



先进重型燃气轮机冷却技术 现状及发展

文 / 蒋佳华

大型燃气轮机是目前世界上最高效的热能转化装置，是国防和能源领域的重要能源装置。简要介绍通用电气、西门子、美海等大型大型燃气轮机的最成果，并对大型燃气轮机的燃烧与涡轮的散热技术做了详细的描述，将有利于新技术推广。

大型燃气涡轮在发电、舰船等能源及防务等方面有着广阔的应用前景，体现了多个学科交叉的交叉融合，是关系到我国未来能源发展与国家安全与经济发展的关键高科技动力设备。由于燃气涡轮在国防、能源安全以及维持行业竞争力等方面具有举足轻重的作用，所以西方国家对燃气涡轮的开发给予了极大的关注，使全球燃气涡轮技术和行业得到了快速发展。《中国制造 2025》还指出，国家将继续推动先进设备的发展，通过重大科学研究计划的制定，推动大型商用飞机、电力设备、船舶等产品在世界范围内的应用。

当前，以燃气透平和混合动力为基础的电厂在全世界的电力供应中，大约有 22% 是以燃气透平和混合动力为基础不断增长的。1939 年，第一座大型火力发电机组问世以来，我国大型火力机机组技术发展迅速，目前在 120 MW 级及更高等级的大型火电机机组中占有较大比例的比例。截至 2020 年，我国在 120MW 及更高级别火电机机组的市场占有率仍处于 40% 左右。在 F 类大型透平机上，气体初始温度可达 1400℃，单次循环量可达 38%，组合循环量可达 57%，目前世界上最先进的 G/H/J 级透平，其气体初始温度可达 1500-1600 摄氏度，单循环可达 40%-41%，组合可达 60%-61%。

1H/J 级燃气轮机冷却技术

目前，世界上大型燃气透平的主要产品是美国通用电气，德国西门子，日本 MHI 等，而 H/J 级燃气透平是这些公司大

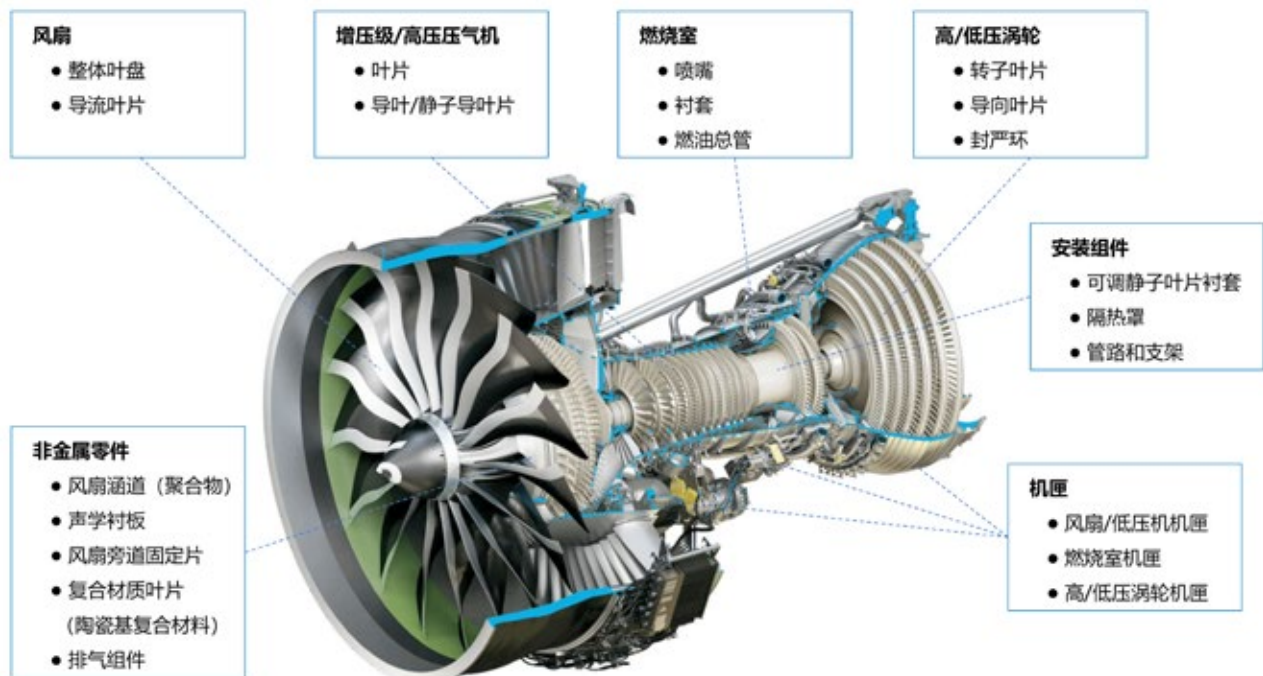
型燃气透平中最具代表性的产品，它们都是对原来的技术进行了开发与革新。一些最近研制的新型燃气透平的技术指标见下表，这些指标反映了当前国际上大型燃气透平技术的发展状况。

热端部件材料以及涂层技术

燃气涡轮中的热构件，包括涡轮动叶片、静叶片、燃烧管等。当前，以 Ni、Co 等为代表的超高温热合金具有比较完善的技术。除通过在热端件上加入微量成分以提高其使用性能外，还广泛应用于热端件上的热障涂料（TBC），通过在其上沉积一层具有较高热导的陶瓷薄膜，以达到对其进行高温防护的目的。在目前的制冷工艺下，250 微米的热障涂层能使热端区的表面降温 110-170℃。MHI 公司研发出了一种具有较高的绝缘温度的烧绿石质 TBC，这种新型的陶瓷涂料的工作温度高于 YSZ，能够适应 1600℃级燃气轮机的发展需要。

2GE 公司 H 级燃气轮机的冷却技术

通用电气公司生产的 H 系列燃气透平主要有 7/9H 系列和 7/9HA 系列。7 H 和 7 HA 分别表示 60 赫兹和 50 赫兹，与 GE-9FA 型相比，7/9 H 型采用对流冷却，冲击冷却，气膜冷却相结合的冷却模式 7/9H 型采用燃气透平水轮机、第三级废热水轮机和再热水轮机构成的复合循环来进行闭环水轮机冷却，其中第一级和第二级为闭环水轮机，第三级为风轮机，



第四级为无水轮机。7/9HA 涡轮为四个层次，第三层次为基于 GE 最新研发的热障涂层 (TBC) 技术，剩余三个层次则为其已经得到证实的金属材料。7/9HA 系汽轮机的制冷模式是在第一个三个阶段中使用强迫对流的气体进行制冷，第四阶段则不进行制冷。

通用电气公司的 H 级燃气透平的燃烧系统在很大程度上是从它的 F 级 DLN 燃烧系统中传承下来的。7/9 H 的发动机使用的是尼莫尼克的燃烧管，燃烧管是由 DLN2.5 H 制成，在接近于火焰的内部一层，使用了两种不同的形式来进行扩散式的散热，并将其与转换器的接头通过“2-Cool”型的结构进行封闭；在火焰筒的外围的外围的上游，引入了扰流肋来增强对流冷却效果，而在下游和转型段则是使用了撞击制冷，在这里，火焰筒和转型段内表面都是喷有热障涂层的。

7/9HA 型采用了 DLN2.6+ 型的燃烧方式，在 DLN2.5H 的燃烧方式的前提下，通过肋片和撞击等方式来增强传热，区别在于火焰筒和过渡段的内表面都是可以使壁面的温度下降 50–100K 的 TBC。

现有冷却结构的复合化

重型燃气轮机冷却技术的组合形式包括：燃烧器管束组合式、涡轮叶轮两段式等。一般用于单侧壁焰管的降温方法有狭槽型的纯气膜型和多侧孔型的全气膜型，两层壁上的焰管通常采用撞击法 + 多个斜孔法。新型燃烧器采用冲击 + 流动 + 气膜孔、冲击 + 发散型等组合方式，有效地降低了冷气流，同时降低了冷气流，通常采用扰流柱、气膜孔和热障涂料等方法来实现涡轮引导叶片的冷却。在涡轮转子叶面的前边，使用了一种撞击式的冷却方式，在叶面上使用了一种带有扰流筋的蛇形管道，并在叶面上使用了一种分裂构造。双壁桨叶是一种将内外撞击和内外气膜相结合的复合散热模式，早在 2001 年，Allison 公司就采用了自主研发的新型双壁型新结构，保证了其能够成功完成。一个具有代表性的两面墙的桨叶的模式，将两面墙的间隙分成 9 条两面墙，1 条在桨叶的前端，4 条在压强端，4 条在吸力端。在每一条双面壁的管道中，都设置有撞击孔和气膜孔，在一些管道中还设置有扰流柱，以达到对换热和提高机械强度的目的，而这个涡轮的尾部分，则采取了撞击制冷的的方式。未来，仍需在火焰筒和透平叶片冷却方式复合化上不断创新，如双层壁火焰筒和双层壁叶片等。

蒸汽冷却及改善

蒸汽冷却的理念是 1990 年代提出来的，其中心是 HRSG 和闭环水蒸气制冷系统，闭环蒸气制冷能大大降低压气机的

耗气量。这种方法可以有效地减少主冷风与主冷风的混合损耗，进而改善燃气透平的总体性能。通用电气的 H 级和三菱重工的 J 级都采用了水冷技术。测试桨叶的水蒸气制冷特性的评价显示，水蒸气制冷的平均制冷效果高于风冷式，并且节省冷水。

MHI 公司的 JAC 系列燃气涡轮采用了一种增强的空气冷却系统来对燃烧腔进行降温，通过先降温后升压来消耗一部分的能量，增大了冷却气体与火焰管外壁面处的温度和冷却性能。在水蒸气的冷却过程中，HRSG 的损耗将达到 28.88%，在提高水蒸气的再冷却能力的同时，可以进一步提高水蒸气的制冷能力。

最近几年，挖掘出了水雾 / 蒸气两相流工质的科研意义，当它用于平滑的长方形管道时，其上、下壁面的平均换热系数差异要高于采用蒸汽时的 2%–14%；此外，60 度带肋的长方形槽道中 Nu 的浓度还将随槽道内雷诺数或雾气 / 蒸气含气率的增大而增大。在雾气 / 水蒸气两相流中，引入圆柱排肋条的方法和叶轮内的带肋条结构的设计方法，揭示了雾气 / 水蒸气两相流的工作原理以及相关的设计方法，对提高雾气 / 水蒸气两相流工作效率有着重要的意义。此外，由于其有成本低廉、操作灵活、形态多样化等优点，也有望成为新型水蒸气制冷工作的核心。

通用电气公司的 HA、西门子公司的 HL、MHI 公司的 JAC 等大型燃气透平机，均是在上述几家企业的 F/G 系列燃气透平机的基础上进行了改造和开发。它采用蒸汽冷却、空气冷却和高效热障涂料等冷却形式，包括气膜、发散、对流和双层壁等冷却形式，气体的温升可达 1650 摄氏度，综合循环量为 61%–64%。要使大型透平的初始温度达到 1700°C 以上，单循环及组合循环的热能利用率分别达到 44% 及 65% 以上，还需进一步开发新型、高效的透平制冷技术。

针对不同形状的气膜孔、撞击孔、内部冷通道等，寻求更为合理的孔径、倾角、结构优化，开发出两层板式叶轮、微型孔洞等，既对已有的散热机理进行了优化，也对微观结构有了进一步优化。

开展基于三维印刷多目标协同的点阵网格冷却、燃烧器与涡轮叶片一体化、高温热管冷却等多项研究，以期为涡轮叶片前缘防护、涡轮外形优化、冷却空气节约等提供理论依据，并通过全热障涂料替代已有冷却系统，可以达到高效冷却的目的。（本文作者为中国航发燃气轮机有限公司工程师）