fire extinguishing systems of UHV transformers [J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(8): 1134-1137.

[13] 高振锡, 张凡, 高迪, 等. 特高压直流换流变压器灭火方案探讨[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(8): 1106-1107, 1116.

GAO Z X, ZHANG F, GAO D, et al. Discussion on extinguishing scheme of UHVDC converter transformer [J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(8): 1106-1107, 1116.

[14] 谢永涛, 袁浩, 李同晗, 等. 特高压换流站消防能力提升措施研究[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 241-245.

XIE Y T, YUAN H, LI T H, et al. Research on improvement measures of fire protection capacity for UHVDC converter station [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 241-245.