

◇ 研究报告 ◇

金属烧结丝网在内场消声中的应用

黄知龙 常伟 廖达雄[†] 王宁 张国彪

(中国空气动力研究与发展中心 绵阳 621000)

摘要: 利用试验手段研究暂冲式风洞稳定段内安装不同规格烧结金属丝网对风洞上游控制阀后气流噪声和湍流度抑制作用。试验结果表明:多层金属烧结丝网可在全频段内大幅度降低上游气流的噪声,最大可达 21 dB;消声量与金属烧结丝网无量纲的压力损失系数成正比,压力降与金属烧结丝网层数呈现出非线性叠加的结果。另外发现烧结金属丝网对气流速度脉动亦具有突出的抑制效果。例如,试验段马赫数 $Ma = 1.5$ 时,120 目 26 层 +160 目 26 层组合烧结金属丝网出口气流速度脉动幅值减小为入口来流的 18%,湍流度由 11.7% 降至 3%。因此金属烧结丝网适合于暂冲式风洞的内场降噪。

关键词: 暂冲式风洞;烧结金属丝网;降噪;湍流度;试验

中图法分类号: V211.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2020)03-0417-05

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.03.014

Application of interior noise reduction for metal sintering screen

HUANG Zhilong CHANG Wei LIAO Daxiong WANG Ning ZHANG Guobiao

(China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: Metal sintering screens were mounted in settling chamber of the intermittent wind tunnel to reduce noise downstream control valve. An experimental study was conducted to find how this anechoic measure works. The results showed that metal sintering screen could largely attenuate the flow noise in all band, and the flow noise suppression level could reach about 21 dB for some test Mach number. Especially, unlike micropunch plate muffler, there was no amplificatory phenomenon of pressure level in low frequent. And the sound deadening capacity was proportional to the non-dimensional pressure loss coefficient. Moreover, the metal sintering screen could also obviously reduce the fluctuation amplitude and turbulence intensity of air flows through it. Take “26 layers 120 mesh +26 layers 160 mesh” sintering metal screen combinations for example, the flow fluctuation amplitude reduced to 18 percent of inlet and the turbulence intensity changed from 11.7% to 3% when the velocity of coming flow was about 13 m/s. So it could be concluded that metal sintering screen is a very excellent denoising device for the inner field flow of intermittent wind tunnel.

Keywords: Intermittent wind tunnel; Metal sintering screen; Noise reduction; Turbulence intensity; Experiment

2019-07-27 收稿; 2019-11-28 定稿

作者简介: 黄知龙 (1976-), 男, 湖北潜江人, 硕士, 副研究员, 研究方向: 空气动力学。

[†] 通信作者 E-mail: liaodaxiong@sohu.com

0 引言

随着我国大飞机项目的深入开展和下一代超声速飞行器机动性要求和隐身技术的发展,人们对跨超声速流动边界层转捩问题越来越关注。如高速层流的控制技术、热防护系统设计中的不稳定性、战斗机随机运动转捩诱导热应力、超声速运输机和巡航导弹的超声速流动控制能力等的研究和验证,需要风洞具备良好的气流动态品质^[1]。因此,新建的高速风洞都十分重视试验段气流的低噪声和低湍流度性能指标的实现。

目前,暂冲式风洞上游配置的调压阀会产生巨大气流噪声,顺气流向下游传入试验段,导致模型试验区具有一定量级的噪声,影响试验数据精度。上游气流噪声的降低可采用主动降噪和被动消声两种方式。低噪声控制阀的设计为主动降噪,可从声源上消除噪声,目前中国空气动力研究与发展中心正开展相关的设计研究。另外可通过在内场设置消声器吸收或衰减上游气流传播的声能,即为被动降噪方式。本文所介绍的金属烧结丝网降噪方式就是属于后者。

金属烧结丝网是一种烧结金属多孔材料^[2-3],由多层金属丝网按照一定的工艺重叠在真空下烧结制成,具有很好的可渗透性,见图1。烧结结构一般包括支撑层、工作层、保护层组成。

优良的烧结金属多孔材料有以下特点:优良的透过性能;孔径与孔隙度的可控性;强度高、韧性好;

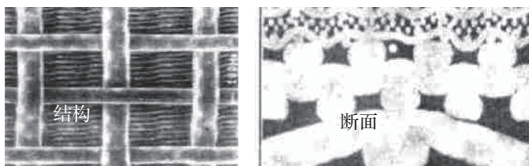


图1 烧结金属丝网

Fig. 1 The photograph of sintering metal screen

较好的再生性能;较好的机械加工性。基于上述特性,烧结金属丝网除了用作过滤材料外,还被广泛用作外场声辐射的吸声材料。其以瑞利创立的多孔吸声材料的微孔黏滞吸声理论^[4]为基础,主要原理是声波通过材料的孔隙与固体骨骼相互摩擦而消耗能量。目前,金属烧结丝网主要应用于城市道路隔离带进行噪声的屏蔽、航空发动机高温和高声强尾流的表面吸声等,但将气流直接流过金属烧结丝网实现降噪的技术研究未见报道。

鉴于金属烧结丝网具有较好的气流通过性能、高强度和韧性、较好的再生性能以及体积小等优点,研究人员将其置于引导性暂冲式风洞稳定段内,让上游控制阀后具有极高湍动能的气流流过多层金属烧结丝网,对其降噪特性和压力损失特性开展了专项试验测试研究,分析验证其内场降噪的工程应用可行性,并优化设计参数,为我国某大型超声速风洞内场消声器的确定提供了设计依据及技术支撑。

1 金属烧结丝网性能测试平台

研究实验在中国空气动力研究与发展中心FL-22风洞中开展,该风洞为暂冲式下吹风洞,试验段尺寸 $0.3\text{ m}\times 0.3\text{ m}$,马赫数(Ma)范围 $0.3\sim 3.5$,通过全柔壁喷管实现,测试平台总体布局示意图见图2。

金属烧结丝网试验件安装于风洞稳定段内,位于大开角扩散段与蜂窝器之间,稳定段直径约 $\phi 1.2\text{ m}$ 。为了确保金属烧结丝网在试验过程中不发生抖动,其前后设置有井字型支撑架固定,试验件照片见图3。试验件可拆卸更换,烧结金属丝网试验件共有以下6种规格:120目/英寸6层、12层、26层及160目/英寸6层、12层、26层。所有网丝直径均为 0.1 mm 。

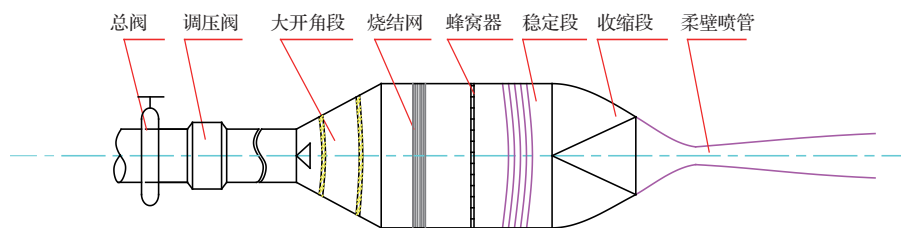


图2 烧结金属丝网性能测试平台

Fig. 2 The test platform of sintering metal screen

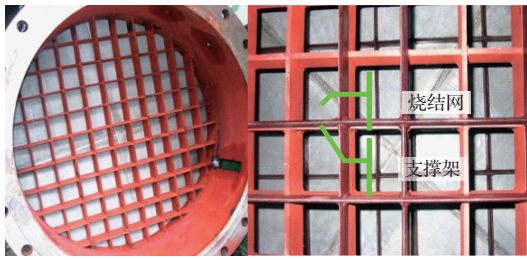


图3 烧结金属丝网试验件

Fig. 3 The tests of sintering metal screen

为了对烧结金属丝网的降噪性能和整流特性进行评估,在其前后截面设置了总压排架和壁面噪声测点。总压测量采用差压传感器,噪声测量采用美国Kulite脉动压力传感器(采用分析频率 ≤ 20 kHz),垂直安装于洞壁壁面,每个测量截面周向4个均匀布置。同时在稳定段出口安装丹麦 DANTEC公司的STREAMLINE系列热线风速仪测量气流湍流度。

2 实验结果与分析

2.1 烧结网物性参数测量

对多孔材料特性的判定,可根据国家标准《可渗透性烧结金属材料气泡试验孔径的测定》(GB/T 5249-2013)^[5]和《烧结金属材料流体渗透性的测定》(GB/T 5250-2014)^[6]开展。

气泡试验孔径定义为试样的最大等效毛细管直径,依据式(1)确定:

$$d = \frac{4 \cdot \gamma}{\Delta p}, \quad (1)$$

式(1)中, d 为试样毛细管等效直径, m; γ 为试验液体的表面张力, N/m; Δp 为静态下试样上的压力差, Pa。多次测量后取其算数平均数为平均流动孔径。

而渗透率(相对透气系数)依据简化的达西公式确定:

$$K = \frac{Q}{A \cdot \Delta p}, \quad (2)$$

式(2)中, Q 为流量, ml/min; A 为表面面积, cm²; K 为渗透率, ml/(min·cm²·Pa)。

按照国家标准对上述6种规格的金属烧结丝网成品的孔径和渗透性参数等进行了测量,部分测试结果见表1。可以看出随着金属丝网目数和烧结层数的增加,其呈现出平均流动孔径减小和孔压增大的趋势。

表1 烧结金属丝网基本参数

Table 1 Parameters of sintering metal screen

丝网规格/目	烧结层数	平均流动孔径/ μm	渗透率/ $(\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1})$
120	6	96.7	4.11
	12	72.0	3.38
	26	62.3	2.68
160	6	89.9	4.11
	12	79.6	3.54
	26	50.1	2.33

2.2 烧结丝网性能测量

在试验平台上共进行了6种金属烧结丝网组合性能测试,分别为:120目12层、120目26层、160目26层、120目12层+160目12层、120目26层+160目26层、160目26层+160目12层+160目6层。并从压力损失、降噪特性、出口截面速度分布及湍流度等几个方面对其性能进行了分析,具体结果如下:

(1) 压力损失

金属烧结丝网的压力损失通过无量纲的压力损失系数 ξ 表示,定义如下:

$$\xi = \frac{P_{01} - P_{02}}{0.5 \cdot \rho \cdot v^2}, \quad (3)$$

式(3)中, P_{01} 为烧结丝网入口总压, Pa; P_{02} 为烧结丝网出口总压, Pa; ρ 为入口气流密度, kg/m³; v 为入口气流速度, m/s。

烧结丝网前后布置有总压排架,测得各种组合状态下的压力损失,换算得到的损失系数 ξ ,对比结果见图4。横坐标为烧结丝网入口截面气流速度,纵坐标为不同组合烧结丝网的损失系数。

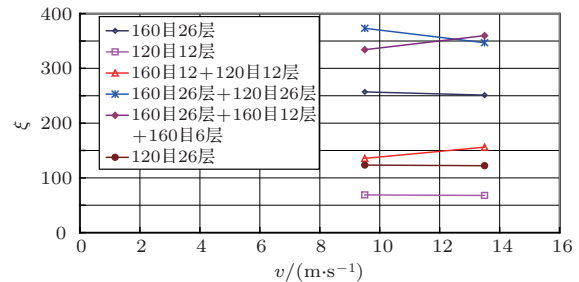


图4 烧结金属丝网压力损失系数

Fig. 4 Pressure loss coefficient of sintering metal screen

可以看出金属烧结丝网作为内流构件具有非常大的压力损失系数 ξ ,各种组合的损失系数范围约为67~378。在风洞稳定段的常用速度范围内,不同入口气流速度下压力损失系数基本保持不变。因此可以通过无量纲损失系数 ξ 估算不同来流速度和运行压力下的气流总压损失。另外,测试结果表明多层烧结丝网前后的压力降不是单层丝网压力降简单线性叠加的结果,略偏小,如120目12层和26层的 ξ 值分别为68和123。而分层布置的烧结丝网压力损失基本保持为多层叠加之和。风洞常温常压运行条件下,测试得到的最大压力降约39 kPa,该压力降对于暂冲式风洞而言主要影响气源的运行截止压力,是可以接受的。但对于压缩机驱动的连接式风洞而言,烧结丝网压力损失过大,一般很少采用。

(2) 气流脉动衰减

图5给出了风洞增压状态下气流经过双26层组合金属烧结丝网前后的气流速压脉动情况对比曲线。可以看出金属烧结丝的网孔隙对抑制气流脉动具有非常突出的效果。烧结丝网前的速压最大波动量达到380 Pa,而烧结丝网后的速压波动量衰减至68 Pa以下,衰减量达到约82%。这是由于风洞上游阀门和大开角段后端动能极高的气流进入烧结丝网后,大的漩涡被破碎成极小的漩涡,能量被孔隙壁的摩擦及空气黏滞阻力所消耗。

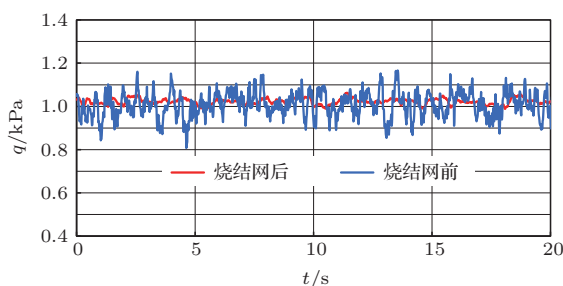


图5 烧结金属丝网前后截面速压脉动

Fig. 5 Pressure fluctuation of flow before and after sintering metal screen

(3) 降噪性能

金属烧结丝网前后截面声压级的差值定义为其降噪量。试验段马赫数 $Ma = 1.5$ 时的风洞沿程噪声声压级测试结果见图6。横坐标为不同测试截面位置,纵坐标为顺气流方向各截面噪声测试频谱线性计权(Z计权)总声压级。测试结果表明,气流流

过各种组合金属烧结丝网后的噪声都得到大大衰减,其中双26层组合的气流噪声由入口截面158 dB降低为出口截面137 dB,总降噪量达到21 dB,将进入风洞试验段的气流噪声控制到了理想水平。

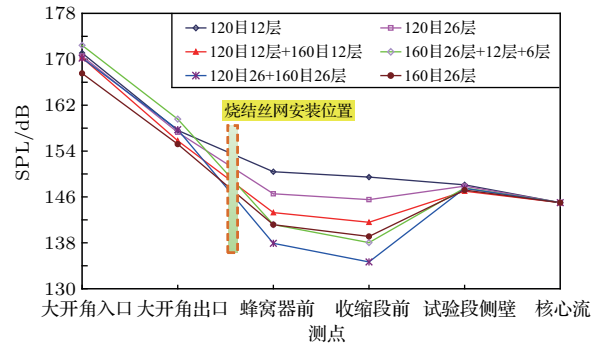


图6 不同规格烧结金属丝网消声量

Fig. 6 Noise reduction values of various sintering metal screen

图7给出了双26层组合烧结丝网组合入口和出口截面1/3倍频程频谱特性。可以看出全频带范围下烧结丝网均具有较强的消声能力。特别是当频率大于10 kHz和低于300 Hz时,消声效果相对更佳,在频率150 Hz附近烧结丝网的单频降噪量达到27 dB。在频率在(0.4~0.6) kHz区间,其消声效果均相对较弱,但消声量也达到平均约14 dB。没有出现类似金属微穿孔板消声器在低频下声压级明显放大的现象[7]。

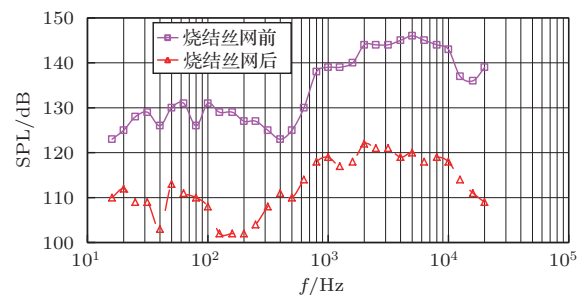


图7 烧结金属丝网消声1/3倍频程特性

Fig. 7 Frequency spectrum characteristic of 1/3 noise octave for sintering metal screen

另外,相关研究表明金属烧结丝网在孔径和厚度一定的情况下,孔隙率越高,内部通道越复杂,吸声系数的峰值增大,峰值对应的共振频率向高频扩展,这将使材料的吸声系数提高明显。因此在满足材料强度的情况下,孔隙率应尽量大以达到较好的吸声效果。在厚度和孔隙率一定的情况下,孔径细

小时, 孔隙通道变多且更加复杂, 当声波进入孔隙后, 声波发生多次碰撞的可能性大大增大, 而使相当一部分声能转化为热能而被耗散。因此应尽可能保持孔径细小以取得最佳的吸声效果。

(4) 湍流度

湍流度反映气流中3个方向的脉动气流速度的方根平均值与主流平均速度之比, 是风洞重要的动态品质指标之一, 定义为

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{u'^2 + v'^2 + w'^2}{3 \cdot U_\infty^2}}, \quad (4)$$

式(4)中, ε 为湍流度; u' 为 x 方向来流脉动速度, m/s; v' 为 y 方向来流脉动速度, m/s; w' 为 z 方向来流脉动速度, m/s; U_∞ 为时均流动的未扰动速度, m/s。

测试中发现气流经过烧结丝网噪声可大大降低的同时气流湍流度也可明显降低, 气流经过的丝网层数越多, 湍流度越低。双26层组合金属烧结丝网安装后, 稳定段出口核心流区域的湍流度平均值由11.7%降低至3.0%。几种不同金属烧结丝网组合出口截面的气流湍流度具体如下: 160目12层, $\varepsilon \leq 5.5\%$; 160目26层, $\varepsilon \leq 3.3\%$; 160目26+120目26层, $\varepsilon \leq 3.0\%$ 。

3 结论

将金属烧结丝网作为内场消声器设置于暂冲式风洞稳定段内, 让上游具有极高湍动能的气流通过后噪声在全频段内均可大幅降低, 且不引入过大

的压力损失, 同时出口气流的湍流度和速压脉动可大大改善, 是一种适合于暂冲式风洞的内场降噪方式。通过选取合适的网丝尺寸、烧结层数, 控制孔隙尺寸和空洞面积, 可实现满意的降噪效果。目前该烧结金属丝网的研究成果已经成功应用于我国某大型超声速风洞稳定段的降噪设计, 但仍然需要深入研究其降噪特性、压力损失与网丝尺寸及孔隙率等相关物性参数的理论关系, 以便更好地开展工程应用。

参 考 文 献

- [1] Frink N, Bonhaus D, Vatsa V, et al. A boundary conditions for simulation of flow over porous surfaces[R]. AIAA-2001-2412.
- [2] 刘鹏辉, 杨宜谦, 姚京川. 多孔吸声材料的吸声特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2011, 31(2): 123-126.
Liu Penghui, Yang Yiqian, Yao Jingchuan. Study on absorption property of porous pound-absorbing materials[J]. Noise and Vibration Control, 2011, 31(2): 123-126.
- [3] 顾临, 邱世庭, 赵扬. 烧结金属多孔滤材技术综述[J]. 流体机械, 2002(2): 30-34, 6.
Gu Lin, Qiu Shiting, Zhao Yang. The review on sinter metal porous filter element[J]. Fluid Machinery, 2002(2): 30-34, 6.
- [4] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 15-18.
- [5] 可渗透性烧结金属材料气泡试验孔径的测定: GB/T 5249-2013[S].
- [6] 可渗透性烧结金属材料流体渗透性的测定: GB/T 5250-2014[S].
- [7] 黄知龙, 吕金磊. 多层微穿孔板消声结构研究测试[R]. 中国空气动力研究与发展中心, 2012.