

文章编号:1007-3124(2000)04-0041-05

# 亚、跨声速底排减阻特性研究

陈少松, 丁则胜, 罗 荣, 曹顶贵

(南京理工大学动力工程学院, 南京 210094)

**摘要:**为了研究亚、跨声速底排减阻特性, 采用了底排氢加空气燃烧和底排冷空气的方法进行底排减阻特性的风洞实验研究, 实验的马赫数范围为  $M_\infty = 0.71 \sim 1.55$ 。从研究结果看出, 底排冷空气的减阻率确实很低, 但氢加空气燃烧的底排减阻率是很高的, 其最大减阻率  $\Delta C_{DB,max} = 40\% \sim 120\%$ , 比冷排气要高一个量级。说明在亚、跨声速下采用底排燃烧的方法仍可有效减少弹丸底部阻力增加射程。

**关键词:**底排燃烧; 底部减阻; 风洞实验; 弹丸

中图分类号:TJ011. '4 文献标识码:A

## An investigation on characteristics of base drag reduction with base bleed in subsonic and transonic speeds

CHEN Shao-song, DING Ze-sheng, LUO Rong, CAO Ding-gui

(School of Dynamic Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** An investigation of wind tunnel tests of base bleed is conducted, in order to research the characteristics of base drag reduction with base bleed burning  $H_2 + air$  and base bleed cold air in subsonic and transonic speeds. The Mach numbers are  $0.71 \sim 1.55$ . From results of it, the base drag reduction rate with base bleed cold air is low, but it with base bleed burning  $H_2 + air$  is much higher than base bleed cold air, that its maximum of base drag reduction rate is  $40\% \sim 120\%$ . It is shown that reducing the base drag of projectile and increasing the range of it are possible by means of base bleed burning in subsonic and transonic speeds.

**key words:** base bleed burning; base drag reduction; wind tunnel test; projectile

## 0 引言

底排技术自 70 年代初被应用于底排弹以来, 已得到了广泛的应用, 大口径远程低阻

收稿日期:2000-06-11

作者简介:陈少松(1958-),男,江苏南京市人,南京理工大学副研究员。

弹丸利用底排技术可增程 30%，效益很高。目前，底排技术多应用于超声速范围，国外仅有的根据亚、跨声速底排冷空气实验结果资料表明，该速度范围的底排减阻效率很低。采用固体燃料进行底部燃烧排气的实验发现，亚、跨声速下固体燃料的底排减阻效率约为 80%~100%，这一发现对于改造我国初速较低的老式弹丸使之现代化具有重要意义。

为了全面、系统地研究亚、跨声速下底排减阻特性，本实验采用可燃气体氢做燃料，用空气做氧化剂，按一定的比例混合，排入模型底部燃烧，模拟真实药剂进行底排减阻特性的研究。

## 1 实验设备、模型和实验方法

### 1.1 风洞

实验是在南京理工大学 HG-3 号风洞中进行的。实验马赫数为  $M_\infty$  为 0.71~1.55。

为消除支架对模型底部流场的干扰，该风洞的喷管带有一个中心体，用流线径向支柱支撑于稳定段中。中心体喷管如图 1 所示。

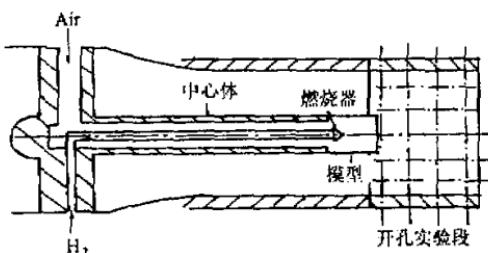


图 1 中心体喷管简图

Fig. 1 Sketch of center-body nozzle

### 1.2 模型

本实验采用圆柱形后体模型，连接在中心体末端。燃烧喷嘴装在模型内腔。模型直径 34mm，喷口直径  $D_1$  与模型底部直径  $D$  之比  $D_1/D = 0.53$ 。

### 1.3 排气系统

模型底部排出的可燃混合气分别从两条专门管路输送，一条输送氢，一条输送空气。两股气体经中心体径向支柱流入中心体流向模型底部，在模型内腔混合后排出燃烧。

两路气体的流量由调压阀控制和流量计计量。为避免一般流量计因反压变化引起流量变化，造成流量误差，实验研制了超临界流量计。

### 1.4 实验方法

风洞起动后，排出少量燃气；电子点火器点燃后迅速抽回点火器支杆，以后调整燃气 ( $H_2$ ) 量和空气量到所需要的值，测量底部压力  $p_{B0}$ ，然后再逐步地改变燃气 ( $H_2$ ) 量和空气量几个台阶，每个台阶都测量底部压力  $p_{B0}$ 。最后，根据无底排时的底压  $p_{B0}$  和有底排时的底压  $p_{B1}$  计算出减阻率  $\Delta C_{DB}$ 。

$$\text{万方数据} \quad \Delta C_{DB} = \frac{C_{DB1} - C_{DB0}}{C_{DB0}} = \frac{p_{B1} - p_{B0}}{p_\infty - p_{B0}}$$

## 2 结果和讨论

本次实验研究氢加空气燃烧的氧系数为 50%。

底排氢加空气燃烧的减阻率  $\Delta C_{DB}$  和底排冷空气的减阻率  $\Delta C_{DB}$  随排气率  $I$  的变化曲线如图 2~8 所示。

可以看出,在各个  $M_\infty$  数下,两种底排方式的减阻率  $\Delta C_{DB}$  随排气率  $I$  的变化趋势相同。但不同的  $M_\infty$  下同种底排及两种底排方式之间都有特点之处。如下所述:

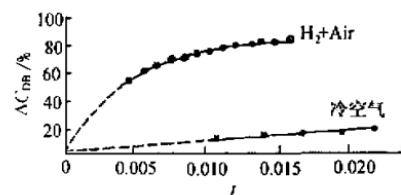


图 2  $M_\infty = 0.71$  ( $H_2 + Air$ ) 底排燃烧和  $M_\infty = 0.72$  底排冷空气的减阻率  $\Delta C_{DB}$  曲线

Fig. 2 The base drag reduction rate  $\Delta C_{DB}$  of ( $H_2 + Air$ ) base bleed burning at  $M_\infty = 0.71$  and base bleed cold air at  $M_\infty = 0.72$

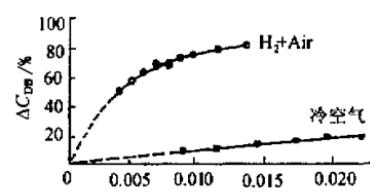


图 3  $M_\infty = 0.83$  ( $H_2 + Air$ ) 底排燃烧和  $M_\infty = 0.84$  底排冷空气的减阻率  $\Delta C_{DB}$  曲线

Fig. 3 The base drag reduction rate  $\Delta C_{DB}$  of ( $H_2 + Air$ ) base bleed burning at  $M_\infty = 0.83$  and base bleed cold air at  $M_\infty = 0.84$

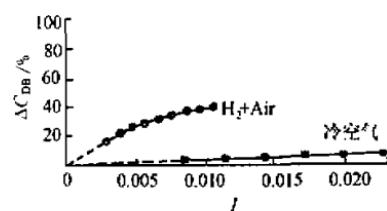


图 4  $M_\infty = 0.96$  ( $H_2 + Air$ ) 底排燃烧和  $M_\infty = 0.97$  底排冷空气的减阻率  $\Delta C_{DB}$  曲线

Fig. 4 The base drag reduction rate  $\Delta C_{DB}$  of ( $H_2 + Air$ ) base bleed burning at  $M_\infty = 0.96$  and base bleed cold air at  $M_\infty = 0.97$

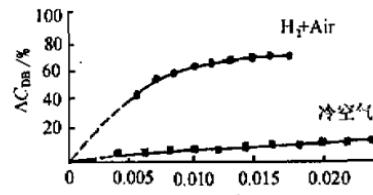


图 5  $M_\infty = 1.09$  ( $H_2 + Air$ ) 底排燃烧和  $M_\infty = 1.08$  底排冷空气的减阻率  $\Delta C_{DB}$  曲线

Fig. 5 The base drag reduction rate  $\Delta C_{DB}$  of ( $H_2 + Air$ ) base bleed burning at  $M_\infty = 1.09$  and base bleed cold air at  $M_\infty = 1.08$

(1) 小  $I$  值下,底排燃烧的减阻率  $\Delta C_{DB}$  随  $I$  值的增加迅速提高。

小  $I$  值下,底排的速度和动量小,  $I$  值增加,单位时间进入尾迹区的燃气质量和燃烧释放出来的能量迅速增加,使尾迹区迅速扩大,通过剪切层与外流的相互作用,使得底压上升,底阻减小,减阻率  $\Delta C_{DB}$  迅速提高。

(2)  $I$  值较大时,底排燃烧的减阻率  $\Delta C_{DB}$  随  $I$  值的增加曲线上升趋势变得平缓,  $\Delta C_{DB}$  趋近于一恒定值。

$I$  值较大时,单位时间进入尾迹区的质量较多,因排气口尺寸不变,排气速度和动量较大。大的排气动量会产生引射作用,破坏底部回流区结构,使底部部分气体被抽走,造成底压下降,底阻增加,抵消了部分由于质量和动量增加带来的好处,当这两种作用趋于平衡时,

平衡时,就形成了减阻率  $\Delta C_{DB}$  增加平缓渐趋恒值的现象。

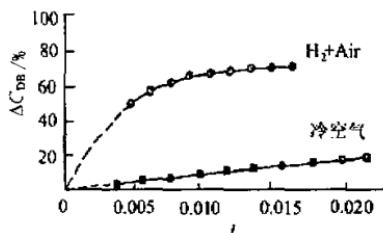


图 6  $M_\infty = 1.19$  ( $H_2 + Air$ ) 底排燃烧和底排冷空气的减阻率  $\Delta C_{DB}$  曲线

Fig. 6 The base drag reduction rate  $\Delta C_{DB}$  of ( $H_2 + Air$ ) base bleed burning and base bleed cold air at  $M_\infty = 1.19$

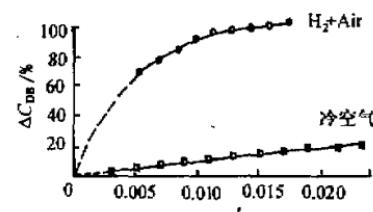


图 7  $M_\infty = 1.32$  ( $H_2 + Air$ ) 底排燃烧和底排冷空气的减阻率  $\Delta C_{DB}$  曲线

Fig. 7 The base drag reduction rate  $\Delta C_{DB}$  of ( $H_2 + Air$ ) base bleed burning and base bleed cold air at  $M_\infty = 1.32$

(3) 在各  $M_\infty$  数下, 冷排气的减阻率  $\Delta C_{DB}$  随  $I$  值呈直线增加, 但直线的斜率较小, 其减阻率  $\Delta C_{DB}$  的数值远低于底排氢加空气燃烧的  $\Delta C_{DB}$  值。

冷排气时, 只是向底部尾迹区增加了一些质量, 当底排燃烧时, 排出的高温产物不仅向底部低压区补充了质量, 而且还大大提高了尾迹区的温度。此外, 富燃的燃烧产物还将在底部尾迹区发生二次燃烧, 使尾迹区进一步扩大, 进一步提高底压。故底排燃烧的减阻率远高于冷排气的值。

(4) 在  $M_\infty$  数为 0.71~1.55 范围内, 底排燃烧的减阻率  $\Delta C_{DB}$  随  $M_\infty$  数的增加呈现增加-减少-再增加的变化趋势, 其中  $M_\infty = 0.96$  左右时, 减阻率  $\Delta C_{DB}$  最低。底排冷空气的变化规律与之相似。其变化规律如图 9 所示。

图 9 给出了最大减阻率  $\Delta C_{DBmax}$  随着  $M_\infty$  数变化关系。可看出, 在  $M_\infty = 0.96$  和  $M_\infty = 0.97$  处, 底排燃烧和冷排气的最大减阻率  $\Delta C_{DBmax}$  最小。

图 10 给出了减阻效率  $- \frac{\partial C_{DB}}{\partial I}$  随  $M_\infty$  数变化的曲线。从图 10 可以看出, 减阻效率  $- \frac{\partial C_{DB}}{\partial I}$  的变化趋势与最大减阻率  $\Delta C_{DBmax}$  的变化趋势相同, 均反映出在  $M_\infty = 0.96$ ~0.97 附近底排减阻的效率最差。

从图 10 中还可看出, 冷排气的减阻效率要比底排燃烧的减阻效率差一个数量级。从变化规律上看底排燃烧时在  $M_\infty = 0.96$  附近, 减阻效率  $- \frac{\partial C_{DB}}{\partial I}$  变化激烈一些, 而冷排气在  $M_\infty = 0.97$  附近的变化相对要平缓得多。这一点与文献[1]所讲的固体药剂的底排燃烧与冷排气的减阻率随马赫数  $M_\infty$  的变化规律观点相一致。

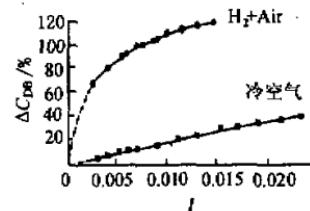


图 8  $M_\infty = 1.55$  ( $H_2 + Air$ ) 底排燃烧和底排冷空气的减阻率  $\Delta C_{DB}$  曲线

Fig. 8 The base drag reduction rate  $\Delta C_{DB}$  of ( $H_2 + Air$ ) base bleed burning and base bleed cold air at  $M_\infty = 1.55$

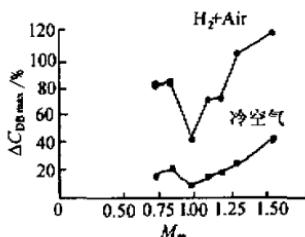
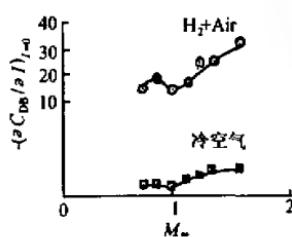
图9 最大减阻率  $\Delta C_{D\max}$  ~  $M_\infty$  曲线图10 减阻效率  $-(\frac{\partial C_D}{\partial M})$  ~  $M_\infty$  曲线

Fig.9 The curve of the maximum base drag reduction rate  $\Delta C_{D\max}$  ~  $M_\infty$  Fig.10 The curve of the base drag reduction efficiency  $-(\frac{\partial C_D}{\partial M})$  ~  $M_\infty$

### 3 结束语

作者对亚、跨声速下 7 个马赫数的底排氢加空气燃烧和底排冷空气减阻特性进行了分析,从中看出底排氢加空气燃烧的减阻率是很高的,验证了固体燃料底排的实验结果。

### 参考文献:

- [1] 丁则胜,邱光纯,刘亚飞等.固体燃料底部排气空气动力研究.空气动力学报,1991,9(3):300~307.
- [2] 陈少松,丁则胜.亚超音速弹丸底排冷空气减阻性能研究.空气动力学报,1989,7(1):81~87.
- [3] BOWMAN J E, CALYDAN W A. RARDE Rep. 4/69(1969).