

涡轮进口热斑迁移特性研究

An Investigation of Hot Streak Characteristic at Turbine Inlet

■ 马慧文 朱江楠 苗辉 / 中国航发研究院

航空发动机燃烧室的出口气流不均匀会造成涡轮入口处存在明显的局部高温现象。针对高温热斑开展精细化研究，明确其影响因素、迁移路径以及在后方各级叶栅中的具体作用，提出降低热斑消极影响的解决方案，可以从细节上进一步提升涡轮的总体效率。

在发动机中，因燃烧室自身结构、燃烧组织及冷却机制的综合作用，实际出口流场与温度场往往存在明显的周向和径向温度梯度，燃气核心区温度明显高于周围流体，局部的最高温度可以达到最低温度的两倍以上，接近甚至超过了金属材料的热屈服值，这种局部的高温气流被称为热斑，如图 1 所示。热斑在进入高压涡轮级后，冷热气流在流道中按不同的路径发生迁移。同时，动静叶排之间相对运动使高低温流在叶排间产生迁移，给涡轮叶片带来明显的热负荷分布不均匀现象。这种现象造成叶片表面局部过热甚至烧蚀失效，极大地影响了叶片的可靠性和寿命，在转子叶片压力面上尤为显著。

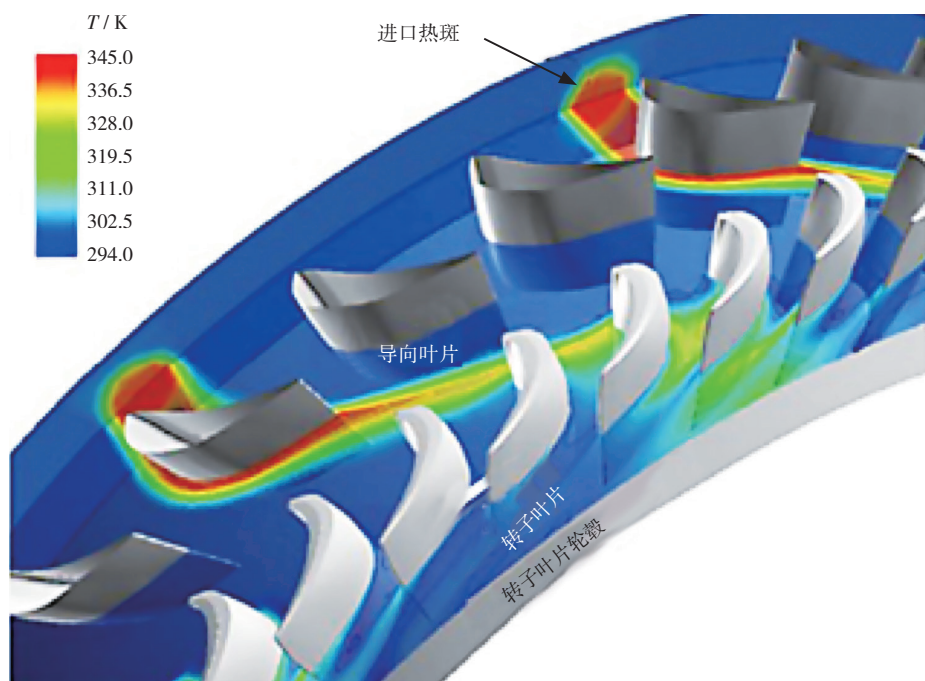


图 1 涡轮入口处温度场热斑

热斑的迁移特性

早在 20 世纪 40 年代，美国海军军械实验室 (US Navy Ordnance Laboratory) 的蒙克等人就注意到涡轮进口附近存在局部高温并进行了理论推导，认为由燃烧室出口温度不均匀现象产生的热斑不会对涡轮第一级静子叶片流场造成影响，但对转子叶片流场与温度场的改变较为明显。涡轮进口总压分布的不均匀性会使静子叶片栅流道中的流动形态发生一定的变化，并由压力梯度产生二次流。此后，美国国家

标准协会 (American National Standard Institution) 的蒂尔斯和国家航空航天局 (NASA) 的埃尔默等人分别通过对燃烧室内部温度场与第一级涡轮叶栅通道温度场进行测量，证实涡轮入口处温度存在不均匀现象。在转子叶片通道中，热斑的迁移特性有冷热气流分离、时序效应、浮力以及二次流等 4 个主要诱因。

冷热气流分离

热斑的存在以及涡轮级中冷却

气流混合作用在主流中 (在完全掺混前可视为独立流动的多股冷热气流) 有不同的迁移流动路径。因而温度相对较高的热斑流在旋转坐标系中的速度高于主流和其他低温流体，且在流动过程中向着压力面偏移，同时低温流体倾向于在转子叶片吸力面汇集，由此发生冷热气流分离。在冷热气流分离效应下，动力压力面的热负荷急剧增大，时均压力面最高温度可高于前缘最高温

度35%，冷热流分离在燃气轮机和火箭发动机涡轮泵转子叶片中会导致高达100~240K的温差。另一方面，在有导向叶片尾缝冷气和涡轮入口热斑同时作用的转子叶片表面，这两股气流会汇集在不同位置上，不能用来彼此中和。

时序效应

时序效应的影响是出自于涡轮级中动静交界面处，热斑的周向位置在动静叶排间的非定常干涉环境中会随着转子叶片旋转频率而呈现不断地摆动（见图2），在1个转动周期内的摆动幅度可以达到20%叶栅节距。在有热斑存在的情况下，即使很小的转静干涉也会造成很可观的温度变化，普惠公司的研究人员利用简单径向平衡方程数值模拟的方法对热斑在涡轮转子叶片上的热负荷进行了定性与定量研究，发现在导向叶片出流角 $\pm 3^\circ$ 内波动时，转子叶片排入口周向时均温度变化甚至会达到100K，可想而知，更大的转静干涉会引发更强烈的温度变化。

一方面，从涡轮叶片几何布置来看，转子叶片温度场会随转子叶片和静子叶片数量比变化，为了降低热斑时序效应的影响，选取最优转子叶片和静子叶片数量比十分必要，可以最大程度地降低热斑对涡轮转子叶片造成的热负荷。如图3所示，导向叶片与转子叶片数量之比为3:5时转子叶片表面有最低程度的温度不均匀性，是最优的转子叶片和静子叶片数量比。在多个热斑作用的情况下，英国杜伦大学的研究人员用多叶片排三维黏性非定常数值计算程序研究了一个跨声速涡轮中的热斑通道数比（进口热斑数

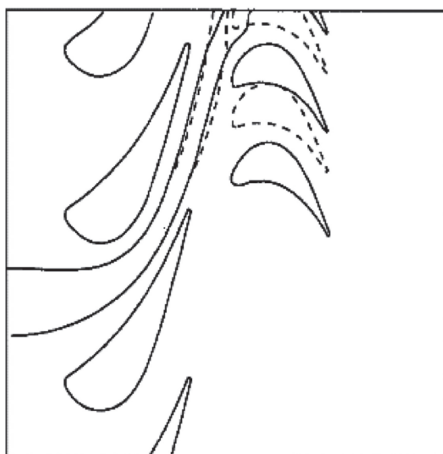


图2 转静干扰导致静子叶片出流角波动与转子叶片通道流场变化

目与涡轮导向叶片数目之比)效应，并发现不同通道数比下，转子叶片热负荷对热斑时序位置变化的敏感程度不同，其中当通道数比为1:1时，转子叶片热负荷对热斑时序位置的变化较敏感，但当通道数比为1:4时，转子叶片热负荷几乎不因热斑时序位置的变化而变化。

另一方面，热斑引入的周向径向位置差异也会造成时序效应的不同表现。从周向位置看，热斑对静子叶片完全无冲击时，转子叶片压力面上有明显的热流聚集，热流的径向迁移也十分明显；而热斑对静子叶片完全直接冲击时，在大部分叶高上的转子叶片压力面与吸力面的温度分布高度一致且较为均匀。更为重要的是，热流很少由压力面叶尖泄漏到吸力面区域，有效降低了局部高温烧蚀的风险。总之，进口热斑在正对第一级导向叶片前缘时可以有效地降低转子叶片和第二级导向叶片的热负荷，但也付出了第一级导向叶片热负荷增加的代价，在热斑完全冲击第一级静子叶片时，热斑热流与静子叶片尾迹混合后作用在转子叶片上的热负荷明显更小。第二级导向叶片上温度场与第一级转子叶片表现基本有相同趋势，但由于热流已与主流对流掺混，温度

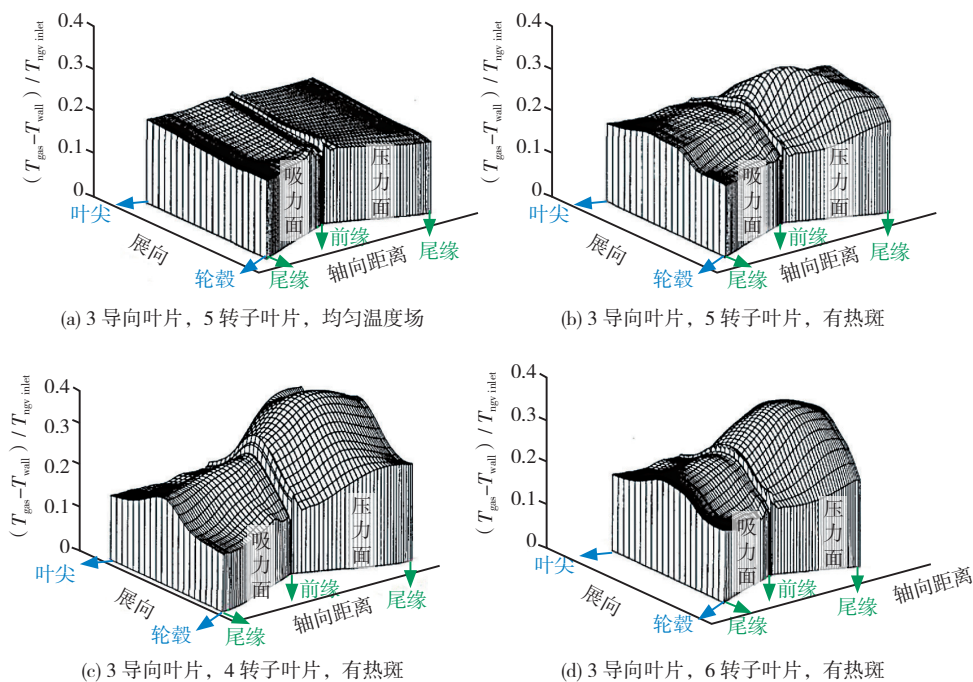
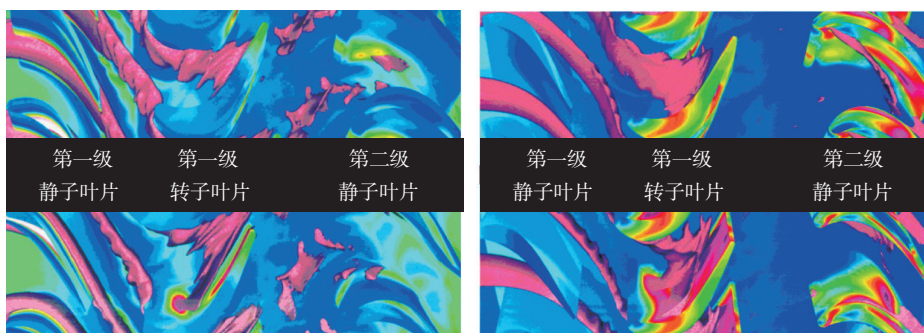


图3 转子叶片温度场随转子叶片和静子叶片数量比变化^[1]



(a) 最优情况：热斑在 40% 叶高正对冲击第一级静子叶片前缘
(b) 最差情况：热斑在 60% 叶高从第一级静子叶片通道中间通过

图 4 最优和最差热斑位置方案下的瞬时温度场对比^[2]

变化更小。从径向位置看，随着热斑径向位置的升高，转子叶片区域里轮毂的热负荷逐渐降低，机匣的热负荷逐渐升高。热斑在完全正对冲击第一级静子叶片下半部分（偏叶根方向）区域时有相对较轻的负面影响，如图 4 可见最优和最差热斑冲击方案下的瞬时温度场对比。

浮力影响

热斑在转子叶片流道中受到浮力影响会产生向轮毂方向的迁移。从局部来看，热斑的迁移特性受浮力影响很明显，浮力推动高温流体向轮毂位置偏移，使温度局部不均匀地升高，这种偏移的程度与热斑温度线性正相关，与流动系数的平方负相关。

二次流影响

热斑会改变转子叶片进口处温度压力以及速度场的分布，并由此产生相应的附加二次流，如图 5 所示。附加二次流会增强转子叶片压力面侧高温流体的径向迁移，使得迁移至转子叶片压力面附近的高温流体逐渐向上下端壁扩散，而在吸力面上附加二次流对高温流体径向迁移的影响相对较小。

热斑流动参数的影响

由于热斑源于燃烧室运行工况以及变化，所引起的热斑形状、旋流、温比、个数等特性参数的变化对热斑非定常迁移以及涡轮热负荷分布有一定影响。目前，大多数的热斑研究都以单个圆形热斑为对象，而实际燃烧室出口的热斑形态、大小、个数等特性往往是不尽相同的。

椭圆形的热斑由于与周围气流接触面积更大，导致其热斑径向掺混比周向掺混强烈。另外，热斑截面积较小时，转子叶片平均温度受热斑温比和形状的影响较小。热斑截面积较大时，因转子叶片轮毂二次流的影响，会产生额外的高温区。

热斑的温比在不同工况下差异很大，对下游涡轮部件的温度载荷分布造成直接影响，转子叶片压力面附近会产生间歇性的流动分离，致使热斑与转子叶片壁面之间出现一薄层低温流体，温比增加，则流动分离的产生频率增加。在采用强旋流燃烧器时，带热斑的旋流会引起叶片表面热负荷的显著增加，高压静子叶片局部甚至会增达 200% 之高。

叶栅结构对热斑迁移的影响

叶栅弯扭、非轴对称端壁和叶顶间隙等叶栅结构对热斑迁移的影响已经成为关注重点。通过控制静子叶片出口流场来调整热斑在转子叶片中的迁移是削弱热斑产生高热负荷区域的有效方法，叶栅弯扭等结构能够显著改变静子叶片出口流场分布，降低叶栅气动损失。图 6 所示的正弯叶型可以显著削弱热斑向转子叶片压力面的径向迁移，使转子叶片压力面和叶顶热负荷显著降低。叶顶间隙泄漏流动也对热斑的径向迁移有很大影响，叶顶间隙会增强热斑向转子叶片壁面的迁移，使转子叶片壁面时均温度增加。使用非轴对称端壁产生的附加二次流可以

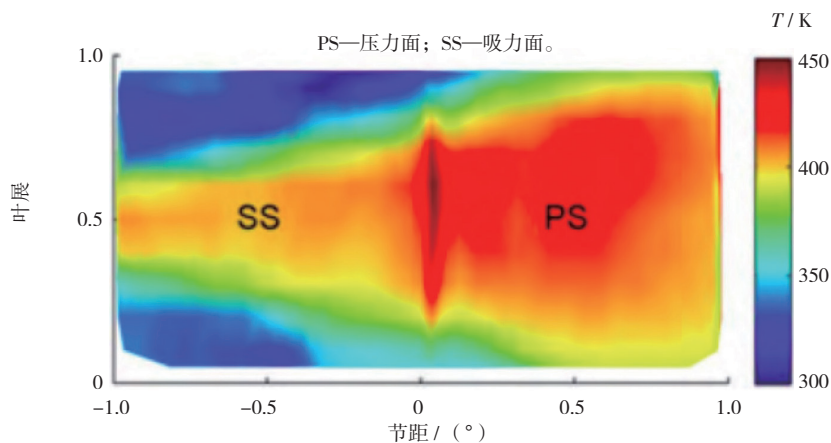


图 5 转子叶片壁面绝热温度分布^[3]

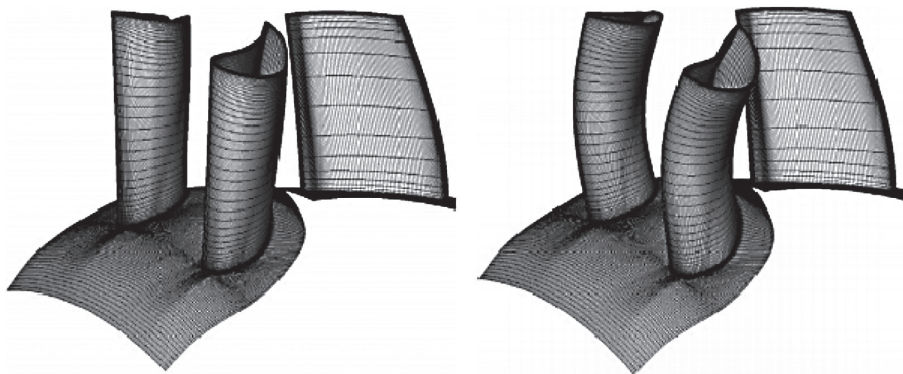


图6 涡轮静子叶片原始叶型与正弯叶型

有效削弱二次流损失，但对转子叶片壁面静温的影响很小，最大变化约为1%。另外，由时序效应影响可知，改变叶片数(或节距)对热斑迁移规律和转子叶片壁面热负荷影响很显著。导向叶片数较多时，转子叶片表面温度越低，原因是导向叶片数较多时，热斑流会被分配至各导向叶片通道，转子叶片表面温度因而降低，而转子叶片则存在能使转子叶片壁面时均热负荷最低的最优数量。

冷却气流对热斑迁移的影响

对于涡轮入口处温度场畸变的影响，热斑特性参数和叶型结构的合理选择可在一定程度上削弱热斑产生的高热负荷区域，目前可行性最高且应用较多的方法是采用先进的气膜冷却技术。对比其他冷却方法来说，气膜冷却结构效率更高，对冷却气流速度的限制更少，便于有针对性地减小热斑负面影响。

气膜冷却对热斑的削弱作用在不同位置差异很大，前缘冷却气流主要削弱了轮毂区域高温区，压力面冷却气流对热斑的影响甚微，在吸力面上的气膜几乎可以完全消除热斑影响。

热斑迁移效应影响因素及控制方法

深入研究涡轮叶栅进口热斑迁移特性及其主要影响因素，有助于制定更为合理的涡轮叶片冷却方案，从而提高涡轮的效率、可靠性及寿命，其意义对于航空发动机性能的优化不言而喻。目前针对热斑迁移效应已进行了一定的研究，主要有以下几个方面。

首先，在第一、二级涡轮中，热斑的迁移特性主要由冷热气流分离、时序效应、二次流和浮力4个现象控制，主要在导向叶片前缘和第一级转子叶片的压力面以及叶顶、轮毂附近产生较高的热负荷，热斑高温流体主要向转子叶片压力面迁移，而低温流体向转子叶片吸力面侧汇集。

其次，在燃烧室中，可对热斑特性参数(合理布置燃烧室冷气掺混)和燃烧室旋流方向(增大负攻角)进行控制。在涡轮中，调节叶型结构(正弯叶型)和气膜孔位置(动叶吸力面)能够在一定程度上削弱热斑产生的高热负荷区域。

第三，对于热斑迁移对涡轮的影响可从3个角度进行优化：一是从前侧部件，即燃烧室进行控制，减小热斑温比、数量、形状大小，减少旋流，控制其周向、径向位置；二是在

保障叶片性能的前提下对叶片结构进行调整，综合考虑转子叶片和静子叶片数量比、叶栅弯扭、非轴对称端壁和叶顶间隙；三是充分利用现有较成熟的冷却手段，直接有效地针对热斑作用显著区域增加气膜等结构，实现从前端到终端再到附加结构三位一体的考量，统一协作调整，以降低热斑对涡轮性能的影响。

结束语

目前关于热斑的研究大多还比较简单，主要通过数值模拟对少量影响因素进行定常分析，较难在真实工况中系统应用其结果。因此，关于热斑的研究还有许多值得深入探讨和挖掘的内容，在未来叶栅优化设计过程中，应该将叶栅气热性能的综合提升作为设计目标，在非定常的研究中尤其应该加大力度，研究热斑和冷却气流对于涡轮性能的综合影响。

航空动力

(马蕊文，中国航发研究院，助理工程师，主要从事先进内冷涡轮叶片流热耦合数值仿真及设计技术研究)

参考文献

- [1] Shang T H, Epstein A H. Analysis of hot streak effects on turbine rotor heat load[J]. Journal of turbomachinery—transaction of ASME, 1997, 119(3): 544–553.
- [2] Gundy-Burlet K L, Dorney D J. Effects of radial location on the migration of hot streaks in a turbine[J]. Journal of propulsion and power, 2000, 16(3): 377–387.
- [3] Qureshi I, Smith A D, Chana K S, et al. Effect of temperature nonuniformity on heat transfer in an unshrouded transonic HP turbine: an experimental and computational investigation[J]. ASME journal of turbomachinery, 2011, 134(1): 011105/1–12.