

换流变压器新型套管洞口封堵抗爆性能试验

程亮, 高湛, 吴必华, 王义鹏

(中南电力设计院有限公司, 武汉 430061)

摘要: 为改进现有换流变压器套管洞口封堵结构性能,设计了一种新型封堵抗爆结构,并通过足尺爆破试验对该结构的抗爆性能进行了试验研究。试验针对3种不同用量的炸药模拟出一般、较大和极限3种超压冲击作用,并进行了外观观测、超压时程和位移时程及残余变形的记录。试验结果表明,该新型封堵抗爆结构,在一般和较大超压荷载下,整体结构和封堵盖板均保持完整,结构实际位移均低于设计要求,表明该新型结构的抗爆能力足以抵御一般及较大超压爆破作用;在极限超压爆破荷载下,结构的位移及变形虽有明显增大,但结构整体保持完整,仅因锚栓脱落造成局部盖板翘曲,说明即使在爆破量较大的极限超压荷载下,该新型结构依然具备相当的抗爆能力。基于本试验可见新型封堵结构抗爆性能优异,后续可通过加强连接的方式进一步加强其抗爆能力。

关键词: 抗爆性能; 爆炸试验; 反射超压; 封堵结构; 套管洞口

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)24-0325-08

换流变压器阀侧套管洞口的封堵是阀厅结构的薄弱环节,换流变压器运行时带有大量的绝缘油,在设备发生故障的情况下,具有发生爆炸事故的可能性^[1]。国内外的直流换流站均发生过换流变压器的爆炸事故,事故轻则导致换流变压器套管洞口封堵的破坏,重则在随后的火灾中进一步引起阀厅结构的倒塌,进而损坏阀厅内设备,严重影响电网运行安全。为提高变压器阀侧套管洞口封堵的抗爆性能,目前已建特高压换流站工程中,设计的封堵抗爆结构,一般以中间方钢龙骨、两侧不锈钢抗冲击板及硅酸铝棉填充形成整体的抗爆窗,再与在阀厅防火墙洞口室外侧设置的主钢框架连接形成防爆封堵抗爆门^[2-4]。典型的阀厅封堵结构的设置,如图1所示。

常规的封堵结构厚度和重量大,在换流变压器就位后的狭小空间安装困难的缺陷,且存在工艺复杂和整体造价较高的不足。本文依托某±1100 kV特高压换流站高端阀厅的换流变压器套管洞口,设计一种新型的换流变压器套管洞口封堵结构,通过工艺优化减轻其结构厚度,从而使该新型结构具备高强轻质和造价低廉、施工方便的优势。为了验证该新型封堵结构的抗爆性能,对其进行了抗爆爆炸

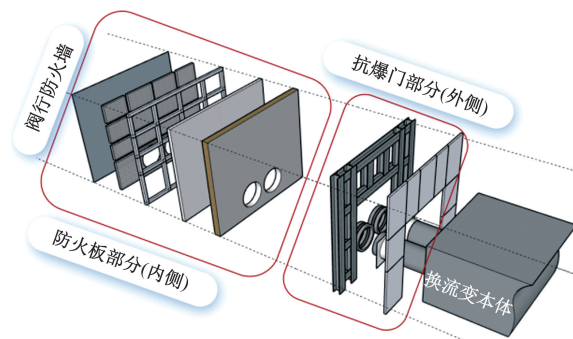


图1 封堵结构布置示意图

冲击试验,对此结构在爆炸引起的一般超压,较大超压和极限超压三种工况下结构变形特性和破坏特征进行了分析,以充分评估新型结构的抗爆能力。

1 新型封堵结构抗爆性能试验研究

1.1 新型封堵结构设计和布置

在传统的封堵结构的基础上,通过优化主钢框架的尺寸,调整钢板的位置和布置,以及删除对抗爆作用较小的刺毡填充等,设计出新型的阀厅换流变压器阀侧套管洞口封堵结构。

传统和新型封堵抗爆结构的细部构造,如图2所示。新型封堵抗爆结构的整体材料用量有了较大的改进,其具体的对比如表1所示。

收稿日期: 2024-06-11

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目(5108-202218280A-2-317-XG)

作者简介: 程亮(1989—),男,湖北黄冈人,硕士,工程师,研究方向为电力工程技术;高湛(1980—),男,湖北武汉人,硕士,高级工程师,研究方向为换流站、变电站等的结构设计;吴必华(1966—),男,湖北武汉人,硕士,教授级高工,研究方向为换流站、变电站等的结构设计;王义鹏(1991—),男,湖北武汉人,研究方向为变电土建设计。

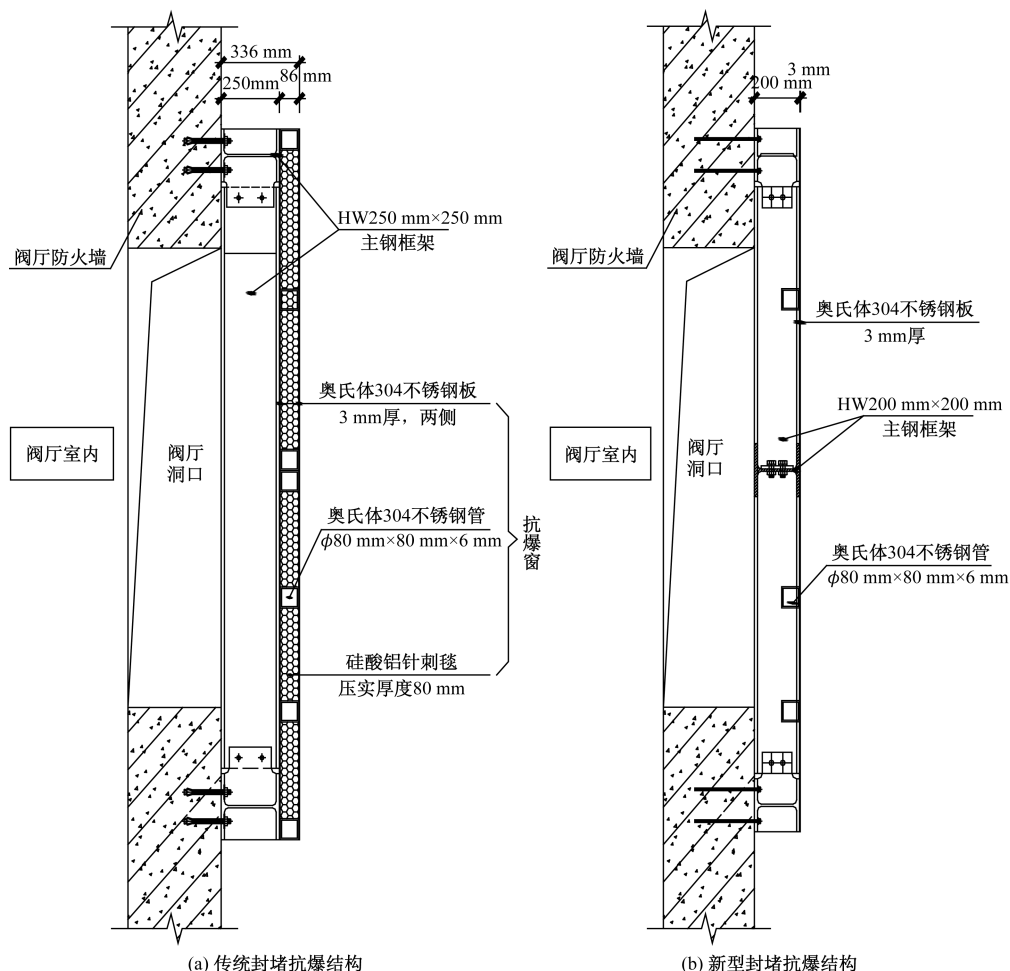


图2 传统及新型封堵结构细部构造

表1 新型换流变压器套管洞口封堵抗爆结构性能提升对比

特性	传统方案	新型方案	性能优化百分比/%
总厚度/mm	203	336	-39.6
综合用钢量/(kg·m ⁻²)	120	190	-36.8
单个构件最大质量/kg	425	1 100	-61.4

改进后的结构是否具有足够的抗爆能力,需要进行试验分析研究。因此,根据某高端阀厅换流变压器阀侧套管洞口(尺寸7.2 m×7.7 m),按新型封堵抗爆结构思路进行设计和布置。封堵结构由主、次框架梁结构及顶部的抗冲击不锈钢板组成,主框架采用HW200 mm×200 mm型钢制作,而次框架采用不锈钢方钢管80 mm×80 mm×6 mm,抗冲击板则采用3 mm厚奥氏体304不锈钢钢板。主框架与阀厅的钢筋混凝土洞口之间采用预埋地脚螺栓或化学螺栓连接,主、次框架之间采用不锈钢螺栓连接。顶部的3 mm厚不锈钢抗冲击板与封堵结构框架之间采用不锈钢自攻螺钉连接,以方便前期安装及满足后期检修拆卸要求。同时,为保证爆炸冲击作用下不锈钢封堵板与龙骨之间连接的可靠性

和整体性,封堵板在洞口附近局部区域采用1×4布置,在其他区域采用2×4布置。整体封堵结构和框架布置和封堵结构上抗冲击钢板的区格划分如图3所示。

1.2 爆炸方案及工况

波作用时间短、荷载大,是一种瞬时荷载^[5-7],本次试验采用球形TNT装药模拟换流变压器绝缘油爆炸对套管封堵结构的冲击波作用,其冲击波产生的超压可按国防工程设计规范中的公式进行估算^[8-10];具体表达式如公式(1)所示。

$$P = \frac{0.082}{r'} + \frac{0.265}{(r')^2} + \frac{0.686}{(r')^3} \quad (1)$$

式中: r' 为比例距离,取值与测点和爆炸中心距离 D (m)和等效的TNT药量 Ge (kg)相关,采用公式(2)进行计算。

$$r' = D/(Ge)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

采用不同炸药用量爆炸以模拟一般超压,较大超压和极限超压3种不同的工况,以研究抗爆结构

的抵抗爆破性能:一般超压(工况 1)采用炸药量为 1.0 kg,爆心几何高度约为 3.2 m;较大超压(工况 2)采用的炸药量为 2.0 kg,爆心几何高度约为 3.0 m;极限超压(工况 3)的采用炸药量为 4.0 kg,爆心几何高度约为 2.8 m。试验采用的爆炸物类型、重量及爆炸几何中心高度如表 2 所示。

1.3 整体结构布置和数据量测

对该新型换流变压器套管洞口封堵结构制作足尺试验模型,考虑到试件安装的便利性,将封堵结构水平覆盖安装于试验台座上。为保证封堵结构

与换流变压器套管间不出现碰撞及附加应力,采用柔性的 3M1000NS 防火密封胶填充二者的间隙。整体试验的布置如图 3 所示,其中整体框架布置参见正视图 4(a),顶部封堵不锈钢顶板布置可参见俯视图 4(b)。

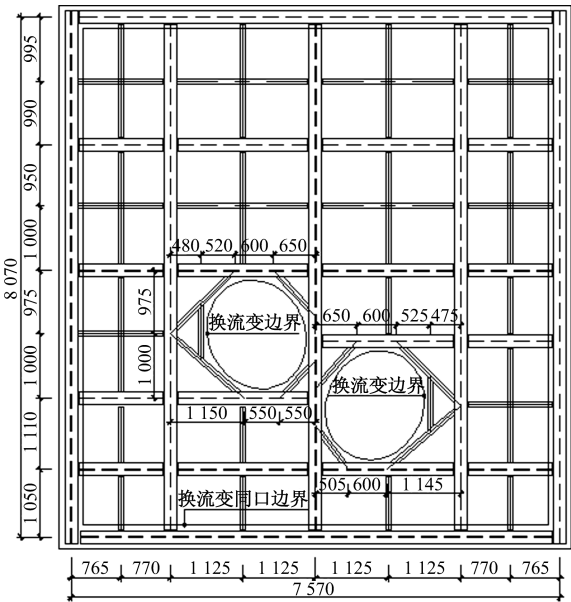
布置完成后在试验装置的四周设置高速摄像机以观测结构外部情况,顶部则利用无人机进行观测记录,利用设置与顶板的 PCB 壁面压力传感器,实测炸药在封堵结构板表面产生的反射超压。对于封堵结构在爆炸冲击作用下的位移采用设置与底部的激光位移传感器进行测量,主要设备布置如图 5(a)所示。盖板处的位移及压力测试点的布置参见图 5(b)的测点布置图。

2 试验结果及分析

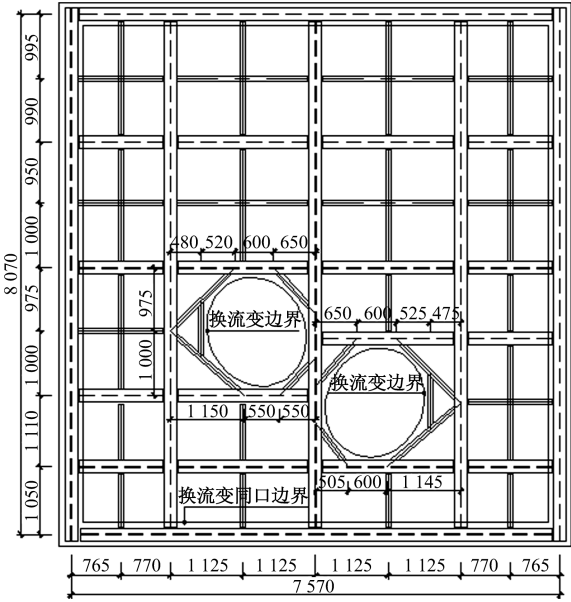
根据 3 种不同工况进行爆破试验,描述试验现

表 2 爆炸试验荷载

试验次序 (工况)	炸药类型	质量/kg	密度/ (g·cm ⁻³)	爆心高度/ mm
1	TNT	1.0	1.6	3200
2	TNT	2.0	1.6	3000
3	TNT	4.0	1.6	2800



单位: mm
(a) 封堵结构主、次框架布置



单位: mm
(b) 封堵结构不锈钢板区格划分

图 3 封堵结构主、次框架及区格划分



(a) 洞口封堵结构正视图



(b) 洞口封堵结构俯视图

图 4 新型换流变压器套管洞口封堵结构试验模型布置

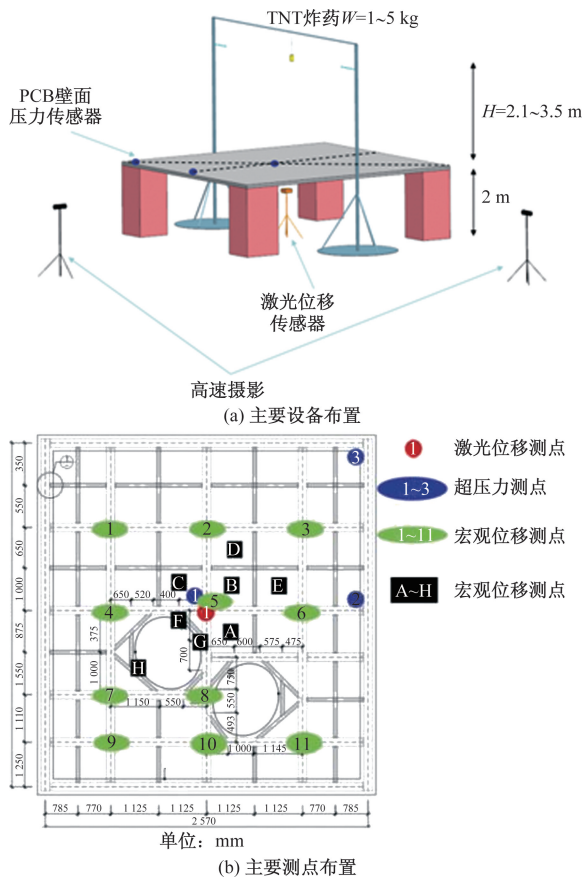


图 5 试验装置及测点布置

象、超压荷载及位移变形等并进行分析。

在一般超压即工况 1 情形下，整体结构的试验现象如图 6(a)所示，顶部盖板及连接栓钉在试验后的状态如图 6(b)和 6(c)所示。

图 6 显示整体结构在爆炸后未出现可见的破损，结构及构件保存完好，而封堵结构未出现明显变形，连接的栓钉也保持牢固状态，未出现脱落及断裂，综合而言，新型套管洞口封堵结构一般超压荷载作用下外观未出现可见破坏和明显变形。

工况 1 情形下 1 号～3 号超压测点的压力时程曲线如图 7(a)所示，位移时程曲线如图 7(b)所示。

根据超压时程及位移时程图显示，封堵结构板中心、边部中心及角部最大反射超压值分别为 248、175 和 112 kPa；宏观上框架 10 号测点残余位移（8 mm）为最大；封堵结构板测点最大残余位移为 13 mm，出现在两个洞口之间；爆炸过程中框架中心点的最大位移为 18 mm，残余位移为 0.89 mm。超压和位移时程所体现的整体结构变形特性进一步证明了外观观测结果。

由工况 1 试验可得，在适量炸药作用产生的一般超压 $P \leq 248$ MPa 冲击下，封堵结构框架的最大



(a) 整体试验现象



(b) 封堵盖板形态



(c) 连接栓钉形态

图 6 工况 1 下试验现象及封堵盖板、连接栓钉形态

变形为 18.0 mm(挠跨比 1/428)，远远小于挠跨比 1/200 的基本要求，且整体结构、构件及连接件均未出现损坏，显示在一般超压冲击下的结构良好的承载能力，并具备一定的安全储备。

在较大超压即工况 2 情形下，整体结构的试验现象如图 8(a)所示，顶部盖板及连接栓钉在试验后的形态如图 8(b)和 8(c)所示。由图 8 所示的整体结构和各个构件的状态特性，可知整体结构在工况 2 即较大超压下，依然保持了整体结构的完好，结构及构件均未出现明显的破坏，封堵结构的直接位移较小，且与工况 1 相比，未出现可见的残余变形增量。大部分连接的栓钉保持完好，但有极个别栓钉在冲击荷载下，因抗拔能力不足出现少量脱落。总

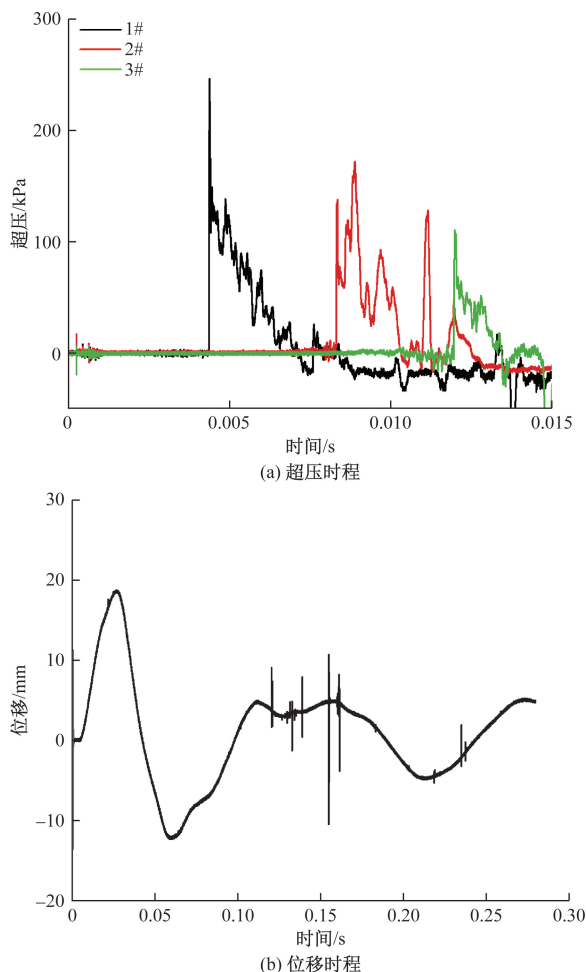


图 7 工况 1 下超压时程和位移时程

体而言,新型套管洞口封堵结构在较大超压荷载作用下整体变形较小,极个别连接部位的应力和变形略大。

工况 2 情形下 1#~3# 超压测点的压力时程曲线如图 9(a)所示,位移时程曲线如图 9(b)所示。根据图 9 显示的相关数据,封堵结构板中心、边部中心及角部最大反射超压分别为 337、292 和 116 kPa;宏观上框架 10# 测点残余位移(17 mm)为最大;封堵结构板测点最大残余位移为 14 mm,出现在洞口右上方;爆炸过程中框架中心点的最大位移为 36.3 mm,残余位移为 1.8 mm。超压和位移时程所体现的整体结构变形特征与外观观测结果基本一致。

由工况 2 试验可知,在超量炸药作用产生的较大超压 $P \approx 337$ MPa 冲击下,封堵结构框架的最大变形为 36.3 mm(挠跨比 1/212),依然未超过挠跨比 1/200 的基本要求,且整体结构完好,显示该新型封堵抗爆结构在一般超量爆破产生的较大超压作用下,依然保持了较好的承载能力,且还有少量的



(a) 整体试验现象



(b) 封堵盖板形态



(c) 连接栓钉形态

图 8 工况 2 下试验现象及封堵盖板、连接栓钉形态

安全储备以供略大荷载作用。

在极限超压即工况 3 情形下,整体结构的试验现象如图 10(a)所示,顶部盖板及连接栓钉在试验后的形态如图 10(b)和 10(c)所示。在工况 3 下,整体结构出现了较为明显的变形,框架整体的位移和残余变形较工况 2 有了明显的增加,但结构自身尚未出现引起结构破坏的断裂或损伤。封堵结构板的位移和残余变形也有了增加,且一处角部板件因连接构件脱落引起翘曲。栓钉损坏及脱落较为明显,连接性能的下降也导致了整体抗爆能力有所下降。

如图 11 所示,封堵结构板中心、边部中心及角部最大反射超压分别为 737、601 和 382 kPa;宏观

上框架10#测点残余位移(14 mm)为最大;封堵结构板测点最大残余位移为19 mm,出现在左侧洞口正上方;爆炸过程中框架中心点的最大位移为77.0 mm,残余位移为9 mm。超压和位移时程也表明在此工况下,局部连接件的破坏增加了整体结构的位移和封堵钢板的变形,但并未对结构整体产生致命破坏,其结论与观测的试验现象一致。通过以上描述和记录,对3次爆炸试验过程中封堵结构板表面产生的反射超压荷载,框架结构最大位移,以及框架及盖板的残余变形进行汇总,如表3所示。

工况3情形下1#~3#超压测点的压力时程曲线如图11(a)所示,位移时程曲线如图11(b)所示。

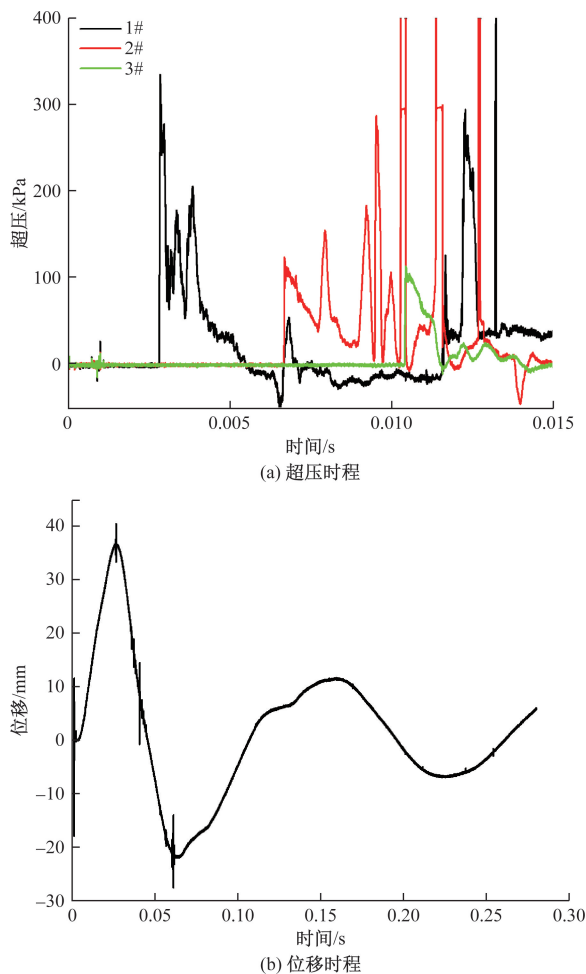


图9 工况2下超压时程和位移时程

由工况3试验可知,在极限当量炸药作用产生的极值超压 $P \approx 740$ MPa爆炸冲击作用下,封堵结构框架的最大变形达到挠跨比1/100,结构整体变形明显,但依然保持了较好的完整性,整体结构并未在突加的超量荷载下完全丧失承载能力;极限超压荷载下最易产生破坏的部位为板格四角的连接处,但顶板自身的破坏较小,不同超压的爆炸冲击作



(a) 整体试验现象



(b) 封堵盖板形态



(c) 连接栓钉形态

图10 工况3下试验现象及封堵盖板、连接栓钉形态

表3 抗爆试验主要结果汇总

爆炸最大超压/kPa	框架最大位移/mm	框架残余变形/mm	钢板残余变形/mm	整体情况
248	18.0	0.89	13	结构完好
337	36.3	1.8	14	结构无明显变形,少数铆钉掉落
740	77.0	9.0	19	变形明显,但整体结构未明显破坏,较多铆钉掉落,一块板掀起

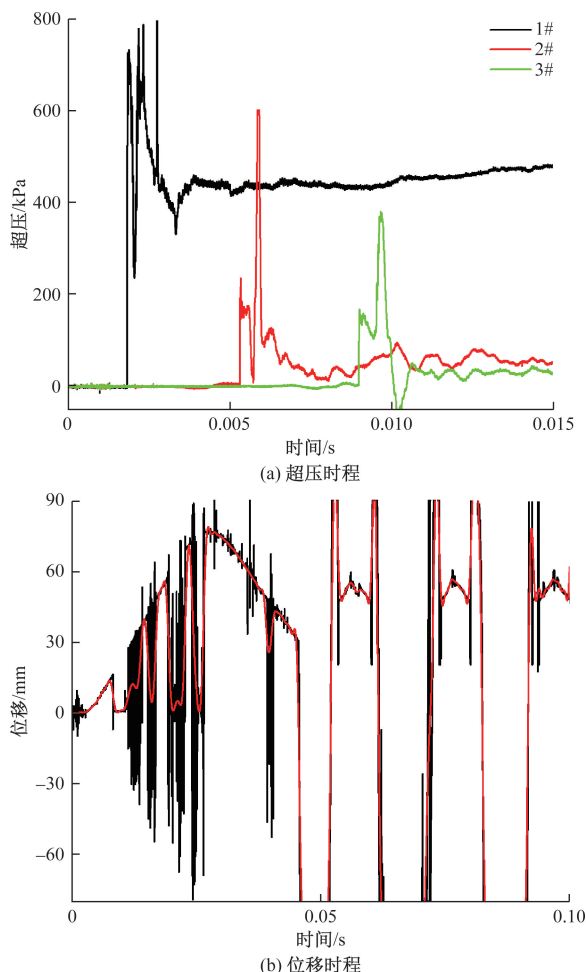


图 11 工况 3 下超压时程和位移时程

用下,不锈钢板最大残余变形为 13~19 mm。整体结构抗爆性能的提升依赖于连接节点的性能与能力。

3 结论

通过对已建工程的总结和设计优化,提出一种结构简单、布置合理的新型换流变压器套管洞口封堵抗爆结构。该结构较常规方案在厚度和重量上有了明显的提升,为验证此新型封堵抗爆结构实际抵抗冲击能力,利用爆炸试验对其在爆炸冲击作用下的超压、变形及破坏性能进行分析,得出以下结论。

(1)在引起一般超压的爆炸当量的冲击下,整体结构完整性良好,框架位移较小,远低于一般抗爆结构中挠跨比的要求。框架自身抗冲击板的残余变形均较小,在一般超压爆炸冲击下,新型换流变压器套管洞口封堵结构的具有良好的变形特性和抵抗破坏能力,并具备足够安全储备。

(2)在产生较大超压(约 1.35 倍一般超压)爆炸

当量作用下,框架的位移增加较为明显,但整体结构依然保持完好,未出现明显变形,仅个别连接构件出现脱落,说明在超过一定程度超压的情况下,封堵结构依然具备较好的力学性能。

(3)在导致极限超压(约 3 倍一般超压)的爆炸当量影响下,整体框架变形明显,其最大位移和残余变形为一般超压产生位移的 4 倍及 10 倍,即便如此整体结构依然未出现明显的破坏和对结构产生明显影响的损伤,仅在局部的部分构件产生与主结构的分离,部分连接构件脱落,体现出新型洞口封堵结构在偶然极限作用下依然具备相当的承载能力。

(4)顶部的抗冲击钢板在整个爆破试验过程中,整体位移和变形较小,具备在爆炸中保护封堵结构及设备能力,但部分角部的连接栓钉在极限爆炸作用下破坏较为明显,对该新型结构的进一步改良应着眼于连接栓钉,尤其是角部栓钉的改进和加强。采用板件局部加厚和选用强度等级更高的高强螺栓,应能从一定程度上对结构的抗爆性能有所改良。

新型换流变压器套管洞口封堵抗爆结构通过试验验证分析,体现出其在爆破引起的一般超压,较大超压和极限超压情形下,均具备出色的抗爆特性,能极有效经受换流变压器爆炸的冲击,保护其后的防火封堵结构。试验成果可为已建特高压换流站的改造和后续新建换流站项目的换流变压器套管洞口,以及其他有防爆要求的洞口封堵抗爆结构提供有力支撑数据,对已投运及新建换流站的安全生产运行具有十分重要的意义。

参考文献

- [1] 孙勇,朱建新. 换流变压器套管爆炸事故原因分析[J]. 南方电网技术, 2008, 2(5): 71-88.
- [2] 赵李源. 换流变压器阀侧套管洞口抗爆设计研究[J]. 价值工程, 2020, 39(30): 149-150.
- [3] 钟波,赵长征,张泽江,等. 在运换流站阀厅防火封堵系统加强技术研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(3): 357-360.
- [4] 赵欣宇,杨黎波,董一夫,等. 变压器油蒸气爆炸与泄爆过程数值模拟[J]. 工业安全与环保, 2020, 39(3): 31-35.
- [5] BLASKO J, SOH T B, ASTARLIOGLU S, et al. Pressure-impulse diagrams for the behavior assessment of structural components[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(8): 771-783.
- [6] Task committee on Blast-Resistant Design. ASCE 41088

- Design Of Blast-Resistant Buildings In Petrochemical Facilities[M]. American Society of Civil Engineers, 2015.
- [7] 黄思远. 石油化工抗爆控制室结构设计[J]. 化工管理, 2020(11): 181-182.
- [8] 张玉磊, 陈华, 袁建飞, 等. 爆炸冲击波超压非均匀分布特性及最优测点数量[J]. 兵工学报, 2024, 45(3): 744-753.
- [9] 王沿朝, 赵志鹏, 强洪夫, 等. 城市典型地下人防工程外爆性能评估研究进展[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(32): 13631-13644.
- [10] 党蒲妮, 吕锦锋, 王斌. 空中爆炸冲击波下结构动响应及其抗冲击波设计研究进展[J]. 应用力学学报, 2023, 40(4): 733-744.

Blast-Resistant Performance Test Research on New Bushing Hole Closure of Converter Transformer

CHENG Liang, GAO Zhan, WU Bihua, WANG Yipeng

(Central Southern China Electric Power Design Institute, Wuhan 430061, China)

Abstract: To improve the sealing structure performance of the existing converter transformer casing hole, a new sealing and explosion-proof structure was designed. The anti-explosion performance of the structure was analyzed through full-scale blasting tests. The experiment simulated three types of overpressure impact effects, namely general, large, and ultimate, based on three different amounts of explosives, and the appearance, overpressure time history, displacement time history, and residual deformation records was observed. The results indicate that the new sealing and anti explosion structure maintains integrity in both the overall structure and the sealing cover plate under general and large overpressure loads, and the actual displacement of the structure is lower than the design requirements, indicating that the anti explosion ability of the new structure is sufficient to withstand general and large overpressure blasting effects. Under extreme overpressure blasting loads, although the displacement and deformation of the structure have significantly increased, the overall structure remains intact, with only partial cover plate warping caused by anchor bolt detachment. This indicates that even under extreme overpressure loads with large blasting quantities, this new structure still has considerable blast resistance. Based on this experiment, it can be found that the new sealing structure has excellent anti explosion performance, and its anti explosion ability can be further strengthened by strengthening the connection in the future.

Keywords: anti-explosion performance; explosion test; reflection overpressure; sealing structure; converter transformer bushing hole