

双辐板涡轮盘流动与换热试验研究

赵维维, 郭文, 呼艳丽, 徐连强
(中国燃气涡轮研究院, 四川 成都 610500)

摘要: 通过测量不同工况下双辐板涡轮盘壁面温度、盘腔内气流压力和温度分布,研究了盘心冷气流量、转速及盘缘加热量对盘内流动与换热的影响。结果表明,双辐板涡轮盘试验件壁面温度随转速的上升而下降,随盘缘加热量的增加而上升;由于盘缘加热,整个壁面温度在径向上沿盘面逐渐上升;由于离心力作用,盘内气流压力随转速的上升而略有升高;转速越高换热效果越好,盘内气流温度越低。

关键词: 航空发动机;双辐板涡轮盘;IHPTET;换热特性;试验研究

中图分类号: V231.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620 (2014) 06-0028-05

Experimental Investigation of Flow and Heat Transfer in the Dual-Web Turbine Disk

ZHAO Wei-wei, GUO Wen, HU Yan-li, XU Lian-qiang
(China Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China)

Abstract: An experimental investigation on the flow and heat transfer in the dual-web turbine disk rig cavity was conducted. The experimental data of disk wall temperature, air pressure and temperature distribution in the cavity was obtained for different operating conditions. The effect of the cooling mass flow rate, rotating speed and heat flux from disk rim on flow and heat transfer field was investigated in details by analyzing the experimental data. The results demonstrates that the disk wall temperature decreases with the accretion of the rotating speed and increases with the accretion of the heat flux from disk rim; when the rim is heated the temperature on the disk wall increases along the radial direction; the cooling-air pressure rises slightly with increasing of the rotating speeds as a result of the centrifugal effect, on the other hand the cooling-air temperature in the cavity changes against with the rotating speed.

Key words: aero-engine; dual-web turbine disk; IHPTET; heat transfer characteristics; experimental investigation

1 引言

航空发动机涡轮前进口燃气温度和循环效率的提高,必然会对热端部件的结构和冷却技术提出更高的要求。传统涡轮盘为实心结构,由高温合金锻造或铸造而成,这使得盘质量大且冷气无法通过盘内对其进行冷却,易导致涡轮盘温度较高且分布不均,热应力大。

美国在 IHPTET 计划中,验证了一种可减小涡轮盘质量并延长其寿命周期的空心结构设计的新

型。双辐板涡轮盘结构。双辐板涡轮盘采用焊接方法加工而成,冷气可直接流进双辐板间的空腔,对涡轮盘内部进行冷却,有效改变了传统结构形式冷气只能从盘面流过的冷却形式,提高了盘的冷却效果,减少了冷却空气用量,提高了发动机性能。同时,合理的冷却方式使得涡轮盘的温度分布更加均匀,热应力更小,从而延长了涡轮盘寿命。研究^[1]表明,与传统涡轮盘相比,这种焊接的双辐板涡轮盘能减少 17% 的质量,提高 9% 的转速,提高 AN^2 值,从而降低涡轮

收稿日期: 2013-10-07; 修回日期: 2014-08-25

作者简介: 赵维维(1987-),女,广西桂林人,硕士研究生,主要从事航空发动机空气系统与热分析研究。

盘的高周疲劳失效,进而大幅降低发动机的非定期维护成本。

目前,国内外对于实心涡轮盘的研究技术比较成熟,积累了大量经验,但实心涡轮盘的冷却效果已无太多潜力可挖,因此迫切需要开展新型冷却结构的研究。在实心涡轮盘基础上发展起来的双辐板涡轮盘,采用带有滑出小舌的盘内孔冷却概念设计,使转子在旋转时固定到位,从而收集冷气并将之引至轮缘^[2]。国内对双辐板涡轮盘结构及其优化设计也进行了一定研究,如陆山等^[3]分别对单辐板和双辐板盘进行了优化设计,验证了双辐板盘的优越性;张乘齐等^[4]针对双辐板涡轮盘结构及其连接的设计特点,进行了经验设计、结构拓扑优化和形状优化。但对盘腔内的流动和换热结构方面的研究较少,且基本局限于数值模拟阶段^[5-6]。本文通过试验,研究了双辐板涡轮旋转盘腔内冷气流量、转速及盘缘加热量等参数对盘腔内流动与换热的影响。

2 试验件及试验

2.1 试验件

双辐板涡轮盘试验件(图 1),主要用于摸索双辐板涡轮盘盘腔内的流动与换热机理,设计为可拆卸结构,左、右辐板通过止口定位,螺栓联接,摩擦传扭。试验时,其最高工作温度不超过 227℃,转速不超过 3 000 r/min。

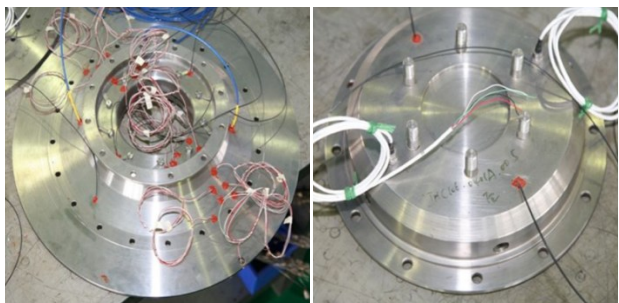


图1 左、右辐板实物照片

Fig.1 Left & right web of dual-web turbine disk specimen

试验件上安排壁面温度、盘腔压力和盘腔温度测点。其中,壁面温度测点 24 个,腔压和腔温测点各 6 个,且每个测点沿周向两点均布。各测点说明见表 1,测点布置如图 2 所示。

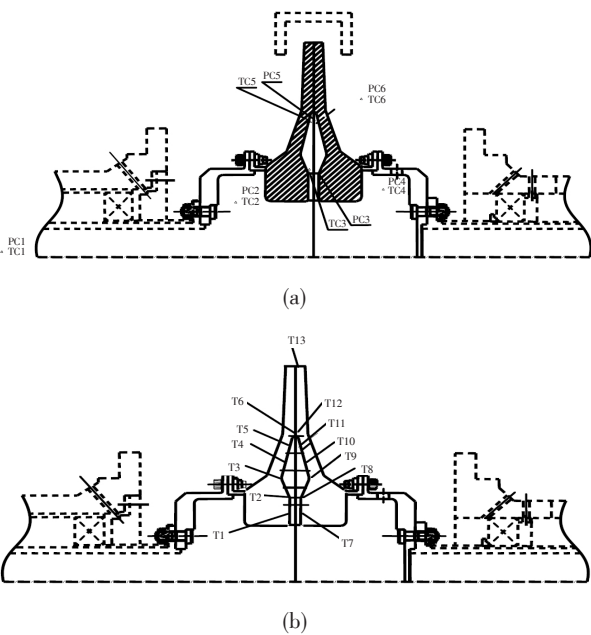


图2 试验件测点布置示意图

Fig.2 The layout of the specimen stations

2.2 试验内容及方法

双辐板涡轮盘试验件安装在支承系统上,由 250 kW 动力系统提供动力,保证其在 0~3 000 r/min 内稳定运转。轮盘顶部设置一辐射加热罩,罩内空气温度恒定为 227℃。气源供给的冷却空气由涡轮盘心引入,双辐板涡轮盘冷却方案如图 3 所示。冷气进入 101 腔后,小部分冷气在旋转作用下经舌板通道进入 106 腔,对盘内壁面进行冷却后又沿盘面回到 101 腔,最后经孔 F3 流入盘后。测试信号采用滑环引电器引出,由动态系统处理后送到计算机显示。转速利用磁电传感器测量。

试验工况见表 2,试验时调节盘心冷气流量分别至 10、35、40、60 g/s;启动电加热器,将盘缘逐步加

表 1 双辐板涡轮盘流动与换热试验件测量参数表

Table 1 Test parameters for dual-web turbine disk specimen on flow and heat transfer field

测点号	测量参数	周向测点数	测量范围	测量状态		受感部	精度	备注
				稳态	过渡态			
T1~T24	盘面壁温/℃	各 2 点	<250	*	*	热电偶	±1%	
TC1~TC6	盘腔内气流温度/℃	各 2 点	<200	*	*	热电偶	±1%	离壁面 2mm
PC1~PC6	盘面壁压/kPa	各 2 点	≤300	*	—	压力传感器	±0.5%	位于盘面上且垂直于盘面

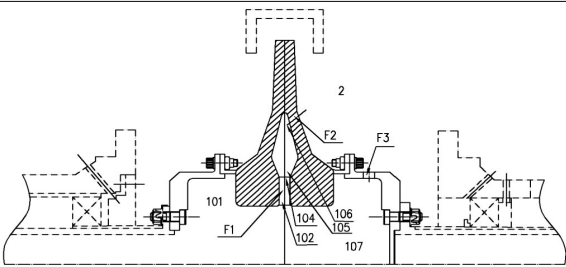


图3 冷却方案示意图

Fig.3 Schematic view of cooling method

温至各流量下对应的温度并保持稳定;在上述每一状态下启动电机,转速从0逐步升高至3 000 r/min,记录1 000、1 500、2 000、2 500、3 000 r/min时的稳态测试数据(盘面壁温、盘腔温度和压力)。获取转

表2 试验工况

Table 2 The operating conditions

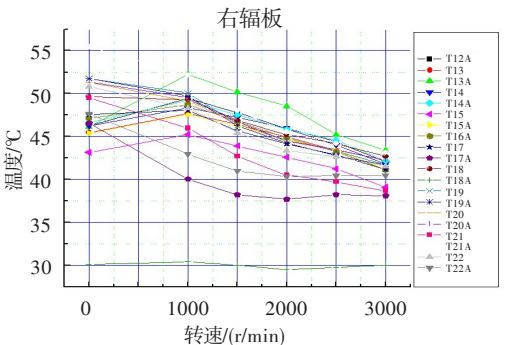
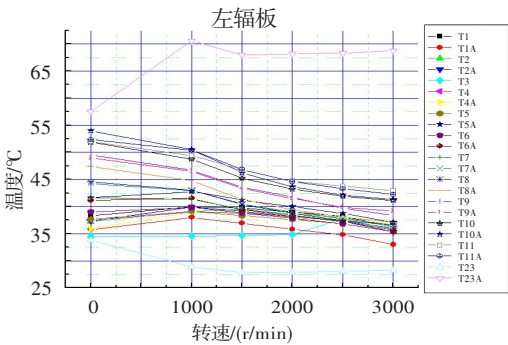
流量/(g/s)	10		35		40		60
加热温度/℃	27	57	100	70	70	100	90
转速/(r/min)	0、1 000、1 500、2 000、2 500、3 000						

速、盘心冷气流量、盘缘加热量,对双辐板涡轮盘盘腔内气体流动与换热特性的影响。

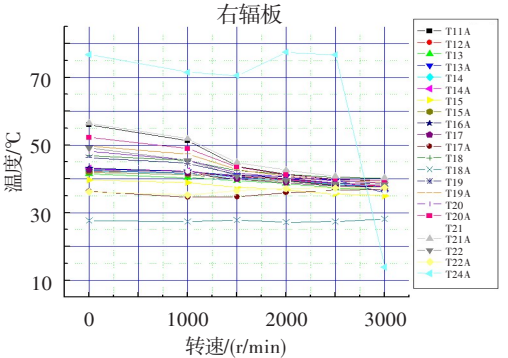
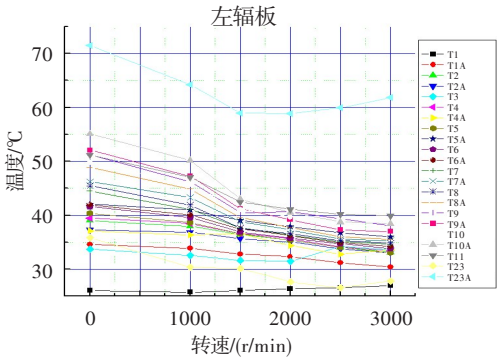
3 试验结果与分析

3.1 壁面温度随转速的变化

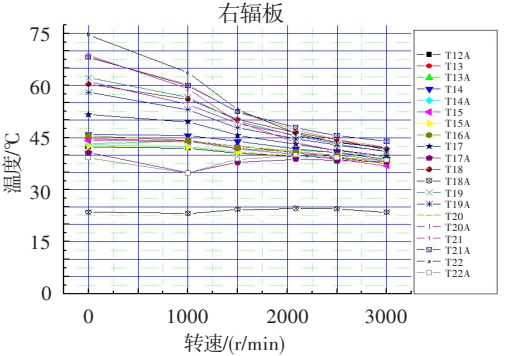
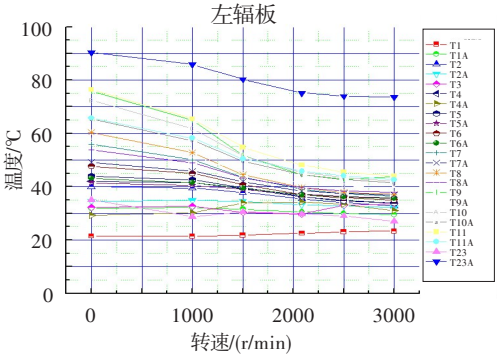
部分试验状态下壁面温度随转速的变化如图4所示。可见,在盘心冷气流量和盘缘加热初始温度



(a) 10 g/s, 57℃



(b) 35 g/s, 70℃



(c) 60 g/s, 90℃

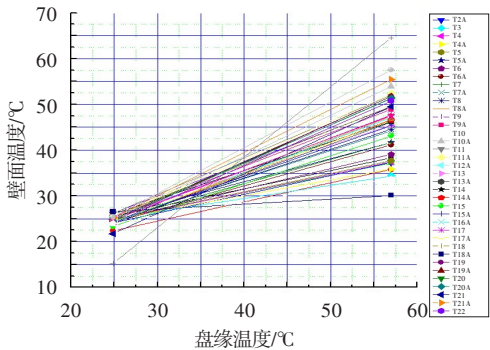
图4 双辐板壁面温度随转速的变化

Fig.4 Wall temperature changes with rotating speed

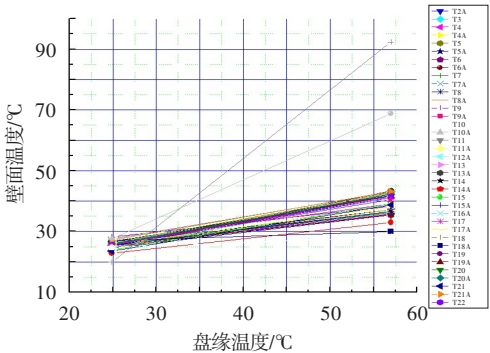
一定的情况下,随着转速的升高,盘面温度明显降低。这是因为旋转使壁面与冷气的相对速度加大,进入腔内的气体流量增加,温度梯度变化较剧烈,换热系数明显加强,从而使壁温降低。

3.2 壁面温度随盘缘加热量的变化

图5给出了盘心冷气流量为10 g/s、试验件在静止和3 000 r/min转速时,双辐板壁面温度随盘缘加热量的变化。可见,流量和转速一定时,随着盘缘加热量的增加,盘面温度升高,且越靠近盘缘温度升高越多,这符合本试验边界加热情况。加热温度对试验件表面温度分布有较大影响,加热温度越高试验件温度上升越大;转速越低流入盘腔内的流量越小,换热越弱,试验件温度升幅也越大。



(a) 0 r/min



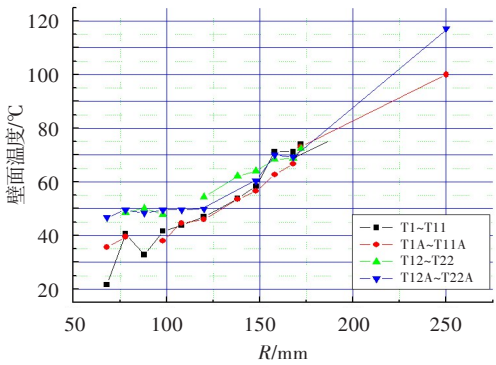
(b) 3 000 r/min

图5 盘心冷气流量为10 g/s时双辐板壁面温度随盘缘加热量的变化

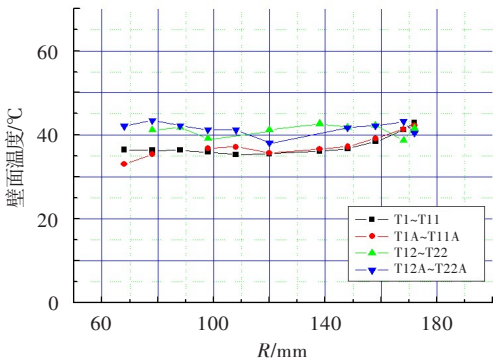
Fig.5 Wall temperature changes with rim heat flux (case 10 g/s)

3.3 壁面温度分布

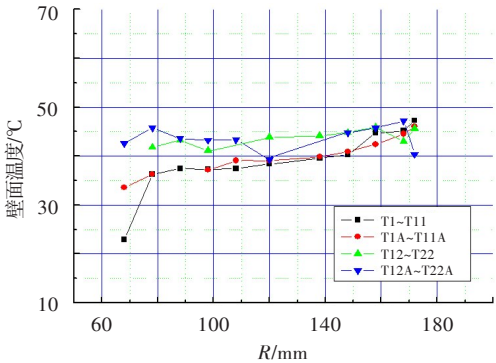
图6给出了不同盘心冷气流量、转速和盘缘加热温度下,双辐板壁面温度沿半径方向的变化。可见,试验件壁面温度在半径方向由盘心处向盘缘逐渐升高,同时因转速影响上升趋势减缓。这是因为试验件的温度主要由加热端通过导热方式传递,从而使整个温度分布在半径方向沿加热段逐渐上升;



(a) 10 g/s, 0 r/min, 100°C



(b) 10 g/s, 3 000 r/min, 57°C



(c) 40 g/s, 3 000 r/min, 70°C

图6 双辐板壁面温度分布

Fig.6 Wall temperature distribution of the dual-web disk

而转动使气流热量交换充分,故温度上升趋势较缓。

3.4 壁面压力随转速的变化

图7给出了不同盘心冷气流量和盘缘初始加热温度下,双辐板壁面压力随转速的变化。可见,转速对试验件壁面压力的影响不大,且各位置的壁面压力较为接近;随着转速的升高,壁面压力略有上升,这是由于转动离心增压所致。

3.5 腔内气流温度随转速的变化

图8给出了不同盘心冷气流量和盘缘初始加热温度下,双辐板盘腔内气流温度随转速的变化。可

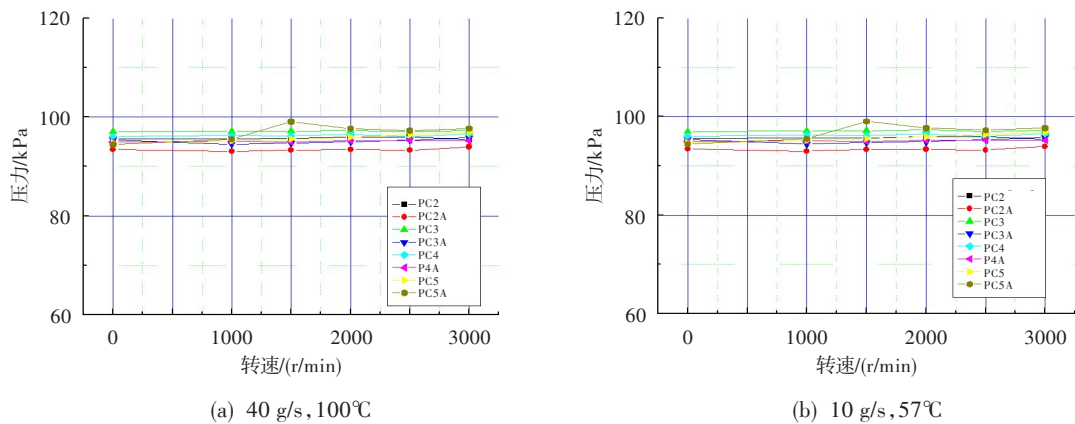


图7 双辐板壁面压力随转速的变化

Fig.7 Wall pressure changes with rotating speed

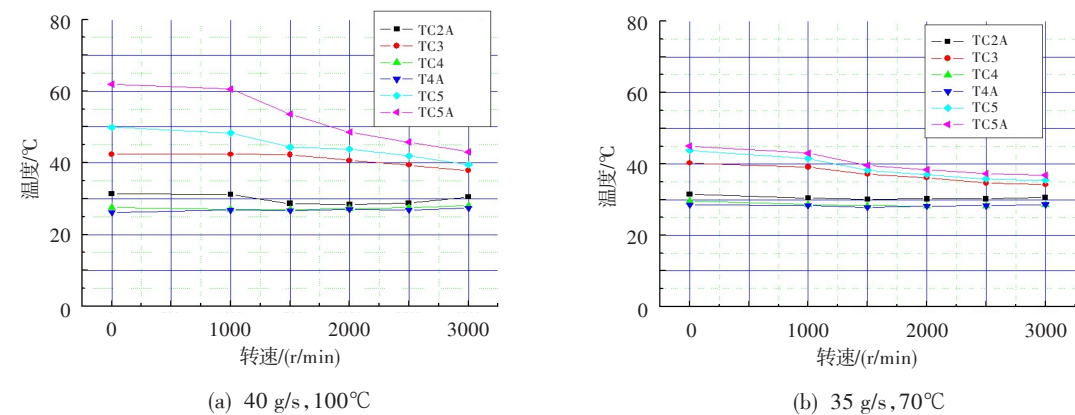


图8 双辐板腔内气流温度随转速的变化

Fig.8 Cooling-air temperature changes with rotating speed

见,转速对腔内TC2A、TC4及TC4A测点气流温度的影响不大,且各位置的温度较为接近;而TC3、TC5及TC5A测点温度随转速的上升而下降。这是因为TC2A、TC4及TC4A位于试验件进气轴心位置,受试验件热传递和换热影响较小;而TC3、TC5及TC5A位于试验件盘腔内部靠近试验件加热位置(温度略高),转速越高,换热效果越强,气流温度就越低。

4 结论

- (1) 试验件壁面温度随转速的升高而降低;盘缘加热温度越高,加热量就越大,试验件壁面温度就越高。
- (2) 盘缘加热使得涡轮盘整个壁面温度在径向上沿着盘缘逐渐上升;转动时由于离心力的作用,涡轮盘壁面压力随着转速的增大略有上升。
- (3) 试验件进气轴心位置的气流温度,受转速

和加热量的影响不大,但腔内靠近加热位置的气流温度较高,且转速越高气流温度越低。

参考文献:

- [1] Integrated High Performance Turbine Engine Technology(IHPTET)[R]. USA:U.S. Department of Defense, 2006.
- [2] 江和甫. 对涡轮盘材料的需求及展望[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2002, 15(4): 1—6.
- [3] 陆山, 李伦未. 航空发动机高负荷涡轮盘双辐板结构优化设计[J]. 推进技术, 2011, 32 (5): 631—636.
- [4] 张乘齐, 黄文周, 刘学伟, 等. 低惯量涡轮转子结构设计与优化[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2013, 26(4): 33—36.
- [5] 赵熙, 徐国强, 罗翔, 等. 等重量空心盘冷气布置方案[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(5): 527—531.
- [6] 罗翔. 复杂旋转盘腔内冷气的流动和换热特性研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2003.