

文章编号:1000-8055(2012)03-0528-08

旋转盘腔盘罩间隙比的敏感性分析

丁水汀, 李 烨, 张 弓

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室 适航技术研究中心, 北京 100191)

摘 要: 为保证寿命限制件之一的涡轮盘满足适航性要求, 采用单向流固耦合 (fluid structure interaction, 简称 FSI) 数值方法, 研究转静系旋转盘腔盘罩间隙比的变化对转盘安全性的影响机理。并且, 由流阻、换热效果和应力分布三方面构成的工程评价体系对盘罩间隙比的影响进行评价以及敏感性分析。结果表明: 盘罩间隙比的变化能够影响旋转盘腔内流动结构的强度, 从而改变盘面换热效果和转盘温度分布, 导致与温度梯度相关的热应力也发生变化。随着盘罩间隙比的增加, 旋转盘腔的流阻损失基本不变, 转盘迎风面平均换热效果呈现先增强后减弱的趋势, 转盘整体应力水平上升, 以及出现在盘心处的最大等效力值增大。盘罩间隙比的变化能够从材料许用应力和实际使用载荷两方面影响涡轮盘的失效概率, 因此, 在涡轮盘腔设计阶段, 需考虑盘罩间隙比对涡轮盘安全性的影响。

关 键 词: 适航; 旋转盘腔; 盘罩间隙比; 冷却效果; 敏感性分析

中图分类号: V231

文献标志码: A

Sensibility analysis of gap ratio in rotating cavity

DING Shui-ting, LI Ye, ZHANG Gong

(Airworthiness Technologies Research Center,

National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engines Aero-thermodynamics,
School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100191, China)

Abstract: The sensibility analysis of the gap ratio was investigated on the cooling effect of the rotating cavity with intent of ensuring safety of a turbine disk, one of the life-limited parts in the propulsion system. The cooling effect was evaluated by fluid-structure-interaction numerical method according to resistance evaluation, heat transfer evaluation and stress distribution evaluation. The results show that the gap ratio has a great effect on heat transfer and temperature distribution of the rotating disk. Furthermore, the thermal stress of the rotating disk related to the temperature gradient can be affected. As the rising of the gap ratio, the frictional windage of the rotating cavity has not changed, heat transfer of the windward of the disk takes on up-down tendency, and the stress level and the maximum value enlarged. Therefore, change of the gap ratio has an effect on the failure probability of the turbine disk from two aspects: the material affordability and the working stress.

Key words: airworthiness; rotating cavity; gap ratio; cooling effect;
sensibility analysis

收稿日期: 2011-05-05; 修订日期: 2011-12-04

基金项目: 航空发动机复杂系统安全性教育部长江学者创新团队 (IRT0905)

作者简介: 丁水汀 (1967—), 男, 辽宁铁岭人, 教授、博导, 博士, 主要从事燃气轮机热端旋转部件流动与换热机理研究, 航空发动机适航性设计与验证技术研究。

航空发动机安全、高效的运行是航空器飞行安全的必要保障,能够持续维持公众对航空安全的信任度^[1].在航空器本身导致的事故中,近40%与航空发动机的故障相关^[2],因此,在航空发动机设计阶段,应当引入安全性理论和分析技术,建立安全性设计保障体系和实用安全性设计准则,保证发动机高性能指标的持续实现.据统计,航空发动机所有的非包容事故,大约有一半是由轮盘的损坏引起的,其中又有大约1/8的结果是相当于轮盘的1/3的碎片飞出.涡轮盘作为航空发动机的寿命限制件,其原发失效能够引起航空发动机灾难性影响^[3],因此,适航规章明确规定了涡轮盘在运行期间失效概率必须低于 10^{-8} 次/飞行小时^[4].涡轮盘处于高温、高转速的工作状态,由温度梯度产生的热应力受到涡轮盘腔内流动与换热特性的影响^[5].因此,为保证涡轮盘满足适航性要求,需要对涡轮盘腔冷却效果进行全面地评价.

Daily 和 Nece^[6]依据无外部供气时带罩转静系旋转盘实验数据,按盘罩间隙比 G 与旋转雷诺数 Re_ω 划分了具有不同流动特点四个区域. Bayley 和 Owen^[7]通过数值计算以及实验方法研究了中心进气径向出流的转静系旋转盘腔的流动特性.研究发现,盘罩间隙比的改变对转盘摩擦转矩的影响不大;而力矩系数会随着旋转雷诺数的增加而减小. Howey 等^[8]实验研究了转静系旋转盘在不同盘罩间隙比和旋转雷诺数下的换热特性,并指出在实验工况中由于旋转泵效应而出现了主流空气沿静盘入侵的现象.国内曹玉璋、徐国

强、陶智等^[9-11]对高位垂直进气转静系旋转盘附近冷气流动和换热特性进行实验研究,并采用混合长度模型进行数值计算研究.然而,国内外关于涡轮盘腔的大量研究成果主要集中在其流动与换热特性,缺乏由安全性角度考虑的评价指标.

近年,丁水汀等^[12-13]提出了以流阻、换热和应力分布三个指标构成涡轮盘腔冷却问题的工程评价体系,较为全面地衡量旋转盘腔冷却效果.进一步,需要研究流动与换热对涡轮盘应力分布的影响机理以及边界条件的偏差引起工程评价体系中各指标的变化,即对流动和换热的边界条件进行敏感性分析,这对于指导旋转盘腔冷却结构的设计,以及在发动机涡轮部件的安全性分析中是十分必要的^[5].

因此,本文以轴向进气径向出气的转静系旋转盘腔模型(如图1)模拟发动机涡轮盘腔冷却系统,采用单向流固耦合(fluid structure interaction,简称FSI)数值方法研究不同的盘罩间隙对冷却效果的影响机理,并且对工程评价体系中各指标随盘罩间隙变化的敏感性进行分析.

1 数值方法

1.1 计算模型

本文采用单向流固耦合数值方法对旋转盘腔流热固耦合问题进行研究,采用与文献^[14]相同的几何模型,如图1所示.当盘罩间隙 S 作为独立变量进行研究时,模型的其他几何参数按表1给定.

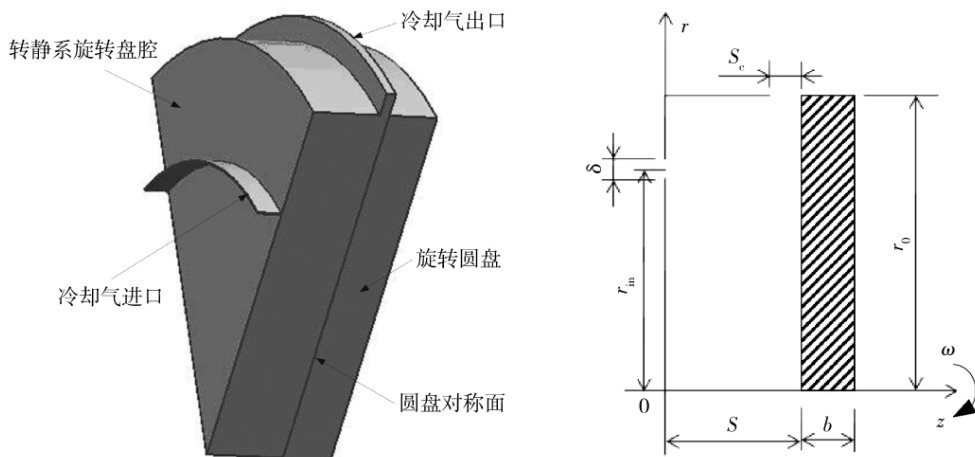


图1 旋转盘腔模型示意图

Fig. 1 Model of rotating cavity and disk

表 1 计算模型的几何参数
Table 1 Geometry parameters of the model

圆盘半径 r_0/mm	圆盘厚度 b/mm	进气位置 r_{in}/mm
320	40	224
进气缝宽 δ/mm	预旋角度 $\varphi/(\text{^\circ})$	出气间隙 S_c/mm
1.2	0	8

图 2 为旋转盘腔和圆盘的子午截面网格示意图. 采用六面体单元和三棱柱单元划分计算模型, 并在流固交界面的流体近壁区域进行适当的网格加密处理. 流、固两域的网格单元数分别为 15 万和 6 万, 通过网格无关解验证. 选用 K-Omega 湍流模型. 收敛标准为全场最大残差小于 10^{-5} 以及控制方程(组)的计算不平衡量小于 0.1%.

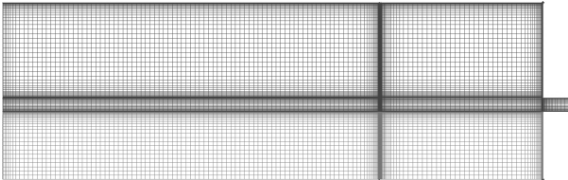


图 2 旋转盘腔和圆盘的网格示意图

Fig. 2 Mesh of rotating cavity and disk

1.2 边界条件的确定

无量纲分析旋转盘腔流热固耦合方程组及其定解条件后可得, 盘罩间隙比 $G=S/r_0$ (系统的无量纲几何参数) 是影响旋转盘腔冷却效果的准则数之一. 基于单变量研究思路, 在 $Re=1.7\times10^6$, $Re_\omega=2.04\times10^6$, $T_e=0.394$, $r_{\text{in}}/r_0=0.7$, $v_{\varphi 0}/v_0=0$ 时(见表 2), 数值研究盘罩间隙比 G 在 0.025~

表 2 计算边界条件数据列表

Table 2 Computational boundary condition

计算边界条件	数值
冷却气流量/(kg/s)	0.02778
冷却气进口总温/K	301.15
冷却气进口预旋角度/($^\circ$)	0
冷却气出口背压/Pa	101325
圆盘转速/(r/min)	3000
盘腔静止罩壁面处理	无滑移, 绝热
圆盘盘缘加热(热流密度)/(W/m)	17407
圆盘对称面	绝热, 法向位移为零

0.2 范围内变化对旋转盘腔冷却效果的影响. 其中, Re 为进气雷诺数, Re_ω 为旋转雷诺数, T_e 为基比切夫数, r_{in}/r_0 为无量纲进气位置, $v_{\varphi 0}/v_0$ 为无量纲进气预旋角.

旋转盘腔内的流动马赫数 $Ma<0.3$, 可忽略流体的压缩性. 并且, 在本模型的计算工况中, 由于冷气与涡轮盘换热后温升不是很高, 故材料物性参数按照常物性处理. 参考温度取进口流体温度, $T_{\text{ref}}=T_0=301.15\text{ K}$, 物性参数按表 3 给定.

表 3 物性参数列表

Table 3 Data list of the physical parameters

计算域的物性参数		数值
流体域	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1.173
	导热系数 $\lambda_{\text{fluid}}/(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$	0.0265
	比定压热容 $c_p/(\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$	1005
	动力黏度 $\mu/10^{-5}(\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}))$	1.854
固体域	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	7840
	导热系数 $\lambda_{\text{solid}}/(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$	47
	比定压热容 $c_p/(\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$	470
	弹性模量 E/GPa	200
	泊松比 ν	0.3
	热膨胀系数 $\alpha/10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$	14.2

2 计算结果及分析

2.1 旋转圆盘的温度分布

图 3 给出了不同盘罩间隙比对旋转圆盘迎风面温度分布的影响. 其中, $G=0.170$ 时, 温度分布趋势及其相对大小与文献[10]的实验数据吻合. 从图中可以看出, 转盘低半径区域的温度梯度基本为零, 高半径区域的温度变化剧烈. 温度梯度逐渐增大. 当 $G=0.025$ 时, 转盘迎风面的温度最小值出现在与冷却气进口处于相同径向位置的区域; 其余工况下, 转盘迎风面的温度最小值均出现在盘中心. 随着盘罩间隙比的增加, 转盘的整体温度水平逐渐下降, 整体最大温差增大. 当 $G=0.200$ 时, 转盘的平均温度比 $G=0.025$ 时仅下降 0.8%, 而整体最大温差却增加了 13%.

2.2 流阻评价

定义阻力系数来反映系统的流阻损失

$$\xi_1 = 2(p^* - p_0)/\rho_0 \omega^2 r_0^2 \tag{3}$$

或者

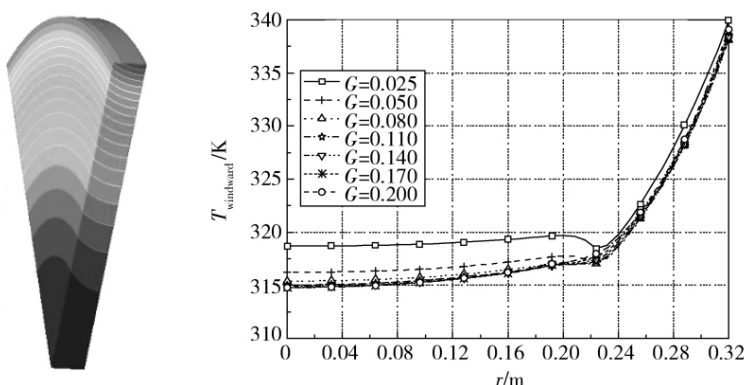


图 3 旋转圆盘迎风面的温度分布趋势

($Re=1.7 \times 10^6, Re_w=2.04 \times 10^6, T_e=0.394, r_{in}/r_0=0.7, v_{\varphi 0}/v_0=0$)

Fig. 3 Temperature distributions of the rotating disk

($Re=1.7 \times 10^6, Re_w=2.04 \times 10^6, T_e=0.394, r_{in}/r_0=0.7, v_{\varphi 0}/v_0=0$)

$$\xi_2 = \frac{2[p^* - p_0 - 0.5\rho_0\omega^2(r_0^2 - r_{in}^2)]}{\rho_0\omega^2r_0^2} \quad (4)$$

其中 p^* 为旋转盘腔进口总压; p_0 为旋转盘腔出口总压, 取为大气压力。阻力系数 ξ_2 剔除了旋转盘腔泵效应, 更合理地反映流动损失。

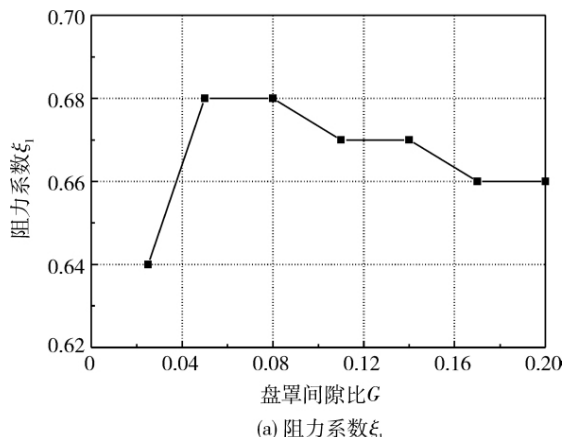
图 4 给出了不同盘罩间隙比对旋转盘腔流阻损失的影响。从图中可以看出, 与中心进气径向出流的情况^[7]类似, 在旋转雷诺数 $Re_w = 2.04 \times 10^6$ 的情况下, 盘罩间隙比的变化对高位进气径向出流的转静系旋转盘腔的阻力系数影响不大。

2.3 换热评价

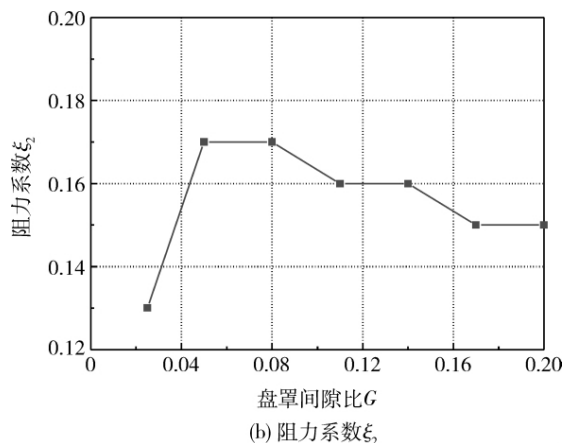
图 5 给出了不同盘罩间隙比对旋转圆盘迎风面换热效果的影响。从图 5(b) 可以看出, 低半径处的局部 Nu 处于较低水平, 换热效果不明显; 中半径处具有换热局部强化区域, 强化效果不大; 高半径处的换热效果大幅提升, 并且换热效果最强的区域与冷却气进口的径向位置一致。随着盘罩间隙比的增加, 高半径处的强换热区域面积扩大, 然而换热效果逐渐减弱, 导致转盘迎风面的平均换热效果呈现先增强后减弱的变化趋势(见图 5(a))。平均努赛尔数 Nu_{ave} 的最大值出现在 $G = 0.110$ 附近, 比 $G = 0.025$ 时增大了 11%。

2.4 应力评价

图 6 给出了旋转圆盘等效应力在不同盘罩间隙比下的分布情况。转盘的等效应力由轮盘本身质量离心力引起的离心应力, 以及由于非均匀温度场引起的热应力所构成。盘罩间隙比的改变对离心应力没有影响, 仅引起热应力的变化, 从而影响转盘的等效应力分布。图 6 显示, 圆盘的最大等



(a) 阻力系数 ξ_1



(b) 阻力系数 ξ_2

图 4 旋转盘腔的阻力系数分布

($Re=1.7 \times 10^6, Re_w=2.04 \times 10^6, T_e=0.394, r_{in}/r_0=0.7, v_{\varphi 0}/v_0=0$)

Fig. 4 Frictional windage distributions of the rotating cavity ($Re=1.7 \times 10^6, Re_w=2.04 \times 10^6, T_e=0.394, r_{in}/r_0=0.7, v_{\varphi 0}/v_0=0$)

效应力值出现在中心区域,并且在靠近外缘处应力有急剧上升的趋势.随着盘罩间隙比的增加,转盘整体的应力水平上升以及最大等效应力值增大,而应力分布趋势的变化不大.当盘罩间隙比 $G=0.200$ 时,圆盘的整体应力水平和最大等效应力值比 $G=0.025$ 时分别增加了 4.5%和 7%.

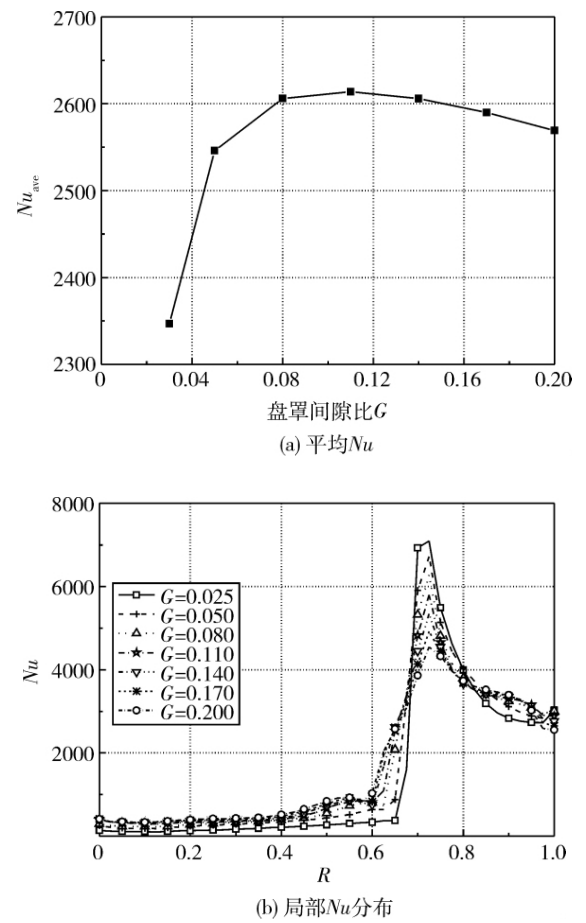


图 5 旋转圆盘迎风面的 Nu 分布
($Re=1.7\times10^6, Re_\omega=2.04\times10^6, T_e=0.394,$
 $r_{in}/r_0=0.7, v_{\varphi 0}/v_0=0$)

Fig. 5 Nusselt number distributions of the disk's windward ($Re=1.7\times10^6, Re_\omega=2.04\times10^6,$
 $T_e=0.394, r_{in}/r_0=0.7, v_{\varphi 0}/v_0=0$)

2.5 分析

从 $Re=1.7\times10^6, Re_\omega=2.04\times10^6, T_e=0.394, r_{in}/r_0=0.7, v_{\varphi 0}/v_0=0$ 时不同盘罩间隙比的旋转盘腔流线图(见图 7)中可以看出,由于高速冷气经进气口直接冲击到转盘的表面,流体以冲击点为界,分别向高、低径向方向流动,阻断冲击区下边因旋转造成径向外流的流体^[9]. 流动结构与文献[11]在转静系旋转盘腔中使用 PIV (particle imaging velocimetry) 粒子成像技术测

量得到的腔内流场分布结果相符.随着盘罩间隙比的增大,旋转盘腔内流动结构的变化不明显,然而所形成涡的强度逐渐减弱,从而影响旋转圆盘迎风面的换热强度.

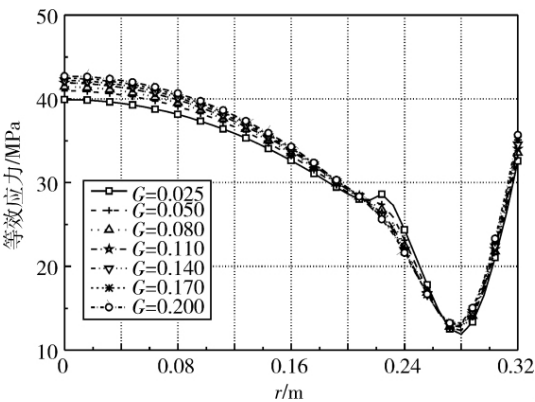


图 6 旋转圆盘的等效应力分布
($Re=1.7\times10^6, Re_\omega=2.04\times10^6, T_e=0.394,$
 $r_{in}/r_0=0.7, v_{\varphi 0}/v_0=0$)

Fig. 6 Von-mises stress distributions of rotating disk
($Re=1.7\times10^6, Re_\omega=2.04\times10^6, T_e=0.394,$
 $r_{in}/r_0=0.7, v_{\varphi 0}/v_0=0$)

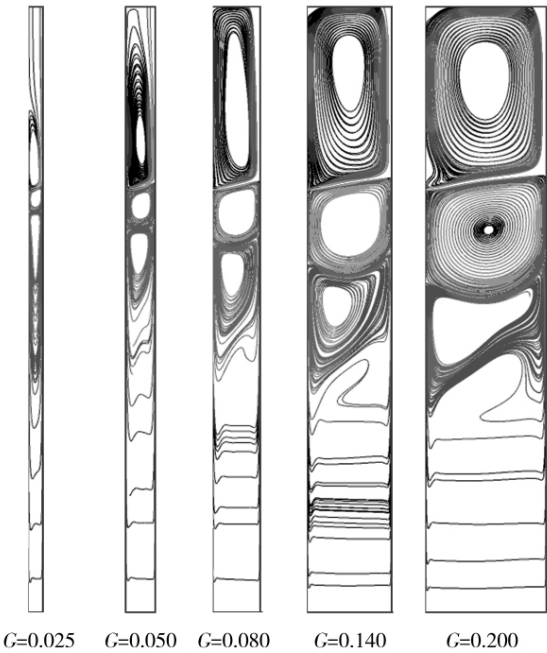
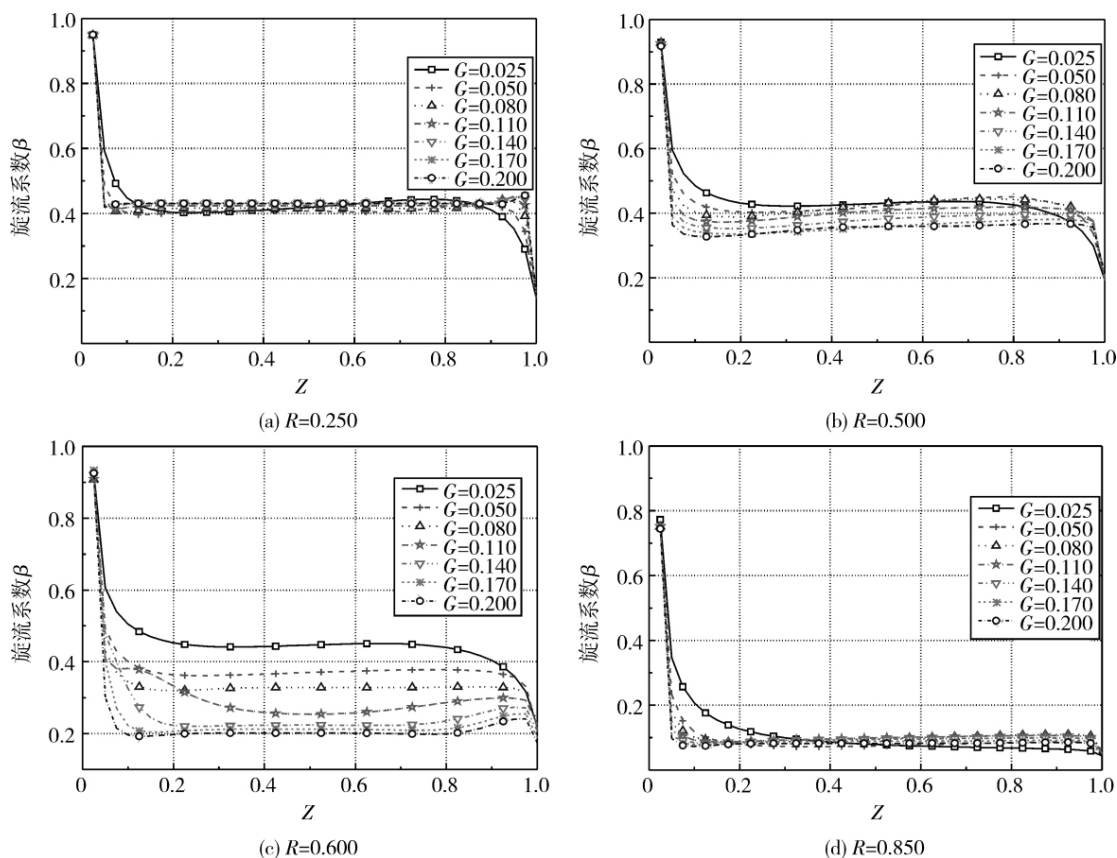


图 7 不同盘罩间隙比 G 时旋转盘腔的流线图
Fig. 7 Stream lines of the rotating cavities

旋转圆盘迎风面的换热效果受到对流换热和冲击冷却的综合作用.图 5(b)的局部 Nu 数分布图显示,转盘高半径区域的换热效果显著,是由于

图8 不同盘罩间隙比在相同径向位置下旋流系数 β 的比较

($Re=1.7 \times 10^6$, $Re_w=2.04 \times 10^6$, $T_e=0.394$, $r_{in}/r_0=0.7$, $v_{\varphi 0}/v_0=0$)

Fig. 8 Comparisons of the swirl ratio β in the same radial position with different gap ratios

($Re=1.7 \times 10^6$, $Re_w=2.04 \times 10^6$, $T_e=0.394$, $r_{in}/r_0=0.7$, $v_{\varphi 0}/v_0=0$)

转盘外缘的切线速度大,盘面的速度边界层和热边界层较薄;并且,由于采用的是高位进气,冷气对高半径区域进行强有力的冲击冷却。图8给出了不同盘罩间隙比在相同径向位置下旋流系数 β 的比较,可以看出,在转盘和静盘之间存在着核心流动,而且两盘之间(除两盘表面附近)在相同径向位置上的旋流系数 β 可以看作常数^[9]。随着盘罩间隙比的增加,相同径向位置处的旋流系数逐渐减小,尤其以冷却气入口的径向位置附近区域($R=0.5 \sim 0.8$)的 β 减小更为明显,导致流体与转盘的相对切向速度增大,对流换热效果增强;然而,冷却气对转盘表面冲击冷却的距离增加导致了冲击冷却的效果明显减弱^[9]。因此,两方面综合作用的效果是转盘高半径处的强换热区域面积扩大,而换热效果逐渐减弱,如图5所示。由此推断,盘罩间隙比 G 的改变能够影响腔内的流动结构,从而影响盘面换热效果的变化。

进一步,从转盘迎风面的平均努赛尔数 Nu_{ave} 随盘罩间隙比 G 变化的敏感性分析可以看出,盘

罩间隙比 G 较小($G < 0.050$)时, Nu_{ave} 对 G 的变化十分敏感($dNu_{ave}/dG|_{\max} = 12800$),是由于旋转盘腔内的流动结构发生较大改变。随着盘罩间隙比 G 的增加,流动结构变化不大,迎风面换热效果对 G 的敏感性逐步减弱。

转盘迎风面的换热效果强烈影响着转盘的溫度分布和变化趋势。由图9(a)和图9(c)可见,随着盘罩间隙比的增大, $G < 0.050$ 时,的增强趋势持续减弱,导致转盘平均溫度的下降趋势迅速减缓,并且圆盘低半径区域的溫度梯度逐渐增大(见图3)。而 $G > 0.050$ 时,由于平均换热效果 Nu_{ave} 基本不变,因而平均溫度对盘罩间隙比 G 变化的敏感性维持在接近于零的水平。

由文中第2.4节应力评价的分析可得,盘罩间隙比的改变仅引起热应力的变化,从而影响转盘的等效应力分布。最大等效应力值出现在转盘的低半径区域;在该区域中,离心应力处于主导地位,热应力的方向与离心应力的方向一致,起到增强等效应力的作用。随着盘罩间隙比的增加,该区

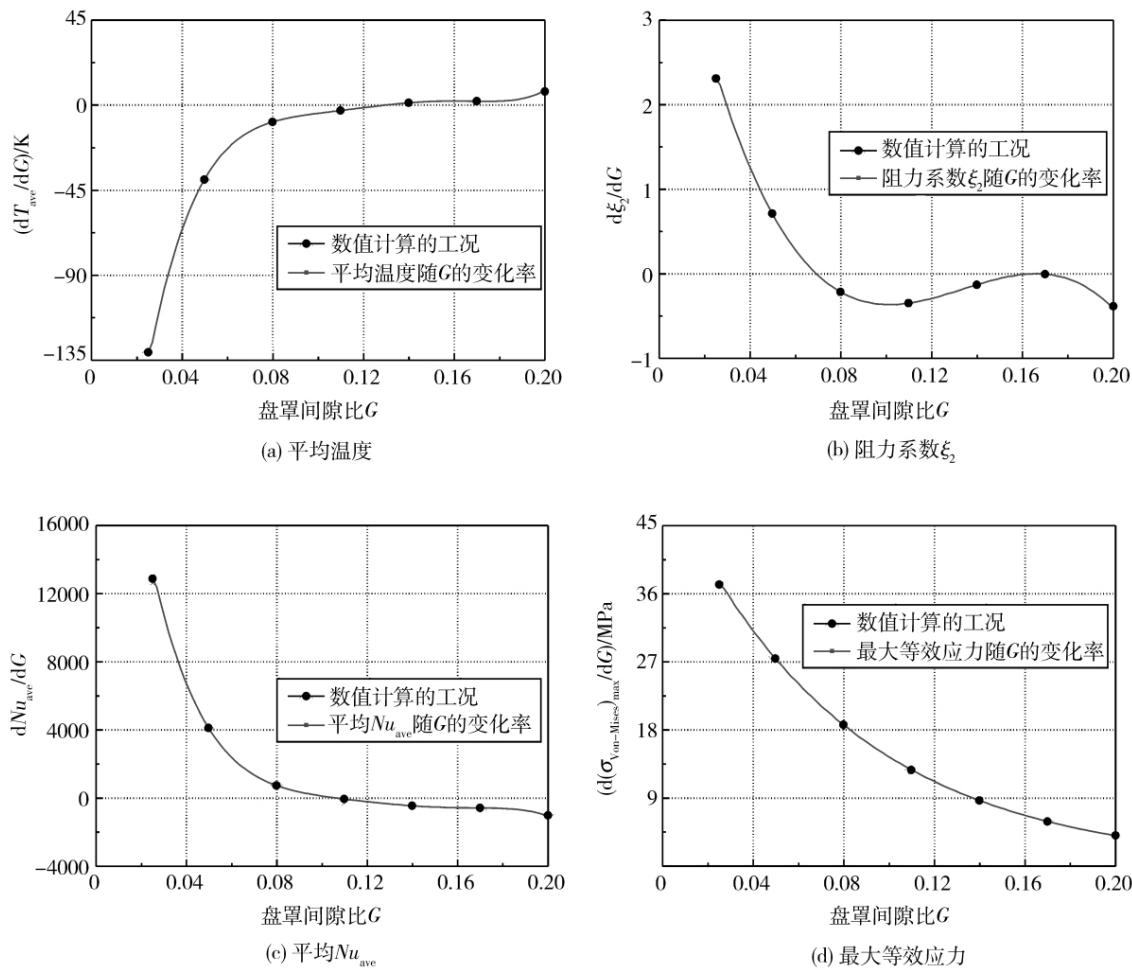


图 9 各指标随盘罩间隙变化的敏感性分析图

($Re=1.7\times10^6, Re_w=2.04\times10^6, T_c=0.394, r_{in}/r_0=0.7, v_{\varphi 0}/v_0=0$)

Fig. 9 Sensitivity analysis on the gap ratio

($Re=1.7\times10^6, Re_w=2.04\times10^6, T_c=0.394, r_{in}/r_0=0.7, v_{\varphi 0}/v_0=0$)

域的温度梯度逐渐增大,热应力水平上升,导致等效应力值逐步增大.图 9(d)反映出最大等效应力值对盘罩间隙比 G 的敏感度随着 G 的增大而减弱,在 $G=0.025$ 时,敏感度具有最大值, $d(\sigma_{\text{Von-Mises}})_{\text{max}}/dG=37\text{ MPa}$,表明在 $G=0.025$ 附近,盘罩间隙比 G 每增加 0.100 时,转盘的最大等效应力值升高 3.7 MPa.同时,在转盘的高半径区域,圆周方向上热应力分量的方向与离心应力分量的方向相反.并且由于热应力在高半径区域处于主导地位,其变化直接导致等效应力值的改变.随着盘罩间隙比的增加,温度梯度基本不变,热应力维持在稳定的水平,因此,高半径区域的等效应力值的变化不大(见图 6).

从涡轮盘安全性分析角度来看,涡轮盘的失效概率取决于材料许用应力和实际使用载荷^[15].因此,转静系旋转盘腔盘罩间隙比的变化通过改

变盘腔内的流动与换热特性以及转盘的应力分布,从而对涡轮盘的失效概率产生较大影响^[16].一方面,随着盘罩间隙比的减小,转盘整体温度上升,使得材料特性发生变化以及承受失效的能力下降,从而导致材料的局部许用应力发生较大的变化.另一方面,随着旋转盘腔盘罩间隙比 G 的变化,转盘的的实际使用载荷,即由热应力变化导致整体应力水平和最大等效应力值发生改变.因此,在涡轮盘腔的设计阶段,需要考虑盘罩间隙比对涡轮盘安全性的影响.

3 结 论

- 1) 依据旋转盘腔冷却问题的工程评价体系,从流阻、换热效果和应力水平三方面针对不同盘罩间隙比的冷却效果进行评价.
- 2) 盘罩间隙比的变化能够影响旋转盘腔内

流动结构的强度,从而改变盘面换热效果和转盘的温度分布,导致与温度梯度紧密相关的热应力水平也发生变化。

3) 随着盘罩间隙比的增加,旋转盘腔的流阻损失基本不变,转盘迎风面的平均换热效果呈现先增强后减弱的趋势,转盘整体应力水平上升,并且出现在圆盘中心处的最大等效应力值增加。

4) 转静系旋转盘腔盘罩间隙比的变化能够从材料许用应力和实际使用应力两方面影响涡轮盘的失效概率,因此,在涡轮盘腔的设计阶段,需要考虑盘罩间隙比对涡轮盘安全性的影响。

参考文献:

- [1] Sehra A K, Whitlow W Jr. Propulsion and power for 21st century aviation[J]. Progress in Aerospace Science, 2004, 40(4-5): 199-235.
- [2] International Air Transport Association. Safety report 2008[M]. Canada: International Air Transport Association, 9049-09, 2009.
- [3] U. S. Department of Transportation Federal Aviation Administration. Guidance material for 14 CFR 33. 75 safety analysis[R]. America: Federal Aviation Administration, Advisory Circular 33. 75-1A, 2009.
- [4] U. S. Department of Transportation Federal Aviation Administration. The United States code of federal regulations, title 14, aeronautics and space, Part 33, airworthiness standards: aircraft engines[M]. America: Federal Aviation Administration, 2009.
- [5] U. S. Department of Transportation Federal Aviation Administration. Guidance material for aircraft engine life-limited parts requirement[M]. America: Federal Aviation Administration, Advisory Circular 33. 70-1, 2009.
- [6] Daily J W, Nece R E. Chamber dimension effects on induced flow and frictional resistance of enclosed rotating disks[J]. Journal of Basic Engineering, 1960, 82(1): 217-232.
- [7] Bayley F J, Owen J M. The fluid dynamics of a shrouded disc system with a radial outflow of coolant[J]. Trans. ASME, Journal of Engineering for Power, 1970, 92(3): 335-341.
- [8] Howey D A, Holmes A S, Pllen K R. Radially resolved measurement of stator heat transfer in a rotor-stator disc system[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(1-3): 491-501.
- [9] 曹玉璋. 航空发动机传热学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [10] 徐国强. 转静系旋转盘腔内冷气的流动与换热特性研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1999.
XU Guoqiang. Flow and heat transfer characteristics of coolant through a shrouded rotating disk system[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999. (in Chinese)
- [11] 陶智, 高娟, 蔡毅, 等. 高位垂直进气转静系旋转盘腔流场的实验[J]. 航空动力学报, 2007, 22(3): 347-351.
TAO Zhi, GAO Juan, CAI Yi, et al. Experimental investigation of the flow field between a rotating and a stationary disk at high-positioned air inflow[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(3): 347-351. (in Chinese)
- [12] 丁水汀, 陶智, 徐国强, 等. 旋转盘腔冷却问题的工程评价[J]. 航空动力学报, 1999, 14(1): 83-86.
DING Shuiting, TAO Zhi, XU Guoqiang, et al. An engineering evaluation system of turbine disk cooling configuration[J]. Journal of Aerospace Power, 1999, 14(1): 83-86. (in Chinese)
- [13] FU Debin, TAO Zhi, ZHANG Gong, et al. Safety evaluation of cooling configuration in a rotor-stator cavity[R]. Beijing: Proceedings, 1st Int. Symposium on Aircraft Airworthiness, 2009.
- [14] 丁水汀, 张弓, 李焯, 等. 旋转盘腔进气位置的敏感性分析[J]. 航空动力学报, 2011, 26(8): 1681-1687.
DING Shuiting, ZHANG Gong, LI Ye, et al. Sensibility analysis of the air inlet position in the rotating cavity[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(8): 1681-1687. (in Chinese)
- [15] Enright M P, Chan K S, Moody J P, et al. Probabilistic fretting fatigue assessment of aircraft engine disks[J]. Journal Engineering of Gas Turbines and Power, 2010, 132(7): 072502-1(9 pages).
- [16] Melis M E, Zaretsky E V, August R. Probabilistic analysis of aircraft gas turbine disk life and reliability[J]. Journal Propul. Power, 1999, 15(5): 658-666.