

高温吸声结构的声学性能研究

中国航空工业规划设计研究院 刘 伟* 汤道敏

【摘要】 本文从分析温度对多孔材料的性能影响入手,对燃气轮机排气装置中常用的有限厚度吸声层在高温及存在温度梯度时的声学性能进行了理论分析,并通过高温试验验证,证明理论分析与实际是一致的。

关键词: 吸声材料 温度 燃气轮机

1 高温条件下吸声材料的理论研究

1. 1 理论分析

环境温度的改变引起了空气介质的密度 ρ 、声学速度 c 及动力粘滞系数 η 的变化。当多孔材料内部具有与周围环境相同的温度 T 时,材料内部缝隙中的声边界层厚度 σ 和无量纲频率参数 ξ 可以确定:

$$\sigma_i = \sigma_o (T/T_o)^{0.85}, \quad \xi_i = \xi_o (T/T_o)^{-0.85} (f/f_o)^{0.5} \quad (1)$$

式中下标 “ i ” 表示温度为 T 时的参数, “ o ” 表示常温下的参数。

根据 Kosten^[1] 的细管模型理论,温度为 T 时的细管复密度 $\rho_{\text{细管}}$ 和压缩模量 $K_{\text{细管}}$ 为

$$\rho_{\text{细管}} = \{1 - \frac{2J_1(\xi_i - i)}{\xi_i - i} J_0(\xi_i - i)\}^{-1}$$
$$K_{\text{细管}} = \{1 + \frac{(k-1)J_1(\xi_i - i)}{B\xi_i - i} J_0(\xi_i - i)\}^{-1} \quad (2)$$

式中: J_0 、 J_1 为 0 阶和 1 阶 Bessel 函数; $\xi_i = (d/2) \sqrt{\rho_i/\eta}$ 为直径为 d 的细管无量纲频率参数; B 为 Prantl 数的平方根, $B = 0.86$ 。计及结构因子 S 和孔隙率 Q 后,可得材料的复密度 $\rho_{\text{材}}$ 和复压缩模量 $K_{\text{材}}$, 传播常数 γ_i 和特性阻抗 W_i :

$$\rho_{\text{材}} = \rho_{\text{细管}} \cdot S/Q, \quad K_{\text{材}} = K_{\text{细管}}/Q, \quad \gamma_i = i\omega \cdot \sqrt{S\rho_{\text{细管}}/K_{\text{细管}}/c_i}$$
$$W_i = \rho_i c_i \sqrt{S\rho_{\text{细管}}/K_{\text{细管}}/Q} \quad (3)$$

厚度为 L 的均质吸声材料层在温度为 T 时的表面声阻抗率 Z_1 及吸声系数 α 可由下式确定:

$$Z_1 = W_i \frac{Z_2 + W_i \tanh(\gamma_i L)}{Z_2 \tanh(\gamma_i L) + W_i} \quad (4)$$

$$\alpha = 4R / [(1 + R)^2 + X^2] \quad (5)$$

Z_2 为材料层背衬的负载阻抗率,当背衬刚壁时, $Z_2 = \infty$, $Z_1 = W_i \coth(\gamma_i L)$; R 与 X 分别为声阻抗率的实部和虚部。

1. 2 用常温条件下的声学性能预示高温声学性能

从 (1)、(2) 式可见,通过 ξ 可以建立起常温性能与高温性能之间的关系:

$f_i/f_o = (T/T_o)^{1.7} = C_1$, $Y_i/Y_o = (T/T_o)^{1.2} = C_2$, $W_i/W_o = (T/T_o)^{-0.5} = C_3$ (6)

厚度为 L 的均质吸声层, 在频率为 f_i 温度为 T 时的声学性能可用常温条件下的频率为 $f_o = f_i/C_1$ 的传播常数 W_o 和特性阻抗 W_o 来计算:

$$Z_1 = C_3 W_o \cdot \frac{Z_2 + C_3 W_o \tanh(C_2 Y_o L)}{Z_2 \tanh(C_2 Y_o L) + C_3 W_o}$$
 (7)

对于常温下多孔材料的传播常数 Y_o 和特性阻抗 W_o 可用驻波管 (如 B & K 4002) 测得材料层的声阻抗率, 再用双空腔法^[2]或固定空腔法^[3]计算求得。

1. 3 存在温度梯度性的性能计算

消声装置内的温度分布往往不均匀, 而是呈一定的梯度分布, $T_L > T_o$ 。 $T(x)$ 与 x 的关系取决于材料的传热特性以及消声装置的结构特性。对存在温度梯度时的材料层声阻抗率计算方法如下: (1) 按传热规律和材料结构特性确定吸声材料的温度分布关系 $T(x)$ 。(2) 将厚度为 L 的吸声层均匀地或按一定的关系分成 n 份, $\Delta L_1, \Delta L_2 \cdots \Delta L_n$, 假定每一 ΔL_i 内的温度为均匀分布。(3) 用公式 (7) 求出厚度为 ΔL_1 , 温度为 $T(\Delta L_1)$, 背衬负载阻抗率为 Z_2 的吸声层表面声阻抗率 $Z_1(\Delta L_1)$ 。(4) 将求得的 $Z_1(\Delta L_1)$ 做为第二层 ΔL_2 的负载阻抗率 Z_2 用 ΔL_2 层的温度 $T(\Delta L_2)$ 确定新的常数 C_1, C_2, C_3 值, 用公式 (7) 求出 ΔL_2 层的表面声阻抗率 $Z_1(\Delta L_2)$ 。(5) 根据 (7) 式的叠代关系, 按 (2)、(3) 的方法计算, 可求出厚度为 L 存在温度梯度时声阻抗率。

2 试验验证

2. 1 高温驻波管验证法

该试验是在我院研制的高温驻波管上进行的, 其系统是由普通驻波管、加热炉和温控系

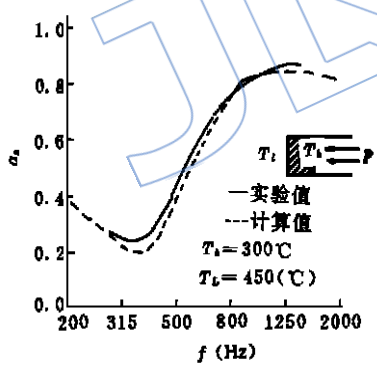


图 1 超细玻璃棉 α 的实测与计算

统组成。由于采用的是局部加热, 使驻波管内测量极小声压位移值变得复杂、困难, 导致声阻抗率不能准确求出。而声压级相对讲比较稳定、易于测定。吸声系数 α 为:

$$\alpha = 4S / (1 + S)^2$$
$$S = \log [(SPL_{\text{极大}} - SPL_{\text{极小}}) / 20]$$
 (8)

式中: $SPL_{\text{极大}}$ 、 $SPL_{\text{极小}}$ 各为驻波管中极大、极小声压值。试验材料选用上海玻璃厂的超细玻

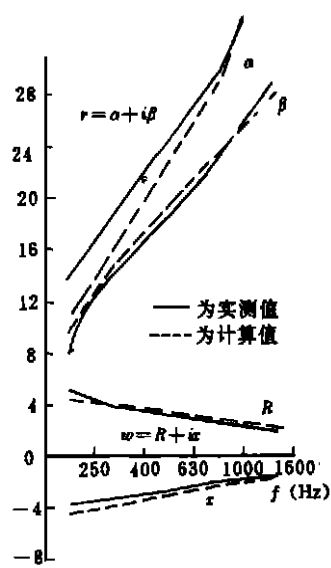


图 2 $t=496^{\circ}\text{C}$ SR5 矿棉的 γ 和 W 的实测和计算值

璃棉 ($L = 50\text{mm}$, $\gamma = 30\text{kg/m}^3$) 和北京陶粒厂生产的陶粒吸声材料 ($L = 95\text{mm}$)。实际测定了频率为 250、315、400、500、630、800、1000、1250Hz 等频率的吸声系数。由于受加热炉保温效果的影响, 使试件两端温度不等, 靠近测声探管一侧温度偏低, 而靠近刚壁一侧温度偏高。因此理论计算是在有温度梯度下进行的。对两种材料吸声系数实测值与计算值进行了比较。二者吻合较好 (见图 1)。

2. 2 Christie^[4] 高温流阻仪验证法

Christie 采用高温阻抗仪对他的理论方程进行验证, 即用阻抗仪测出相同温度下 SR5 矿棉的传播常数和特性阻抗。结果表明, Christie 的方法对于纤维类材料的高温声学性能计算是符合实际的。以 Christie 的常温 ($t = 10^\circ\text{C}$) 下的传播常数 γ 和特性阻抗 W 测量值为基础, 用本文的计算公式对 $t = 225^\circ\text{C}$ 和 496°C 时的传播常数和特性阻抗进行计算, 结果与 Christie 实测结果吻合 (见图 2)。

2. 3 简要分析

编制了计算多孔材料的常温和高温性能的计算程序^[5], 并用超细棉、陶粒材料的计算结果来分析高温声学性能。本文仅给出超细棉在背衬刚壁时 ($Z_2 = \infty$) 的等温条件下的吸声系数曲线和声阻抗率曲线 (图 3)。由图 3 (a), α 随温度的增加发生了频率移动现象, 曲线呈起伏趋

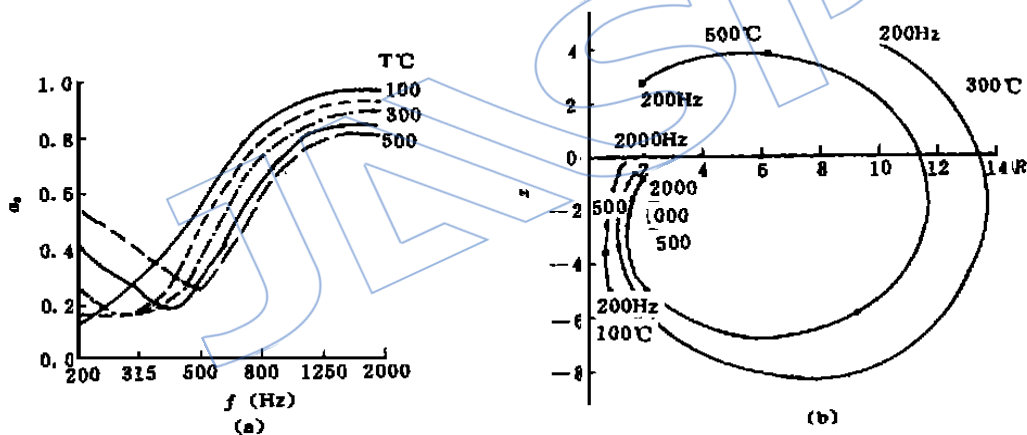


图 3 等温条件下超细玻璃棉的 (a) α 曲线 ($L = 50\text{mm}$)、(b) $Z = R + iX$

势且吸声系数随温度增加略有减小。对声阻抗率曲线分析表明: 温度增加, 中、低频段声阻增大幅度较大, 温度达到一定数值后声阻增大幅度变缓。声抗随温度增加沿虚轴负方向增大。

参 考 文 献

- 1 Zwikker C, Kosten C W. Sound Absorbing Material. Elsevier, 1949
- 2 汤道敏, 刘希贤. 耐高温颗粒吸声砖的新发展. Inter-noise 87 Proceedings, 1987: 451
- 3 纪恩士, 汤道敏. 由法向声阻抗率确定多孔材料声学参数的简便方法. 航设院, 1982: 3
- 4 Christie D R A. Measurement of the Acoustic Properties of a Sound Absorbing Material at High Temperature. Journal of Sound and Vibration, 1976, 46: 347
- 5 刘伟. 多孔材料高温声学性能的研究与应用: [学位论文]. 北京: 北京航空航天大学发动机系, 1989

(责任编辑 魏星禄)

decision. The program is based on the Mean-Stream-Line Method. It is given in detail how to select the independent design functions of this method in programming. This program enables to be operated with a very small computer, even a pocket computer such as the Sharp PC-1500.

SPECIAL COLUMN: LIGHT-WEIGHT GAS TURBINE R & D OF LIGHT WEIGHT GAS TURBINE IN CHINA

Wang Zuhu and Li Huaiti

(China National Light-Weight Gas Turbine Development Centre)

ABSTRACT This paper introduces the engineering research of aeroderivative gas turbines in recent ten years in aspects of such as generator modified; power turbine research; alternative-fuel combustibility. The advanced and applied researches aim at meeting the demands for industrial and marine propulsion, such as prolonged life, improved performance, enhanced reliability and satisfactory variability.

ACOUSTICAL PROPERTIES OF SOUND ABSORBING STRUCTURES AT HIGH TEMPERATURE

Liu Wei, Tang Daomin

(Design Institute of Xian Aero-Engine Corporation)

ABSTRACT The acoustical properties of sound absorbing layers used in gas turbine exhaust silencing component at high temperature with temperature gradient were investigated by analysing the effect of temperature on the acoustical properties of porous materials. Some experimental results are given and a good agreement is found between theoretical prediction and measurements of acoustical properties at various temperatures up to 500°C.

PERFORMANCE IMPROVEMENT OF GAS TURBINE WITH STEAM INJECTION

Qian Yansheng

(Wuxi Engine Research Institute)

Li Huaiti

(China Light Weight Gas Development Center)

ABSTRACT This paper describes how to choose and modify the WZ-5 gas turbine for steam injection testing and how to evaluate testing parameters and programmes. Testing results indicate that when the steam is injected 3.6t/h into the WZ-5 gas turbine, its power output and thermal efficiency increase 40% and 25% respectively. Moreover, the steam injection does not deteriorate the exit temperature profile in the turbine, which ensures a long term reliability of operation for the engine.