

C/SiC 陶瓷基复合材料燃烧室壁厚设计与验证*

刘彦杰^{1,2}, 马武军², 吴建军¹, 刘志泉²

(1. 国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073;
2. 上海空间推进研究所, 上海 210013)

摘要: C/SiC 复合材料发动机具有重量轻、工作温度高等优势, 已成为下一代高性能发动机的重要发展方向, 其中 C/SiC 复合材料燃烧室的强度与壁厚设计是发动机设计的关键技术之一。本文以薄壳理论和第四强度理论为基础, 以环向拉伸强度为基础数据, 推导了 C/SiC 复合材料燃烧室壁厚计算公式, 并对某型号发动机燃烧室壁厚进行了计算。未验证计算结果准确性, 利用复合材料燃烧室试件的爆破试验对计算结果进行了验证, 并对根据计算结果研制的 C/SiC 复合材料燃烧室进行了热试车考核验证。本文提出的研究计算方法与结果对其他 C/SiC 复合材料燃烧室的壁厚设计具有指导意义。

关键词: C/SiC 复合材料; 燃烧室; 壁厚; 设计

中图分类号: TP316 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2012)06-0121-04

Wall thickness design of combustion chamber for C/SiC composites rocket engine

LIU Yanjie^{1,2}, MA Wujun², WU Jianjun¹, LIU Zhiquan²

(1. College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 210013, China)

Abstract: Carbon fibers reinforced silicon carbide composites (C/SiC) are the most promising materials for next generation rocket engine components due to their unique properties, such as low densities and extremely high temperature resistance. The intensity and wall thickness design of C/SiC composites combustion chamber is one of the key tasks for rocket engine design. Based on the thin shell theory and the fourth intensity theory, this research deduced an ideal thickness calculation formula for composites chamber, which was used to calculate the wall thickness of a certain type of rocket engine combustion chamber. The validity of the formula was checked through subscale C/SiC tube by burst-test and thrust chamber by hot fire test. The formula and results proposed in this paper can be widely applied to the design of the wall thickness of C/SiC composites combustion chamber.

Key words: C/SiC composites; combustion chamber; wall thickness; design

火箭发动机工作时, 燃烧室要承受高温、高压、脉冲压力冲击等苛刻环境, 燃烧室材料需要具备优异的耐高温、抗氧化、抗冲刷性能, 以及优异的高温强度和模量等才能满足要求。传统的金属燃烧室通常采用钛合金、镍合金等高温合金制备而成, 现有高温合金的工作温度不超过 1350℃, 此外, 高温合金还存在密度大的不足^[1-2], 这都限制了发动机比冲及推重比的进一步提高。以碳纤维增强碳化硅复合材料(C/SiC)为代表的陶瓷基复合材料凭着自身优异的高比强、高比模、耐高温、抗烧蚀和低密度等特性在航空航天领域脱颖而出^[3-4]。采用 C/SiC 复合材料制备火箭发动机燃烧室及喷管可减轻发动机重量, 提高发动机工作温度, 简化发动机结构设计, 从而提高发动机整

体性能^[5-6]。

根据国内开发新一代高室压轨控发动机的需要, 某型号发动机采用了国防科技大学研制的 C/SiC 复合材料替代传统金属材料制备发动机燃烧室及整体喷管。为了实现复合材料燃烧室安全可靠的工作, 该燃烧室必须具有一定的壁厚, 从而提供足够的强度承受发动机工作压力的冲击^[7]。C/SiC 复合材料是一种新型复合材料, 其结构计算分析没有相关经验借鉴, 为此复合材料燃烧室的强度计算与壁厚设计已成为发动机设计的关键技术之一。

本文以某型号轨控发动机为研究对象, 以国防科技大学提供的 C/SiC 复合材料力学性能为基础, 根据薄壳理论和第四强度理论推导了复合材

* 收稿日期: 2012-05-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51002186); 国家部委资助项目

作者简介: 刘彦杰(1966—), 男, 湖北钟祥人, 研究员, 博士研究生, E-mail: sisp@sisp.cn

料燃烧室的壁厚计算公式,并对设计结果进行了试验验证。

1 发动机工作条件及复合材料性能

本文所研究的发动机为双组元高室压发动机,其工作条件如表 1 所示。发动机燃烧室及喷管的轮廓曲线如图 1 所示。

表 1 发动机工作条件

Tab. 1 Operating condition of the rocket engine

项目	参数
氧化剂	四氧化二氮(N ₂ O ₄)
燃料	甲基肼(MMH)
燃烧室工作压力	3MPa
燃气温度	3000 ~ 3200K
考核程序	120s 稳态 + 20s 脉冲
结构安全系数	≥ 2

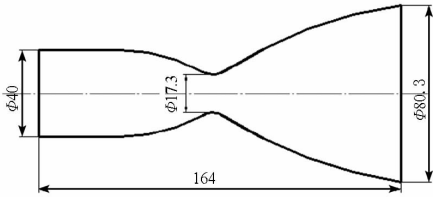


图 1 燃烧室及喷管轮廓曲线(单位:mm)

Fig. 1 Outline of the combustion chamber and nozzle

表 2 给出了以连续碳纤维三维四向编织物为增强相,采用先驱体浸渍裂解(PIP)工艺制备的 C/SiC 复合材料的基本力学性能数据。

表 2 C/SiC 复合材料基本力学性能数据^[8]

Tab. 2 Mechanical properties of C/SiC composites

性能	数值
密度/ ρ , (g/cm ³)	≤ 2.0
弯曲强度/ σ_{3b} , (MPa)	≥ 650
弯曲模量/ E , (GPa)	≥ 100
断裂韧性/ K_{IC} , (MPa · m ^{1/2})	≥ 20
剪切强度/ τ , (MPa)	≥ 45
环向拉伸强度, Hoop Tensile Strength (MPa)	≥ 82

2 燃烧室壁厚设计

火箭发动机燃烧室为圆筒状,可近似为薄壳进行强度计算,如图 2 所示。根据薄壳理论^[9],壳体中存在拉应力或压应力,不存在弯应力。燃烧室圆筒壳体在内压力作用下的周向应力及纵向应力可分别表达为

$$\sigma_t = \frac{PD}{2\delta} \quad (1)$$

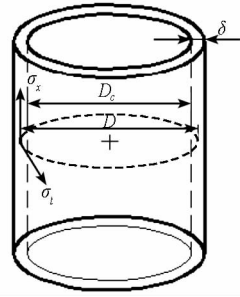


图 2 薄壁圆筒力学分析示意图

Fig. 2 Scheme of mechanical analysis of thin-wall cylinder

$$\sigma_x = \frac{P_c D}{4\delta} \quad (2)$$

其中:

σ_t ——圆筒壳体的周向应力;

σ_x ——圆筒壳体的纵向应力;

D ——圆筒壳体中性曲面的直径;

δ ——圆筒壳体的壁厚;

P ——圆筒壳体内压力(燃烧室最高压力)。

不难看出, $\sigma_t = 2\sigma_x$,即圆筒壳体的周向应力比纵向应力大一倍。圆筒壳体的受力状态符合二向应力状态,即

$$\sigma_1 = \sigma_t = \frac{PD}{2\delta} \quad (3)$$

$$\sigma_2 = \sigma_x = \frac{PD}{4\delta} \quad (4)$$

$$\sigma_3 = 0 \quad (5)$$

对材料进行强度计算时,应遵循相应的强度理论。脆性材料一般采用第一去强度理论,即最大拉应力理论;塑性材料一般采用第三强度理论(最大切应力理论)或第四强度理论(形状改变比能理论),相关研究认为第四强度理论既考虑了最大主剪应力对塑性屈服的作用,又考虑了其他两个主剪应力的影响,它对塑性材料的实验结果比第三强度理论好。鉴于 C/SiC 复合材料良好的塑性,和高室压发动机对重量的苛刻要求,本文采用第四强度理论开展 C/SiC 复合材料燃烧室壁厚计算。

根据第四强度理论的强度条件:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \leq [\sigma] \quad (6)$$

式中 $[\sigma]$ 为材料的许用应力。

将式(3)~式(5)代入式(6)得

$$\delta = \frac{PD}{2.3[\sigma]} \quad (7)$$

在壁厚未知的情况下, D 是不定数。可用圆筒壳体的内径(D_c)来表示。将 $D = D_c + \delta$ 代入式

(7)得

$$\delta = \frac{PD_c}{2.3[\sigma] - P} \quad (8)$$

发动机工作时最高压力为启动峰值压力,一般取 1.2 倍工作室压 P_c 。因而燃烧室壁厚可最终表示为

$$\delta = \frac{1.2P_c D_c}{2.3[\sigma] - 1.2P_c} \quad (9)$$

其中材料的许用应力 $[\sigma]$ 可用式(10)表示:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_b}{K_b} \quad (10)$$

其中: σ_b 为材料的抗拉强度,取环向拉伸强度;

K_b 为安全系数,取 2。

燃烧室压力 P_c 为 3.0MPa,燃烧室内径 D_c 为 40mm,环向拉伸强度取 82MPa。将上述参数代入式(9)和(10),可得到 C/SiC 复合材料燃烧室的计算壁厚 δ 为 1.6mm。考虑产品制备时壁厚偏差,取设计壁厚 2mm。

3 燃烧室壁厚验证

为了验证燃烧室壁厚计算结果的可靠性,设计并制备出 C/SiC 复合材料燃烧室的模拟件,利用管材的爆破强度对计算结果进行了校核。

将式(8)转化为式(11)的形式,得到燃烧室承载压力与材料许用强度 σ_b 的关系。

$$P = \frac{2.3\delta\sigma_b}{D_c + \delta} \quad (11)$$

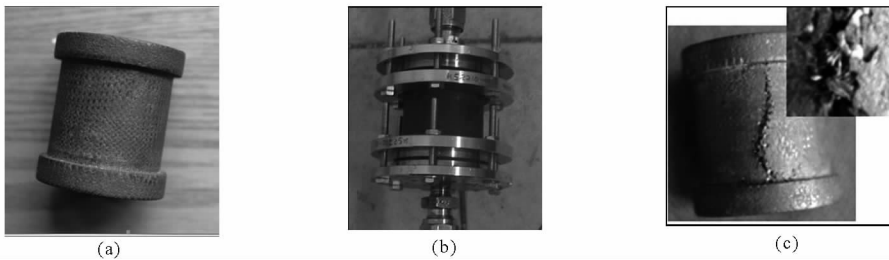


图3 C/SiC 复合材料燃烧室模拟管爆破试验前后照片及过程图片

Fig.3 Photos of C/SiC composites tube before, during and after the burst experiment

在燃烧壁厚计算结果得到验证的基础上,确定燃烧室壁厚 2mm,然后进行了热试车考核,发动机热试车工作参数如表 1 所示,其中燃烧室最高压力 3.5MPa,工作室压 3.0MPa。复合材料整体燃烧室实际通过 500s 稳态与 20s 脉冲的性能考核,热试车过程及热试车后燃烧室结构完好,如图 4、图 5 所示。

图 6 给出了发动机在稳态工作时推力、压力和流量随时间的变化曲线。从图中看出,各参数保持稳定,这说明按计算结果设计并制备的 C/

在不考虑任何安全系数的情况下,即不考虑发动机组件的安全系数 η ,以及材料的安全系数 K_b ,根据燃烧室的内径、壁厚以及材料的原始强度,由式(11)可以计算得到燃烧室的临界承载压力 P 。将 D_c 取为 40mm, δ 取为 2mm, σ_b 取值为 82MPa,代入式(11)计算出该燃烧室的临界承载压力 P 为 8.9MPa,远大于发动机实际最高工作压力 3.5MPa。如取计算壁厚 1.6mm,计算的临界承载压力 P 为 7.3MPa,也远大于发动机实际最高工作压力。

为了验证上述结果及判断,采用 PIP 工艺制备了 C/SiC 复合材料燃烧室的模拟件,如图 3(a)所示,模拟件内径为 40mm,壁厚为 2mm(台阶位置除外)。利用两套金属法兰将模拟件两端封堵,其中一套金属法兰为全封闭结构,一套金属法兰中心带有孔道,如图 3(b)所示。以水为介质,将水通过金属法兰的孔道注入模拟管件内腔,然后缓慢增加水压,监控管件破坏时的水压压力。当水压压力增至 11.5MPa 时,管件突然沿轴向开裂,管内压力下降,图 3(c)给出了管件破坏后的形貌照片。通过试验可知,该管件的破坏压力为 11.5MPa。按照壁厚与爆破压力成比例关系,则 1.6mm 壁厚实际爆破压力约为 9.2MPa。

试件爆破压力大于公式(11)计算结果与计算时环向拉伸强度取最小值有关。爆破实验证明式(9)计算、设计壁厚合理、可靠。



图4 C/SiC 复合材料整体燃烧室热试车过程照片

Fig.4 Photos of C/SiC composites combustion chamber during hot firing test



图 5 C/SiC 复合材料整体燃烧室热试车后照片

Fig. 5 Photos of C/SiC composites combustion chamber after hot firing test

SiC 复合材料燃烧室在工作过程中结构尺寸稳定,无冲刷变形等问题。

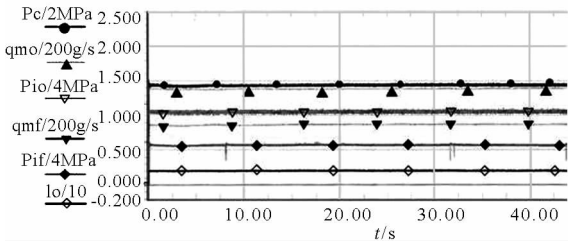


图 6 推力、压力和流量随发动机工作时间的变化曲线

Fig. 6 Thrust, pressure and flow versus time during steady firing of engine

4 结论

本文针对复合材料发动机燃烧室强度与壁厚设计的工程应用问题,以薄壳理论为理论基础,以复合材料的环拉伸强度为基础数据,推导并计算了某高室压发动机燃烧室的理想壁厚。发动机工作压力 3.0MPa,燃烧室内径 40mm,复合材料环拉伸强度 80MPa,发动机组件安全系数与材料使用安全系数取 2 时,计算得到燃烧室的安全壁厚为 1.6mm,考虑制备过程偏差,取设计壁厚 2mm。

利用复合材料管件的爆破试验对计算结果进行了验证;对制备的 C/SiC 复合材料燃烧室进行

了热试车考核验证。研究结果对其它复合材料燃烧室的壁厚设计具有指导意义。

参考文献 (References)

- [1] Wie D, JR D, King D, et al. The hypersonic environment: Required operating conditions and design challenges [J]. Journal of Materials Science, 2004, 39: 5915 - 5924.
- [2] Zhou Z, Du J, Song S. Microstructural characterization of W/Cu functionally graded materials produced by a one-step resistance sintering method [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2007, 428(1 - 2):146 - 150.
- [3] Schmidt S, Beyer S, Knabe H, et al. Advanced ceramic matrix composites materials for current and future propulsion technology applications[C]//Germany: AC - 03 - S. 3. 03 sep., 2003.
- [4] Martin M. Advanced carbon fiber reinforced silicon carbide technology for SM3 divert and attitude control systems[R]. Fiber Material Inc. -Final Report, N96 - 284, 2002.
- [5] 邹武, 张康助, 张立同. 陶瓷基复合材料在火箭发动机上的应用[J]. 固体火箭技术, 2000, 23(2):60 - 65. ZOU Wu, ZHANG Kangzhu, ZHANG Litong. Application of ceramic matrix composite to rocket motor[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2000, 23(2):60 - 65. (in Chinese)
- [6] 陈博, 张立同, 成来飞, 等. 3D C/SiC 复合材料喷管在小型固体火箭发动机中的烧蚀规律研究[J]. 无机材料学报, 2008, 23(5):938 - 944. CHEN Bo, ZHANG Litong, CHENG Laifei, et al. Ablation characteristic of 3D C/SiC composite nozzle in a small solid rocket motor [J]. Journal of Inorganic Materials, 2008, 23(5):938 - 944. (in Chinese)
- [7] 杨海涛. 压力容器的安全与强度计算[M]. 天津:天津科学技术出版社, 1985. YANG Haitao. Security and strength calculation for pressure vessel[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1985. (in Chinese)
- [8] 陈朝辉. 先驱体结构陶瓷[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 2003. CHEN Zhaohui. Structural ceramics pyrolyzed with precursor [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [9] 周之桢. 材料力学[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1987. ZHOU Zhizhen. Materials mechanics [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1987. (in Chinese)