基于 Mie 散射理论的水滴平均直径测量

常士楠 管章杰 王 超 庄伟亮

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 冰风洞实验时,为了更精确地模拟实验环境,需要精确测量喷头喷出水滴的直径,为此,开发了一套激光束发射装置并基于 Mie 散射理论编制了水滴直径计算程序. 在水滴流场的环境中,激光束发生散射,间隔 Δt 的时间反复实验获得多个时刻的散射光强分布图. 应用自行开发的计算程序对已获得的多组散射光强分布图进行计算处理,得到同一截面不同时刻的多组水滴平均直径. 利用 Newton 插值法对上述多组水滴平均直径进行插值,拟合出不同时刻水滴直径的连续变化曲线,对该曲线求积分平均值,获得该截面水滴的平均直径. 为检验实验装置和计算程序的准确性,对某加湿器喷水系统进行实验测量,测量结果与产品说明中提供的数据吻合良好,表明该测量装置和计算程序可行.

关 键 词: 冰风洞; 水滴直径; Mie 散射理论; 测量

中图分类号: V 219

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)09-1163-05

Application of Mie-scattering theory in measurement of mean droplet diameter

Chang Shinan Guan Zhangjie Wang Chao Zhuang Weiliang

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In an ice wind tunnel experiment, in order to simulate the experimental environment more accurately, the diameter of droplets jetted from the nozzle need to be measured accurately accordingly. A set of laser device and drop diameter calculation program based on Mie-scattering theory were developed. In the environment of droplet flow field, the laser beam became scattered, experiments were repeated to obtain multiple moments of the scattering intensity distribution figures in interval of. The calculation program developed was applied to calculate the scatter intensity distribution of the figures. The mean diameters of water droplets in the same section but at different time were obtained. The Newton interpolation method was applied to interpose the data of multiple sets of the mean droplet diameters and based on the curves obtained by fitting the diameter data of the cross at different time, the average value of the integration which was considered to be the mean droplet diameter would be obtained. A humidifier was used to investigate the feasibility of the code. Good agreement between the prediction and the data provided by the product description show that the measurement device and calculation program is feasible.

Key words: icing wind tunnel; droplet diameter; Mie-scattering theory; measurement

水滴直径的测量技术,在航空航天领域以及发电机、钢铁冶炼等普通工业领域具有广阔的应用空间. 19 世纪 70 年代,文献[1-9]使用了聚乙烯醇薄膜测量水滴直径,该方法利用了聚乙烯醇对水滴的溶解性,水滴撞击在聚乙烯醇薄膜上时,在撞击力的作用下迅速溶解在聚乙烯醇里,使得聚乙烯醇薄膜上留下水滴的轮廓,再利用电子显微镜成像测量出水滴的直径. 20 世纪初,文献

收稿日期: 2012-09-26; **网络出版时间**: 2013-06-24 14:34

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130624.1434.004.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11072019)

作者简介: 常士楠(1968-),女,山西榆次人,教授,sn_chang@buaa.edu.cn.

[10]为了估算云层中水滴大小,使用了双波雷达测量,使用3段频率(X,K_α,W-Band)收集云层数据,测量的数据呈明显的3种散射特征:X频段下呈瑞利散射;K_α频段下呈Mie散射;W-Band呈Mie散射.根据这3种频段下呈类似的散射情况,分析出水滴的尺寸.2004年,文献[11]使用激光散射方法对水滴尺寸进行测量研究,利用水滴对激光的散射,在不同方向放置两台相机同时捕抓水滴图像,根据水滴轮廓边缘推算出水滴的尺寸大小.对于微小水滴沿程跟踪测量的情况,直接测量法就有些困难.对于冰风洞而言,由于冰风洞收缩段、试验段流场压力及流场速度等因素变化的影响,导致这一区段内水滴直径大小不一.针对这一问题,本文将水滴运动的沿程路段分为多个小段,测量每个小段内的水滴平均直径,汇总每个截面的水滴平均直径并按照截面位置的先后顺序进行排序,近似认为排序后的测量结果为水滴平均直径的沿程尺度变化.另外,在冰风洞结冰试验中,可以将紧邻试验件前的位置处测得的水滴平均直径作为结冰实验的水滴直径,确保结冰条件更为准确.

限于实验室现有冰风洞实验条件的限制,选择对某加湿器喷水截面进行水滴直径测量,并将测量结果与厂家校核的结果进行对比.

1 测量装置在冰风洞中的安装位置

为了方便、准确地获得实验数据,需要对测量装置在冰风洞中的固定安装进行计算分析.图1为冰风洞收缩段和实验段的结构示意图,其中收缩段长度为L_1,实验段长度为L_2.

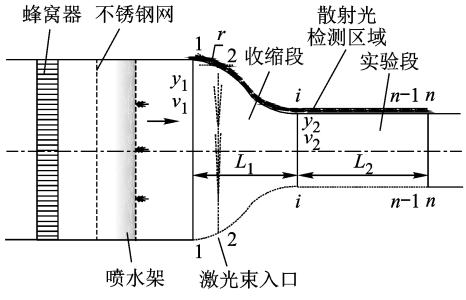

图1 测量装置在冰风洞中安装位置

取冰风洞中心轴(水平方向)为x轴,收缩段中心轴左端为坐标原点,实验段中心轴右端为端点.收缩段沿x轴的加速度分布为

$$a = k\sin^2\frac{\pi x}{L_1} \tag{1}$$

$$k = \frac{v_2^2 - v_1^2}{L_1} \tag{2}$$

即保证收缩段入口$x=0$和出口$x=L_1$处的水滴流场速度稳定.k为系数,其值与收缩段入口流场速度v_1和出口速度v_2以及收缩段长度L_1有关.由连续性方程可得

$$vy^2 = v_1y_1^2 = v_2y_2^2 \tag{3}$$

$$a = v\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x} \tag{4}$$

其中,v为收缩段流场沿x轴方向的速度函数;y为收缩段外轮廓的曲线函数;y_1为收缩段的入口半径;y_2为收缩段的出口半径.

根据式(1)和式(4),可得

$$v^2 - v_1^2 = k\left(x - \frac{L_1}{2\pi}\sin\frac{2\pi x}{L_1}\right) \tag{5}$$

求解方程式(2)、式(3)和式(5)可得收缩段和实验段的轮廓曲线方程为

$$\left.\begin{aligned} y &= \frac{y_1}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{y_1^4}{y_2^4}\right)\left(x - \frac{L_1}{2\pi}\sin\frac{2\pi x}{L_1}\right)}} \\ &\qquad 0 \leqslant x < L_1 \\ y &= y_2 \qquad\qquad L_1 \leqslant x \leqslant L_2 \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

激光二极管的探头面积为$S=6.5\ \mathrm{mm}\times 6.5\ \mathrm{mm}$,入射窗口检测散射光强分布的有效区域为$D=80\ \mathrm{mm}\times 80\ \mathrm{mm}$.为有效地获得收缩段和实验段的水滴平均直径沿程变化曲线,各个激光束入口及各个散射光检测区域都应合理安置,即应确定安装位置的横坐标x及检测板的安装角γ,以保证获得准确的光强分布图.实验的原则是不影响收缩段和实验段的内部流场,因此在每个激光束入射窗口和散射光检测窗口都会使用透射率比较高的耐高压玻璃或有机玻璃.激光束入射窗口安置在收缩段和实验段的下轮廓曲线处,其位置的横坐标满足如下关系式:

$$x = 80i + 40 \tag{7}$$

检测板放置在收缩段和实验段的上轮廓曲线处,其横坐标同式(7).对检测板与x轴的夹角γ,有

$$\tan(180^\circ - \gamma) = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x} \tag{8}$$

因此,第i检测区域检测板与x轴的安装角γ为

$$\gamma = \arctan\left(-\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}\right)\Big|_{x=80\times i} \tag{9}$$

由式(7)及γ的值,即可确定测量装置的安装位置.

2 测量装置的开发

测量装置主要包括激光束发射装置和激光光

强分布检测区域两部分. 激光束发射装置见图 2.



图 2　激光束发射装置实物图

2.1　激光束控制装置结构

激光束发射装置结构如图 3 所示,发射装置包括晶振电路、复位电路、单片机、时间步长显示电路、激光开关电路和当前时间显示电路. 晶振电路用来为单片机提供工作信号脉冲;复位电路用来为单片机上电复位,稳定单片机的工作;激光器开关电路通过单片机来控制,用来开启或断开激光器的电源;当前时间显示电路用来显示当前的工作时间;时间步长显示电路用来显示设定的时间步长 Δt;激光头开关电路包括激光二级管,通过单片机程序控制激光二极管每间隔时间步长 Δt 发射一次激光束,或者使激光束持续发射 Δt 时间.

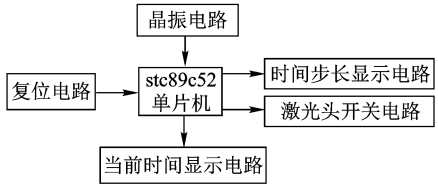

图 3　激光束发射装置结构框图

2.2　激光二极管的控制

激光二极管的控制对数据的采集起重要作用,因此控制好激光二极管,使其输出稳定的激光光源是展开后续工作的基础. 本文选择自动功率控制电路,如图 4 所示. 激光二极管工作一段时间后温度阻抗等会发生变化,因此设计时应该加入反馈控制和补偿.

为了输出稳定的光源,单片机 stc89c52 的管脚 P2.7 输出 220 Hz 频率信号,使三极管 Q1 处于反复关断状态,关断激光二极管可补偿其由于温度升高而引起的阻抗变化. R7 为可调电阻,其作用是可以调节激光器输出激光强度的大小. 电阻 R2 接单片机的 P2.7 引脚,P2.7 输出周期脉冲,使三极管 Q1 反复开断. 当 P2.7 输出高电平时,三极管 Q1 导通,三极管 Q2 的集电极和发射极的两端电压保持 2.2 V. 三极管 Q3 也处于导通状态,随着激光二极管的 LD 端发射激光,温度升高,发出的激光会逐渐增强;随着激光的增强,激光二极管 PD 端的导通系数增大,从而升高 Q2 的基极电压,降低 Q3 的放大倍数,使流过 LD 端的电流变小,达到反馈控制 LD 端的效果,使输出的激光光强处于稳定状态.

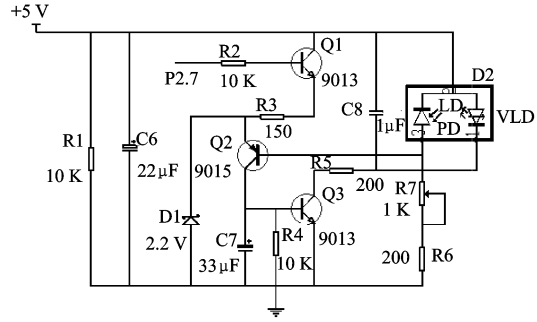

图 4　激光二极管控制电路

3　Mie 散射理论的应用

Mie 散射理论是麦克斯韦方程对处在均匀介质中的均匀颗粒直径在平面单色光的照射下的严格数学解. 假设冰风洞实验段和收缩段上某垂直于来流方向的小截段上各点压力相同、气体密度相等. 散射体为选取的某小截段,记 r 为小截段几何中心到散射点 p 处的距离,散射点 p 的散射光强记为 I_{scat},如图 5 所示.

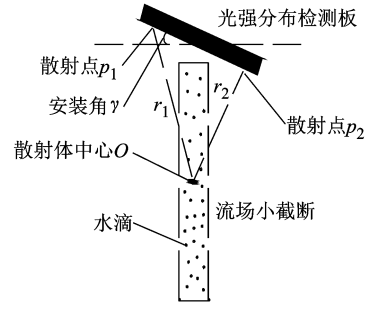

图 5　小截断示意图

由 Mie 散射理论可知:

$$I_{\text{scat}} = I_0 g \frac{\lambda^2}{8\pi^2 r^2} g I(\theta,\varphi) \tag{10}$$

$$I(\theta,\varphi) = |S_1(\theta)|^2 \sin^2\varphi + |S_2(\theta)|^2 \cos^2\varphi \tag{11}$$

其中,λ 为激光光波波长,单位为 m;g 为非对称因子;I_0 为入射初始光强,单位为 Cd;I_{scat} 为散射光强,单位为 Cd;θ 为散射角,单位为(°);φ 为偏振光的偏振,单位为(°). $S_1(\theta)$ 和 $S_2(\theta)$ 为振幅函数,其表达式[12]为

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n + b_n \tau_n] \tag{12}$$

$$S_2(\theta)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2n+1}{n(n+1)}[a_n\tau_n+b_n\pi_n] \quad (13)$$

其中,a_n,b_n 是与贝塞尔函数和第一类汉克尔函数有关的函数;π_n,τ_n 是连带勒让得函数的函数,仅与散射角 θ 有关;a_n,b_n,π_n,τ_n 分别由以下关系式求得:

$$a_n=\frac{\phi_n(\alpha)\phi'_n(m\alpha)-m\phi'_n(\alpha)\phi_n(m\alpha)}{\varepsilon_n(\alpha)\phi'_n(m\alpha)-m\varepsilon'_n(\alpha)\phi_n(m\alpha)} \quad (14)$$

$$b_n=\frac{m\phi_n(\alpha)\phi'_n(m\alpha)-\phi'_n(\alpha)\phi_n(m\alpha)}{m\varepsilon_n(\alpha)\phi'_n(m\alpha)-\varepsilon'_n(\alpha)\phi_n(m\alpha)} \quad (15)$$

$$\pi_n=\frac{2n-1}{n-1}\pi_{n-1}\cos\theta-\frac{n}{n-1}\pi_{n-2} \quad (16)$$

$$\tau_n=\pi_n\cos\theta-\pi'_n\sin^2\theta \quad (17)$$

$$\pi'_n=(2n-1)\pi_{n-1}+\pi'_{n-2} \quad (18)$$

其中,$\phi_n(\alpha)$ 和 $\varepsilon_n(\alpha)$ 分别是贝塞尔函数和第一类汉克尔函数;α 为无因次直径,$\alpha=\pi D/\lambda$,D 为由流场中水滴引起的散射光强分布计算出的水滴直径,λ 为入射激光光波波长;π_n,τ_n 和 π'_n 的初始值为 $\pi_0=0$,$\pi_1=1$,$\pi'_0=0$;m 是水滴相对于周围气体的复折射率,实验时使用的是纯净水,取 $m=1.5-0.5i$[13-15]. Mie 散射理论应用程序界面如图 6 所示.

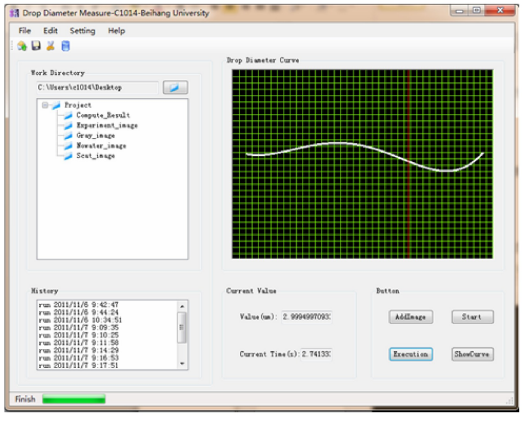

图 6 Mie 散射理论应用程序界面

4 水滴平均直径的测量与结果分析

受实验室现有冰风洞实验条件的限制,本文的实验对象为某加湿器喷水系统. 正常工作时,加湿器喷出的水滴速度为 3.2 m/s. 在距离加湿器水滴出口 15 cm 处放置实验测量装置. 在供电功率变化的情况下,小水滴的直径会因为超声波的作用而有所不同;而且在大功率的作用下,水滴个数会增多,小水滴结合成大水滴的概率增大,因此水滴的平均直径也会相应增大. 本文抓住水滴流场中各小截断水滴平均直径可能不一样的特点,截取加湿器喷出的水滴流场中某一截面进行测量.

固定好加湿器喷水系统和激光束发射装置,使光强分布检测板与激光束垂直,即检测板安装角 $\gamma=0$. 首先获得无水滴流场时检测区域的光强分布 RGB 图,如图 7 所示. 然后获得有水滴流场时 t_n 时刻的光强分布 RGB 图,如图 8 所示. 从图 7 可以看出,当没有水滴流场时,光强分布轮廓清晰;激光束焦点的周围也有光强分布,这是因为激光二极管光束出口处透射率较高的玻璃引起了折射,对分析计算影响不大. 而图 8 激光束焦点周围明显变得模糊,这是因为激光束穿过水滴流场时,光子通过水滴向各个方向散射出去,使得有些地方的光强得到增强.

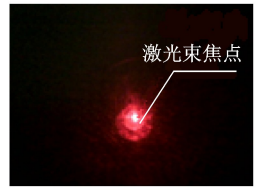

图 7 无水滴流场时的光强分布 RGB 图

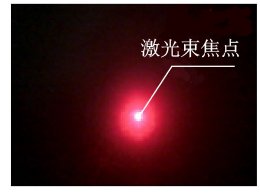

图 8 t_n 时刻有水滴流场光强分布 RGB 图

本文使用 VB. NET 语言编写程序,对图像进行处理,分别获得无水滴流场及 t_n 时刻有水滴流场的灰度图像,如图 9 和图 10 所示.

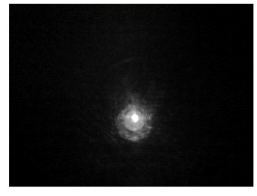

图 9 无水滴流场时的光强灰度图

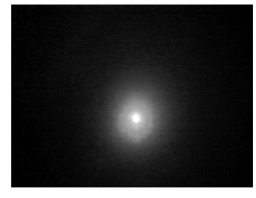

图 10 t_n 时刻有水滴流场光强灰度图

对图 9 及图 10 像素点上的光强和位置进行分析计算,可获得 t_n 时刻散射光强分布灰度图,如图 11 所示. 从图 10 可以看出,在激光束焦点周围分布有散射光强与散射角均不相等的像素点,程序计算时对每个散射点都进行 Mie 散射理论分析计算.

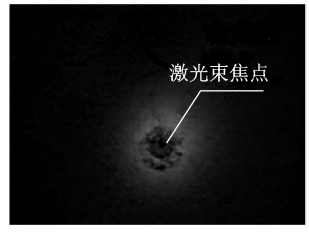

图 11 t_n 时刻散射光强分布灰度图

根据 t_n 时刻的散射光强分布灰度图,基于 Mie 散射理论分析计算出此时刻的水滴平均直径. 同理,间隔相等的 $2i+1$ 个时刻的水滴平均直径,如表 1 所示.

表 1　各时刻水滴平均直径表

时刻	t_{n-i}	t_{n-i+1}	…	t_n	…	t_{n+i}
水滴直径	D_{n-i}	D_{n-i+1}	…	D_n	…	D_{n+i}

在 t_{n-i}时刻到 t_{n+i}时刻这段时间内对 $2i+1$ 个水滴直径进行 Newton 插值,$2i$ 阶插值表达式如下:

$$Q^{2i+1}(t) = (D_n + c_1(t-t_n) + c_2(t-t_n)(t-t_{n-i}) + \cdots + c_{2i+1}(t-t_n)(t-t_{n-i})\cdots(t-t_{n+i}))$$

其中,$c_1 = T[t_n, t_{n-i}]$, $c_2 = T[t_n, t_{n-i}, t_{n-i+1}]$, $\cdots$, $c_{2i+1} = T[t_n, t_{n-i}, t_{n-i+1}, \cdots, t_{n+i-1}, t_{n+i}]$, $c_1, c_2, \cdots, c_{2i+1}$可以根据差商表确定.

在 t_{n-i}时刻到 t_{n+i}时刻这段时间内水滴平均直径 D 的表达式为

$$D = \frac{\int_{t_{n-i}}^{t_{n+i}} Q^{2i+1}(t)\,\mathrm{d}t}{t_{n+i} - t_{n-i}} \tag{20}$$

在本文的实验中,间隔 1 s 抽取一张散射图像进行 Mie 散射理论程序分析,在 4 s 时间内,分别进行 3 组实验 Data1、Data2 和 Data3,获得的水滴直径如表 2 所示.

表 2　5 个时刻获得 3 组数据的水滴直径

时刻/s	水滴直径/μm		
	Data1	Data2	Data3
0	2.1	2.0	2.6
1	1.7	2.7	3.0
2	3.2	2.1	2.5
3	2.0	2.6	2.3
4	2.1	2.3	2.1

根据 Newton 插值公式(19),得到 3 组实验 Data1、Data2 和 Data3 的插值公式如下:

$$Q_1^5(t) = 0.358\,3t^4 - 2.917t^3 + 7.192t^2 - 5.033t + 2.1 \tag{21}$$

$$Q_2^5(t) = -0.1792t^4 + 1.475t^3 - 3.821t^2 + 3.225t + 2.1 \tag{22}$$

$$Q_3^5(t) = -0.062\,5t^4 + 0.575t^3 - 1.738t^2 + 1.625t + 2.6 \tag{23}$$

由式(21)~式(23)可得 3 组数据的插值曲线,如图 12 所示. 从图中可以看出,Data1 变化较大,说明加湿器喷出的水滴直径变化较大,这是由于实验时反复调节加湿器功率的幅度较大. Data2 和 Data3 与 Data1 相比则稳定一些,这是因为实验时对加湿器功率调节的幅度比较小. 从这 3 组数据中可以很好地监测到水滴直径的变化情况.

在时刻 0~4 s 这段时间内,由式(20)计算出 Data1 的水滴平均直径 $D_1 = 2.3$ μm(精确到小数点的后一位),Data2 的水滴平均直径 $D_2 = 2.2$ μm,Data3 的水滴平均直径 $D_3 = 2.6$ μm. 查阅到加湿器的水滴直径也在 1~5 μm 之间,验证了本文所用装置和实施方法的可行性.

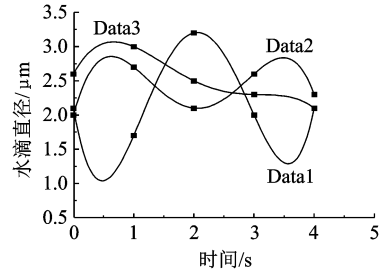

图 12　3 组数据的插值曲线图

5　结　论

本文测量的水滴直径大小在加湿器手册提供的水滴直径范围之内,验证了测量系统和方法的可行性. 由 Mie 散射理论可知,测量系统的分析范围与其发射的激光波长有关. 实验使用的激光波长为 0.65 μm,无因次直径在 10^6 以内,因此能比较精确地测量的水滴直径不超过 204 μm. 实验与数值分析表明,本文所开发的水滴平均直径测量装置可以应用到冰风洞中以实现对水滴直径的测量.

参考文献(References)

[1] Lawson J R, Walton W D, Evans D D. Measurement of droplet size in sprinkler sprays[R]. NBSIR 88-3715, 1988

[2] Prosperetti A, Oguz H N. The impact of drops on liquid surfaces and the underwater noise of rain[J]. Anual Review of Fluid Mechanics, 1993, 25(1): 577-602

[3] Villermaux E, Bassa B. Single drop fragmentation distribution of raindrops[J]. Nature Physics, 2009(5): 697-702

[4] Fan Xueliang, Jia Zhihai, Zhang Jingjing, et al. A video probe measurement system for coarse water droplets in LP steam trubine[J]. Journal of Physics, 2009, 147(1)

[5] Liu Z, Kim A. A review of water mist fire suppression systems—fundamental studies[J]. Journal of Fire Protection Engineering, 1999, 10(3): 32-50

[6] 李修乾,洪延姬,何国强,等. 水滴激光辐照效应研究现状[J]. 激光杂志,2007,28(4):70-72
Li Xiuqian, Hong Yanji, He Guoqiang, et al. Status of study on the effect of laster radiation to water droplet[J]. Laser Journal, 2007, 28(4): 70-72(in Chinese)

[7] 汪继文,陆和军,张妍妍. 基于粒子系统的水滴溅落模拟[J]. 科学技术与工程,2010,10(6):1547-1550
Wang Jiwen, Lu Hejun, Zhang Yanyan. Water droplet splashign down simulation based on particle system[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(6): 1547-1550(in Chinese)

(下转第 1191 页)

阐释推力室的“狗窝”破坏过程;

4) 提高推力室寿命,减缓低周疲劳损伤需减小循环过程中的应变值,而降低蠕变损伤则需从降低结构应力方面着手.

参考文献 (References)

[1] Riccius J, Haidn O J, Zametaev E B. Influence of time dependent effects on the estimated life time of liquid rocket combustion chamber walls[R]. AIAA 2004-3670, 2004

[2] Quentmeyer R J. Experimental fatigue life investigation of cylindrical thrust Chambers[R]. AIAA-77-893, 1977

[3] Arya V K, Arnold S M. Viscoplastic analysis of an experimental cylindrical thrust chamber line[J]. AIAA Journal, 1992, 30(3): 781-789

[4] Arya V K. Nonlinear structural analysis of cylindrical thrust chambers using viscoplastic models[R]. NASA-CR-185253, 1991

[5] Schwarz W, Schwub S, Quering K, et al. Life prediction of thermally highly loaded components modeling the damage process of a rocket combustion chamber hot wall[J]. CEAS Space J, 2011, 1: 83-97

[6] Riccius J, Haidn O J. Determination of linear and nonlinear parameters of combustion chamber wall materials[R]. AIAA-2003-4901, 2003

[7] Asraff A K, Sunil S, Muthukumar R, et al. Stress analysis & life prediction of a cryogenic rocket engine thrust chamber considering low cycle fatigue, creep and thermal ratcheting[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2010, 63(2-3): 601-606

[8] Asraff A K, Sunil S, Muthukumar R, et al. New concepts in structural analysis and design of double walled LPRE thrust chamber [R]. AIAA-2006-4368, 2006

[9] 杨进慧,陈涛,金平,等. 液体火箭发动机再生冷却槽寿命预估[J]. 航空动力学报, 2012, 27(4): 907-912
Yang Jinhui, Chen Tao, Jin Ping, et al. Life prediction of cooling passage for reusable liquid rocket engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(4): 907-912(in Chinese)

[10] Kuhl D, Woschnak A, Haidn O J. Coupled heat transfer and stress analysis of rocket combustion chambers[R]. AIAA-98-3373, 1998

[11] Porowski J S. Development of a simplified procedure for thrust chamber life prediction[R]. NASA CR-165585, 1981

(编　辑:张　嵘)

(上接第 1167 页)

[8] 陈养喟. 天然水体中激光衰减的现场测量[J]. 舰船科学技术, 2000(1): 3-7
Chen Yangkui. Field measurements of laser aattenuation in natural waters[J]. Ship Science and Technology, 2000(1): 3-7(in Chinese)

[9] Toyoaki Tanaka. The method for measuring water droplets by means of polyvinyl alcohol film[J]. Meteorological Research Institute, 1972, 23(4): 287-306

[10] Vivekananda J, Zhang G, Politovich M K. Estimation of cloud droplet size and liquid water content using dual-wavelength radar measurements[C]//Transactions on Geoscience and Remote sensing. Extremadura: IEEE, 2000: 1813-1816

[11] Zama Y, Kawahashi M, Hirahara H. Development of simultaneous measurement of droplet size and 3D velocity in spray[R]. 2003

[12] 王君,何俊发. 简易 Mie 散射数值计算方法的研究[J]. 应用光学, 2005, 26(4): 13-16
Wang Jun, He Junfa. The implementation of straightforward Mie scattering numerical calculation[J]. Applied Optics, 2005, 26(4): 13-16(in Chinese)

[13] 沈建琪,刘蕾. 经典 Mie 散射的数值计算方法改进[J]. 中国粉体技术, 2005, 11(4): 1-5
Shen Jianqi, Liu Lei. An improved algotithm of classical Mie scattering calculation[J]. China Powder Science and Technology, 2005, 11(4): 1-5(in Chinese)

[14] 黄竹青,杨继明,孙春生,等. 激光散射理论在汽轮机蒸汽湿度及水滴直径测量中的应用[J]. 动力工程学报, 2006, 26(2): 241-04(in Chinese)
Huang Zhuqing, Yang Jiming, Sun Chunsheng, et al. Application of the laser scattering theory for monitoring steam wetness and droplet size in steam turbines[J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(2): 241-04

[15] 黄竹清,曹小玲,杨继明,等. 基于 CCD 的蒸汽湿度及水滴直径测量[J]. 光电工程, 2010, 37(4): 39-43
Huang Zhuqing, Cao Xiaoling, Yang Jiming, et al. Application of CCD in mesauring steam moisture and droplet size[J]. Optoelectronic Engineering, 2010, 37(4): 39-43(in Chinese)

(编　辑:李　晶)