

# 受控液扇撞击的混合特性研究

姚明明<sup>1</sup>, 刘 茹<sup>1</sup>, 周 军<sup>1</sup>, 雷凡培<sup>2</sup>

(1. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100; 2. 中国航天科技集团公司, 北京 100037)

**摘 要:** 对溅板式层板喷注单元撞击后产生的两个相同受控液扇的混合特性进行研究, 探讨液扇扩张角  $\beta$  对混合效率因子  $E_m$  的影响。研究过程中对圆柱射流流强分布数学模型进行分析并改进, 建立了适用于两个相同受控液扇撞击后的流强分布的数学模型。模拟计算  $E_m$  值与试验值的偏差在  $-0.86\% \sim 12.9\%$  之间。研究结果表明: 当  $\beta < 60^\circ$  时,  $E_m$  随  $\beta$  的增加而增加, 当  $\beta > 60^\circ$  时  $E_m$  变化规律不明显。

**关键词:** 受控液扇; 混合特性; 数学模型

中图分类号: V434-34 文献标识码: A 文章编号: 1672-9374 (2011) 05-0013-06

## Investigation on mixture characteristics of two controlled impinging liquid sheets

YAO Ming-ming<sup>1</sup>, LIU Ru<sup>1</sup>, ZHOU Jun<sup>1</sup>, LEI Fan-pei<sup>2</sup>

(1. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;

2. China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100037, China)

**Abstract:** The research on mixture characteristic of two same liquid sheets generated after the impinging of splash platelet injector is conducted. The effect of expanding angle ( $\beta$ ) of liquid sheets on mixing efficiency ( $E_m$ ) is discussed. In the process of investigation, the mathematical models of the mass flux distribution generated by single like liquid sheets impinging are founded based on analyzing and revising the mathematical models of mass flux distribution of two cylindrical jets impinging. The comparison result indicates that the relative deviation between suimulation calculation  $E_m$  value and experimental value is in the range of  $-0.86\%$  to  $12.9\%$ . The research results show that  $E_m$  increases with the increase of  $\beta$  when  $\beta$  is less than  $60^\circ$ , but the variation law of  $E_m$  along with the expanding angle is disordered when the angle is in the range of  $60^\circ \sim 90^\circ$ .

**Keywords:** controlled liquid sheet; characteristic of mixture; mathematical model

收稿日期: 2011-05-31; 修回日期: 2011-08-11

基金项目: 总装备部预研项目

作者简介: 姚明明 (1983—), 男, 硕士研究生, 研究领域为液体火箭发动机设计技术

## 0 引言

双组元推进剂液体火箭发动机的性能和可靠性取决于喷注器组织的高效和稳定的燃烧以及发动机有效的冷却,这些都与推进剂在燃烧室中的混合特性密切相关。

Rupe<sup>[1,2]</sup>在喷气推进实验室首次从动量比、撞击角、面积比、尺寸大小、流体物理特性和相容性及喷嘴特性等方面对圆柱射流的混合特性做了全面的试验研究。使用四氯化碳和水模拟推进剂(硝酸和苯胺),定义了混合效率因子 $E_m$ (也称之为混合均匀性参数),提出了Rupe准则,在工程设计中具有极大的应用价值。层板喷注器由于结构设计灵活,喷嘴排列方便,喷孔密度高,雾化质量和均匀性较好,有利于提高推力室性能,目前广泛用于姿轨控液体火箭发动机<sup>[3,4,5]</sup>。

本文对溅板式层板喷注单元产生的两个相同受控液扇撞击后的混合特性进行研究。

## 1 试验件和测量系统

喷注单元结构由三部分组成:入口板、中间板、出口板,见图1。溅板式层板喷注器雾化过程起始于喷嘴内部,喷出时已发展成湍流液扇,喷注单元中两股射流的撞击实质上是两个经过层板流动通道后形成的液扇撞击。

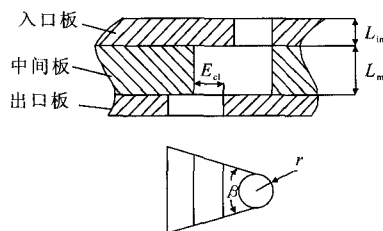


图1 喷注单元单路结构

Fig. 1 Structure of single stream of splash platelet injector

图中 $L_{in}$ 为入口板厚度; $L_m$ 为中间板厚度; $E_{ci}$ 为出口间隙; $r$ 为入口板推进剂入口孔半径; $\beta$ 为中间板扩张角。试验用收集坐标见图2。

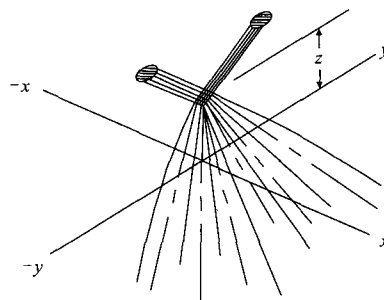
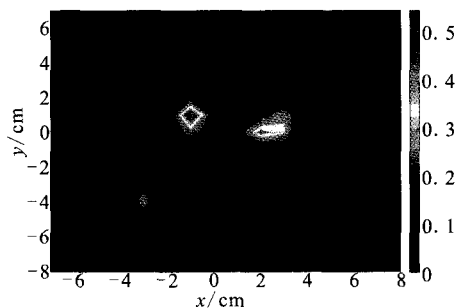


图2 液流试验收集坐标

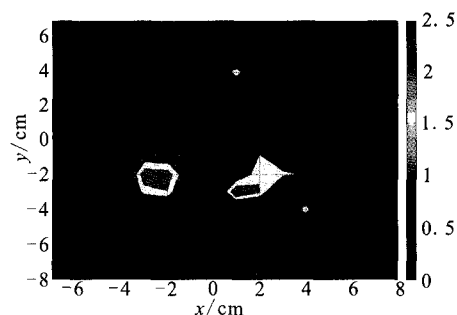
Fig. 2 Coordinate of water-collecting device

流强、混合比试验系统由管路系统和收集台组成。收集台主要由收集面和试管架组成,收集面为 $16 \times 16$ 的单元格,每个单元格为 $1 \times 1$  ( $\text{cm}^2$ )的正方形,单元格通过橡皮软管与试管架中的试管相连。试验件装夹在收集面的正上方中心位置,两个相同受控液扇的入射角相同。

测量试管中液体的质量及混合比,可得到相应的流强及混合比分布。试验中以纯净水为介质,模拟氧化剂路的水中增加染色剂,用光电比色仪获得混合比。图3为部分液流试验结果。



(a) 流量为4 g/s、扩张角为60°时流强分布



(b) 流量为4 g/s、扩张角为75°时混合比分布

图3 流强与混合比分布试验结果

Fig. 3 Test results of distributions of mass flux and mixture ratio

## 2 喷雾流强分布的数学模型

由两股圆柱射流组成的喷注单元, 撞击后流强分布可以用椭圆边界内的二维高斯分布近似地表征<sup>[6]</sup>, 见公式 (1)。Reardon 等人在描述两股圆柱射流喷注单元时采用该方法, 此方法对于预测两股自击式射流撞击所产生的流强分布较为适合<sup>[7]</sup>。

$$\dot{m}_i(x, y, z) = \frac{\dot{m}_{001}}{z} \left[ \frac{1+c_1\left(\frac{y}{z}\right)+c_2\left(\frac{y}{z}\right)^2}{1+c_5\left(\frac{y}{z}\right)+c_6\left(\frac{y}{z}\right)^2} + c_3\left(\frac{x}{z}\right) + c_4\left(\frac{x}{z}\right)^2 \right] \times \left[ 1+c_5\left(\frac{y}{z}\right)+c_6\left(\frac{y}{z}\right)^2 \right] e^{-a\left(\frac{x}{z}\right)^2-b\left(\frac{y}{z}\right)^2} \quad (1)$$

式 (1) 满足连续性, 其中

$$\left[ \frac{1+c_1\left(\frac{y}{z}\right)+c_2\left(\frac{y}{z}\right)^2}{1+c_5\left(\frac{y}{z}\right)+c_6\left(\frac{y}{z}\right)^2} + c_3\left(\frac{x}{z}\right) + c_4\left(\frac{x}{z}\right)^2 \right] \times \left[ 1+c_5\left(\frac{y}{z}\right)+c_6\left(\frac{y}{z}\right)^2 \right]$$

反映流强的椭圆形分布,

$$\frac{1+c_1\left(\frac{y}{z}\right)+c_2\left(\frac{y}{z}\right)^2}{1+c_5\left(\frac{y}{z}\right)+c_6\left(\frac{y}{z}\right)^2}$$

反映  $x$  向、 $y$  向之间的关联

度,  $e^{-a\left(\frac{x}{z}\right)^2-b\left(\frac{y}{z}\right)^2}$  反映流强在  $x$  向、 $y$  向的高斯分布。系数  $\dot{m}_{001}$  和  $a, b, c_1 \sim c_6$  是撞击角、孔径、撞击动量和孔长等参数的函数。

对于相同的两股圆柱射流, 流强分布具有对称性、非负性, 此时  $c_1=c_5, c_3=0, c_4=a, c_2=c_1*c_1/4, c_6=c_5*c_5/4$ , 只需确定  $a, b, c_1$  三个系数。通过研究发现对于相同的两股圆柱射流,  $a$  反映高斯分布沿  $x$  向的展宽,  $b$  反映高斯分布沿  $y$  向的展宽,  $c_1$  反映流强中心沿  $y$  向偏离  $x$  轴的距离。

理想情况下, 对于相同的液扇撞击后流强分布也应具有对称性、非负性。对两个相同液扇撞击试验研究发现, 当系数  $c_4 \neq a$  时, 公式 (1) 可以很好地再现液扇撞击后的流强分布。适用于两

个相同液扇撞击后流强分布的表达式如下:

$$\dot{m}(x, y, z) = \frac{\dot{m}_{001}}{z} \left[ 1+c_1\left(\frac{y}{z}\right) + \frac{c_1^2}{4}\left(\frac{y}{z}\right)^2 \right] \times \left[ 1+c_4\left(\frac{x}{z}\right)^2 \right] e^{-a\left(\frac{x}{z}\right)^2-b\left(\frac{y}{z}\right)^2} \quad (2)$$

此时需要确定的系数有四个, 分别为  $a, b, c_1, c_4$ 。对公式 (2) 沿  $x$  和  $y$  向进行动量积分, 可以从冷流试验数据中对各个系数进行确定。

系数  $a$  和  $c_4$  的处理方法如下: 对 (2) 式沿  $x$  向进行力矩积分, 离散表达式如下:

$$\bar{X}_E = \frac{\sum_{i=1,n} \sum_{j=1,n} x_{i,j} \dot{m}_{i,j}}{\sum_{i=1,n} \sum_{j=1,n} \dot{m}_{i,j}} \quad (3)$$

$n$  为收集平面单元格数, 试验中收集面为  $16 \times 16$  的单元格, 因此  $n$  为 16。相应解析表达式为:

$$\bar{X}_A = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x \dot{m}(x, y, z_c) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{m}(x, y, z_c) dx dy} \quad (4)$$

由于  $\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x \dot{m}(x, y, z_c) dx dy = 0$ , 对上式的分子积

分域进行修改。两个相同受控液扇的入射角相同, 且位于收集面正中心的上方, 理想情况下取  $x$  积分域为  $x \in [0, \infty)$  或者  $x \in (-\infty, 0]$ , 不影响数据处理的正确性。这里取  $x \in [0, \infty)$ 。  $\bar{X}_E$  和  $\bar{X}_A$  新的表达式为:

$$\bar{X}_E' = \frac{\sum_{i=8,16} \sum_{j=1,16} x_{i,j} \dot{m}_{i,j}}{\sum_{i=1,16} \sum_{j=1,16} \dot{m}_{i,j}} \quad (5)$$

$$\bar{X}_A' = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x \dot{m}(x, y, z_c) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{m}(x, y, z_c) dx dy} \quad (6)$$

$$\text{得到 } \bar{X}_E' = \bar{X}_A' = \frac{z_c}{2\sqrt{a\pi}} \frac{1+\frac{c_4}{a}}{1+\frac{c_4}{2a}} \quad (7)$$

另外定义如下公式

$$\left.\frac{s}{s_{x=0}}\right|_E = \frac{\sum_{i=1,16} \sum_{j=1,16} \dot{m}_{ij}}{\frac{1}{\Delta} \sum_{i=8,9} \sum_{j=1,16} \dot{m}_{ij}} \quad (8)$$

$\Delta$  为两个单元格宽度，此处取为 20。

$$\left.\frac{s}{s_{x=0}}\right|_A = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{m}(x,y,z_c) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \dot{m}(0,y,z_c) dy} \quad (9)$$

得到 
$$\left.\frac{s}{s_{x=0}}\right|_E = \left.\frac{s}{s_{x=0}}\right|_A = z_c \sqrt{\frac{\pi}{a}} \left(1 + \frac{c_4}{2a}\right) \quad (10)$$

联立式 (7) 和式 (10) 可确定系数  $a, c_4$ 。

对公式 (2) 沿  $y$  向进行力矩积分，并采用公式 (5~10) 相类似的方法得到系数  $b, c_1$ 。

图 4 为  $a, b, c_1, c_4$  等四个参数随扩张角的变化规律（试验过程中保持喷注单元其他参数不变，只改变扩张角  $\beta$ ，分别为  $45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$  和  $90^\circ$ ）。

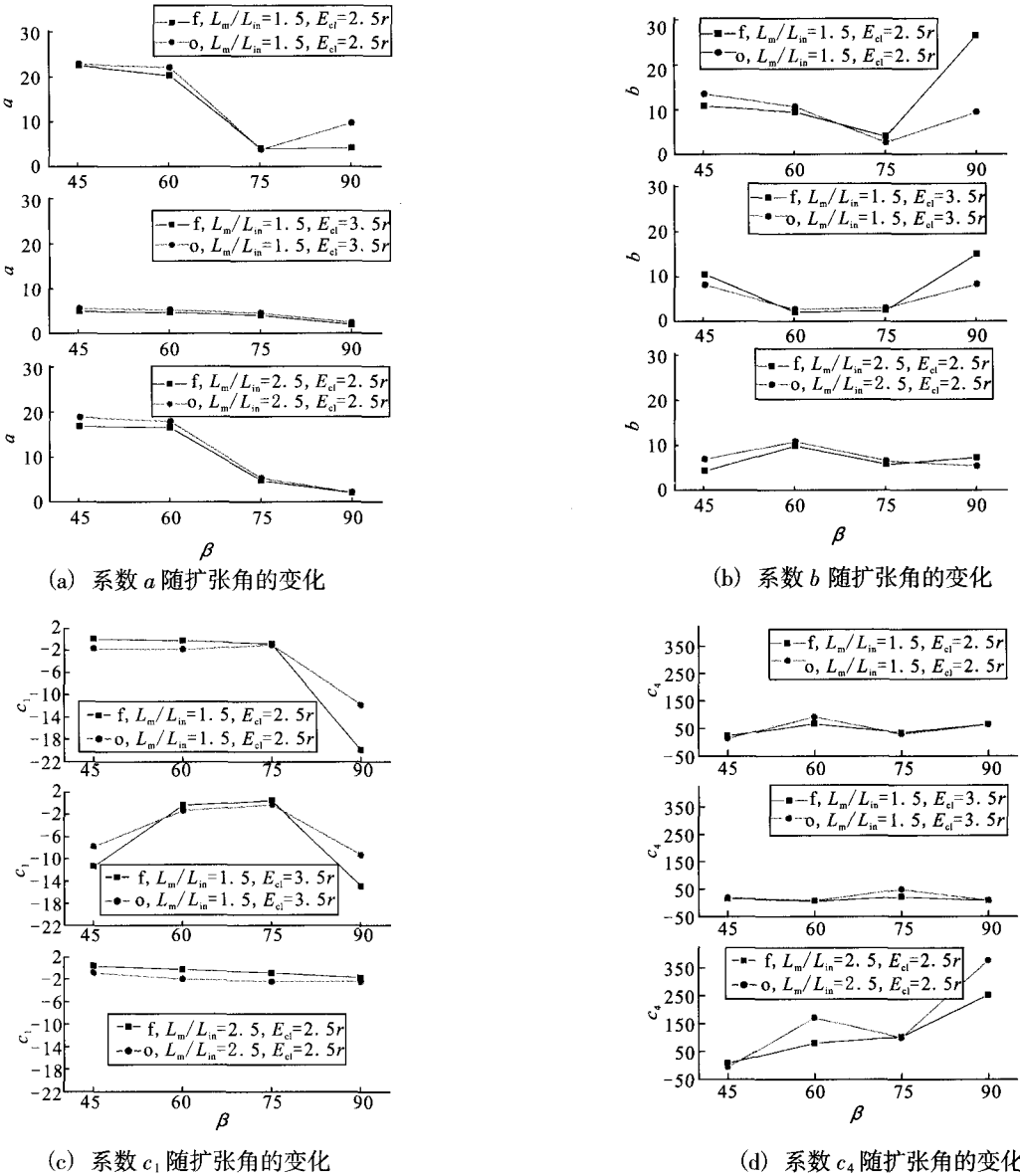


图 4 系数  $a, b, c_1$  及  $c_4$  随扩张角的变化

Fig. 4 Variation of coefficients  $a, b, c_1$  and  $c_4$  with expanding angles

分布计算公式见式 (11)。

3 数学模型的验证

根据上文中对各个系数的确定, 就可对液扇撞击后流强和混合比分布进行模拟计算。混合比

$$R(x,y,z)=\frac{m_o(x,y,z)}{m_t(x,y,z)}$$

(11)

图 5 为部分计算结果与试验结果的对比。

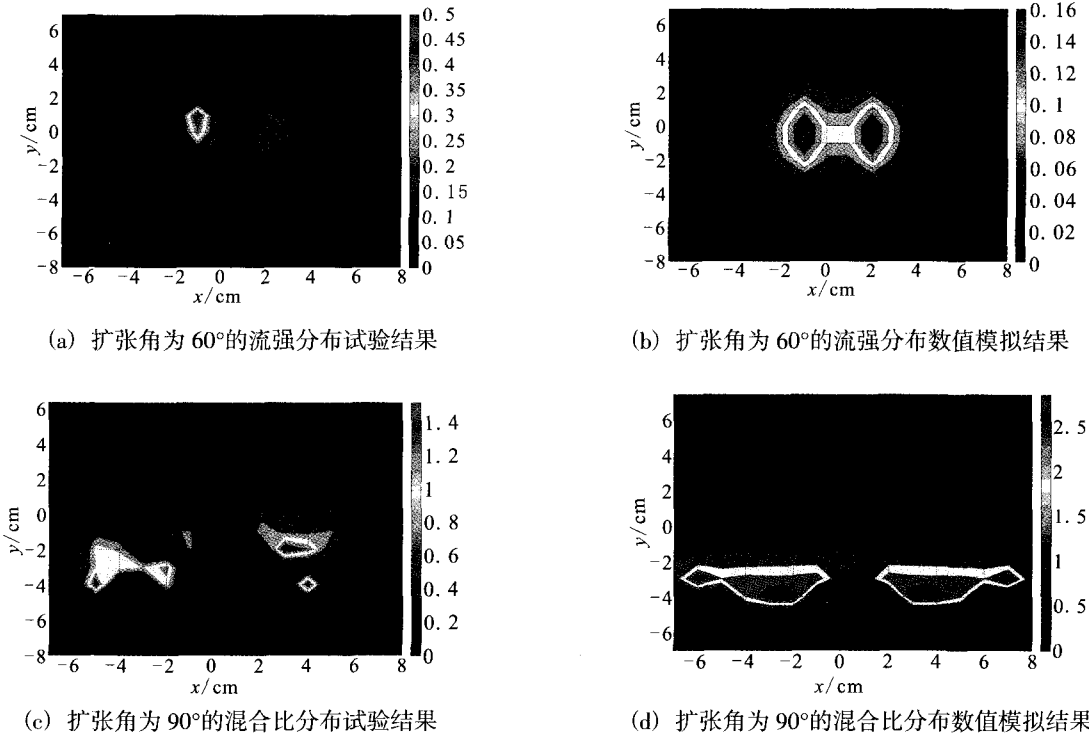


图 5 流量为 4 g/s 时流强和混合比分布计算结果与试验结果对比

Fig. 5 Comparison of tested and numerical results for distributions of mass flux and mixture ratio for flow rate at 4 g/s

对比上述结果发现, 在流强分布方面, 模拟结果与试验结果最为接近, 模拟精确度较高, 而在混合比方面, 二者存在一定差异。造成模拟和试验结果之间的差异主要是由两个方面引起的: 一方面是数学模型, 此模型是针对理想的喷注撞击情况而言, 在模拟过程中, 倾向于抹平液流撞击后所形成的椭圆形高斯分布, 使其不会出现尖刺, 模拟结果相比试验结果比较规整; 另一个方面是试验本身存在缺陷, 试验件加工存在毛刺, 激光加工的板片存在入口孔不圆、异形通道不规则、角度存在偏差等问题, 板片的组装是利用胶粘和螺栓紧定完成的, 存在层与层之间是否紧密贴合、定位是否准确等问题, 再加上液流收集是利用 16×16 的 1 cm<sup>2</sup> 的格子来完成, 存在着收集误差等。

虽然存在差异, 此模拟结果仍然能够较正确地反映流强和混合比分布, 在数量级以及分布趋势两个方面均能相对正确地反应试验情况, 对流强和混合比分布做出实效的预测。

4 扩张角对  $E_m$  的影响

图 6 表示扩张角  $\beta$  为变化参数时, 混合效率因子  $E_m$  的试验值与模拟值的对比。从图 6 中可以看出, 使用数学模型计算的混合效率因子  $E_m$  能较好的模拟试验件的  $E_m$  随各个参数的变化情况, 误差范围在 -0.86%~12.9% 之间。

从图 6 还可看出: 在扩张角小于 60° 时,  $E_m$  随角度增大而逐渐增大, 在扩张角大于 60° 后,  $E_m$  随角度变化规律不明显。这可能是因为角度

较小时, 出口液扇比较均匀, 液流在两边的集中程度不高, 液扇中部区域存在较大的流量, 撞击后能形成比较有规律的分布, 随着角度在一定范围内增加, 液扇中部区域的流量变少, 两边的集中程度增加, 但是撞击后仍能形成比较有规律的分布, 有利于撞击雾化和混合, 所以在  $45^\circ \sim 60^\circ$  之间,  $E_m$  随着扩张角  $\beta$  增大而增大。当角度大于  $60^\circ$  后, 出口液扇的流量主要集中在两边, 中部区域几乎没有, 液扇相撞相当于两股互相背离的圆柱射流的撞击, 对混合产生了的不利影响。随着角度增大, 出口液扇始终保持在此种状态, 没有出现对混合有利的情况。

## 5 结论

在两个相同受控液扇撞击试验研究的基础上, 对圆柱射流流强分布数学模型进行分析并改进, 使之适用于两个受控液扇撞击后的流强分布, 并对各个系数进行推导计算, 模拟计算的  $E_m$  值与试验值的偏差在  $-0.86\% \sim 12.9\%$  之间; 对试验数据进行分析: 当  $<60^\circ$  时,  $E_m$  随  $\beta$  的增加而增加, 当  $>60^\circ$  时  $E_m$  变化规律不明显。

### 参考文献:

- [1] RUPE J H. The liquid-phase mixing of a pair of impinging streams [R]. Pasadena, CA: California Inst. of Technology, 1953.
- [2] RUPE J H. A correlation between the dynamic properties of a pair of impinging streams and the uniformity of mixture ratio distribution in the resulting spray: JPL progress rept. No. 20-209[R]. USA: JPL, 1956.
- [3] 宁建华. 层板喷注器光刻工艺技术研究 [J]. 火箭推进, 2001, 27 (2): 19-47.
- [4] 宁建华, 雷娟萍. 光刻技术在整体式层板催化剂床研究中的应用[J]. 火箭推进, 2006, 32(6): 43-47.
- [5] 宁建华. 光刻技术在液体火箭发动机中的应用[J]. 火箭推进, 1992, 18 (4): 74-77.
- [6] 庄逢辰. 液体火箭发动机喷雾燃烧的理论、模型及应用 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1995.
- [7] HINES W S. Extension of a thrust chamber compatibility model, rocketdyne: final report AFRPL-TR-72-19 [R]. California: Division of North American Rockwell Corporation, 1972.

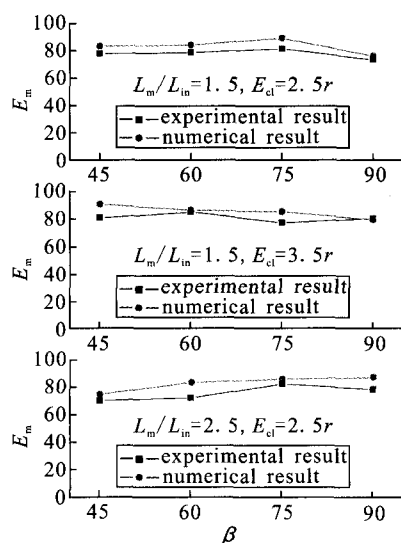


图6 扩张角  $\beta$  为变化参数时, 混合效率因子  $E_m$  的试验值与模拟值的对比

Fig. 6 Comparison between simulation and experiment values of  $E_m$  with the variation of  $\beta$

(编辑: 陈红霞)