

# 类蜂巢结构在航空发动机中的应用

## Application of Honeycomb-Like Structure in Aero Engine

吕东 徐宁宁 刘会平 / 大连理工大学 王奉明 / 中国航空发动机研究院

人类不断从大自然中汲取灵感来推动科技的进步，并由此衍生出了一个庞杂的学科门类——仿生学。其中的经典案例之一是对蜂巢结构的研究和利用，它在流动、传热、力学和材料等方面的诸多优势，使其成为了航空发动机中一众难题的解决方案。

航空发动机是复杂而又精密的动力机械，其性能的优劣在一定程度上体现了一个国家综合国力的强弱。而在航空发动机的设计与制造过程中又充满了各种挑战，集流动、传热、燃烧、强度、振动、控制、材料和制造工艺等多个学科于一体，是一项同时追求高性能、高可靠性和低成本的极其复杂系统工程。在其技术推陈出新的过程中，研究人员不断从自然界中寻找灵感，发现新的原理并加以研究，从而得到更优的解决方案，对于蜂巢结构的发展演变和应用就是其中的典型代表之一。

### 精妙的蜂巢结构

人类对于蜂巢结构的关注要追溯到公元320年左右，古希腊数学家帕普斯（Pappus of Alexandria）曾在其论著《数学集》中记载了他对于蜂巢的观察和研究，并发现蜜蜂所用的正六边形结构，比同样可以实现密铺的正三角形和正方形更利于储存蜂蜜。到了18世纪，研究发现，蜂巢结构的精妙之处不仅在于为六棱柱形，其底部的3个菱形在大量样本范围内也呈现了一致的形状。法国数学家贾科莫·菲利波·马拉尔

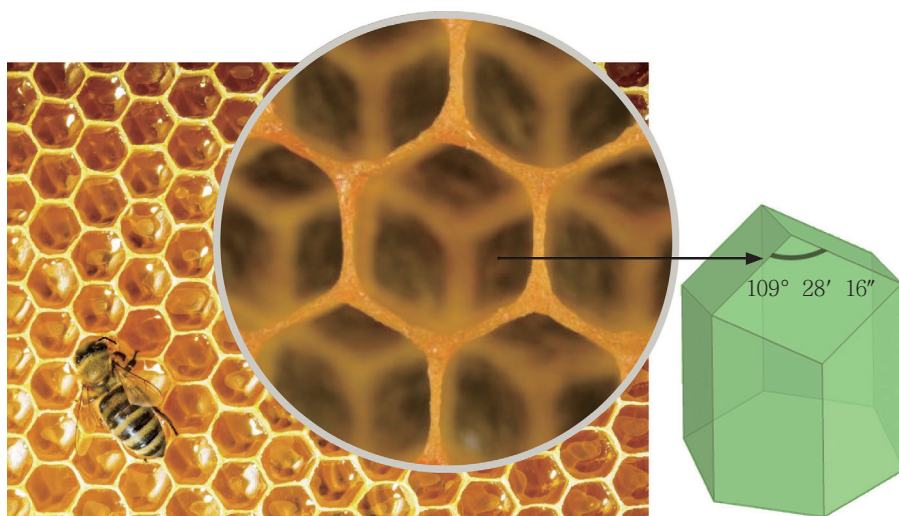


图1 自然界中的蜂巢结构

迪（Giacomo Filippo Maraldi）针对这一现象，从实证和理论两方面入手，揭示了其中的原理，证明其 $109^{\circ}28'16''$ 的顶角可以在利用最少表面积的情况下使体积最大，探明了这种结构设计上的最优解。因此该角度也被其命名为“马拉尔迪角”（见图1），并为后来的工程实用提供了理论参考。

随着现代工业技术的进步，研究发现，蜂巢结构所揭示的原理不仅局限于几何学，而在固体力学、流体力学、传热气学，甚至是声学学和电磁学等多个方面都有涉及，成为了航空发动机减重、强化、防喘、

抗振、隔声、密封、冷却和隐身等多种需求的有效解决方案。本文以此为切入点，从增韧减重、防喘提效、隔声降噪、封严抗振和阻热冷却等多个方面，阐述类蜂巢结构在航空发动机中的研究和应用历史，以及未来发展方向。

### 在增韧和减重中的应用

在20世纪80年代，民用航空的蓬勃发展加快了大涵道比涡扇发动机的研发进度，更高效的推进需求迫使风扇叶片不断向更长、更宽和取消凸肩等的方向发展，而由此引发的质量增加、轮盘载荷过大，及抗振

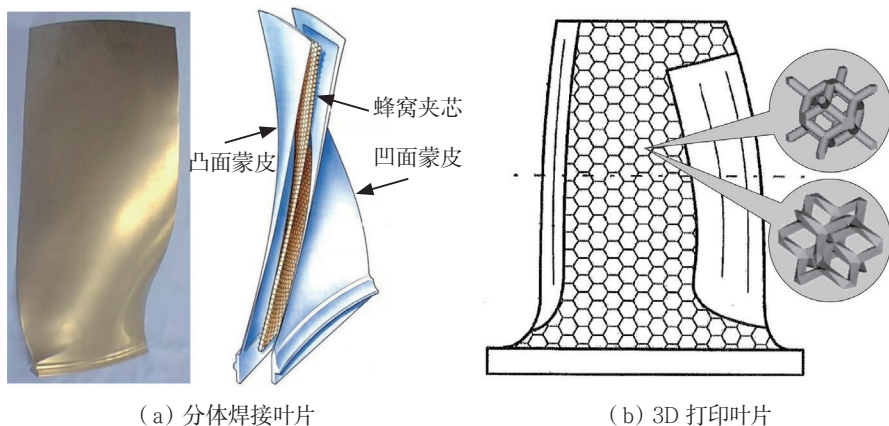
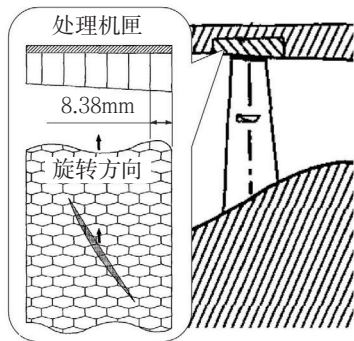


图2 基于蜂巢结构的空心风扇叶片

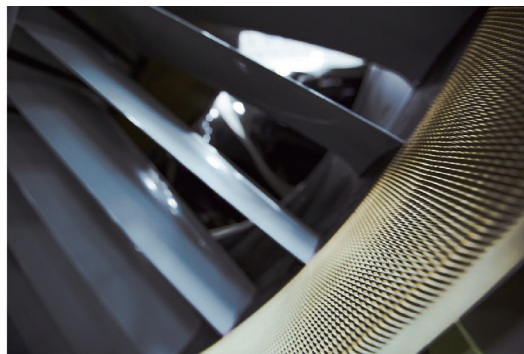
动和外物撞击能力不足等问题，仅依靠当时最好的钛合金材料仍无法有效应对。英国罗罗公司对此的解决方案是世界首创的钛合金宽弦空心风扇叶片，其典型结构如图2(a)所示。这项历时12年研发并成为了英国女王科技成就奖的开创性产品，将原本实心的风扇叶片分解为盆侧、背侧和其中的蜂巢状夹芯共3部分，并通过扩散焊工艺连接为整体。该叶片成功地应用在了RB211-535E4发动机中，这不仅使整级风扇叶片数量由33片大幅减少为22片，更提高了风扇效率，并使发动机耗油率减少了4%以上。该型叶片随后在V2500发动机中取得了更大范围的工程实用。这项载入航空史册的创新，不单得益于英国当时在制造技术上的领先，更源于其成功地采用蜂巢结构填充了叶片中的空心部分，这样既能够将盆背两侧的薄壁紧密地连接在一起，提高整体强度和刚性，又能使用较少的材料，避免质量和离心负荷的增加，是这种高比强结构在航空发动机中的最典型应用之一。

罗罗公司这种蜂巢式空心风扇

叶片的设计思想和制造工艺，引领了当时的产业潮流，而下一代基于三角桁架夹芯或无芯对开结构的设计方案，更使得该领域呈现出了百花齐放的局面。进入21世纪后，虽然复合材料正在逐步取代以往的钛合金，成为了大涵道比发动机风扇叶片的首选，但是如增材制造和拓扑优化等技术又赋予了此类方案以新的生机——利用形状充分优化的多维度细小桁架构成的细胞式单元填充进叶片内部，典型结构如图2(b)所示，并利用3D打印技术完成制造，是对传统蜂巢结构强化和减重技术的发展创新。



(a) NASA 压气机试验



(b) GE9X 发动机

图3 采用蜂巢结构的压气机处理机匣

## 在防喘和提效中的应用

压气机和风扇是航空发动机中的重要部件，它们消耗涡轮功，并通过高速旋转的叶片对来流空气进行压缩，其效率直接决定了发动机循环状态，以及推力和耗油率等重要指标。与此同时，由于空气在这些部件中沿逆压力梯度方向流动，故极易发生气流的分离或逆流，从而引发喘振等问题，甚至会造成发动机的熄火停车，更严重者会诱发叶片折断飞出等严重安全事故。而为了解决这些问题，看似与其无关的蜂巢结构也做出过突出的贡献。

美国国家航空航天局(NASA)于20世纪70、80年代针对压气机抗喘振技术开展了大量的研究，并侧重于对机匣结构的改进，结果显示若使用多孔的蜂巢结构替代原有的实心式外环，典型结构如图3(a)所示，可以大幅度地将喘振裕度提高12%左右，并且在喘振边界附近，压气机仍有不低的效率。结果公布之后，大量学者又进一步探索了其中的机理，发现此类处理机匣能够利用蜂巢状的空腔，抑制边界层的增厚，打散叶尖附近低能流体的聚集，并且还降低叶尖间隙对性

能影响的敏感性，从而实现压气机的扩稳。随后NASA又对此进一步发展，打开了蜂巢的封闭盲端，借助机匣外部的空腔连通叶栅的上下游，通过对气流的抽吸和再注入循环，加强对叶尖流场的控制，使压气机设计和制造技术又一次得到跨越提升。

在现代，使用处理机匣技术提高风扇和压气机部件性能的做法早已普及，在如EJ200等军用和GENx等民用航空发动机中都有了典型应用，如图3(b)所示。而无论是早期的蜂巢式，还是现在更为广泛使用的槽缝式，都在为航空发动机更加安全和环保做着贡献。

### 在隔声和降噪中的应用

航空发动机中有一个难以回避的问题——随着推力水平的增大，更高速流动的空气以及更高转速的机械都制造了强度呈几何级数增长的噪声，成为了行业发展的瓶颈之一。对于军用机型，轰鸣的噪声增加了被定位的风险；而对于更为敏感的民航来说，噪声引起的环保和乘客体验问题，都直接影响了航空公司的盈利能力。为此，《国际民用航空公约》正在不断加严规定，如“当飞机起飞质量在35~280t之间时，进近点处噪声值应在98~105有效感觉噪声分贝（EPNdB）之间。”我国在《航空器型号和适航合格审定噪声规定》等一系列法规标准中也沿用了相同指标。而为了应对这一不断苛刻的要求，研究人员在发动机的隔声降噪领域开展了大量工作，其中就包括在短舱和内涵道外壳中填充进蜂巢结构，形成声衬（见图4），这样既不会引起质量的大幅增加，还能够起到包裹住噪声的作用，

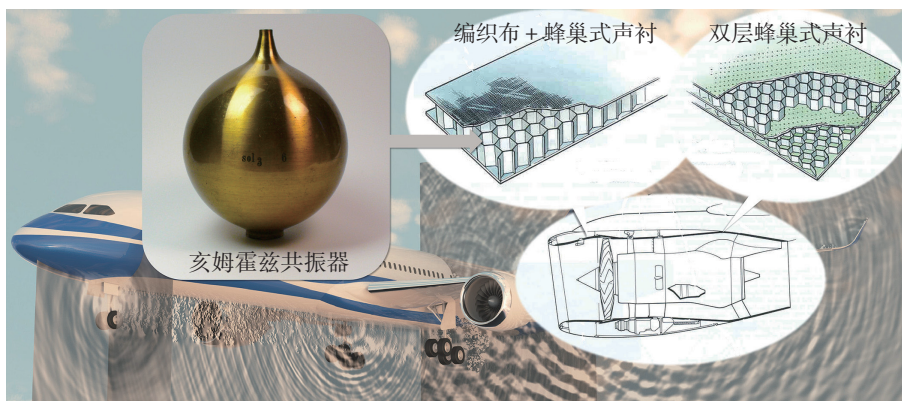


图4 基于亥姆霍兹共振器原理的蜂巢式声衬

以使发动机达到适航要求。

采用蜂巢结构进行消声的原理可以追溯到1862年，德国物理学家亥姆霍兹发明了以其名字命名的共振器，其外观如图4所示，可以通过带有尖嘴的球形空腔从环境中捕获特定波长的振动，通过共振吸收其能量并转化为热。现代的发动机中正是利用了这一原理，将表面开有小孔的蒙皮与蜂巢腔室组合构成了阵列式的亥姆霍兹共振器，制成连续的声衬，以此把气流和机械产生的振动噪声部分封闭在了发动机内部。而为了匹配现代发动机的噪声强度和频率，更复杂的多层编织布或双层蜂巢结构也被应用进来，进一步提升了隔声降噪效果。

### 在封严和抗振中的应用

航空发动机是一种典型的旋转机械，如压气机对空气的压缩，涡轮对燃气能量的转化，还有轴功的传递等，都源自于最基本的运动方式——旋转。而对于旋转机械来说，除轴承以外所有转子与静子的结合之处，都是结构设计和制造的重点。这里既不能完全贴合，因为二者一旦触碰，意味着将产生严重的振动、磨

损甚至是卡滞；又不能间隙过大，否则高温高压的气体会在其中串流，使机械失去对工质的组织和控制。而发动机在气动和热载荷下的各种变形又使得这些间隙难以确定。因此，转子与静子之间能否在整个飞行包线内都恰好保持在“最佳间隙”状态，是衡量一型发动机是否优秀的重要因素，而蜂巢结构则在这种需求中又一次成为了解决方案。

以涡轮为例，转子叶片的叶尖与机匣之间的缝隙是燃气的主要泄漏之处，而泄漏的燃气无法对叶片做功，是影响涡轮效率的首要因素，故需要采取措施加以限制。于是一类经典的封严方案被发动机广泛采用——静止的蜂巢+旋转的篦齿。其典型布局如图5所示，在叶冠顶部设有截面形如指尖的篦齿，与其相对的机匣外环上则布满了蜂巢结构，二者之间的距离通常在1mm以内。这样的结构同时具有两方面的优点：在气动上，篦齿和蜂巢腔共同激起了大量的旋涡，阻碍了燃气的流进而形成了密封；在结构上，蜂巢结构在更为坚实的篦齿的碰磨下，会牺牲自身而避免转子振动或卡滞，而随之被篦齿磨出的沟槽仍然能够

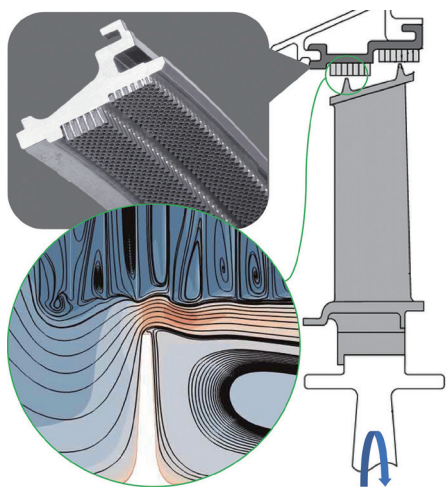


图5 蜂巢式机匣外环与篦齿式叶尖的组合封严结构

起到产生旋涡和封气的作用。这种可以同时兼顾多种需求的优势，使该类结构被更广泛地应用在了盘腔、轴承腔等需要密封的场景中，是控制发动机内部轴向力和维持主流及空气系统有效运行的重要手段。

## 在阻热和冷却中的应用

航空发动机为追求更大推力，主要技术措施是提高涡轮前燃气温度。在先进航空发动机的研发过程中，2000K以上的燃气温度与不足1400K

的高温合金许用温度之间的矛盾，成为了制约其性能提升的主要瓶颈。在更高耐温能力的非金属材料暂时无法广泛工程实用的前提下，对涡轮叶片采用高效的冷却结构，来满足超高的降温需求，仍是当前发动机研制领域的尖端课题。但是随着涡轮叶片冷却技术的更新换代，理论和实践均发现，结构的精细化不仅推高了制造成本，同时还严重透支了叶片强度，从而使其工程实用性与先进航空发动机的客观需求大相径庭。为了探索这一问题的解决方案，笔者团队基于仿生学原理，从自然界的蜂巢结构中获取了灵感，创新性地提出了可进一步强化涡轮叶片多学科综合性能的一类蜂巢式高效冷却结构，并开展了仿真和实验研究，如图6所示。

此类结构继承了双层壁冷却设计理念，采用六边形网状隔肋及中心扰流柱作为叶片内外壁之间的支撑，并通过进气孔和气膜孔将壁间蜂巢状腔体单元与涡轮叶片内外部相连，使冷却气在其中呈螺旋形流动。这一设计不仅增强了将燃气热

源的热量导入到叶片内部冷源的能力，减小了冷、热源之间的热阻；同时也提供了大量的内腔换热面积，以保证与冷却气的对流换热充分；而且其气膜出流具有高度贴壁性，覆盖范围也更广，强化了气膜冷却所带来的收益；更重要的是，该方案继承了蜂巢结构的高强度特性，能够显著提升叶片抗拉伸和弯曲载荷的能力，同时还不会引起质量的增加，是相对于其他双层壁结构的显著技术优势。不仅在涡轮叶片上，此类蜂巢状结构在涡轮外环或主燃烧室火焰筒等领域也可以起到同样作用。综合来看，仿生蜂巢结构在对热端部件冷却和结构强化方面的综合优势，使其与先进航空发动机的需求相匹配，有望通过进一步加大研制力度和推进应用，来实现发动机性能的进一步提升。

## 结束语

蜜蜂不仅给人类提供了蜂蜜，还用蜂巢结构充分展示出了大自然的精妙。而工程师们则将其发扬光大，从结构、强度、流动、传热、振动、电磁和声学等多个领域，把蜂巢结构全面的应用在了航空发动机之中，解决了风扇、压气机、涡轮、短舱、空气系统等诸多零部件的设计和制造问题，再一次佐证了仿生学的强大。但同时也可以预见到这仍不是极限，如采用蜂巢结构制造的高耐温能力涡轮叶片尚未被研究透彻，未来仍需进一步加快关键技术的突破，更加全面地将仿生学贯彻至工程实用，不断推进我国航空发动机技术实力和产业水平的提高。 **航空动力**

（吕东，大连理工大学，教授，主要从事涡轮叶片冷却技术研究）

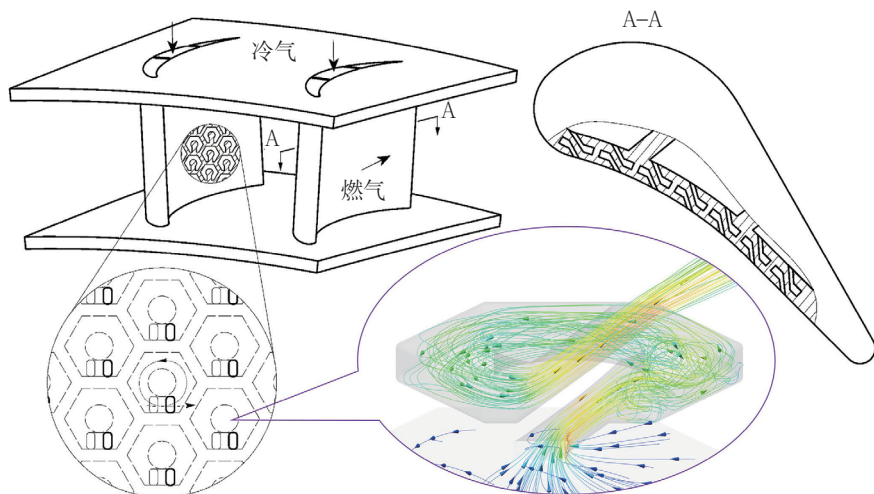


图6 基于类蜂巢结构的涡轮叶片冷却方案