

文章编号:1000-8055(2011)12-2777-06

多循环脉冲爆震载荷作用下爆震室强度分析与结构优化

郑龙席, 姜宏伟, 严传俊, 邱 华

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 利用数值模拟获取的完整爆震循环载荷, 以及爆震室有限元模型, 计算分析了爆震室多循环工作时的等效应力, 依据热平衡状态实测温度数据计算了温度场的影响, 并对爆震室进行了壁厚优化. 发现多循环工作时, 爆震室最大等效应力比单次爆震时略大, 但同一位置处差值不超过 4%; 同一位置处等效应力呈周期性变化, 不同循环的最大等效应力基本不变; 沿爆震波传播方向, 等效应力的最大值逐渐增大. 频率在 10~50 Hz 变化时, 同一位置处最大等效应力值基本不变. 当假设爆震室径向温度相同且轴向可自由膨胀时, 温度对应力几乎没有影响, 但相同应力所产生的应变增加.

关 键 词: 爆震室; 爆震波; 数值模拟; 结构强度; 结构优化

中图分类号: V231.9

文献标志码: A

Strength analysis and structural optimization of detonation combustor to multi-cycle pulse detonation loading

ZHENG Long-xi, JIANG Hong-wei, YAN Chuan-jun, QIU Hua

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The equivalent stress of the detonation combustor was computed and researched using the axisymmetric finite element modal and whole cycle pressure obtained by numerical simulation. The effect of the temperature was calculated using the measured thermal equilibrium temperature data, and the primary optimization of the thickness was completed for given fatigue life. It is found that the equivalent stress of the detonation combustor to multi-cycle detonation loading is a little bigger than that to single cycle detonation loading, and the difference of the same position is less than 4%. The equivalent stress of the detonation combustor at the same position is periodic when the PDE (pulse detonation engine) works circularly, and the maximal equivalent stress in every cycle is nearly equal. The maximal equivalent stress has an increscent trend along with the spread of detonation wave. The maximal equivalent stress at the same position is nearly equal when the frequency changes among 10~50 Hz. The equivalent stress with temperature is nearly equal to that without temperature when it is assumed that the detonation combustor has the same temperature in the radial direction and can expand freely in the axial direction, but the equivalent strain increases.

Key words: detonation combustor; detonation wave; numerical simulation; structural intensity; structural optimization

收稿日期:2011-01-10; 修订日期:2011-03-10

作者简介:郑龙席(1970-),男,陕西西安人,教授,博士,研究方向为航空发动机结构强度与振动.

脉冲爆震发动机工作时爆震燃烧室是主要的承力部件,处于高温和周期性移动冲击载荷的作用下,工作环境非常恶劣.以往的研究主要关注的是脉冲爆震发动机的工作机理,所以对爆震室壁厚的设计偏于保守,而在实际应用中,推质比是发动机的一个主要性能指标,所以就要求在保证强度的情况下尽可能减轻发动机质量.

Tang^[1],Mirzaei 等^[2-5],Shepherd 和 Beltman 等^[6-8]对单次冲击波或爆炸波载荷作用下圆柱管壳的结构响应做了大量的研究,但目前在脉冲爆震发动机爆震室多循环工作时的应力分布、温度场对爆震室的影响以及壁厚优化设计方面还处于空白.本文采用 ANSYS 软件研究了多循环爆震载荷作用下爆震室的等效应力分布,考虑了温度场对爆震室结构强度的影响,并应用名义有限寿命设计方法对等壁厚爆震室进行了初步的优化设计.本文的方法为以后脉冲爆震发动机从原理性研究走向工程应用提供了技术基础.

1 爆震波载荷与有限元模型

1.1 爆震波载荷

为了获得爆震室内沿轴向分布的压力,采用了爆震室一维计算模型.可爆混合物为恰当比的 $C_8H_{18} + \text{air}$,爆震室是长度为 100 cm、内直径为 12 cm 的直管爆震室,如图 1 所示.数值模拟采用均匀网格,网格步长 1 mm.计算了 10、20、30、40 Hz 及 50 Hz 这 5 个频率下的压力数据.在这 5 个工况下,当模型处于充填过程时,图 1 中左端边界条设定为相同的总压和总温(120 192 Pa 和 315 K);当模型处于爆震排气过程时,图 1 左端为固壁边界条件,关闭时间也相同(8 ms).数值模拟过程中,先计算 3~4 个周期循环,待模型计算结果周期稳定后,输出稳定后一个周期内不同时刻压力沿爆震室轴向的分布,时间间隔为 0.005 ms,轴向位置采用隔点输出,即输出时网格步长 2 mm.

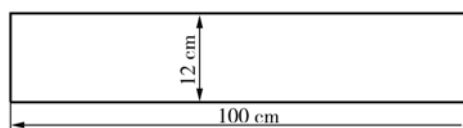


图 1 直管爆震室示意图

Fig. 1 Schematic of detonation combustor

对于所计算的工作频率,由于阀门关闭时间

固定,故阀门开启时间随频率的增加而减少,由 10 Hz 下的 90 ms 减少到 50 Hz 下的 12 ms.虽然阀门开启时间缩短,但对于图 1 中的直管爆震室,当阀门开启开始填充时,一般经过 8 ms 左右,爆震室内气体状态已基本达到准定常过程,管内气体状态随时间的变换较小.进一步推知对所计算的工作频率下,点火前爆震室内气体状态是基本相同,故阀门关闭期间,爆震室内的气体状态变化也相似,压力峰值在 3.4 MPa 左右,所不同的仅是填充时间的长短.图 2 是工作频率为 50 Hz 下不同时刻爆震室压力沿轴向分布曲线,其也基本反应了其他工作频率下管内压力变化情况.

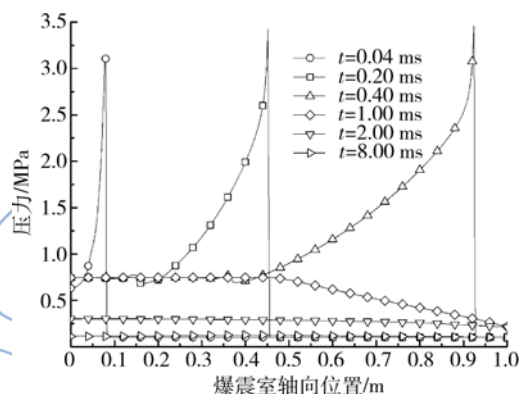


图 2 工作频率 50 Hz 下不同时刻爆震室压力分布

Fig. 2 Pressure at different times for 50 Hz

1.2 爆震室有限元模型

本文的爆震室有限元模型是用 ANSYS 11.0 软件建立的,由于爆震室是轴对称结构,所以截取爆震室的一个截面建立轴对称有限元模型.轴向划分 500 个单元,径向划分 3 个单元,模型的一端施加轴对称约束,另一端可沿轴向自由膨胀.爆震室有限元模型内壁加载 1.1 节中获取的爆震压力载荷,外壁加载大气压力.模型与加载过程示意图在图 3 中给出.爆震室物理模型参数及材料特性参数是根据某脉冲爆震发动机样机确定的,具体数值在表 1 中给出.

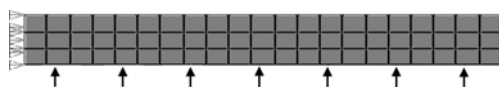


图 3 有限元模型及加载示意图

Fig. 3 Finite element model and schematic loading

表 1 某脉冲爆震发动机爆震室物理模型与材料特性

Table 1 Material and geometrical properties
of detonation combustor

密度/ (kg/m^3)	弹性模量 $E/(\text{N}/\text{m}^2)$	泊松比	外径 R_{out}/m	内径 R_{in}/m	长度 L/m
7900	1.84×10^{11}	0.3	0.063	0.06	1.0

2 多循环爆震作用时结果与讨论

实际应用的脉冲爆震发动机是处在多循环工作状态,把 1.1 节中获取的完整循环爆震载荷数据加载到 1.2 节中所建立的有限元模型上,计算了不考虑温度效应的多循环爆震载荷作用下爆震室的等效应力.图 4 中给出爆震频率为 50 Hz,爆震循环次数为 3 次的爆震室等效应力.从图 4 中可以看出,在多循环工作状态,爆震室同一位置处等效应力呈周期性变化,当爆震波阵面传到时,会产生一个应力峰值,爆震波传过后,膨胀波的压力是振荡衰减的,所以等效应力也随之衰减.不同

次爆震载荷作用下的最大等效应力基本不变,而由膨胀波引起的应力振荡随着循环次数的增加略有增大.不考虑温度效应,研究了多循环爆震载荷作用下爆震室轴向不同位置处最大等效应力与单次爆震载荷作用下爆震室轴向不同位置处最大等效应力的区别,计算结果在图 5 中给出,从图 5 中可以看出多循环爆震载荷作用下爆震室的等效应力比单次爆震载荷作用下的等效应力略大,并且这个现象在爆震室中间位置更加明显,但对计算数据分析发现,同一位置处最大的差值不超过 4%.图 6 中给出了爆震频率的变化对爆震室等效应力最大值的影响,从图 6 中可以看出频率在 10~50 Hz 变化时,不同爆震频率下同一位置处等效应力最大值之间的差值不超过 3%,可以说爆震室等效应力的最大值基本不变.从图 5 和图 6 中可以清晰地看出,沿着爆震波传播的方向,爆震室的等效应力有逐渐增大的趋势.爆震室后端所承受的等效应力大,所以爆震室的后端比前端危险.

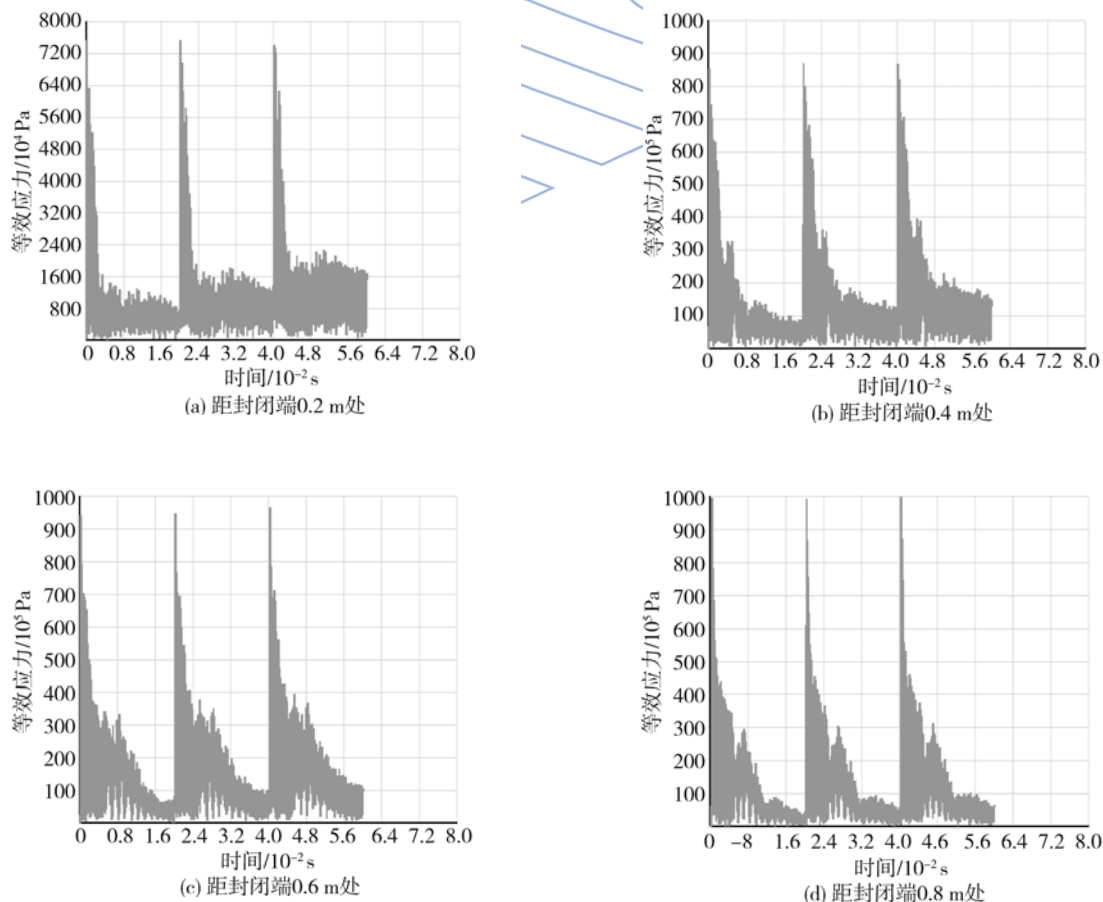


图 4 爆震频率为 50 Hz,不考虑温度效应、三次爆震循环的爆震室等效应力

Fig. 4 Equivalent stress for three-cycle without temperature at the frequency of 50 Hz

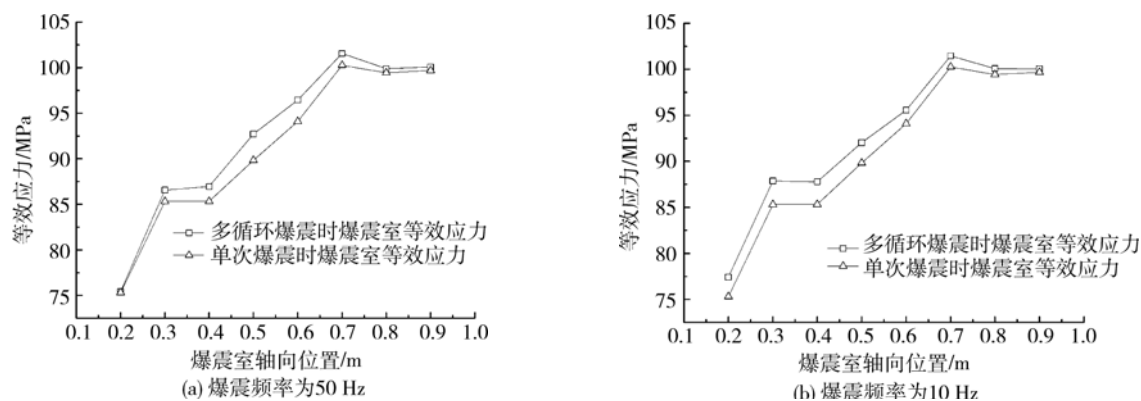


图5 多循环爆震作用下与单次爆震作用下爆震室等效应力区别

Fig. 5 Difference of equivalent stress of detonation combustor to multi-cycle detonation loading and single detonation loading

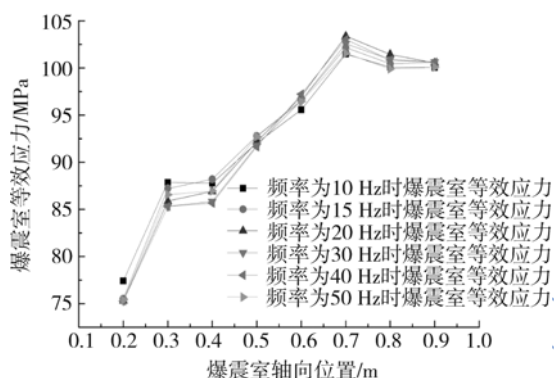


图6 不同频率作用下爆震室等效应力沿轴向分布

Fig. 6 Pressure in the axial direction for different frequencies

实际上爆震室在多循环工作时温度影响是不容忽视的. 西北工业大学的郑龙席等人^[9-10]对多循环工作时爆震室的温度场进行了研究,发现同一频率下爆震室外壁面温度分布呈现从前到后逐渐升高的趋势,距推力壁近的区域上升斜率大,距推力壁远的区域上升斜率小. 爆震室工作一段时间以后,爆震室的壁温不再随时间的增加而升高,这时的爆震室壁温称为热平衡温度. 同一轴向位置处爆震室的壁温随频率的增大而增大. 本文采用通过试验获取的爆震频率为 20 Hz 时爆震室的热平衡温度,计算了温度场对爆震室强度的影响. 在计算时假设爆震室同一位置处内外壁温度相同,爆震室沿轴向可以自由膨胀,所以加载温度场对最大等效应力的影响非常小,但是随着温度的升高,材料的弹性模量降低,相同应力所产生的等效应变增加. 图 7 所示为爆震频率 20 Hz 时,加温度场与不加温度场的应变比较. 从图 7 中可以看出,在同一位置处,加温度场后等效应变比不加温

度场的等效应变大很多.

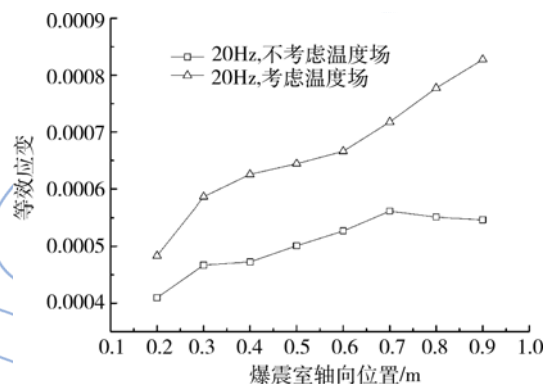


图7 爆震频率 20 Hz 时,加温度场与不加温度场的等效应变比较

Fig. 7 Difference of equivalent strain with temperature and without temperature at the frequency of 20 Hz

3 等壁厚爆震室壁厚优化设计

Tang^[1], Mirzaei 等^[2-5], Shepherd 和 Beltman 等^[6-8]在研究单次冲击载荷或爆震载荷作用时,发现载荷传播的速度对圆柱管壳的结构响应有很大的影响. 他们在分析载荷传播速度与结构响应之间的关系时使用了放大系数,放大系数的定义为动载荷作用下的最大动应力与等效静载荷作用下的静应力之比,即

$$\Phi = \sigma_{\text{dynamic, max}} / \sigma_{\text{static}} \quad (1)$$

Shepherd 和 Mirzaei 等人研究发现当冲击波传播速度大于临界速度时,放大系数大于 1 而小于 2. 一个完整爆震循环的不同阶段爆震载荷的传播速度是不同的,其中爆震波在爆震室内从产生到传出爆震室这个过程是影响爆震室结构瞬态响应的主要因素. 本文的爆震波传播速度大于爆

震室结构的临界速度,根据计算的多循环爆震载荷作用下爆震室最大等效应力进一步得出放大系数最大值在 1.5 左右,为了安全起见,在优化时将放大系数取为 1.7. 确定了放大系数以后,应用名义应力有限寿命设计方法对等壁厚爆震室进行了优化,优化过程中假设采取冷却措施后的爆震室最高温度为 600℃,工作频率为 50 Hz,连续工作时间为 1 h 后材料屈服失效,并且由于爆震室承受的是脉动循环应力,应力比 $R=0$,则根据 Soderberg 直线模型^[11]有

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{-1,n}}{\left[1 + \left(\frac{\sigma_{-1,n}}{\sigma_s}\right)\right]} \quad (2)$$

其中 σ_a 为应力幅, σ_m 为平均应力, $\sigma_{-1,n}$ 为条件疲劳极限, σ_s 为材料的屈服极限. 利用 ANSYS 软件的优化模块,采用零阶方法^[12]进行壁厚优化,在优化过程中以爆震室壁厚 h 作为设计变量,最大等效应力 $s_{\max}$ 作为状态变量,总质量 w_t 为目标函数. 共迭代了 6 次得到最优方案,图 8 给出了爆震室壁厚 h 随迭代次数变化的图形. 从图中可以看出优化后爆震室壁厚有明显减小. 优化后的壁厚为 $h=2.3719\text{mm}$. 由于爆震室的应力水平随所选用的爆震燃料、爆震室材料、爆震室直径等因素的不同而有所不同,并且不同的用途有不同的工作寿命要求,所以本文所得出的优化壁厚只是针对给定条件进行的,但文中的方法为以后的工程应用提供了技术储备.

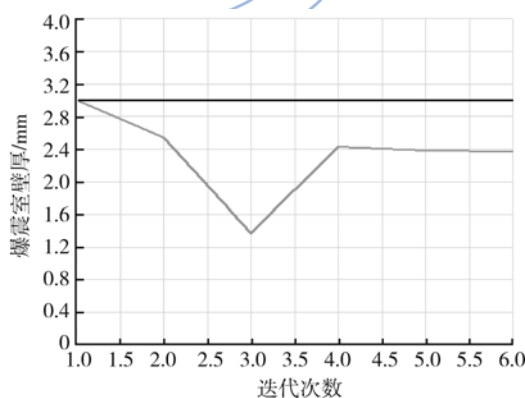


图 8 爆震室壁厚随迭代次数变化图

Fig. 8 Change of thickness with the iterative numbers

得到优化结果后,为了验证优化的壁厚是否满足试验样机设计需要,我们对优化后的结构进行了应力分析. 结果在图 9 中给出. 从图 9 中可以看出在频率为 50 Hz 的爆震载荷作用下,优化后

爆震室的最大等效应力比优化前爆震室的最大等效应力大,最大值为 128.819 MPa,这个值小于材料在 600℃时的屈服极限 176 MPa,也小于所要求寿命对应的条件疲劳极限,所以优化后的壁厚满足设计要求.

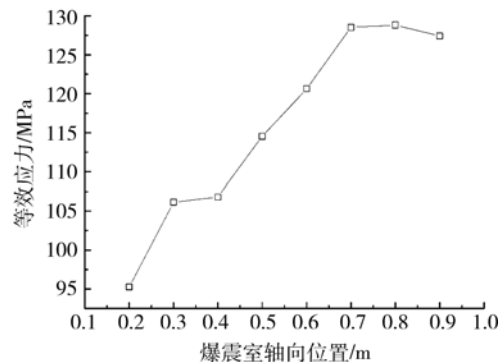


图 9 壁厚优化后爆震室轴向等效应力分布

Fig. 9 Pressure distribution in the axial direction after optimization

4 结 论

本文研究了多循环爆震载荷作用下爆震室的结构响应,并在此基础上对等壁厚爆震室进行了初步的壁厚优化,发现多循环爆震载荷作用下爆震室的等效应力比单次爆震载荷作用下的等效应力略大,但同一位置处最大的差值不超过 4%;在多循环工作状态,爆震室同一位置处等效应力呈周期性变化,不同次爆震载荷作用下的最大等效应力基本不变,而由膨胀波引起的应力振荡随着循环次数的增加略有增大;沿爆震波传播方向,爆震室不同位置处等效应力的最大值有逐渐增大的趋势;在 10~50 Hz 爆震频率范围内,不同频率下爆震室同一位置处的最大等效应力值基本不变;当假设爆震室径向温度相同且轴向可自由膨胀时,温度对应力几乎没有影响,但随着温度的升高和材料的弹性模量降低,相同应力所产生的应变增加. 应用有限寿命设计方法对等壁厚爆震室进行了初步的优化设计,优化后爆震室壁厚为 $h=2.3719\text{mm}$. 本文的优化是针对爆震室最危险的部位进行的等壁厚初步优化,而计算中发现爆震室工作时不同位置的应力是不同的,所以在实用中还有必要对爆震室进行进一步的变壁厚优化设计.

参考文献:

- [1] Tang S C. Dynamic response of a thin-walled cylindrical

- tube under international moving pressure [D]. Michigan USA: University of Michigan, 1962.
- [2] Mirzaei M, Mazaheri K, Biglari H. Analytical modeling of the elastic structural response of tubes to internal detonation loading [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2005, 82(12): 883-895.
- [3] Mazaheri K, Mirzaei M, Biglari H. Transient dynamic response of tubes to internal detonation loading [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 297(1-2): 106-122.
- [4] Mirzaei M, Biglari H, Salavati M. Analytical and numerical modeling of the transient elasto-dynamic response of a cylindrical tube to internal gaseous detonation [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2006, 83(7): 531-539.
- [5] Mirzaei M. On amplification of stress waves in cylindrical tubes under internal dynamic pressures [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2008, 50(8): 1292-1303.
- [6] Shepherd J E. Pressure load and structural response of the BNL high-temperature detonation tube [R]. [S. l.]: s. n., Technical Report A-3991, 1992.
- [7] Beltman W M, Burcsu E N, Shepherd J E, et al. The structural response of cylindrical shells to internal shock loading [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1999, 121(3): 315-322.
- [8] Beltman W M, Shepherd J E. Linear elastic response of tubes to internal detonation loading [J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 252(4): 617-655.
- [9] 郑龙席, 严传俊, 范玮, 等. 脉冲爆震发动机模型机爆震室壁温分布试验研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2003, 9(4): 344-347.
- ZHENG Longxi, YAN Chuanjun, FAN Wei, et al. Experimental investigation on outer wall temperature distribution of a pulse detonation engine model [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2003, 9(4): 344-347. (in Chinese)
- [10] 郑龙席, 严传俊, 李牧. 多循环 PDE 模型机爆震室壁温分布数值模拟 [J]. 燃烧科学与技术, 2007, 13(5): 414-420.
- ZHENG Longxi, YAN Chuanjun, LI Mu. Numerical simulation on detonation chamber wall temperature distribution of a multi-cycle pulse detonation engine model [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2007, 13(5): 414-420. (in Chinese)
- [11] 赵少汴. 抗疲劳设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [12] 刘涛, 杨凤鹏. 精通 ANSYS [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.