

复合材料压力容器封头连接的建模及失效分析

王冰冰, 林木, 孟祥瑞

(大连海洋大学, 辽宁 大连 116023)

摘要:为验证某航空飞行器复合材料压力容器封头连接形式与结构的合理性,采用有限元分析方法研究复合材料封头连接的失效机理。通过对不同内压作用下的压力容器封头连接应变变化进行比较分析,发现螺栓强度、材料强度、螺栓宽径比等因素均会影响压力容器封头连接的失效破坏,这为复合材料压力容器封头连接结构的设计提供了理论依据。

关键词:复合材料;压力容器封头;结构强度;失效机理

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)05-0088-03

Modeling and Failure Analysis of Head Connection of Composite Material Pressure Vessel of Aircraft

WANG Bingbing, LIN Mu, MENG Xiangrui

(Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: To verify the rationality of the head structure of composite pressure vessel of an aircraft, the finite element analysis method is applied to study the failure mechanism of composite head structure. Through comparative analysis of the strain changes of the pressure vessel head connection under different internal pressures, it is found that the bolt strength, material strength, bolt width-to-diameter ratio and other factors will affect the failure of the pressure vessel head connection, which provides a theoretical basis for the design of the connection structure of the composite pressure vessel head.

Keywords: composite material; pressure vessel head; structural strength; failure mechanism

0 引言

复合材料具有较高的比强度与比刚度,在航空航天领域的应用非常广泛^[1-3]。在复合材料结构件的应用中存在各种结构连接,并且这些结构件的失效大多发生在连接位置上。封头连接位置的强度对于整个压力容器的耐久性及稳定性意义重大。因此,复合材料压力容器封头连接的破坏过程分析及失效机理研究是复合材料工程应用过程的重要问题^[4]。目前,国内外研究人员对于复合材料压力容器封头连接结构的失效分析大多采用有限元分析方法。有限元分析的原理主要是通过材料退化建模及非线性方程求解^[5]。在有限元渐进损伤分析原理方面,崔浩等^[6]、PISANO A A等^[7]通过研究复合材料接头损伤破坏,发现复合材料接头主要是剪切和拉断失效。黄河源等^[8]研究了非线性面内损伤,并提出了三维混合失效模型,可将其用于模拟复合材料厚板螺栓连接的失效过程。综上所述,有限元分析方法已广泛用于复合材料连接结构失效的研究过程中。因此,为了对复合材料压力容器封头连接结构进行合理性研究,本文采用有限元分析软件 ANSYS 建立实验模型并对其进行计算仿真,从而分析复合材料压力容器封头连接结构的破坏形式和失效强度,为复合材料压力容器封头连接结构的设计提供理论依据。

1 研究方法

1.1 压力容器封头材料与结构

该航空飞行器压力容器封头(以下简称为封头)采用国内某复合材料,材料弹性模量等参数根据压力容器封头试样的性能试验确定,等效弹性模量为 45 GPa、泊松比为 0.29。其压力容器封头结构如图 1 所示。



图 1 压力容器封头结构

该封头是使用沿圆周方向 28 个均布孔通过螺栓连接实现与堵盖之间安装和固定的,属圆周对称结构,因此在分析过程中为了减少计算量并对模型进行简化,选取 1/14 扇形区域进行分析。封头连接的强度不仅会受材质强度的影响,同时也会受结构尺寸效应、预紧力、搭接形式、螺栓选择、端径比等因素影响。因此在封头与螺栓的连接螺

基金项目:辽宁省高等学校科学研究项目(Q1201720)

第一作者简介:王冰冰(1982—),男,辽宁东港人,硕士,研究方向为机械产品结构优化设计。

套采用台阶形式设计,这种结构能更好地承受螺栓的轴向载荷。封头链接形式如图 2 所示,其中堵盖、螺栓、螺套的材料为 30CrMnSiA,等效弹性模量为 205 GPa,泊松比为 0.25。

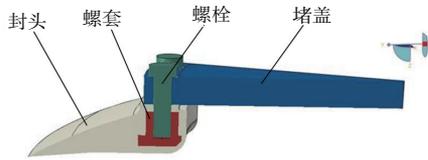


图 2 压力容器封头的链接形式

1.2 压力容器封头有限元模型

通过 ANSYS 有限元分析软件建立封头连接结构的有限元模型。网格采用四面体、六面体类型,单元尺寸分别是 3 mm、5 mm 和 4 mm。如图 3 所示共有 43 871 个单元,32 256 个节点,材料属性按照上文提到的分别对封头、堵盖、螺栓、螺套进行材料设置。边界条件如图 4 所示,为封头外表面固定,并在两侧施加对称边界条件;堵盖的下表面与封头的上表面添加面接触摩擦系数为 0.02。



图 3 封头螺栓连接网格模型

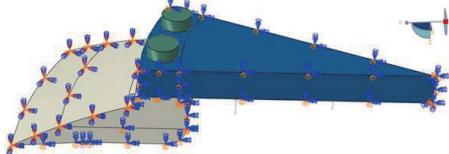


图 4 载荷和边界条件示意图

承压分析过程按照美国材料实验学会测试标准 ASTM D6742 执行^[9]。为了测试复合材料压力容器封头结构的强度,根据实际工作中堵盖承受 10.2 MPa 压力,本文模拟了两种工况:其一,根据实际工作压力对堵盖内表面施加内压 10.2 MPa;其二,对堵盖内表面进行 15% 的过载施加内压 14.1 MPa,进行计算。

2 结果与讨论

2.1 压力容器内压 10.2 MPa 计算结果

压力容器封头在 10.2 MPa 内压的作用下,顶盖中心位置拱起的最大位移约为 2.5 mm。连接螺栓承受拉弯耦合作用,在螺栓端头帽下方发生了塑性变形,最大塑性应变如图 5 所示,为 1.42%。在钢螺套与封头连接区内,两个台阶部位主要承受来自螺栓的拉弯载荷。通过分析可以发现封头与钢螺套的连接部位受力并不均匀,靠近外侧

应力较大,从轴向应变数据来看,螺套连接处的上台阶面附近拉应变约为 4 600 $\mu\epsilon$ 。

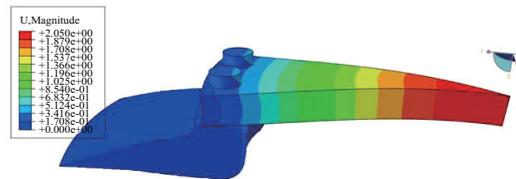


图 5 内压 10.2 MPa 作用下整体位移分布

2.2 压力容器内压 14.1 MPa 计算结果

压力容器封头在 14.1 MPa 内压作用下,顶盖中心位置拱起的最大位移约为 3.5 mm。连接螺栓主要承受拉弯耦合作用,在螺栓端头帽下方发生了塑性变形,最大塑性应变如图 6 所示,为 3.4%。钢螺套与封头连接区,两个台阶部位主要承受来自螺栓的拉弯载荷。通过分析可以发现压力容器封头与钢螺套的连接部位受力并不均匀,靠近外侧应力较大,螺套连接处的台阶面附近拉应变约为 6 200 $\mu\epsilon$ 。

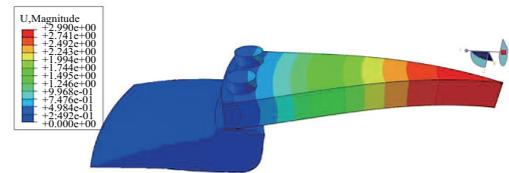


图 6 内压 14.1 MPa 作用下整体位移分布

2.3 压力容器封头的破坏模式

复合材料连接的挤压失效是发生在局部的失效,不会引起大面积崩溃失效,相对来讲是较为安全的失效形式。因此,在复合材料螺栓结构的设计中,应尽可能地使用构件发生挤压失效或包含挤压失效的组合失效模式,从而保证结构具有较高的稳定性和安全性^[10]。如图 7 所示,在压力容器封头承压对比实验中,螺栓连接的轴向应变随内压的增加逐渐变大,强度破坏风险也逐渐增加。

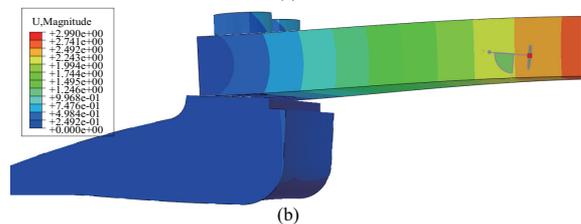
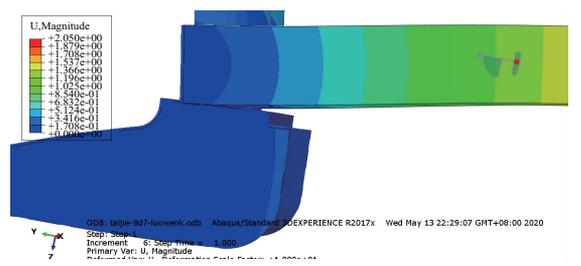


图 7 压力容器应变分布对比

3 结语

通过有限元分析方法研究压力容器封头连接结构的失效过程,分析复合材料压力容器封头连接的失效机理,发现其中螺栓强度、材料强度以及螺栓宽径比等因素,均会对压力容器封头的失效过程产生影响,以此可为压力容器封头连接结构设计提供了一种理论参考依据。

1)压力容器封头的台阶式螺套传力较为合理,该结构形式不容易从基体中拉脱,是较为合理的结构形式。

2)压力容器封头在 10.2 MPa 内压作用下,螺栓塑形应变为 1.42%,塑性区占整个剖面的比例较小,无强度风险。封头与螺套的连接区,靠近上台阶附近轴向应变约为 4 600 $\mu\epsilon$ 。

3)压力容器封头在 14.1 MPa 内压作用下,螺栓塑形应变为 3.4%,塑性区基本贯穿整个剖面,螺栓有一定强度破坏风险。封头与螺套的连接区,靠近上台阶附近轴向应变约为 6 200 $\mu\epsilon$ 。

参考文献:

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报,2007, 24(1):1-12.
- [2] DANILOV A I. Some aspects of CFRP steel structures reinforcement in civil engineering[J]. Procedia Engineering,2016,153:124-130.

- [3] VERZHBOVSKIY G B. Method of composite materials characteristics forecasting[J]. Procedia Engineering,2016,150:1831-1836.
- [4] 高佳佳,楚珑晟. 纤维增强树脂基复合材料连接技术研究现状与展望[J]. 玻璃钢/复合材料,2018(2):101-108.
- [5] MANES A, GILIOLI A, SBARUFATTI C, et al. Experimental and numerical investigations of low velocity impact on sandwich panels[J]. Composite Structures,2013,99:8-18.
- [6] 崔浩,闫群,王向明,等. 激光选区熔化成形铝合金板与 CFRP 复合材料层合板螺栓连接结构失效分析方法评估[J]. 复合材料学报,2017,34(12):2762-2769.
- [7] PISANO A A, FUSCHI P, DE DOMENICO D. Failure modes prediction of multi-pin joints FRP laminates by limit analysis[J]. Composites Part B: Engineering,2013,46:197-206.
- [8] 黄河源,赵美英,万小鹏,等. 复合材料中厚板沉头连接结构强度与损伤失效[J]. 复合材料学报,2017,34(3):557-563.
- [9] ASTM-D-6742-D-6742-M-07 Standard practice for filled-hole tension and compression testing of polymer matrix composite laminates[S]. 2007.
- [10] İÇTEN B M, SAYMAN O. Failure analysis of pin-loaded aluminum-glass-epoxy sandwich composite plates[J]. Composites Science and Technology,2003,63(5):727-737.

收稿日期:2021-04-08

(上接第 77 页)

2)受激波干涉的影响,动叶进口气流角存在 13° 的变化幅值,导致动叶攻角的变化和前缘滞止点的摆动,动叶前缘滞止点摆动范围为 4.56%~7.81%轴向弦长,进而导致前缘滞止点摆动范围内的气膜孔出流方向发生改变。

3)动叶前缘气膜孔的临界逆流裕度与出口相对峰值压力存在一个稳定比值为 0.98,对叶片冷气压力要求最高的位置仍然是动叶前缘及前缘压力侧区域。

参考文献:

- [1] DOORLY D J, OLDFIELD M L G. Simulation of the effects of shock wave passing on a turbine rotor blade[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,1985,107(4):998-1006.
- [2] SMITH A C, NIX A C, DILLER T E, et al. The unsteady effect of passing shocks on pressure surface versus suction surface heat transfer in film-cooled transonic turbine blades[C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2003, Collocated With the 2003 International Joint Power Generation Conference, Atlanta, Georgia, USA;2009:343-350.

- [3] HEIDMANN J. A numerical study of the effect of wake passing on turbine blade film cooling [C]//31st Joint Propulsion Conference and Exhibit. San Diego, CA, USA. Reston, Virginia: AIAA,1995.
- [4] KORAKIANITIS T. On the propagation of viscous wakes and potential flow in axial-turbine cascades[J]. Journal of Turbomachinery,1993,115(1):118-127.
- [5] 周莉,张鑫,蔡元虎. 非正常环境下动叶气膜冷却流场的数值模拟[J]. 航空动力学报,2011,26(8):1695-1701.
- [6] 李虹杨,郑赞. 动静干涉对涡轮转子叶片气膜冷却的影响[J]. 北京航空航天大学学报,2016,42(1):139-146.
- [7] 王宇峰,蔡乐,王松涛,等. 跨声速涡轮静叶尾缘激波对动叶前缘气膜冷却效果影响的研究[J]. 推进技术,2018,39(6):1293-1300.
- [8] 周勇,赵晓路,徐建中. 非正常激波对气膜冷却影响的数值模拟[J]. 工程热物理学报,2007,28(6):933-935.

收稿日期:2021-05-06

(上接第 80 页)

- [7] 周建松. 提高质量:高职院校师资队伍建设的着力点[J]. 教育研究,2012,33(1):138-140,157.
- [8] 成涛. 高职院校企业兼职教师培训途径研究[J]. 湖南工业职业技术学院学报,2019,19(5):110-112.
- [9] 韩天学,张学龙. 适合我国高职学生发展的核心素养研究[J]. 职业技术教育,2019,40(3):19-25.

- [10] 梅瑞斌,包立,王晓强,等. “课程思政”建设体系与价值典范研究[J]. 华北理工大学学报(社会科学版),2021,21(1):84-89.
- [11] 肖涵,戴静雅. 大学生职业规划认知及指导策略[J]. 学校党建与思想教育,2018(6):65-67.

收稿日期:2021-06-18