

文章编号: 1000-8055(2002)01-040-05

高速热喷流条件下 二元收扩喷管扩张段壁面冷却的初步试验研究

额日其太, 王志杰, 吴寿生
(北京航空航天大学 动力系, 北京 100083)

摘要: 在高速热喷流条件下, 对二元收扩喷管超音段壁面的冷却进行了初步试验研究。采用的冷却方案共有 3 种, 分别是缝隙式、离散孔式和波纹板式气膜冷却方案。得到了各冷却方案喷管的壁面压力分布、壁温分布和红外辐射特性。结果表明: 冷却气流对喷管壁面压力分布影响较大, 不同冷却结构的壁面压力分布特点不同。通过冷却, 各喷管的壁温和红外辐射强度明显降低。其中缝隙式气膜冷却和波纹板式气膜冷却冷却结构的冷却效果比较好。

关键词: 二元喷管; 气膜冷却; 红外辐射

中图分类号: V 235. 21⁺ 3; V 231. 1

文献标识码: A

Preliminary Experimental Investigation on the Divergent Wall Cooling of Two Dimensional C-D Nozzles at High Speed and Hot Jet Conditions

Erigitai, WANG Zhi-jie, WU Shou-sheng

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: At high speed and hot exhaust flow conditions, a preliminary experimental investigation on the divergent wall cooling of Two Dimensional C-D Nozzle had been conducted. There were three film cooling schemes used, namely, slot, discrete-hole and wiggle-strip. In the experiment, the infrared radiation and axial distribution of wall temperature and near wall flow pressure were measured with and without film cooling. The results showed: The cooling had significant influence on the near wall flow pressure, and the influence was different with cooling schemes. The infrared radiation and wall temperature were obviously decreased by cooling. There were better benefits through cooling by slot and wiggle-strip film cooling.

Key words: Two Dimensional C-D nozzle; film cooling; infrared radiation

1 前言

二元喷管具有便于喷管/后体一体化设计、容易实现推力矢量、具有较低的红外信号特征等优点, 有利于提高飞机的性能、机动性和隐身能力^[1], 因此在 B-2, F-117A, F22 等先进飞机上得

到应用。喷管热壁面是飞机的主要红外辐射源之一, 为保证喷管可靠工作, 并减少红外辐射, 必须采取冷却措施。在高温、高速热喷流条件下, 喷管壁面冷却的难度较大, 尤其是扩张段壁面的冷却。气膜冷却具有冷却效果好和结构简单等优点, 非常适合喷管壁面的冷却^[2~4]。本文针对缝隙式、离

收稿日期: 2001- 01- 09; 修订日期: 2001- 04- 02

作者简介: 额日其太(1970-), 男, 北京航空航天大学热动力工程研究所讲师, 硕士

散孔气式和波纹板式气膜冷却等 3 种喷管壁面冷却技术进行了初步试验研究, 为进一步研究和发
展我国超音速喷管扩张段壁面冷却技术提供基
础。

2 试验设备和试验模型

试验装置如图 1 所示, 可以测量喷管的壁面
压力分布、壁温分布和红外辐射强度。试验过程
中, 喷管落压比控制在 4.0 左右, 主流总温控制在
520℃左右。冷却气由次流系统提供, 流量约为主

流流量的 8%, 冷却气温度等于室温。测量红外辐
射强度时, 红外辐射仪与喷管轴线的夹角为 30°。

喷管模型有 3 个, 如图 2 所示, 分别是基准喷
管、孔缝喷管和波纹板喷管。基准喷管是轴对称收
扩喷管(图 2(a)), 喉道直径为 85 mm, 扩张比为
1.238, 设计状态下的出口马赫数为 1.56, 用于同
其它两种喷管进行比较。孔缝喷管是二元收扩喷
管(图 2(b)), 由 2 个收缩—扩张边和 2 个平行的
侧边组成, 喉道面积和出口面积与基准喷管相同,
出口的宽高比为 2.6。孔缝喷管的侧壁面没有任
何冷却结构, 2 个扩张边分别设计了离散孔式气
膜冷却结构和缝隙式气膜冷却结构。在离散孔边,
共有 5 排冷却孔, 冷却孔与壁面垂直, 孔径为 1.3
mm, 孔间距和孔排距均为 6 mm, 采用叉排分布
(见图 2(d))。在缝隙边, 喉道后面有 1 条冷却缝,
缝高 1.1 mm, 与扩张边壁面的夹角为 20°。冷却
缝的面积与离散孔的总面积相同。波纹板喷管也
是二元收扩喷管(图 2(c)), 它的基本几何尺寸与
孔缝喷管相同, 但是扩张段的冷却结构不同。波纹
板喷管扩张边壁面焊有波纹形隔热板, 在波纹板
前面有与孔缝喷管缝隙边相同的冷却缝, 冷却气
可以通过冷却缝进入喷管内部, 一部分沿着波纹
板表面流动, 形成冷却气膜, 另一部分在波纹板与
喷管壁面之间的通道内流动, 对喷管壁面进行对
流冷却。

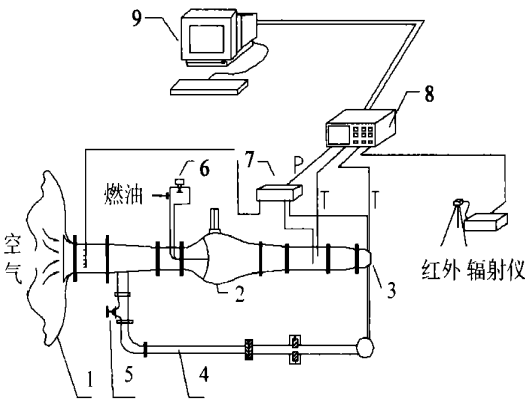


图 1 多功能热喷流试验台(1 稳定箱 2 燃烧室
3 喷管 4 次流系统 5 调节阀 6 油阀
7. 压力传感器箱 8 数据采集箱 9 计算机)

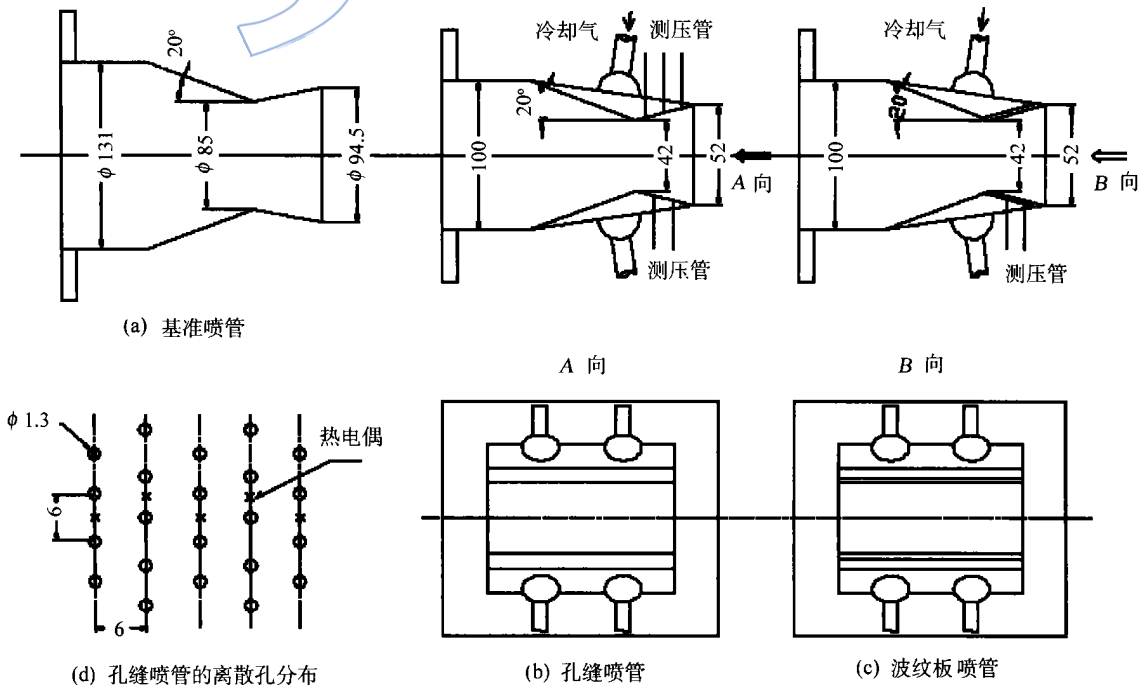


图 2 喷管模型

3 试验结果分析

试验过程中,分别测量了冷却前(关闭次流系统)、冷却后(开启次流系统)的壁面压力分布、壁温分布和红外辐射强度。为了便于进行比较,试验过程中主流的压力和温度保持不变。

3.1 壁面压力分布

图 3~图 6 给出了各喷管的壁面压力分布,

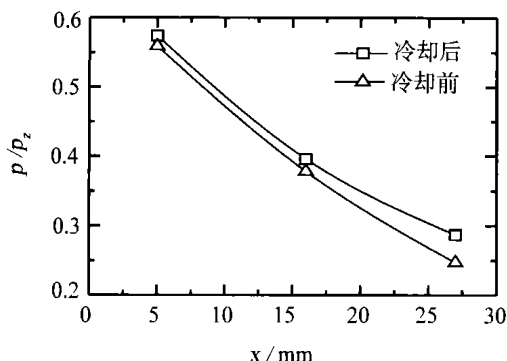


图 3 孔缝喷管侧边壁面压力分布

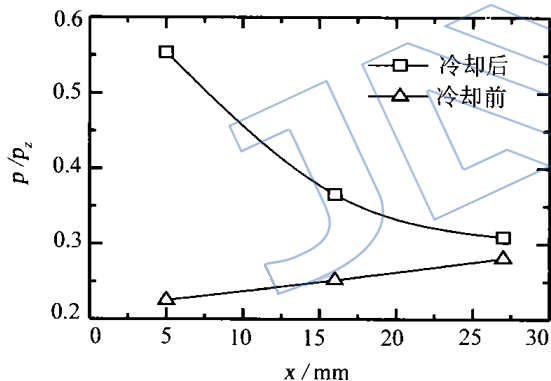


图 4 孔缝喷管缝隙边壁面压力分布

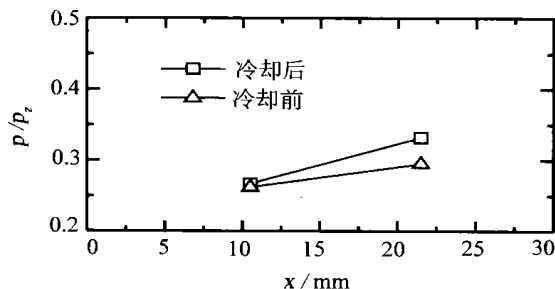


图 5 孔缝喷管离散孔边壁面压力分布

由于测压点比较少,只能粗略反映壁面压力的分布规律,细节还需要进一步研究。图 3 为孔缝喷管侧边壁面的压力分布。虽然侧壁是非膨胀边,但是

受到膨胀边气流膨胀的影响,壁面压力沿喷管轴向逐渐下降。有冷却气之后,壁面压力略有上升。波纹板喷管侧边的壁面压力分布也有类似的特点。图 4 为孔缝喷管缝隙边壁面压力分布。冷却前,由于冷却缝内气流被主流抽吸,所以扩张边前半段壁面压力比较低。在主流的影响下,壁面压力沿喷管轴向呈逐渐上升的趋势。有冷却气注入之后,上述的抽吸现象消失,所以壁面压力沿喷管轴向逐渐下降。图 5 为孔缝喷管离散孔边壁面压力

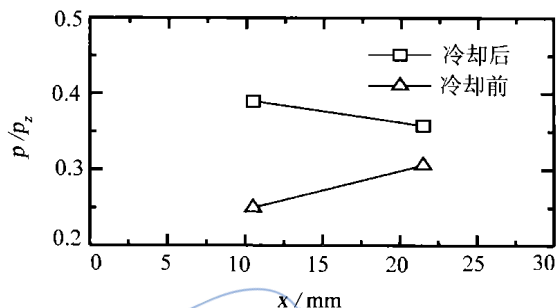


图 6 波纹板喷管扩张边壁面压力分布

分布。图中可见,冷却前后壁面压力沿喷管轴向均呈逐渐上升趋势。冷却之后,上升的斜率比冷却前有所增大。图 6 为波纹板喷管扩张边波谷处壁面压力分布。冷却前,壁面压力沿轴向逐渐上升;冷却之后,壁面压力沿轴向逐渐下降。

3.2 壁温分布

图 7 为孔缝喷管缝隙边的壁温分布。冷却前,

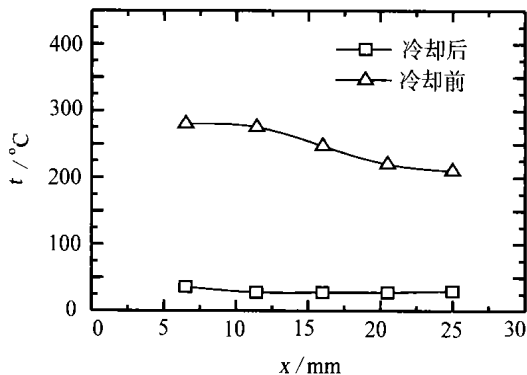


图 7 孔缝喷管缝隙边壁温分布

由于气流不断膨胀,静温不断下降,所以壁温沿轴向逐渐下降。冷却之后,壁温大幅度降低,而且沿轴向变化不大,说明缝隙式气膜覆盖了整个扩张段壁面。图 8 为孔缝喷管离散孔边的壁温分布。冷却前,壁温沿轴向逐渐下降,原因与缝隙边相同。冷却之后,壁温也明显降低,但壁温分布沿喷管轴向先逐渐上升,在 17 mm 附近达到最大值,然后

逐渐下降。从图 7 和图 8 的对比可以看到, 冷却前和冷却后, 孔缝喷管缝隙边的壁温都明显低于离散孔边, 原因可能是: 冷却前, 冷却气通道封闭不够严密, 有少量冷却气泄漏, 缝隙边更容易形成冷却气膜, 所以壁温低于离散孔边。冷却后, 由于缝隙边和离散孔边的冷却气通道是相通的, 缝隙边的流动阻力小, 分配的冷却气流量大于离散孔边; 另外, 由于离散孔式气膜冷却在几排孔之后才能形成稳定的气膜, 喷管模型尺寸小、孔排数少时, 其冷却能力不能充分发挥。因此缝隙边的壁温低于离散孔边。

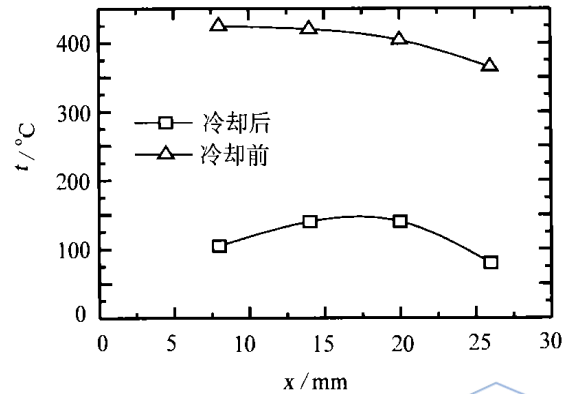


图 8 孔缝喷管离散孔边壁温分布

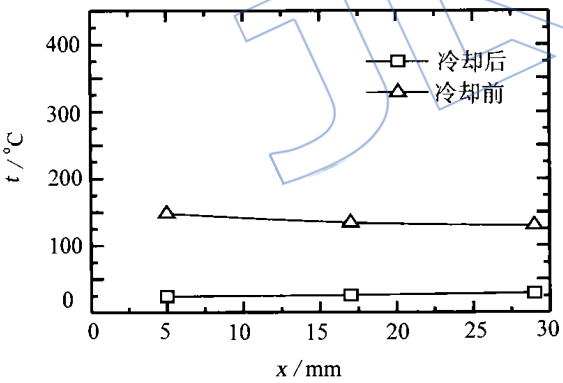


图 9 波纹管喷管波谷处壁温分布

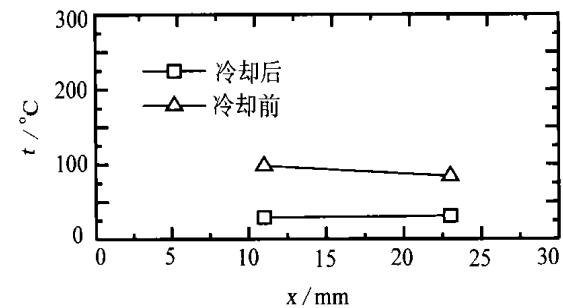


图 10 波纹管喷管波峰处壁温分布

图 9 为波纹管喷管波谷处的壁温分布。冷却

前, 壁温沿轴向略有下降, 由于波纹板起到了隔热屏的作用, 所以喷管的壁温低于孔缝喷管。冷却后, 壁温明显降低, 其值与孔缝喷管缝隙边的壁温值基本相当。

图 10 为波纹管喷管波峰处的壁温分布, 壁温分布与波谷处类似, 但冷却前的壁温明显低于波谷处。由于试验中测量的壁温是喷管外壁面的温度, 而不是波纹板的温度, 所以出现这种现象。

3.3 红外辐射特性

由于试验条件所限, 试验中只测量了 30° 方位角的红外辐射强度。图 11 为 3~5 μm 波段各喷管的红外辐射强度, 图中基准喷管的红外辐射强度表示为 100%, 其它喷管的红外辐射强度表示为与基准喷管红外辐射强度的比值。图中可见: 冷却前, 孔缝喷管和波纹板喷管的红外辐射强度接近, 都低于基准喷管。说明在相同条件下, 将轴对称喷管改为二元喷管, 可以减小喷管的红外辐射、提高排气系统的红外隐身能力。冷却后, 孔缝喷管和波纹板喷管的红外辐射强度明显下降, 其中波纹板喷管红外辐射强度下降的幅度更大一些。原因是: 波纹板冷却结构具有比较好的冷却效果, 另外波纹板的特殊结构使其对排气系统高温部件红外辐射的反射比较少。

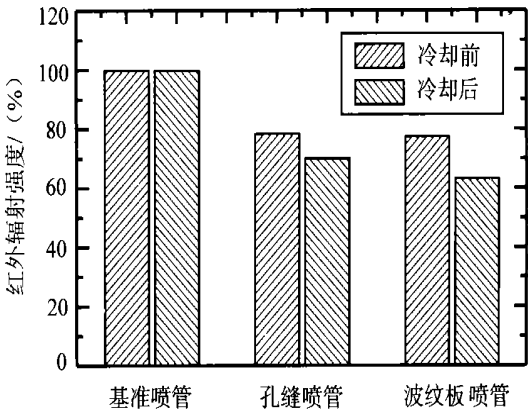


图 11 3~5 μm 波段的红外辐射强度

图 12 为 8~14 μm 波段各喷管的红外辐射强度。图中可见: 冷却之前, 孔缝喷管的红外辐射强度略大于基准喷管, 波纹板喷管的红外辐射强度则略小于基准喷管; 冷却之后, 孔缝喷管和波纹板喷管的红外辐射强度都明显降低, 降低的幅度基本相当。

从 30° 方位角探测到的主要是喷管扩张段壁面和侧壁面的红外辐射, 由于各喷管的侧壁没有冷却, 冷却前后其红外辐射强度基本不变, 所以测

得的红外辐射强度降低幅度都不是很大。但是,通

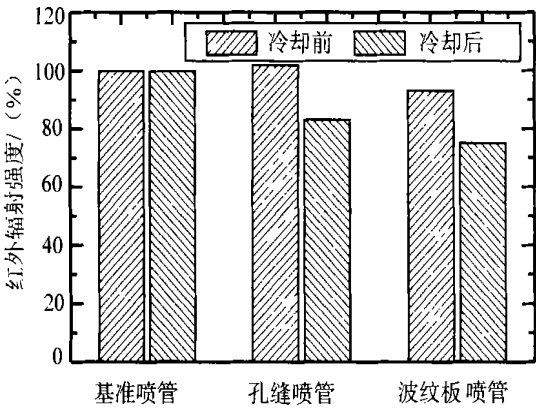


图 12 8~14 μm 波段的红外辐射强度

过对比红外辐射强度的降低幅度,仍然可以分析各冷却方案的优劣。

4 结 论

(1) 不同的冷却结构壁面压力分布不同,冷

却气流对喷管壁面压力分布的影响较大。

(2) 冷却之后,各喷管扩张段的壁温明显下降。其中孔缝喷管缝隙边和波纹板喷管的壁温很低,冷却效果好;由于冷却能力未充分发挥,孔缝喷管离散孔边的壁温高于缝隙边。

(3) 孔缝喷管和波纹板喷管的红外辐射强度都明显低于轴对称喷管,其中波纹板喷管的红外抑制效果最好。

参考文献

[1] 吴达,郑克杨 排气系统的气动热力学[M] 北京:北京航空航天大学出版社,1989

[2] 葛绍岩 气膜冷却[M] 北京:科学出版社,1985

[3] Ordonez G G, Georges M J. Ejector Pumping and Cooling Correlations Applicable to Aircraft Exhaust System [R] AIAA 91- 3134, 1991

[4] Andrews G E, Asere A A, Gupta M L, et al Full Coverage Discrete Hole Film Cooling: Influence of the Number of Holes and Pressure Loss[R] ASME 90- GT- 61, 1990

(责任编辑 杨再荣)