

2 确定随机变量的分布

视 SRM 燃气内压 p 为正态分布随机变量, 采用混合同余法^[1,2], 产生均匀随机数:

$$x_i = 589x_{i-1} + 1(\text{mod}32768) \quad (1)$$

如表1所示, 经独立性、均匀性、参数等统计检验表明, 该式产生的随机数列可以供蒙特卡罗随机模拟使用。表1中: IA 为乘子, U 为统计量 μ_r , E 为统计量 χ^2 , U_1 为统计量 μ_1 , U_2 为统计量 μ_2 , U_3 为统计量 μ_3 , RA 为随机数数组。

Table 1 Random number property test

IA	U	E	U_1	U_2	U_3	RA	Test
589	-0.882	14.048	-0.574	-0.665	-0.436	$RA(1)$	Pass
1813	0.638	13.216	-1.081	-1.254	-0.829	$RA(2)$	Pass

3 纤维缠绕壳体的有限元公式

采用二次曲边等参数壳体单元^[3]对原结构进行离散化处理。利用各向异性壳体的 Raissner 修正理论及旋转壳体理论^[3,4], 推导得几何矩阵:

$$[B] = [B_1 \quad B_2 \quad B_3] \quad (2)$$

其中

$$B_i = \begin{bmatrix} \cos\phi \frac{dN_i}{ds} & \sin\phi \frac{dN_i}{ds} & 0 \\ 0 & \frac{N_i}{r} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{dN_i}{ds} \\ 0 & 0 & -\frac{dN_i}{ds} \\ -\sin\phi \frac{dN_i}{ds} & \cos\phi \frac{dN_i}{ds} & -N_i \end{bmatrix}, (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

此结构相应的弹性矩阵是 [3, 5]

$$\bar{D}_1 = \begin{bmatrix} \bar{D} & 0 \\ 0 & D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & B_{11} & B_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & B_{12} & B_{22} & 0 \\ B_{11} & B_{12} & D_{11} & D_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{22} & D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & 0 \\ B & D & 0 \\ 0 & 0 & D_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 A 为面内刚度, B 为耦合刚度, D 为挠曲刚度, D_2 为横向剪切刚度, 近似地取为^[3,4,6]

$$D_2 = 5E_y H / (12(1 + \nu_x E_y / E_x)) \tag{5}$$

计算 A, B, D 时涉及到每层纤维缠绕角随回旋壳半径变化的问题, 利用纤维缠绕理论^[7]并参照图1、图2, 得本文问题中的椭球曲线回旋体纤维缠绕角计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} z_c &= b \sqrt{1 - (r_c/a)^2} \\ \sin \alpha_i &= \pm b r_c / a \sqrt{b^2 - (z - z_c)^2}, \quad 0 \leq z < z_c \\ \sin \alpha_i &= \pm r_c / a, \quad z_c \leq z \leq z_c + L \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

得到了几何矩阵 B , 弹性矩阵 $\bar{D}_1$ 后, 则可按标准步骤计算单元刚度矩阵。最后依据常规有限元的步骤完成纤维缠绕壳体的应力计算。

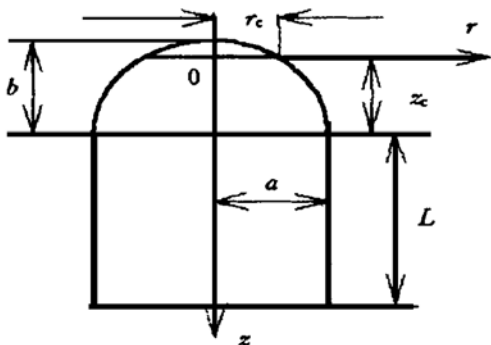


Fig. 1 A half outline of chamber

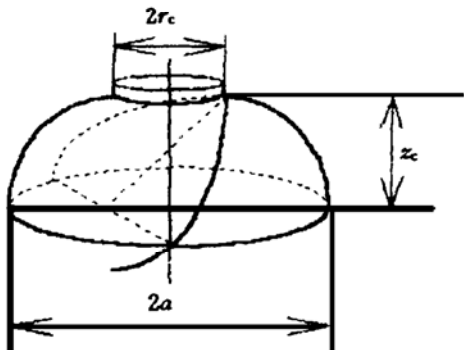


Fig. 2 Ellipsoid end

4 算 例

设 SRM 纤维缠绕薄壳 (8层平面缠绕加6层环向缠绕, 共14层) 如图1、图2所示, 表2给出该结构的各类参数值, 求该结构的位移与应力响应。

Table 2 Original parameter

Geometry parameter	Engineering constant	Load parameter
Thick/Layer: $4.5 \times 10^{-4} \text{m}$	$E_x = 207.0 \text{GPa}$	Pressure: $p = 4.0 \text{MPa}$ Variance: $\sigma^2 = 120$
Layer number: 8 (PSW) + 6 (CW) = 14	$E_y = 19.0 \text{GPa}$	
$r_c = 0.275 \text{m}$	$E_s = 4.8 \text{GPa}$	
$a = 0.70 \text{m}$	$\nu_x = 0.21$	
$b = 0.35 \text{m}$	$\nu_y = E_y \cdot \nu_x / E_x = 0.0193$	
$L = 0.485 \text{m}$	$G_N = \frac{E_y}{2(1 + \nu_y)} = 9.32 \text{GPa}$	

解: 利用表2所示的参数值, 由式 (6) 可算得该结构缠绕角在 $\pm 90^\circ \sim \pm 23^\circ$ 之间连续变化 (沿轴向)。再用本文理论与程序可算得如图 (3~7) 所示的结果。

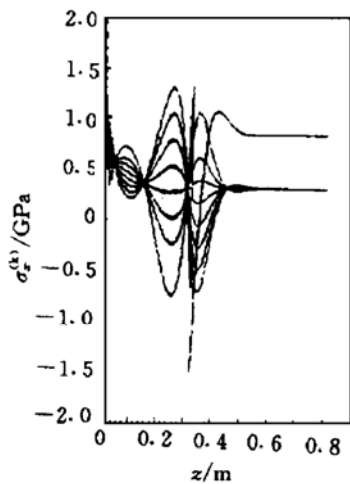


Fig. 3 Fiber longitudinal stress

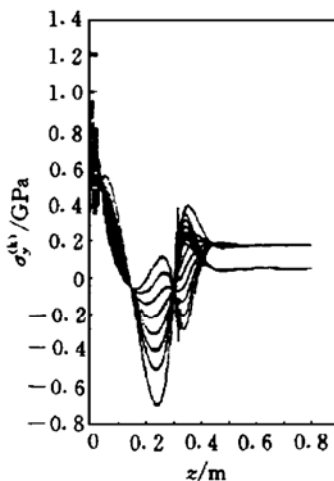


Fig. 4 Fiber lateral stress

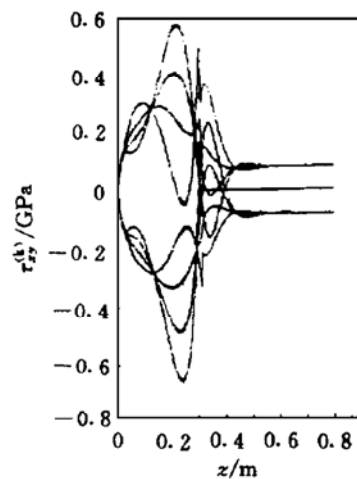


Fig. 5 Shear stress

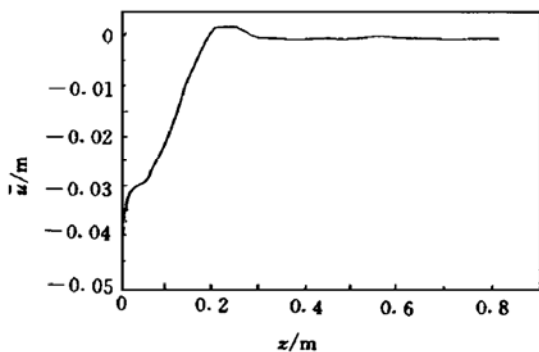


Fig. 6 Axial displacement

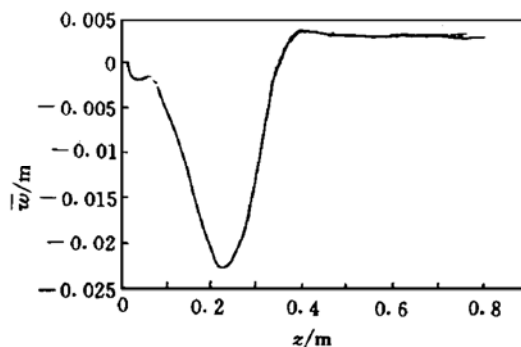


Fig. 7 Radial displacement

得到结构应力分布后,再确定结构中发生最大应力的位置,并对这些特殊点的应力对随机变量 p (燃气内压) 的响应做了统计。设 p 服从 $N(\mu, \sigma^2) = N(4 \times 10^6, 1.2 \times 10^2)$ 的正态分布,在蒙特卡罗模拟过程中,模拟数取为10000次,经10000次有限元计算及采用矩估计法计算,得结构中最大拉、压、剪切正轴应力 ($\sigma_x^k, \sigma_y^k, \tau_{xy}^k$) 的数学期望和方差列于表3中。由表3可见,若燃气内压 p 为正态随机变量,结构应力也做出相应的正态响应。应力随机分布的确定可为结构可靠性评估提供先决条件。

Table 3 Expectation & variance of $\sigma_x^k, \sigma_y^k, \tau_{xy}^k$

$\pm$ Maximum stress	Expectation	Variance
$+\sigma_x^k$	1614MPa	20
$-\sigma_x^k$	-1504MPa	17
$+\sigma_y^k$	987.6MPa	7.3
$-\sigma_y^k$	-691.0MPa	3.6
$+\tau_{xy}^k$	574.1MPa	2.5
$-\tau_{xy}^k$	-649.9MPa	3.2

参 考 文 献

- 1 陈 虬,刘先斌编著.随机有限元法及其工程应用.成都:西南交通大学出版社,1993.
- 2 徐钟济编著.蒙特卡罗方法.上海:上海科学技术出版社,1985.
- 3 王勖成,邵 敏编著.有限元法基本原理与数值方法.北京:清华大学出版社,1988.
- 4 张 锦,张乃恭编著.新型复合材料力学机理及其应用.北京:北京航空航天大学出版社,1993.
- 5 王兴业,唐羽章编著.复合材料力学性能.长沙:国防科技大学出版社,1988.
- 6 李顺林主编.复合材料工作手册.北京:航空工业出版社,1988.
- 7 冷兴武著.纤维缠绕原理.济南:山东科学技术出版社,1990.

垂直射流混合的三维湍流数值模拟^{*}

王 卫 东

(航天工业总公司31所, 北京, 100074)

摘 要: 采用三维 SIMPLE 程序和 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型对三维受限垂直射流进行数值模拟, 研究了不同的几何变量和流动参数对射流穿透和混合的影响。模拟结果表明, 三维垂直射流最显著的流动特征是形成了流向旋涡。射流与来流的混合程度取决于旋涡的位置、作用范围和强弱。单股射流随动量比、旋涡强度和尺度的增加, 混合增强。对于单排多股射流, 喷孔间距直接影响旋涡涡心位置。密排射流, 旋涡过于靠近下壁面, 旋涡无法影响上面来流; 但喷孔排列也不能过于稀疏, 否则涡对靠的太近, 旋涡对侧面影响不大。 S/H 和动量比不变, 改变孔径 D 对射流穿透几乎无影响。这一重要结论说明 S/H 和 J 是决定多股受限射流穿透深度的最重要的量。

主题词: 垂直气流, 气体射流, 混合, 数值分析

分类号: V235. 213

CFD MIXING ANALYSIS OF VORTEX GENERATOR JETS INJECTED INTO CONFINED CROSSFLOW IN RECTANGULAR DUCT

Wang Weidong

(The 31st Research Inst., Beijing, 100074)

Abstract: A CFD study was performed using 3D SIMPLE program and $k-\epsilon$ double-equation turbulence model to analyse the effects of geometries and flow parameters on the penetration and mixing of transverse jet. It was found that the size and location of streamwise vortex has a significant effect on the mixing rates. Three jet configurations numerically tested were 1) single hole jet; 2) slot jet; 3) multile jets. Comparing single hole jet with slot jet, fast mixing rate could be acquired by Vortex Generator Jets, also streamwise vortex. For multiple jets, optimum location of streamwise vortex was found to enhance mixing quickly by adjusting the orifice spacing and momentum ratio. Orifice size has little influence on the jet penetration depth at constant orifice spacing and momentum ratio.

Subject terms: Vertical air current, Gas jet, Mixing, Numerical analysis

1 引 言

垂直射流的流动情况十分复杂, 过去多采用模型试验来研究流场参数分布或者依靠经验公式来预示流动情况。前者成本高且耗时费力并受试验条件和测试技术的限制; 而后者只能作简单的定性分析, 不能为工程设计和改进提供精确可靠的依据^[1]。近年来人们对三维湍流射流时均场进行了数值模拟^[2~5], 流向旋涡场是时均流场最明显的特征, 与试验结果符合很好; 文献 [6] 对 RQL 燃

* 收稿日期: 1997-04-11, 修回日期: 1997-10-20