

# 双层壁叶片的模型化方法与冷却设计流程研究

章锁诚,夏硕成,迟重然,臧述升

(上海交通大学 机械与动力工程学院,上海 200240)

**摘要:**提出了一种适用于双层壁叶片的冷却设计流程。沿叶片的叶高和流向抽象提取出简单冷却单元,对其建立一维管网模型并进行多次管网计算,得出各个单元最优的冷却结构方案。将设计好的冷却单元映射回实际叶片中,并对叶片建立一维管网模型,经过多次冷却结构调整与计算迭代,得到叶片初步的冷却结构。对该叶片进行三维气热耦合计算,只需要局部冷却结构微调 and 少量的 CFD 计算,就可以得出最终的冷却设计方案。最终设计的叶片 CFD 计算得到的平均温度为 1 049 K,总冷气量为 0.288 kg/s,与管网计算结果 1 059 K 和 0.337 kg/s 相近。该设计流程方法简便,准确性高,人工工作量和仿真计算量小,优于传统的涡轮冷却设计流程。

**关键词:** 涡轮;双层壁叶片;设计流程;流热耦合

中图分类号:TK124

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2021.10.002

[引用本文格式]章锁诚,夏硕成,迟重然,等. 双层壁叶片的模型化方法与冷却设计流程研究[J]. 热能动力工程,2021,36(10):11-17. ZHANG Suo-cheng, XIA Shuo-cheng, CHI Zhong-ran, et al. Study on the modeling method and cooling design procedure of double-wall turbine blades[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(10): 11-17.

## Study on the Modeling Method and Cooling Design Procedure of Double-Wall Turbine Blades

ZHANG Suo-cheng, XIA Shuo-cheng, CHI Zhong-ran, ZANG Shu-sheng

(School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code:200240)

**Abstract:** A cooling design process suitable for double-wall blades is introduced. The simple cooling unit is extracted along the blade height and flow direction, the one-dimensional pipe network calculation model is established for it, and the preliminary cooling structure of the whole blade can be obtained after cooling structure adjustment and calculation iteration are carried out for many times. The three-dimensional gas-thermal coupling calculation for the blade is carried out, and the ultimate cooling design scheme can be obtained only by minor adjustment of local cooling structure and a small amount of CFD calculation. The average temperature calculated by CFD for the finally designed blade is 1 049 K and the total cooling air mass flow is 0.288 kg/s, which is close to the one-dimensional pipe network calculation results of 1 059 K and 0.337 kg/s. This design process is simple and convenient with high accuracy, better than traditional turbine cooling design process, which reduces labor workload and simulation calculation amount.

**Key words:** turbine, double-wall blade, design process, flow-heat coupling

## 引言

燃气轮机涡轮前温度升高对涡轮机材料的耐温性提出了挑战。为了进一步提高涡轮前温度,可以采用双层壁结构叶片。双层壁结构叶片采用内壁承力,外壁承温的方式,降低外壁厚度从而使叶片壁面温度降低。随着3D打印技术的发展,双层壁结构受到越来越多的关注。国外Allison公司开发的CMSX-4单晶叶片<sup>[1]</sup>使用自行开发的双壁新冷却结构,确保了叶片顺利通过耐久性测试,更使得涡轮前温度提高了222~333℃。国内张晓东等人<sup>[2]</sup>设计了前缘为气膜冷却,叶身是双层壁的冷却结构并为之申请了专利。相较于传统的叶片,双层壁叶片缺少可借鉴的基准叶片,且冷却结构形式与传统叶片有较大差异,传统的叶片冷却设计流程是否适用于双层壁叶片有待研究。

双层壁叶片的冷却结构具有其独特之处。受到外壁厚度的限制,满足双层壁结构的气膜冷却结构,需要具有小长径比( $L/D < 5$ )的气膜孔。Hale等人<sup>[3]</sup>测量了由狭窄通道供气的一排短孔( $L/D$ 从0.66变化到3.0)的气膜有效度,对薄壁加工制造可能有指导作用。李威宏<sup>[4]</sup>研究了长径比0.5~5.0时气膜冷却的效率。与传统叶片相比,双层壁叶片也受到内壁厚度的限制,需采用短冲击距离的冲击冷却。Florschuetz等人<sup>[5]</sup>研究了冲击距离 $Z/D$ 为1~3,孔流动方向间距 $X/D$ 为5~15,孔跨距 $Y/D$ 为4~8的阵列冲击冷却传热特性。Junsik等人<sup>[6]</sup>扩大了冲击距离 $Z/D$ 的范围,研究了 $Z/D$ 为1.5~8,流向间距 $X/D$ 为5,8,12的冲击射流特性。Andrew C. Chambers等人<sup>[7]</sup>研究了低冲击距离( $Z/D = 1.54$ ),平均射流 $Re = 20\ 000$ 时初始横流强度对传热的影响。除了实验之外,Preston Stoake等人<sup>[8]</sup>还运用计算流体力学(CFD)方法建立模型,对双层壁冷却进行了包括冲击距离、孔流展向间距因素在内的研究并做了相关优化设计。根据前人研究可知,气膜冷却、冲击冷却的冷却结构参数对冷却效果有很大影响,所以冷却结构的详细设计参数十分重要。

双层壁叶片包含多个冷却单元或腔室,每个单

元或腔室均有各自的详细设计参数。在冷却结构设计过程中如何快速准确地调整并找到最佳设计参数组,是双层壁叶片设计的核心问题。采用一维管网设计方法能够以较小的计算量完成冷却结构整体分析,但其计算精度有限且不能考虑耦合传热问题,精度难以支撑详细设计;采用三维流热耦合计算对叶片进行分析时,前处理与求解的工作量和计算量很大,难以在设计流程中反复迭代使用。这些都导致了传统的一维-三维串行的冷却设计流程不适用于双层壁叶片。

本文采用冷却单元设计寻优和叶片整体流热分析改进相结合的方法来设计双层壁叶片。冷却单元设计寻优包括冷却单元提取、抽象参数优化、管网模型的校核与修正。叶片整体流热分析与改进包括完整叶片的抽象与管网模型建立、基于管网计算的完整叶片冷却优化、基于三维仿真的叶片整体验证与改进。每一步流程中都综合采用一维与三维计算方法,实现了设计计算精度与工作量的平衡,以达到缩短设计周期、降低设计难度的目的。

## 1 双层壁叶片流动传热特征分析

### 1.1 典型双层壁叶片冷却结构

典型双层壁叶片模型如图1所示,叶片内外壁之间的空隙被隔板分为9个双层壁通道,其中位于叶片前缘位置1个,压力侧4个,吸力侧4个。每个双层壁通道内布置有冲击孔以及气膜孔,部分通道内还布置有扰流柱,起到强化传热和增强机械强度的作用。该叶片尾缘部分则采用冲击冷却的形式。

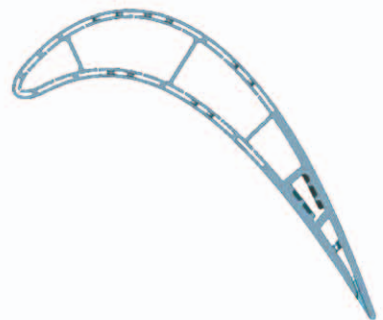


图1 双层壁叶片模型

Fig. 1 Double-wall blade model



## 1.2 适用于双层壁叶片的冷却设计流程的建立

传统叶片冷却结构设计,如图 2 所示。在设计需求确定之后,可先进行初步设计,得到多种初步的冷却结构。再开展冷却结构参数化设计和冷热气路管网计算,对初步设计得到的冷却结构进行筛选并对气路形态进行调整。最后再开展冷却结构参数化设计和三维气热耦合计算,可以得到最终的冷却结构并对其气路形态做进一步调整。

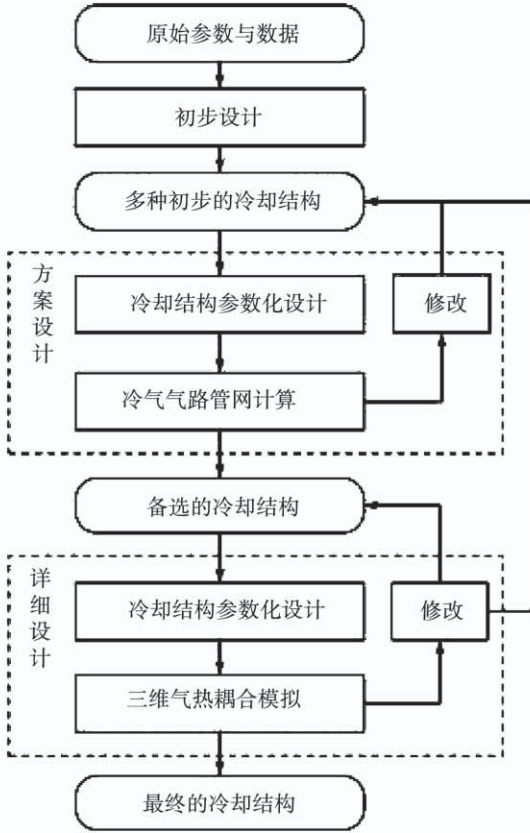


图 2 传统叶片冷却设计流程<sup>[9]</sup>

Fig. 2 Procedure of traditional blade cooling design<sup>[9]</sup>

传统的叶片设计方法,将管网计算和流体力学(CFD)计算分隔开,不能充分发挥管网计算和 CFD 计算的优势。本文将管网计算和 CFD 计算串行起来,搭建了图 3 所示的双层壁叶片设计的新流程。主要包括冷却单元设计参数寻优和叶片整体流热分析与改进。

冷却单元设计参数寻优。先从完整叶片上提取和抽象出冷却单元,然后采用经过三维 CFD 计算校核标定过的一维管网对冷却单元开展正交计算(Design of Experiment, DOE)。经过三维计算标定

后的一维管网不仅速度快,计算量少,而且提升了精度,保证了详细设计参数寻优的效率和准确性。

叶片整体流热分析与改进。将完成详细设计参数寻优的冷却单元放回叶片中,并建立叶片的管网模型,进行基于管网计算的叶片冷却优化。三维气热耦合计算工作量大、耗时长,不适用于叶片冷却结构的筛选。管网计算相比较于 CFD 计算,计算量减少,时间缩短,因此可以通过大量的管网迭代计算筛选和调整冷却结构。再利用三维仿真计算对管网计算筛选出来的叶片进行整体验证,此时仅需要少量的三维计算迭代,最终就可以得到改进的冷却叶片。

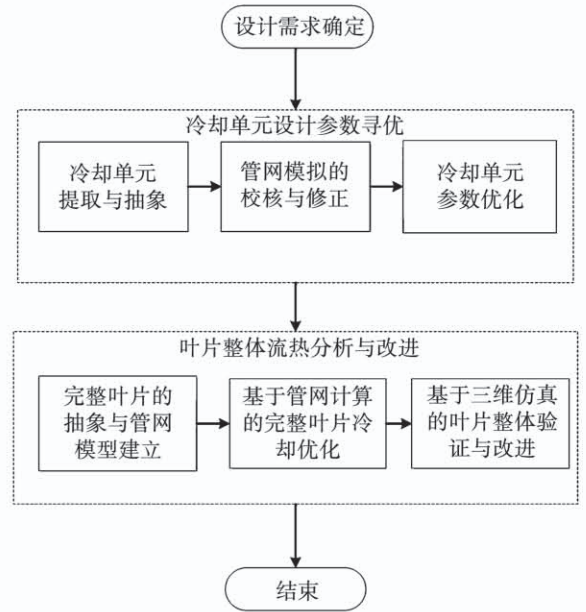


图 3 双层壁叶片冷却设计流程

Fig. 3 Procedure of double-wall blade cooling design

## 2 基于双层壁单元的设计参数寻优

### 2.1 双层壁单元的提取与抽象

图 4 是双层壁叶片参考模型。双层壁单元的提取与抽象即是将其沿叶高和流向划分单元。可以将叶片沿叶高方向划分为 7 个单元,沿流向依次划分为前缘单元、压力侧 3 个单元、吸力侧 3 个单元和尾缘单元,共计 8 个单元。整个叶片上包含 56 个冷却单元,根据冷却叶片的设计定义,仅需进行某一叶高上 8 个单元的选择即可。按照等比例的单元划分原则,考虑到前缘和尾缘设计的便捷性,确定实际叶片划分的比例位置,如图 5 所示。

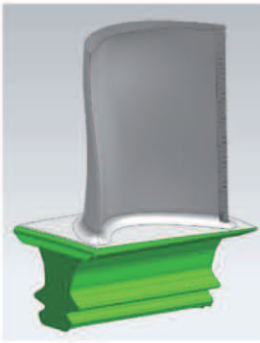


图4 双层壁叶片参考模型

Fig. 4 Reference model of double-wall blade

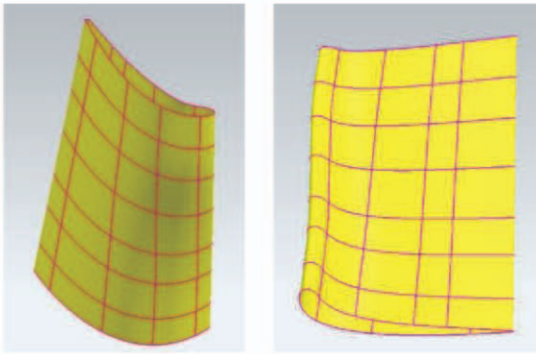


图5 完整叶片的单元划分图

Fig. 5 Unit division diagram of complete blade

## 2.2 管网模型的校核与修正

管网计算主要依赖经验公式完成流阻及传热相关的计算,由于在建立管网模型时做了一定的简化,因此管网计算采用的经验公式与实际会存在较大偏差,此时需要 CFD 计算对管网模型进行修正。

选取一个典型的冲击-气膜冷却双层壁单元分别进行了管网和气热耦合计算。图6为该冷却单元模型。采用 CFD 计算时,流体域部分全部采用了结构化网格,固体域采用了非结构化网格。其中,冲击孔入口静压为 1.777 MPa,气膜孔出口静压为 1.312 MPa,通过 CFD 得到的总流量为 0.003 kg/s,借助经验公式调整后的一维流体网络仿真计算得到的结果为 0.003 4 kg/s,两者流量的相对误差为 13%。由于一维流体网络仿真本身的粗略性,这是一个能够接受的误差值。



图6 典型的冲击-气膜冷却双层壁单元

Fig. 6 Typical impingement-film cooling double-wall unit

## 2.3 基于正交计算的详细设计参数寻优

在冷却单元详细设计参数寻优中,冷却单元表面的冷却效果与流阻,温度与冷气流量,不可能同时达到最佳状态,需要用一定的策略来进行平衡。

以叶片吸力侧某冷却单元为例介绍基于正交计算的详细设计参数寻优过程。该双层壁叶片吸力侧冷却单元基本形式为气膜-冲击冷却,扰流柱是方案寻优时常考虑的结构,如图7所示。



图7 典型冲击-扰流-气膜冷却双层壁单元

Fig. 7 Typical impingement-spoiler-film cooling double-wall unit

对该模型采用一维管网计算,边界条件如表1所示。经过计算得到该单元的冷气流量为 0.461 kg/s,流量过大,需要进行寻优。寻优方法为调整冲击孔、气膜孔、扰流柱的数量、尺寸和分布。对于该双层壁叶片吸力侧冷却单元,可以采取减小冲击孔面积、减少冲击孔数量、减少气膜孔数量和增加扰流柱等方式进行控制。为此增加了9个模型进行管网计算,分别记为模型2~10。其中模型2~4仅仅减少了冲击孔直径,模型5~7分别减少了冲击孔和气膜孔的数量,模型8~10则增加了扰流柱结构。

表1 管网计算边界条件设置

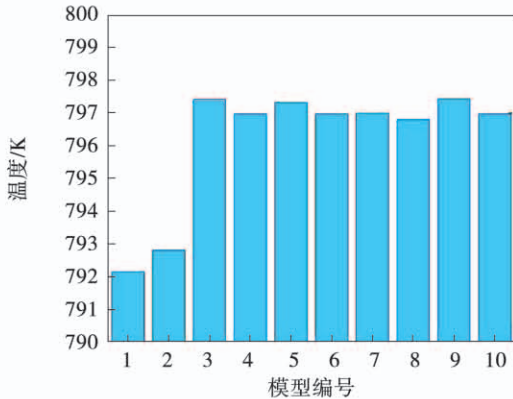
Tab. 1 Boundary condition setting for pipe network calculation

边界条件	设定值
冷气入口总压/MPa	1.78
冷气入口总温/K	725
气膜孔外压力/MPa	1.1
外壁面燃气温度/K	1 200
对流传热系数/ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	1 500
固体导热系数/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	20

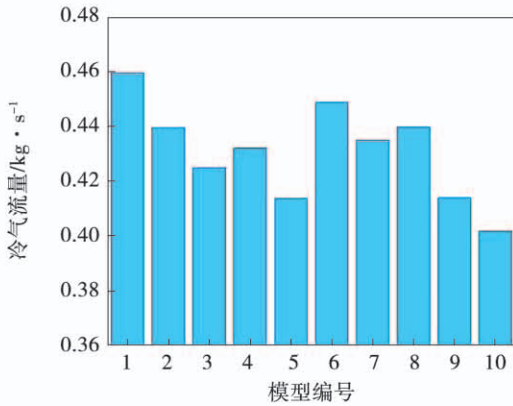
基于10个模型通过一维管网方法得到的壁面平均温度和流量如图8所示。从图中可知,模型具有良好的综合性能,但流量依然偏大。为了解决这个问题,在该组参数上再进行与上述过程相似的多个变量调节过程,并考虑冲击孔、扰流柱、气膜孔的排布问题,得出该单元的最终设计参数和模型。使



用该方法,可以得到所有冷却单元模型最优的详细设计参数范围。



(a) 不同模型壁面平均温度



(b) 不同模型冷气流量

图 8 不同模型管网计算结果

Fig. 8 Comparison of calculation results for different models of pipe networks

### 3 冷却叶片整体流热分析与改进

#### 3.1 基于管网计算的整体流热分析

完整叶片可以抽象和提取出多个双层壁单元,其中每个单元都会完成详细设计参数寻优。将每个双层壁单元寻优的结构组合应用到实际叶片中,就可以建立最初的叶片管网模型。选择其中一种管网模型介绍基于管网计算的整体流动分析。

一维流体计算网络如图 9 所示。其中,黑色的竖直实线代表 11 个冷却通道,红色的倾斜虚线代表冲击孔单元,红色的水平虚线代表气膜孔单元。管网模型将黑色竖线代表的冷却通道流向按叶片的吸力侧和压力侧划分并命名为吸力 1~4 号,压力 1~4 号。图中的网络共计有 77 个主流道节流单元,63 个冲击孔节流单元,44 个气膜孔节流单元,同时共

有节点 138 个。叶片叶顶使用单层壁带气膜孔的设计,所以分为两个单元。由于叶片中央腔室被支撑肋划分为相互独立的两个部分,其流体网络也分为相互独立的两个网络。

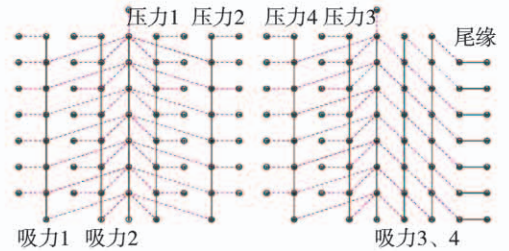


图 9 叶片一维流体计算网络

Fig. 9 One-dimensional fluid calculation network of blades

采用一维流体计算网络方法时,需要进行两次 CFD 计算来获得叶片外壁面的对流传热系数。第一次计算时设置叶片外壁面为绝热,得到其外壁面燃气温度分布  $T_w$ ,第二次计算时设置叶片外壁面为定温 1 000 K,得到其外壁面的热流密度分布  $q_w$ 。通过公式  $h = q_w / (T_w - 1\,000\text{ K})$ ,即可折算得到外壁面的对流传热系数。图 10 为通过这种计算得到的叶片外表面的对流传热系数分布,通过该方法计算得到的对流传热系数与实际情况相比存在一定误差。实际情况下对流传热系数是会随外界条件变化的,而通过本方法计算得到的对流传热系数则是定值。

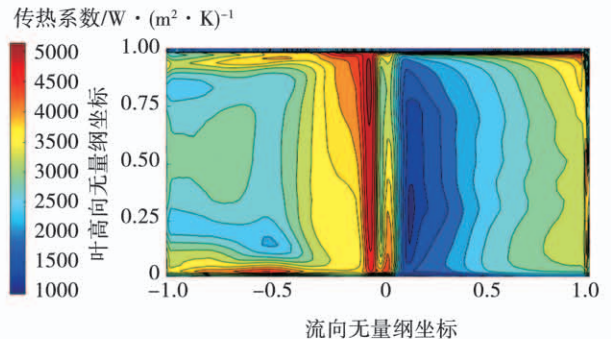


图 10 叶片外面对流传热系数分布图

Fig. 10 Distribution of convective heat transfer coefficient on the outer surface of blade

传统叶片冷却结构设计中,在进行叶片模型调整时,需要进行大量模型修改和三维 CFD 计算迭代的工作。而管网模型易于修改,计算速度快,计算效率高,因此可以对大量的方案进行迭代和筛选。针

对上文建立的管网模型,在进行了 30 多次有针对性调整后,得到了改进前后管网计算结果,如图 11 和图 12 所示。

由改进前的叶片表面温度和冷气流量图,可知吸力侧的这一区域燃气压力较低,流量相对偏高,因此需要缩小靠近前缘部分气膜孔半径,并且增大其间距,以加强对靠近前缘吸力面的流量控制。在叶片尾缘区域,气膜孔效率已经趋近于 0。由冷气入口流经腔室进入尾缘的冷气在经过吸力侧后压力下降,温度也随之升高。这使得尾缘成为了冷却情况较差的区域。因此,需要增大尾缘区域通道流量,以获得更好的冷却效果。为了维持叶片整体流量不变,分配给其他区域的流量相应减少。

可以看出,相较于原模型,上述几点问题基本得到改善和解决。叶片的区域平均温度最大值已经下降到 1 100 K 以下,冷气流量约为 0.393 kg/s。

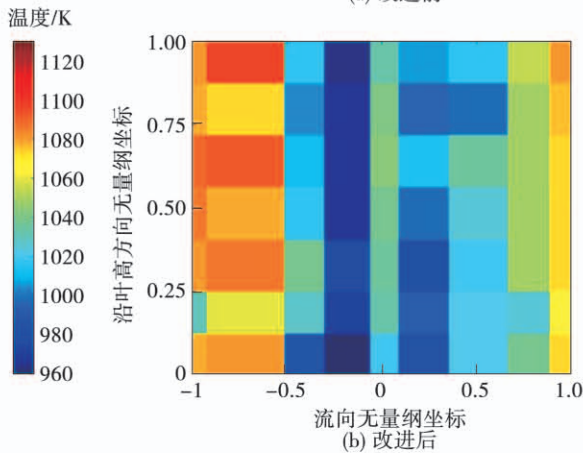
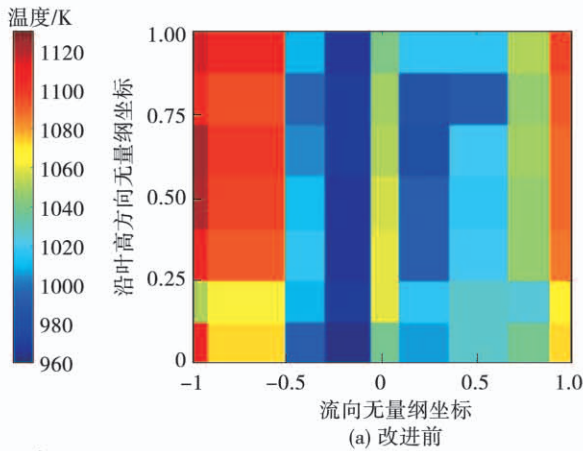


图 11 改进前后叶片管网温度计算结果对比

Fig. 11 Comparison of the blade temperatures by pipe network method before and after the improvement

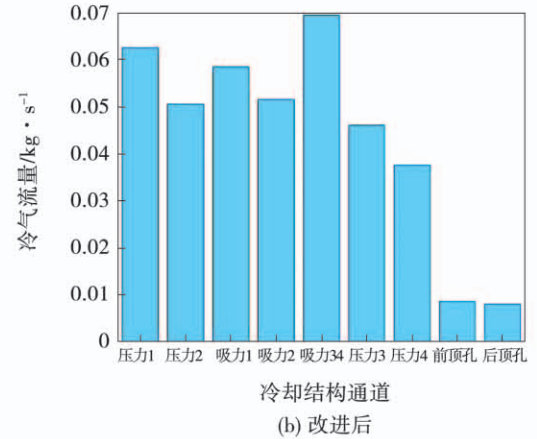
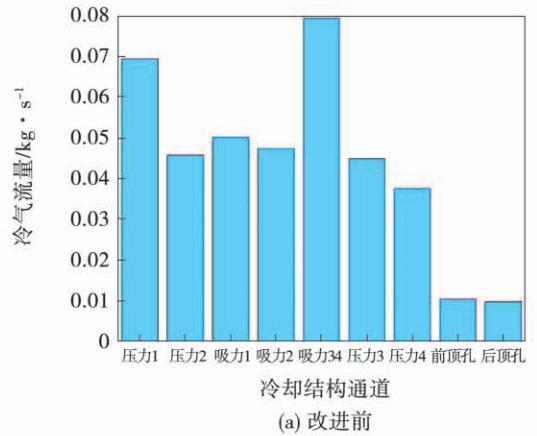


图 12 改进前后叶片管网流量计算结果对比

Fig. 12 Comparison of the blade flow rates by pipe network method before and after the improvement

### 3.2 综合管网与三维仿真的叶片整体验证与改进

经过管网计算大量筛选与调整得到叶片冷却结构模型,只需经过少量的三维计算迭代,对局部冷却效果不好的拓扑结构进行调整就可以得到满足要求的方案,如图 13 所示。



图 13 完整双层壁叶片模型

Fig. 13 Complete double-wall blade model



在上述模型的基础上,对其开展三维气热耦合仿真计算。经过计算,可以得到叶片表面平均壁温和冷却单元冷气消耗量。叶片表面温度分布云图、如表 2 和图 14 所示。

表 2 平均壁温及冷气消耗量对比表

Tab. 2 Comparison table of average wall temperature and air-conditioning consumption

参 数	一维管网计算值	CFD 计算值
平均壁温/K	1 059	1 049
冷气流量/kg · s <sup>-1</sup>	0.337	0.288

从结果中可以看出,一维管网计算得到的平均壁温与 CFD 结果相差不到 1%,说明一维管网计算预测温度是比较准确的。三维气热耦合计算结果的总流量数据约为 0.288 kg/s,小于一维流体网络计算的结果 0.337 kg/s,两者相差 17%,导致这种偏差出现的原因是一维流体网络计算中的流阻经验公式。

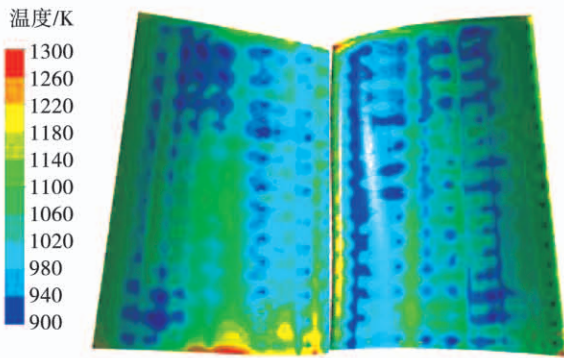


图 14 双层壁叶片表面温度分布

Fig. 14 Surface temperature distribution of double-wall blade

对比一维管网计算结果与图 14 可知,在叶片前缘部分两种计算结果的偏差相对更大。从一维流体网络计算结果可知,其前缘温度不高,但是从三维气热耦合计算结果可知,前缘温度很高。导致这种偏差出现的原因也是由于一维流体网络计算的气膜孔修正误差,因此根据三维计算结果,需要对该区域进行进一步的冷却效果强化。

一维管网计算与三维计算的结果还表明,叶片尾缘平均温度高于其他部位温度,因此需要在叶片

尾缘部分增加射流孔,让冷气直接从叶片内部的腔室射流冲击到尾缘,以增强传热。对调整后的模型进行 CFD 计算,得到叶片表面平均壁温为 960 K,流量为 0.337 kg/s。相较于改进之前的叶片,其流量增加,壁面温度明显下降。

相较于传统的叶片冷却结构设计过程中大量的 CFD 计算,双层壁叶片冷却设计只用了两次 CFD 计算,获得了合理的叶片冷却结构参数,大大减少了计算量,计算效率得到了提升。

## 4 结 论

针对双层壁叶片的几何特点,其冷却设计可采用“单元设计 - 整体设计”的两步流程,每一步都综合采用一维管网和三维 CFD 方法。

(1) 流程第一步是冷却单元设计参数寻优,从三维的双层壁叶片抽象出双层壁单元模型,开展单元的三维仿真并校核标定管网计算模型,进而利用准确的管网模型开展 DOE 寻优,获得双层壁详细参数的最佳范围。

(2) 流程第二步是从叶片整体层面开展流热分析与改进,首先建立叶片整体管网模型,并对各个双层壁单元分别调整设计参数,以达到冷气量与冷效指标,进而对双层壁叶片整体开展三维建模与流热耦合仿真,根据三维仿真结果对冷却结构进行最终的校核与调整。

本文建立的双层壁叶片冷却设计流程能够以较小的人工工作量与仿真计算量确定出双层壁叶片的冷却设计参数组。此设计流程,未来将在工程应用的过程中做进一步地验证与完善。

## 参考文献:

- [1] FUNAZAKI K, TARUKAWA Y, KUDO T, et al. Heat transfer characteristics of an integrated cooling configuration for ultra-high temperature turbine blades; experimental and numerical investigations[J]. Proceedings of Asme Turbo Expo. New Orleans, Louisiana, USA:2001,3(2):92-97.
- [2] 张晓东,安柏涛,曾蕴涛,等.一种双层壁冷却与气膜冷却组合式透平叶片结构;中国,CN108425705A[P].2018.  
ZHANG Xiao-dong, AN Bai-tao, ZENG Yun-tao, et al. Double-wall cooling and film cooling combined turbine blade structure; China, CN108425705A[P].2018.