

进口压力对涡流管冷却特性影响的实验研究

薛庆增¹, 许 聆², 张瑞霞², 张宗卫³

(1. 海装沈阳局驻沈阳地区某军事代表室, 辽宁 沈阳 110015; 2. 中国航发沈阳发动机研究所, 辽宁 沈阳 110015;
3. 中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘要:为了解决燃气轮机高温部件热防护问题,采用实验研究涡流管在不同进口压力(0.20~0.65 MPa)和冷气流率(0.17~0.89)下的冷却特性。实验结果表明:实际温降,在不同进口压力下随着冷气流率的增加先增大后减小,在相同冷气流率下随着进口压力的增大而增大;温度效率,在不同进口压力下随着冷气流率的增大先增大后减小,在冷气流率等于0.5时达到最大值;绝热效率,在进口压力等于0.20 MPa时最小,在大于0.30 MPa时随着进口压力的增加变化不大;制冷效率,随冷气流率的增加会先增加后减小,进口压力等于0.30和0.40 MPa时制冷效率最高。

关键词: 涡流管; 进口压力; 制冷温度效应; 冷气流率; 实验测量

中图分类号:TK221 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.02.004

[引用本文格式]薛庆增,许 聆,张瑞霞,等.进口压力对涡流管冷却特性影响的实验研究[J].热能动力工程,2024,39(2):26-32. XUE Qing-zeng, XU Ling, ZHANG Rui-xia, et al. Experimental study on the effect of inlet pressure on cooling characteristics of vortex tube[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(2): 26-32.

Experimental Study on the Effect of Inlet Pressure on Cooling Characteristics of Vortex Tube

XUE Qing-zeng¹, XU Ling², ZHANG Rui-xia², ZHANG Zong-wei³

(1. Military Representative Office of the Naval Equipment Department in Shenyang, Shenyang, China, Post Code: 110015;
2. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang, China, Post Code: 110015;
3. Aeronautical Engineering Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin, China, Post Code: 300300)

Abstract: To address the issue of thermal protection for high-temperature components in gas turbines, the cooling characteristics of a vortex tube were studied under different inlet pressures ranging from 0.20 to 0.65 MPa and cold air flow rates ranging from 0.17 to 0.89. The experimental results show that the actual temperature drop initially increases and then decreases with an increase in the cold flow rate under different inlet pressures. Additionally, the actual temperature drop increases with an increase in the inlet pressure at the same cold flow rate; the temperature efficiency also initially increases and then decreases as the cold flow rate increases under different inlet pressures, with the maximum efficiency observed at a cold flow rate of 0.5; the adiabatic efficiency is lowest at an inlet pressure of 0.20 MPa and does not change significantly with an increase in inlet pressure beyond 0.30 MPa; the refrigeration efficiency initially increases and then decreases as the cold flow rate rises, with the highest efficiency observed at an inlet pressure of 0.30 or 0.40 MPa.

Key words: vortex tube, inlet pressure, refrigeration temperature effect, cold flow rate, experimental measurement

收稿日期:2023-02-15; 修订日期:2023-04-03

基金项目:中央高校基本科研业务费资助项目(3122021045)

Fund-supported Project: Fundamental Research Funds for the Central Universities (3122021045)

作者简介:薛庆增(1984-),男,海装沈阳驻沈阳地区某军事代表室工程师。

通讯作者:张宗卫(1984-),男,中国民航大学讲师。

引言

涡流管是一种常见的能量分离装置,将气体压缩变为高压气体送入装置,经过装置作用气体便会出现能量分离,变为高温和低温两股低压流体。该装置广泛应用于制冷、制热、航空航天及海水淡化等各种领域和科学研究中^[1-4]。

虽然制冷循环中涡流管的结构较为简单,但是管内流体的流动状态和能量传递分离过程却极为复杂。中科院曹勇等人^[5]简化了涡流管工作条件,采用热力学方法分析涡流管能量分离的过程,涡流管内流体间的内摩擦作用使流体发生不可逆的传热现象。虽然对涡流管能量分离效应现象的解释至今尚无定论,但这并不影响对其工作特性的研究。何丽娟等人^[6]以二氧化碳为工质,实验研究了入口压力和冷气流率对涡流管工作特性的影响。覃柏钧^[7]对涡流管的关键参数进行了数值模拟研究。

在工程领域,如船用燃气轮机的冷却中,这种具有优良制冷特性的装置,具有广阔的应用前景。随着燃气轮机性能的不断加强,燃气温度不断提高,对高温部件的冷却需求日益增加。杨祺等人^[8]对涡轮导叶叶片内部冷却通道换热特性进行了研究。席雷等人^[9]对蒸汽冷却厚壁通道传热进行了研究。李宗全等人^[10]对燃气轮机轮盘的冲击冷却进行了研究。胡娅萍等人^[11]对层板冷却涡轮叶片传热进行了研究。陈帆等人^[12]发明了一种冷气预旋结构

的弯孔预旋喷嘴,将预旋喷嘴技术应用到涡轮发动机冷却中;沃特·希伯特森^[13]将涡流管技术应用到燃气轮机热负荷结构件的冷却中;张宗卫等人^[14-15]将涡流管冷却技术应用到燃气轮机的预旋喷嘴和涡轮叶片冷却方案中,提出了基于涡流冷却效应的新型气膜孔结构和预旋喷嘴结构,申请并获批了相关发明专利。同时,龚迪澜等人^[16]研究了涡流管进出口膨胀比、节流阀开度和进气温度对涡流管性能的影响,重点分析了制冷和制热温度效应随上述参数变化的规律,但并未单独研究进口压力对涡流管冷却特性的影响。

因此,本文将涡流冷却技术应用在船用燃气轮机冷却装置的基础上,在涡流管冷气流率 0.17 ~ 0.89 范围内,研究了不同进口压力下涡流管冷却特性的变化规律。由于实验条件的限制和为了保证实验安全,进口压力范围为 0.20 ~ 0.65 MPa。

1 实验研究

1.1 实验系统

图1为实验系统图。图2是实验台示意图。实验系统由压缩机、储气罐、油水分离器、流量控制阀、涡流管、流量计、压力表和温度传感器等组成。实验开始时,首先通过压缩机压缩高压空气并储存在储气罐里。高压气体从储气罐流出,经过油水分离器处理后流进涡流管,在涡流效应下分为冷热两股气流。冷气、热气分别经过流量计测量体积后,流出实验台。

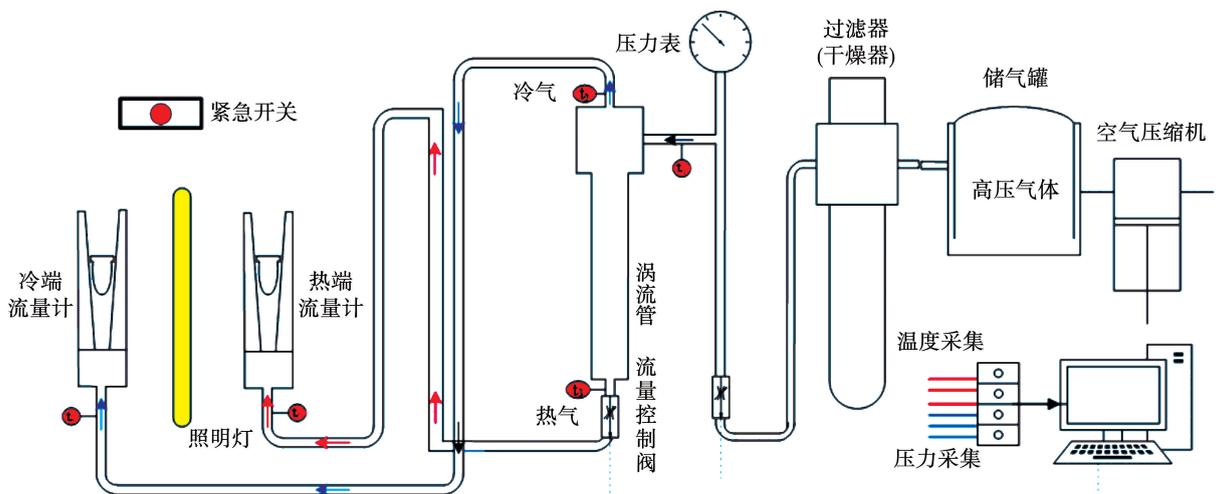


图1 实验系统

Fig.1 Diagram of experiment system

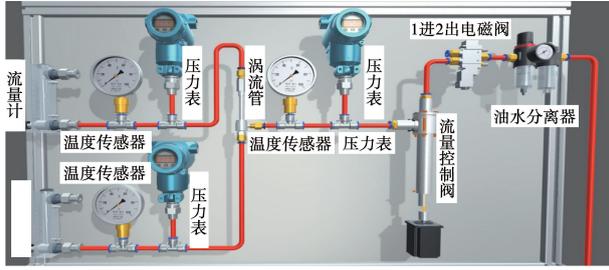


图2 实验台示意图

Fig.2 Schematic diagram of test bench

1.2 实验件及测试仪器

实验中涡流管选用 VC52010S 型 VAIR 通用型涡流管, 额定压力为 0.70 MPa, 额定进气参数为 0.23 m³/min, 进出口螺纹分别为 1/8 PT 和 1/4 PT。冷端出口和热端出口, 用量程为 2 ~ 16 m³/h 的 LZM-15T 型体积流量计测量冷、热端出口的气体流量。在非标准状态下测量得到的体积流量, 需要转换成标准状态下的值。采用非铠装 K 型热电偶悬挂在气路中测量温度, 误差为 ±1 K, 悬挂在气路中进行测量。采用 CKS-208 数显远传型压力表测量压力, 量程为 0 ~ 1 MPa, 精度等级为 0.2 级。

1.3 实验方法和内容

涡流管实验件进口安装温度和压力测试传感器, 用于记录进口空气温度和压力的数值, 同时在实验件冷、热两端也分别设置了温度和压力测试传感器, 可以获得不同工况下冷端和热端空气的状态参数。实验中通过体积流量计测量得到冷、热端的气体体积流量, 结合流量计进口压力和温度值进行修正, 得到标准状态下对应的质量流量。使用流量控制阀保持进口压力在 0.20 ~ 0.65 MPa 之间, 调节冷、热端流量计阀门改变涡流管冷气流率, 使其在 0.17 ~ 0.69 之间, 测量在不同进气压力和不同冷气流率下的进口温度、热端温度、冷端温度和进口压力等参数, 对数据进行处理得到实际温降、温度效应、绝热效率、制冷效率的变化规律, 获得涡流管的冷却特性。

2 参数定义和数据处理方法

涡流管理论温降 ΔT_s 定义为:

$$\Delta T_s = T - T_s \quad (1)$$

式中: T —涡流管进口气流温度, °C; T_s —理论冷端出口温度, °C。

涡流管实际温降 ΔT_c 定义为:

$$\Delta T_c = T - T_c \quad (2)$$

式中: T_c —涡流管实际冷端出口温度, °C。

冷气流率 μ 定义为:

$$\mu = \frac{G_c}{G} \quad (3)$$

式中: G_c —涡流管冷端质量流量 kg/s; G —涡流管进口总的的质量流量, kg/s。

温度效率 η_T 定义为:

$$\eta_T = \frac{\Delta T_c}{\Delta T_s} \quad (4)$$

涡流管绝热效率 η_s 定义为:

$$\eta_s = \mu \eta_T = \frac{\mu \Delta T_c}{\Delta T_s} \quad (5)$$

涡流管制冷效率 COP 定义为:

$$\text{COP} = \frac{\mu c_p \Delta T_c}{RT \ln\left(\frac{p}{p_0}\right)} \quad (6)$$

式中: c_p —空气的比定压热容, J/(kg·K); R —空气气体常数; p 和 p_0 —涡流管进口端及冷端出口压力, Pa。

由于部分参数是通过测量与被测参数相关的其他量, 并利用一定函数关系求得的。因此, 不确定度就会由直接测量量传递给被测参数。假设间接测量量 Y 和直接测量量 (x_1, x_2, \dots, x_n) 之间有如下的函数关系:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (7)$$

则误差传递公式^[17]为:

$$dy = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} dx_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

根据误差传递公式(8)可得实际温降的不确定度为 0.47%。同理, 可得其他参数的不确定度, 如表 1 所示。

表 1 参数的不确定度分析

Tab.1 Uncertainty analysis of parameters

参 数	不确定度/%
实际温降	±0.47
冷气流率	±0.28
温度效率	±0.57
绝热效率	±0.63
制冷效率	±1.60

3 实验结果与分析

实验中通过使用稳压阀和流量控制阀调节进口压力,不同工况冷气流率范围不同,均分布在 0.17 ~ 0.89 范围内。

3.1 实际温降

图 3 给出了进口压力为 0.20 ~ 0.65 MPa 的工况下实际温降随冷气流率的变化曲线。在所有工况里,实际温降随着冷气流率的增大先增大后减小,在实验达到的冷气流率 0.17 ~ 0.89 范围内,存在极大值。

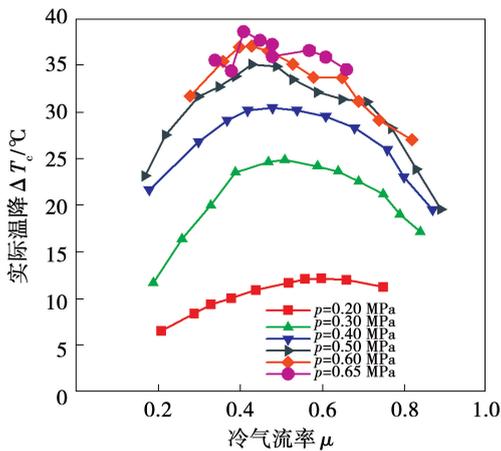


图 3 不同进口压力下实际温降随冷气流率的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of actual temperature drop with cold flow rate under different inlet pressures

当进口压力从 0.20 MPa 增大到 0.50 MPa 时,实际温降随冷气流率的变化大幅增大。当进口压力为 0.50 ~ 0.65 MPa 时,进口压力对实际温降影响较小,而且随着进口压力的增加,实际温降极大值所需冷气流率逐渐减小。当进口压力为 0.20 MPa 时,冷气流率为 0.6,实际温降达到最大值 12 °C;而当进口压力为 0.30 MPa 时,实际温降达到最大 25 °C,冷气流率仅为 0.5。该现象产生的原因,可能是当进口压力开始增加时,会提供给气体一个较大的进口速度,有利于实现涡流管内部的能量分离。当进口速度增大到一定程度后,即进口压力进一步增加,可能已经达到了该实验件结构允许的进口速度最大值,使涡流强度不能进一步提升,从而减弱对能量分离作用的影响。故再增加进口压力对实际温降影响

不大。

3.2 温度效率

图 4 给出了进口压力为 0.20 ~ 0.65 MPa 的工况下温度效率随冷气流率的变化曲线。在各种工况下,温度效率随冷气流率的提高先增加到最大值然后逐渐减小,大约在 0.40 ~ 0.50 MPa 时温度效率达到最大,之后温度效率便会减小。当进口压力为 0.40 MPa 时,冷气流率增加到 0.5 时,温度效率会达到最大值,之后会随着冷气流率的下降而下降。

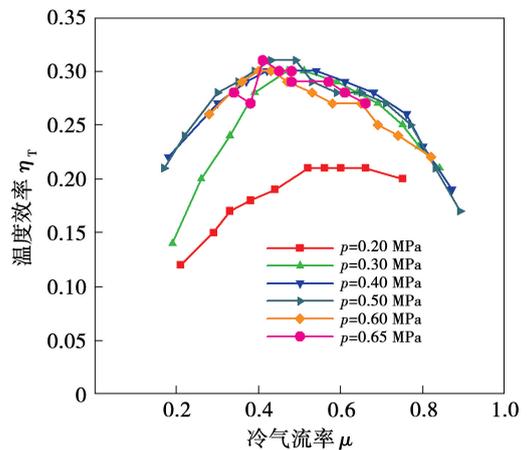


图 4 不同进口压力下温度效率随冷气流率的变化曲线

Fig. 4 Variation curve of temperature efficiency with cold flow rate under different inlet pressures

当进口压力从 0.20 MPa 增加到 0.40 MPa 时,温度效率随冷气流率的变化比较明显,最大增幅达到 10% 以上。说明提高进口压力可以有效地提升温度效率。但是当进口压力从 0.50 MPa 增加到 0.65 MPa 时,温度效率的增幅并不明显,甚至还会下降。与实际温降变化规律类似,该现象产生的原因可能也和进口压力对进口速度的影响有关。根据温度效率的定义,在所测试的工况中,效率最大不会超过 35%。

3.3 绝热效率

不同进口压力下绝热效率随冷气流率的变化曲线如图 5 所示。可以看到,在冷气流率达到 0.6 之前,各种工况下的绝热效率 η_s 都是随着冷气流率逐渐增加而增加。但当冷气流率超过 0.6 时,在不同工况下,情况会有所不同。在 $p=0.20$ MPa 时,绝热效率 η_s 会随冷气流率的增加而增加;在 $p=0.30$

MPa 时,绝热效率 η_s 会在冷气流率为 0.7 时达到最大值 0.19; 当 $p=0.40$ MPa、冷气流率为 0.75 时,绝热效率达到最大值 0.2; 当 $p=0.50$ MPa 冷气流率为 0.7 时,绝热效率达到最大值 0.19。以上工况下,绝热效率达到最大值之后,随着冷气流率增加而下降。当进口压力为 0.60 MPa 时,绝热效率达到最大值后下降,后随着冷气流率的增加又上升。当进口压力为 0.65 MPa 时,绝热效率随冷气流率的增加而增加。但由于实验条件限制,冷气流率大于 0.67 之后的工况未进行实验,故无法判断之后的情况。

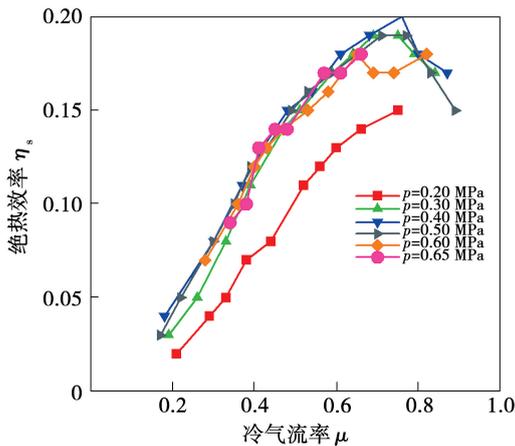


图5 不同进口压力下绝热效率随冷气流率的变化曲线

Fig.5 Variation curve of adiabatic efficiency with cold flow rate under different inlet pressures

当进口压力从 0.2 MPa 增加到 0.30 MPa 时,绝热效率会明显增大。当进口压力在 0.40 ~ 0.65 MPa 范围时,进口压力对绝热效率的影响逐渐减弱。即随着进口压力的增加,绝热效率出现不明显的变化。这可能是由于进口压力达到一定数值后不能有效地提高气流进入涡流室的速度,涡流室内涡流强度也不能进一步增强导致的。

3.4 制冷效率

图 6 为不同进口压力下制冷效率随冷气流率的变化曲线。可以看出,当进口压力为 0.20 MPa 时,制冷效率随着冷气流率的增大显著增大。进口压力达到 0.30 MPa 及以上时,制冷效率随着冷气流率先增大达到最大值,之后会随着冷气流率的增加而减小。在进口压力为 0.30 MPa、冷气流率为 0.68 的情况下,制冷效率达到最大值 0.16,之后又减小到

0.15; 而当进口压力为 0.60 MPa、冷气流率为 0.65 时,制冷效率达到最大值 0.14,之后再增加进口压力,制冷效率不变。

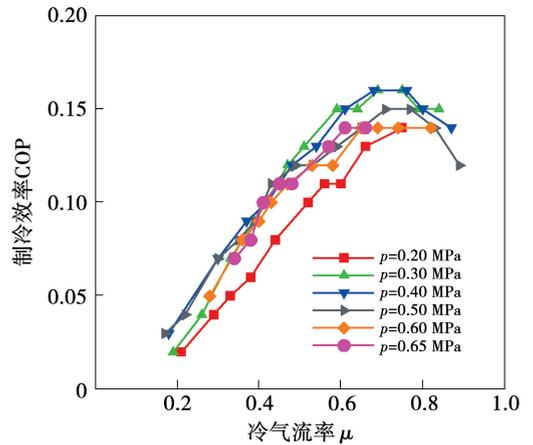


图6 不同进口压力下制冷效率随冷气流率的变化曲线

Fig.6 Variation curve of refrigeration efficiency with cold flow rate under different inlet pressures

当进口压力从 0.20 MPa 逐渐增加到 0.40 MPa 时,制冷效率的增加比较明显。而当进口压力超过 0.40 MPa 后,随着进口压力的增加,制冷效率变化不明显,进口压力在 0.40 ~ 0.65 MPa 范围内,每增加 0.10 MPa,制冷效率增加不到 3%,甚至可能会下降。当冷气流率为 0.71、进口压力为 0.60 MPa 时,制冷效率为 0.14; 而进口压力为 0.50 MPa 时,制冷效率却为 0.15; 由于实验条件限制冷气流率大于 0.67 的工况未进行实验,故无法判断之后的情况。

4 结论

针对涡流管在不同工况下的工作情况,通过实验分析的方法研究了涡流管在不同进口压力下的实际温降、温度效率、绝热效率和制冷效率随冷气流率的变化规律,得出结论:

(1) 实际温降随着冷气流率的增加先升高后减小,并且随着进口压力的增加,开始时实际温降会随着冷气流率的增加大幅增加,当进口压力达到 0.50 MPa 之后实际温降的增幅开始减小。同时,随着进口压力逐渐增加,实际温降极大值所需冷气流率逐渐减小。

(2) 温度效率随着冷气流率的增加先升高后降

低。温度效率在进口压力为 0.20 ~ 0.50 MPa 时,随冷气流率的变化比较明显,最大增幅到达 10% 以上。当进口压力在 0.50 ~ 0.65 MPa 范围内,进口压力对温度效率增幅的作用并不明显,甚至还会使温度效率下降。

(3) 随着冷气流率的增大,进口压力在 0.20 ~ 0.50 MPa 范围内绝热效率会出现先增加到最大值后减小的情况。当进口压力为 0.60 MPa 时,绝热效率会出现先增加后减小再增加。当进口压力从 0.20 MPa 增加到 0.40 MPa 时,在相同冷气流率下绝热效率会出现明显增大。当进口压力从 0.40 MPa 增加到 0.65 MPa 时,绝热效率随压力的增加变化不明显。

(4) 当进口压力在 0.20 ~ 0.50 MPa 时,制冷效率随冷气流率的增加,会先增加后减小。当进口压力为 0.60 MPa 及以上时,制冷效率先增加到最大值后不变。当进口压力从 0.20 MPa 增加到 0.40 MPa 时,在相同的冷气流率下制冷效率增加比较明显。而当进口压力超过 0.40 MPa 后,随着进口压力的增加,制冷效率变化不明显,增加 0.10 MPa,制冷效率可能会增加不到 3%,甚至可能还会下降。

参考文献:

[1] 黎念,陈光明. 涡流管与制冷工质的耦合特性研究[J]. 工程热物理学报,2019,40(1):28-35.
LI Nian, CHEN Guang-ming. Experimental study of the coupling characteristics between a vortex tube and refrigerants [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(1): 28-35.

[2] 何忠韬,罗冠炜. 基于涡流管制热原理的汽车清洗方法[J]. 机械工程学报,2005,41(5):157-160.
HE Zhong-tao, LUO Guan-wei. Automobile rinse method based on vortex tube making heat principle [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(5): 157-160.

[3] 计玉帮,吴玉庭,丁雨,等. 涡流管结构参数对其性能的影响[J]. 航空动力学报,2006,21(1):88-93.
JI Yu-bang, WU Yu-ting, DING Yu, et al. Study of the influence of structural parameters on the vortex tube performance [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(1): 88-93.

[4] SHMROUKH A N, ATTALLA M, ABD EI-HAKIM A A E N. Experimental investigation of a novel sea water desalination system using Ranque-Hilsch vortex tube [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 149: 658-664.

[5] 曹勇,齐延峰,刘加永,等. 涡流管热力学方法的研究[J]. 低温工程,2003(3):12-16.
CAO Yong, QI Yan-feng, LIU Jia-yong, et al. Thermodynamic analysis of the Ranque-Hilsch vortex tube [J]. Cryogenics, 2003(3): 12-16.

[6] 何丽娟,李海燕,马文清,等. 涡流管的入口压力对其性能影响的研究[J]. 真空科学与技术学报,2020,40(1):108-112.
HE Li-juan, LI Hai-yan, MA Wen-qing, et al. Study on the influence of inlet pressure on vortex tube on its performance [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2020, 40(1): 108-112.

[7] 覃柏钧. 涡流管关键几何参数的数值模拟研究[D]. 大连:大连理工大学,2022.
QIN Bai-jun. Numerical study of key geometrical parameters of vortex tube [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.

[8] 张宗卫,朱惠人,刘聪,等. 全气膜冷却叶片表面换热系数和冷却效率研究[J]. 西安交通大学学报,2012,46(7):103-107.
ZHANG Zong-wei, ZHU Hui-ren, LIU cong, et al. Heat transfer coefficient and film cooling effectiveness on a full-film cooling vane [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(7): 103-107.

[9] 席雷,徐亮,高建民,等. 蒸汽冷却厚壁通道传热性能的耦合传热研究[J]. 西安交通大学学报,2017,51(9):32-38,62.
XI Lei, XU Liang, GAO Jian-min, et al. Conjugate calculation of heat transfer performance of a steam cooled thick-wall ribbed channel. [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(9): 32-38, 62.

[10] 李宗全,牛夕莹. 燃气轮机轮盘预旋冲击冷却特性研究[J]. 热能动力工程,2021,36(8):22-27.
LI Zong-quan, NIU Xi-ying. Research on the characteristics of pre-swirl impingement cooling of gas turbine disc [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(8): 22-27.

[11] 胡娅萍,卢元丽,吉洪湖,等. 层板冷却涡轮叶片前缘内部流动与传热特性实验[J]. 航空动力学报,2014,29(2):241-249.
HU Ya-ping, LU Yuan-li, JI Hong-hu, et al. Experience on flow and heat transfer characteristic inside leading edge of lamilloy cooling turbine blade [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(2): 241-249.

[12] 陈帆,王锁芳,夏子龙,等. 一种用于冷气预旋结构的弯孔预旋喷嘴:CN107218083A [P]. 2017-09-29.
CHEN Fan, WANG Suo-fang, XIA Zi-long, et al. A curved hole pre-spin nozzle for cold air pre-spin structure: CN107218083A [P]. 2017-09-29.

- [13] 沃特·希伯特森. 燃气轮机热负荷结构件的冷却方法实施该方法的装置以及热负荷叶片的结构设置: CN87101766A [P]. 1987-02-04.
HIBBERTSON W. The cooling means of gas turbine heat load configuration spare, the device of implementing this method and heat load vane structure: CN87101766A [P]. 1987-02-04.
- [14] 张宗卫, 靳合龙, 姜浩然, 等. 带有基于涡流效应气膜孔冷却结构的涡轮叶片: CN112780357A [P]. 2021-05-11.
ZHANG Zong-wei, JIN He-long, JIANG Hao-ran, et al. Turbine blades with vortex effect air film orifice based cooling structure: CN112780357A [P]. 2021-05-11.
- [15] 张宗卫, 靳合龙, 姜浩然, 等. 一种基于涡流效应的预旋喷嘴: CN112324522A [P]. 2022-11-01.
ZHANG Zong-wei, JIN He-long, JIANG Hao-ran, et al. A pre-rotation nozzle based on vortex effect: CN112324522A [P]. 2022-11-01.
- [16] 龚迪澜, 毛军逵, 邓明, 等. 进气温度与压力对涡流管性能影响的实验[J]. 航空动力学报, 2017, 32(3): 599-606.
GONG Di-lan, MAO Jun-kui, DENG Ming, et al. Experiment on influences of inlet temperature and pressure on vortex tube's performance. [J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(3): 599-606.
- [17] 菲利普·R. 贝文顿, D. 基思·鲁滨逊. 物理科学中的数据处理和误差分析[M]. 夏元复, 何云, 译. 桂林: 广西师范大学出版社, 2006.
BEVINGTON P R, ROBINSON D K. Data reduction and error analysis for the physical sciences [M]. XIA Yuan-fu, HE Yun, Trans. Guilin: Guangxi Normal University Press, 2006.

(丛敏编辑)

(上接第 25 页)

- [10] DU B, QIN Z, LU Q, et al. Dynamic modeling of tie-bolt rotors via fractal contact theory and virtual material method[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2022, 236(11): 5900-5915.
- [11] 闫超群, 马炳杰, 王志刚, 等. 基于虚拟材料法建模的柴油机振动噪声分析[J]. 内燃机学报, 2020, 38(5): 464-471.
YAN Chao-qun, MA Bing-jie, WANG Zhi-gang, et al. Vibration and noise analysis of diesel engine based on virtual material modeling method [J]. Transactions of CSICE, 2020, 38(5): 464-471.
- [12] 陈勇将, 王二化, 郭魂, 等. 基于虚拟材料方法的龙门数控机床动态特性影响机制分析[J]. 现代制造工程, 2021(6): 135-141, 154.
CHEN Yong-jiang, WANG Er-hua, GUO Hun, et al. Influence mechanism analysis of dynamic characteristics of gantry CNC machine tool based on virtual material method[J]. Modern Manufac-
- turing Engineering, 2021(6): 135-141, 154.
- [13] AN C, WEI R, WANG Z, et al. Investigation on dynamic performance of ultra-precision flycutting machine tool based on virtual material method[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2021, 235(9): 1473-1482.
- [14] TIAN H, LI B, LIU H, et al. A new method of virtual material hypothesis-based dynamic modeling on fixed joint interface in machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(3): 239-249.
- [15] 田红亮. 机械结构固定结合部虚拟材料的动力学建模[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
TIAN Hong-liang. Dynamical modeling on fixed joint interface virtual materials in mechanical structure [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.

(丛敏编辑)