

# 超声速气流中液体喷射穿透深度的研究

李长亮 陈立红 顾洪斌 田璐 梁园

中国科学院力学研究所 高温气动重点实验室 100190

**摘要:** 采用实验的方法对不同角度的单孔喷射和凹腔的不同位置的喷射情况进行了研究。研究表明: 不同角度的单孔喷射, 在比较低的动量比的情况下,  $90^\circ$  喷射的穿透深度不是最高; 在较高动量比下, 大角度喷射的穿透深度优势明显; 凹腔的不同位置的喷射, 射流的穿透深度相差很大, 穿透深度随动量比的关系曲线类型也不相同。

**关键字:** 超声速气流 角度喷射 不同位置 穿透深度

## 引言

燃料混合是研制超燃冲压发动机的关键技术之一。超燃冲压发动机中燃料的混合有以下几个难点: (1) 燃料的穿透深度受到极大的限制, 燃料不能与主流充分混合; (2) 燃料在燃烧室内的停留时间在毫秒量级, 在此时间内, 完成燃料的混合和化学反应, 相当的困难; (3) 超音速剪切层的稳定性较强, 在同样的主流与剪切层密度比条件下, 超音速剪切层的扩散率仅有不可压剪切层的  $1/4 \sim 1/3$ <sup>[1]</sup>。现在对于超燃冲压发动机的燃料混合的研究, 大多是针对气态燃料的, 对于液体的研究, 相对较少。本文对超声速气流中不同角度的单孔喷射和凹腔的不同位置的喷射的穿透深度, 进行了研究, 并给出关系曲线, 总结了相应的规律。

## 实验装置

### 设计工况

实验模拟 25 km 高空马赫 6 的飞行状态。隔离段出口马赫数  $2.51 \pm 0.01$ 。对此马赫数下的液体在不同角度的单孔以及带凹腔模型的不同位置状况进行了冷流实验研究。由于燃料的穿透深度和破碎对液体的特性不敏感<sup>[2]</sup>, 所以实验采用水作为典型液体来进行研究。实验中静压在 65~85 kPa 之间, 气流总温 300 K。

### 试验台设计

实验采用直联台进行研究。直联台具有周期短, 成本低, 易于观察等优点, 适合基础研究。如图 1, 是实验台的实物图。气流从最右边的稳压室, 依次通过拉瓦尔喷管(变为超声速气流), 隔离段, 燃烧室 1, 燃烧室 2 以及尾喷管, 实验在中间的燃烧室 1 段进行。

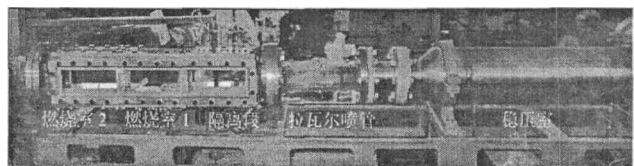


图 1 直联台实物图

### 喷射方案设计

对于单孔带角度的喷射, 孔的直径为 0.5 mm。实验采用壁面喷射的形式, 以喷孔与壁面平行线的夹角为变量, 以  $15^\circ$  为间隔,  $15^\circ \sim 90^\circ$  共 6 组实验。图 2 为方案示意图。

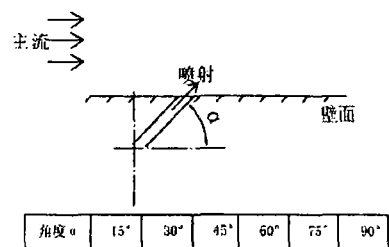


图 2 单孔角度喷射示意图

对于凹腔不同位置喷射的实验, 喷射孔的直径也是 0.5 mm。凹腔深 12 mm, 长 78 mm, 后斜坡为  $45^\circ$ 。设计凹腔上游 2 个位置, 凹腔内部 3 个位置, 后斜坡 1 个位置。实验方案如图 3 所示。

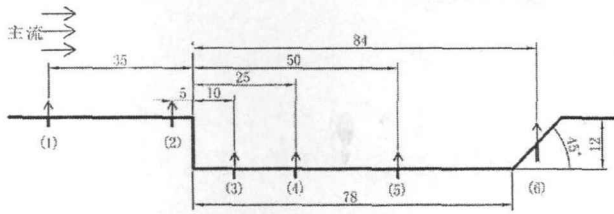


图3 凹腔不同位置喷射示意图

### 穿透深度的定义

把得到的有效时间内的散射图像进行叠加，对于带角度的单孔喷射，取离孔 10 mm 处和 100 mm 处的穿透深度各一组（由于气流存在波动，所以取各自范围内的最大值）。对于带凹腔模型的喷射，取凹腔范围内的最大值（水在气流中的深度减去凹腔的深度）。所得到的穿透深度，都除以喷孔直径，对喷孔直径做无量纲化，作为最终穿透深度的值。

### 单孔角度喷射

单孔角度喷射有  $15^\circ \sim 90^\circ$ ，间隔  $15^\circ$ ，共 6

### 测量方法

实验采用散射成像的方法去分析燃料的混合。利用散射成像可以得到流向中心截面上燃料的穿

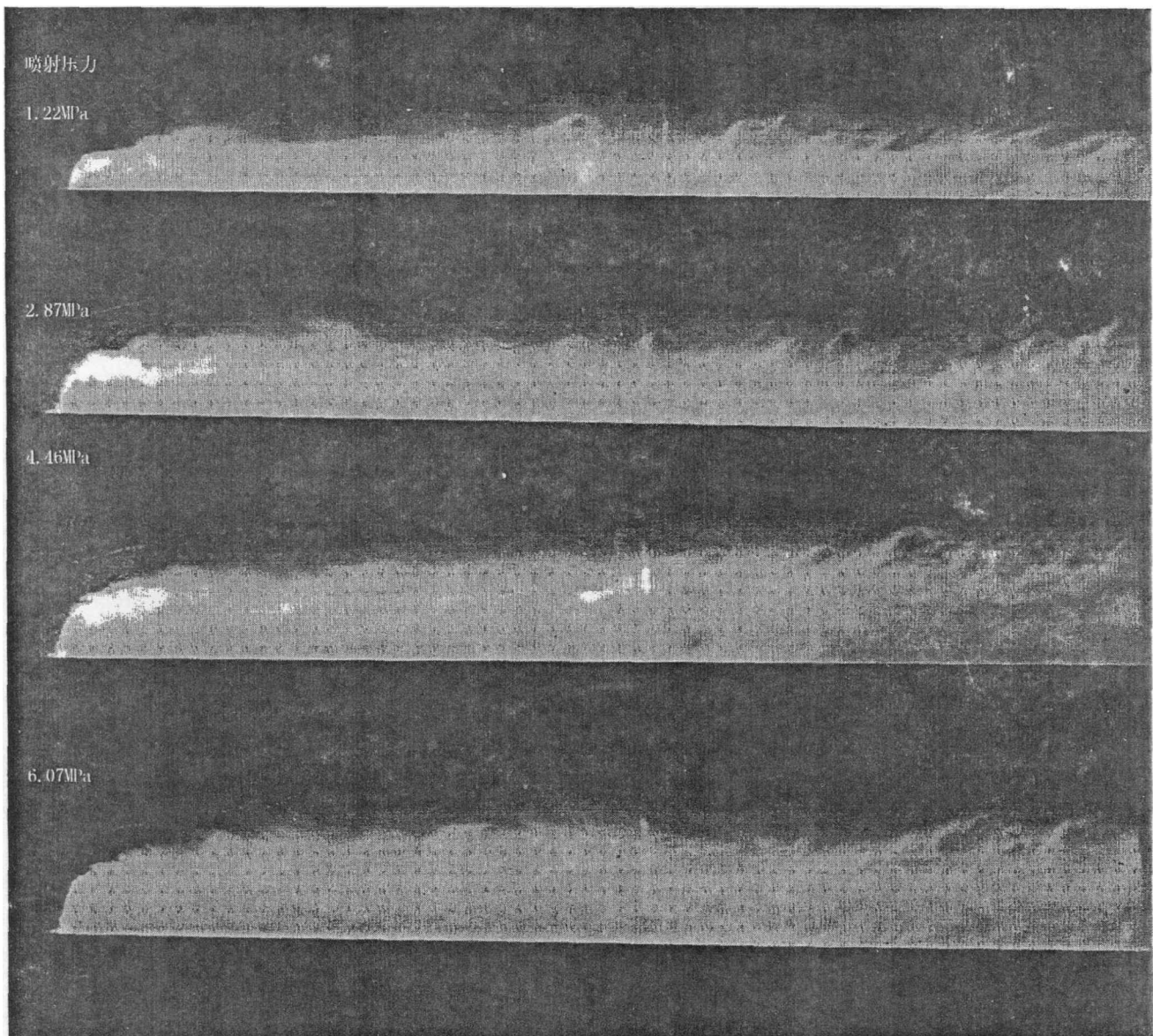


图4  $90^\circ$  不同压力喷射散射图

透深度。

### 实验结果

种，喷射压力 1.5~6 MPa，间隔 1.5 MPa，可得到 4 组数据。图 4 给出了  $90^\circ$  喷射四种压力下的喷射

散射图。从图中可以看出, 对于 90 度喷射, 当喷射压力比较小的时候, 射流的穿透深度增长段的距离比较小, 当喷射压力比较高的时候 (比如 4.46MPa), 甚至在距离喷口 100mm 以后 (图示总长约 130mm), 还在增长。可见, 对 90° 喷射, 较高的喷射压力, 不但在液体喷射初始阶段有着比较大的穿透深度, 而对下游的穿透深度的增长, 也有着重要的作用。

图 5a 和图 5b 给出了 90° /75° /60° 喷射的动量比与穿透深度的关系图。其中圆圈线代表喷孔 10mm 内穿透深度, 五角星线是 100mm 内的穿透深度。

从图 5a 中可以看出, 在离喷孔较近位置处,

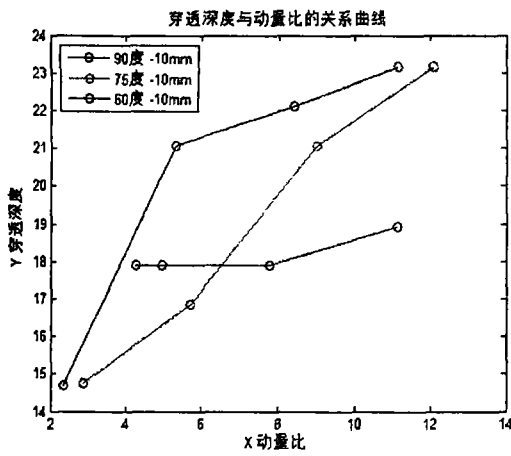


图 5a 角度喷射动量比与穿透深度曲线

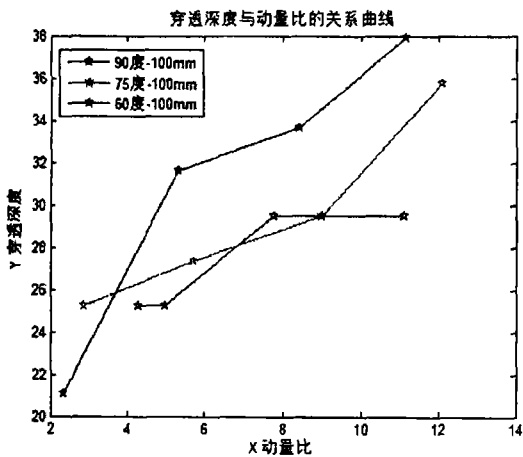


图 5b 角度喷射动量比与穿透深度曲线

60° 喷射却介于 75° 和 90° 之间。从图 5b 中看出, 在 100mm 范围内, 在动量比非常小的时候, 90° 喷射的穿透深度小于 75° 喷射。这可能是由于大角度喷射有利于穿透深度的增加, 但是大角度也导致了在气流中的阻力增加, 两个原因相互作用导致的。因此, 穿透深度对动量比的曲线与角度不一致, 不同的动量比下, 不同角度的穿透深度有着不同的排序结果。

凹腔不同位置喷射

凹腔不同位置的喷射有 6 个, 喷射压力有 1.5~6 MPa, 间隔 1.5 MPa 可得到 4 组数据。图 6 和图 7 分别给出了 1 孔和 3 孔位置的四种压力情况。凹腔上游远距离 (1 孔) 喷射和凹腔内前部 (3 孔) 喷射, 液体在凹腔内分布有很大差异, 从中心截面散射图上看, 凹腔上游远距离喷射, 液体穿透到凹腔内部非常的少。从凹腔后斜坡可以观察到, 凹腔远距离 (1 孔) 喷射, 后斜坡对于穿透深度的提升效果不明显, 而在凹腔内部 (3 孔) 喷射, 后斜坡对穿透深度有一个明显的提升。

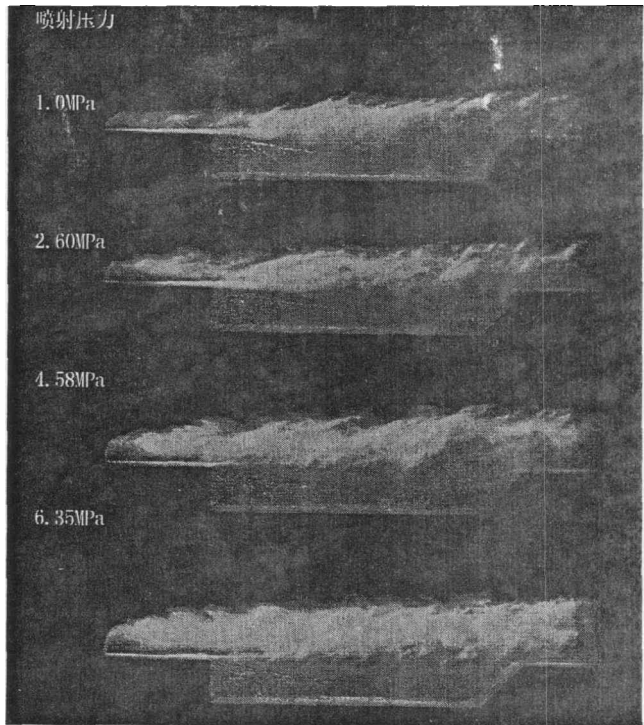


图 6 1号孔不同压力喷射散射图

在试验的工况范围内, 90° 喷射的穿透深度一直大于 75° 喷射的穿透深度, 而动量比在 4-6 的区间,

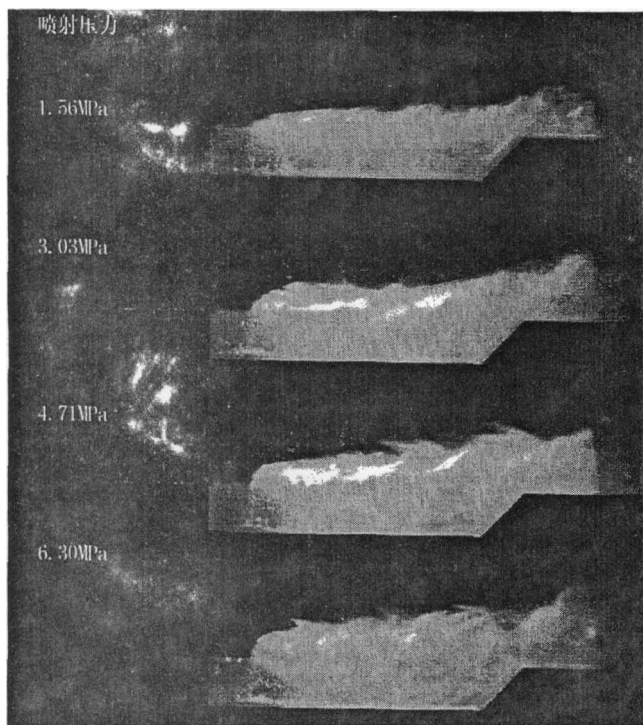


图7 3号孔不同压力喷射散射图

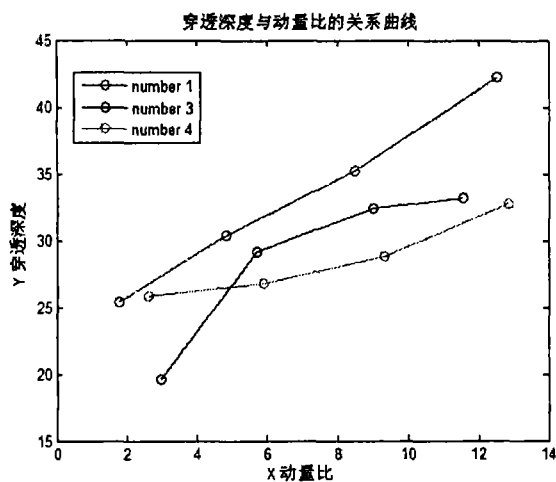


图8 凹腔不同位置动量比与穿透深度曲线

图8给出了1、3、4孔位置的穿透深度与动量比的关系曲线。

从穿透深度的曲线可以看出穿透深度与动量比的关系。1孔的位置在上游离凹腔前沿35mm，处于凹腔上游较远的位置。此处穿透深度与动量比成一个较好的线性关系，与无凹腔90°喷射的情况比较，发现差别不大，说明在凹腔上游较远距离喷射，其穿透深度受凹腔的影响不大。3孔紧靠凹腔壁，在凹腔里面。在喷射压力比较小的时候，穿透深度非常小，并且喷射后，下游的增长速率也很缓慢；

当喷射压力比较高的时候，射流的上半部分喷射形态与凹腔远距离相似，下半部分穿透到凹腔里面。并且3号孔喷射相对于1号孔喷，穿透深度都是取凹腔内的最大值，所以相当于射流发展的距离变小，因此穿透深度有所降低。1号孔喷射，穿透深度与动量比成一个较好的线性关系，3孔穿透深度呈现一个曲率随动量比增加而减小的趋势，而4孔在动量比较小的时候曲率小，在动量比较大的时候，曲率增加，且呈现一个较好的线性关系。可见，在凹腔不同的位置喷射，穿透深度与动量比的关系有着不同的变化规律。

## 结论

1、对于带角度的单孔喷射，大角度喷射在较高的喷射压力下有着较好的优势，而在较低的压力下，穿透深度并不是最高。

2、对于带角度的单孔喷射，较高的喷射压力，不但在液体喷射初始阶段有着比较大的穿透深度，对于下游的穿透深度的增长，也有着重要的作用。

3、在凹腔上游较远距离喷射，其穿透深度受凹腔的影响不大。

4、凹腔远距离喷射，后斜坡对于穿透深度的提升效果不明显，而在凹腔内部喷射，后斜坡对穿透深度有一个明显的提升。

5、对于凹腔不同位置的喷射，不同的位置，穿透深度有所差异，并且在不同的位置，穿透深度随着动量比的关系变化差异很大。

## 参考文献

【1】肖隐立 宋文燕 超声速气流中喷射角度对射流混合的影响 世界科技研究与发展 2008年第4期 436-439

【2】S. I. Baranovsky J. A. Schetz Effect of Injection Angle on Liquid Injection in Supersonic Flow 17th AEROSPACE SCIENCES

MEETING January 15-17, 1979