DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.12.013

基于有限元分析共箱隔离开关壳体设计

史春玲,刘　刚,苏　戈,刘　分,赵艳涛,秦晓宇
(河南平芝高压开关有限公司,河南 平顶山 467013)

摘　要:随着铸造工艺在电力行业中的广泛推广,越来越多的小型化、低成本高压容器应运而生。为实现 GIS(gas insulated switchgear)型隔离开关紧凑型设计的目的,通过对有限元计算后的壳体进行强度分析,完成了三相共箱隔离开关的壳体设计。结果表明,该壳体通过了水压破坏试验的验证,满足了紧凑型 GIS 的开发目的。

关键词:高压容器;铸造铝合金;有限元分析

中图分类号:TG247　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)12-1153-03

Shell Design of Common Box Isolation Switch Based on Finite Element Analysis

SHI Chunling, LIU Gang, SU Ge, LIU Fen, ZHAO Yantao, QIN Xiaoyu
(Henan Pingzhi High-voltage Switchgear Co., Ltd., Pingdingshan 467013, China)

Abstract: With the wide spread of casting technology in the power industry, more and more small, low cost high pressure vessels emerge. In order to realize the purpose of GIS (Gas Insulation Switchgear) type isolation switch compact design, the design of three-phase common-box isolation switch was completed through the strength analysis of the shell after finite element calculation. The results show that the shell has passed the test of water pressure failure and satisfies the development purpose of compact GIS.

Key words: high pressure vessel; cast aluminum alloy; finite element analysis

随着国家电力输变电设备需求的增长,高压开关中相当批量的焊接铝合金壳体逐渐向铸造铝合金耐压壳体转化[1],其承受的压力均为内部绝缘介质的作用。由于铝合金铸件的性能受到合金的成分、变质方法、凝固过程和热处理、铸件的结构等诸多因素的影响,铸件的合理设计对材料的合理应用及企业成本的有效控制具有重要现实意义[2,3]。

考虑到吸附剂、防爆膜、传动机构等,隔离开关壳体上开孔较多,铸件结构复杂。另外,三相共箱壳体体积较大、结构笨重,在成本控制的基础上,设计难度更大。单层耐压容器的设计,焊接圆柱筒体的计算结果不能直接用于强度计算。因此,三相共箱隔离开关壳体破坏压力的计算可以采用有限元法处理[4-8]。根据有限元解析的结果,同时考虑铸造工艺的影响因素,结合应力应变测试,对三相共箱隔离开关壳体进行了水压破坏试验,验证了计算结果。

收稿日期:2020-10-20
基金项目:河南平芝高压开关有限公司自筹项目(PGKJ2018-102)
作者简介:史春玲(1991-),女,河南平顶山人,助理工程师,硕士.主要从事气体绝缘金属封闭开关开发.
电话:15617371238,E-mail:15617371238@163.com

1　壳体应力求解

三相共箱隔离开关壳体三维模型如图 1 所示。额定气压 0.5 MPa,工作介质为 SF_6 气体。由于温升等因素影响,设计压力取 0.65 MPa。壳体材料硅镁铝合金,弹性模量为 71.7 GPa,泊松比为 0.3,法兰连接处螺栓对压力容器的作用力为 F=36 kN。

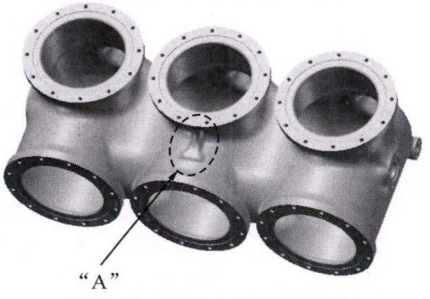

图 1　三相共箱隔离开关箱体
Fig.1 Common box for three-phase disconnect switch

利用 ANSYS 有限元分析软件对该壳体进行应力分析,施加以上边界条件等,获得该压力容器在内压力及外部机械载荷综合作用下的应力分布情况,如图 2 所示。根据应力解析结果,找出受载后的危险截面(点)以及相应的最大应力值,依次分析判断此处结构设计是否可靠,为产品的结构优化提供支撑。

图 2 ANSYS 解析结果
Fig.2 Analysis results of ANSYS software

2 应力分布与结果分析

应力集中问题是设计和使用中从安全角度所考虑的重要因素。通常,应力集中现象出现在高压容器的不连续区域[9,10]。不连续区域的几何形状较为复杂,主要特点为破坏高压容器结构的完整性和减小高压容器承载面积,对安全性能造成很大影响。因此,三相共箱隔离开关壳体的主筒体应避免平板设计,采用了多段圆弧平滑过渡的形式,见图 3。图 3 为主筒体的横截面,壳体在均匀内压为 P=0.65 MPa 作用下发生变形,由于圆弧相切,壳体内部抵抗这种变形产生法向力(即薄膜应力),而弯曲应力相比很小,可忽略。同时,圆滑过渡的形式使壳体壁厚相对均匀,非常有利于铸造过程中浇道设置等工艺选择,可有效避免缩松、砂眼等铸造缺陷。

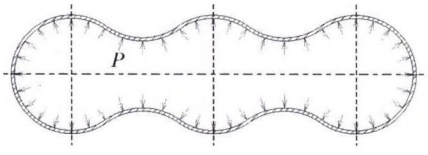

图 3 主箱体截面
Fig.3 Section of main box

如图 1 所示的 A 部为 2 个垂直筒体过渡处,且为三相共箱结构的中间部位。随着 SF_6 气体压力的增大,该区域所产生的应力明显增大,很有可能导致容器失效,是应力分析的关键部位。对局部应力较大处作较详细的应力分析和强度评定,这是确保高压容器安全运行必不可少的关键。应力分类准则是目前工程设计普遍应用的方法[11-13]。

应力分析方法按照应力的不同性质分为 3 类,见表 1 所示。这 3 种应力对应容器在 3 种不同加载条件下存在的 3 种强度问题:①一次应力对应静力强度;②二次应力对应安定性;③峰值应力对应疲劳强度。一次应力强度是结构在机械载荷作用下的最基本强度,也决定了壳体的基本厚度。

表 1 为应力分类及应力强度情况,S_{I}:一次总体薄膜应力强度;S_{II}:一次局部薄膜应力强度;S_{III}:一次薄膜(总体或局部)加弯曲应力强度;S_{IV}:一次加二次应力强度;S_{V}:峰值应力强度;S_{m}:容器元件材料在试验温度下的设计应力强度。S_{a}:在所考虑条件下,以给定的循环次数运用设计疲劳曲线所得之应力幅值。

应力分类线性化分析是国内设计单位主要采用的设计方法。对三相共箱隔离开关壳体的解析结果进行线性化分析,结果如表 2 所示。

铸造铝合金(金属模)许用应力取 59 MPa。此处为不连续区域,应力判据为 1.5 倍许用应力,即 88.5 MPa。由此可见,存在 2%的厚度范围,应力超出极限值。

3 试验验证

根据设计分析的结果,铸造样品进行水压破坏

表 1 应力分类及应力强度极限值[14]
Tab.1 Stress classification and stress intensity limit value

应力种类	一次应力(仅由机械载荷引起)			二次应力	峰值应力
	总体薄膜	局部薄膜	弯曲		
说明	沿实心截面的平均一次应力。不包括不连续和应力集中。	沿任一实心截面的平均应力。考虑不连续但不包括应力集中。	和离实心截面的距离成正比的一次应力分量。不包括不连续和应力集中。	为满足结构连续所需要的自平衡应力。发生在结构的不连续处,可以由机械载荷或热膨胀差引起的。不包括局部应力集中。	(1)因应力集中(缺口)而加到一次或二次应力上的增量。(2)能引起疲劳但不引起容器形状变化的某些热应力。
符号	P_{m}	P_{L}	P_{b}	Q	F
应力分量的组成和应力强度的许用极限	P_{m}				
	$S_{\mathrm{I}} \leqslant S_{\mathrm{m}}$	P_{L}	$P_{\mathrm{L}}+P_{\mathrm{b}}$	$P_{\mathrm{L}}+P_{\mathrm{b}}+Q$	$P_{\mathrm{L}}+P_{\mathrm{b}}+Q+F$
	——用设计载荷	$S_{\mathrm{II}} \leqslant 1.5\,S_{\mathrm{m}}$	$S_{\mathrm{III}} \leqslant 1.5\,S_{\mathrm{m}}$	$S_{\mathrm{IV}} \leqslant 3\,S_{\mathrm{m}}$	$S_{\mathrm{V}} \leqslant S_{\mathrm{a}}$
	- - - 用工作载荷				

表2 线性化分析结果
Tab.2 Results of linearization analysis

长度 /mm	薄膜强度 /MPa	弯曲强度 /MPa	薄膜+弯曲强度 /MPa	合计 /MPa
0.00	54.19	43.27	89.97	116.68
0.26	54.19	41.46	88.17	112.59
0.51	54.19	39.66	86.38	107.35
……	……	……	……	……
11.74	54.19	39.66	45.10	47.20
12.00	54.19	41.46	44.90	47.04
12.25	54.19	43.27	44.82	46.88

试验。为保证铸造壳体内应力的释放，先在壳体内部充入2倍设计压力的水，并保压12 h。随后，泄压至额定压力0.5 MPa，再按10%的加压步长逐步升压[15]。水压破坏试验的同时，根据ANSYS解析的结果，在壳体表面布置应变测点，同步监视壳体关键部位的应力变化。其测点布置情况见图4。

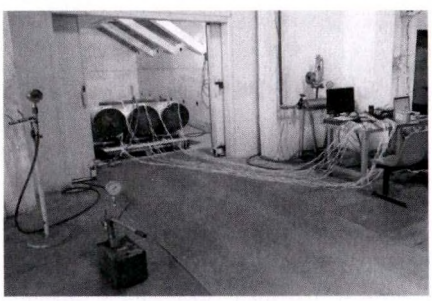

图4 应变测试
Fig.4 Strain test

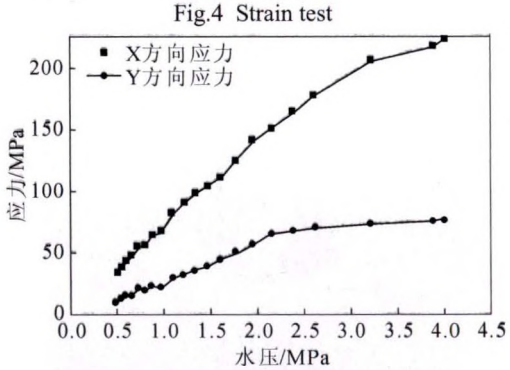

图5 应力变化趋势
Fig.5 Trend of stress change

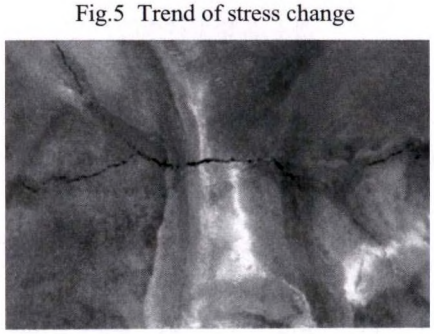

图6 实际裂纹扩展位置
Fig.6 Actual crack propagation location

按照GB7674-6.103的要求，铸造的铝壳体水压破坏试验压力是设计压力的5倍。该三相共箱壳体的设计压力为0.64 MPa，水压破坏试验需要达到3.2 MPa。试验结果为壳体在4.0 MPa时破裂，破裂位置正是ANSYS解析应力最大的部位——A部（如图1所示），二者结果吻合。

4 结论

根据试验结果，三相共箱壳体的结构设计是可行的。

(1)三相共箱隔离开关壳体采用多段圆弧光滑过渡，有效增强其强度。

(2)对于特别不连续区域，可通过局部补强，有针对性的改善应力集中。

(3)对于不规则的高压容器，进行应力分类线性化分析行之有效。

参考文献：

[1] 张猛，陈丽芬. 高压开关设备中铝合金铸造工艺发展综述[J]. 高压电器，2011，47(4):75-83.

[2] 方小汉，吴双，周芳，等. 高压开关中铸造铝壳体破坏压力的计算[J]. 高压电器，2010，46(8):66-69.

[3] 教富川. 隔离开关壳体金属型低压铸造件缺陷分析[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2012.

[4] 王聪. GIS管母线力学特性的有限元分析与研究[D]. 山东大学，2014.

[5] 唐海峰，黄勤，丁祎，等. 基于ANSYS的压力容器应力分析[J]. 制造业自动化，2013，35(08):1-2，5.

[6] 高忠大. 高压容器平盖区域有限元应力分析[D]. 石家庄：河北科技大学，2011.

[7] 侯月玲，李育文，王宁，等. 基于ANSYS的GIS壳体应力分析研究[J]. 煤矿机械，2009，30(4):53-55.

[8] 陈孙艺. 压力容器有限元分析建模中值得关注的几个工程因素[J]. 压力容器，2015，32(5):50-57，17.

[9] 陈连，樊艳. 压力容器可靠性优化设计研究[J]. 工程设计学报，2005，12(1): 39-40

[10] Zheng Jinyang. Design philosophy of flat ribbon wound layered pressure vessel [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1998, 75(1): 57-61.

[11] 桑如苞. 壳体局部弯曲应力的分类及其一次结构法 [J]. 压力容器, 2001(02):23-29，37.

[12] 万兴. 压力容器分析设计的安定性载荷计算方法 [J]. 化工设备与管道, 2015, 52(03):28-32，39.

[13] 陆明万，寿比南，杨国义. 压力容器应力分析设计方法的进展和评述[J]. 压力容器，2009，26(10):34-40.

[14] JB4732—1995. 钢制压力容器———分析设计标准[S].

[15] 王亚鸽，苏戈，王春艳，等. 新型252kV GIS隔离开关铸造壳体压力-应力试验研究[J]. 铸造技术，2016，37(1):196-199.