

动力技术

高温涡轮叶片内冷通道强化换热试验系统设计

刘加增¹ 高建民¹ 高铁瑜²

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室¹和能源与动力工程学院²,西安 710049)

摘要 针对重型燃气轮机高温涡轮叶片的双工质冷却技术,设计建造了研究带肋复杂叶片内冷通道内蒸汽/空气流动及强化换热特性的试验平台。该平台由压缩机、蒸汽发生器分别提供冷却空气和蒸汽源,可以进行叶片内冷通道内蒸汽、空气两种工质的对流、冲击、肋柱扰流及多种冷却结构下的冷却换热机理和摩擦阻力特性研究。从而能揭示叶片内冷通道内流动阻力、表面强化换热与不同冷却结构几何参数及气(汽)动参数的影响规律。获得单元通道内蒸汽/空气为冷却介质的高效冷却结构及相关换热关联准则式。

关键词 燃气轮机 涡轮叶片 双工质冷却 蒸汽冷却 试验平台

中图分类号 TK124; **文献标志码** A

发展先进的冷却技术是提高燃气轮机性能的主要措施。目前,燃气轮机叶片冷却主要采用空气复合冷却技术。然而,随着燃气轮机入口温度的升高,传统的空气冷却技术已越来越难于满足燃气轮机高效率、高可靠性发展的要求,成为制约燃机技术发展的关键。由于蒸汽相对于空气具有更好的换热性能,采用蒸汽作为燃气轮机叶片内冷通道的冷却介质会显著提高冷却效率,因此国内外对蒸汽冷却技术进行了大量研究^[1-6],GE 等公司已成功将闭式蒸汽冷却技术应用于最先进的重型燃气轮机,使简单燃气轮机循环效率达 39%,联合循环效率达 60%^[7]。我国对燃气轮机叶片内冷通道蒸汽冷却技术的研究仍处于起步阶段。

目前,国内外已经建立了很多涡轮叶片内冷通道空气冷却试验系统,如美国 Texas A&M University 的叶片内通道空气冷却模拟试验系统^[8,9],North-eastern University 的高阻塞比叶片内冷通道空气冷却模拟试验系统^[10,11],台湾 Marine University 的大宽高比规则粗糙表面空气冷却模拟试验系统^[12],国

内的西北工业大学^[13],清华大学,中科院热物理研究所等学校和研究机构也建立了类似的试验系统。以上试验系统基本可分为两种类型:1、在试验通道内壁面粘贴薄片加热器加热空气;2、热空气直接引入试验通道(通常采用液晶测温技术)。上述两种试验系统由于加热量,试验段材料及液晶涂层耐温限制,只能研究试验通道内空气冷却的相关特性。由于冷却蒸汽的温度较高,压力较大,现有试验系统不能对叶片内冷通道蒸汽冷却进行研究。

设计建立多功能高质量的涡轮叶片内冷通道强化换热试验系统,对开展高温涡轮叶片的冷却结构设计研究具有重要意义。但是可以支持研究叶片内冷通道蒸汽冷却的试验平台目前尚未见到报道。

为了获得具有我国自主知识产权的燃气机叶片冷却技术,西安交通大学制造系统及质量工程研究所建立了多功能涡轮叶片内冷通道强化换热试验系统。该试验系统不但可以研究蒸汽在复杂受限小流道内的换热特性和摩擦阻力特性,还可研究不同工质、通道内不同冷却结构下的冷却换热机理,为实现相应的新概念冷却叶片技术原型及建立科学合理的叶片冷却设计体系及相关准则提供试验支持。同时也将为我国在未来引进消化国内外

2010年12月13日收到国家973科研项目(2007CB70770102)资助
第一作者简介:刘加增(1984—),男,山东济宁人,博士研究生,研究方向:燃气轮机高温部件冷却技术。

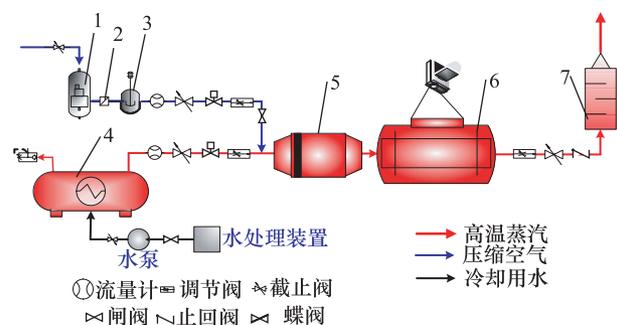
先进技术,建立具有自主知识产权的重型燃气机涡轮叶片设计系统提供试验验证支持。

试验平台建成后具体将从以下三个方向展开研究:

- 1) 叶片内冷通道蒸汽对流、冲击及肋柱扰流换热试验研究;
- 2) 叶片内冷通道空气对流、冲击及肋柱扰流换热试验研究;
- 3) 高温气、汽两相流实验,燃机不同部件的冷却实验等。

1 试验平台的系统组成

如图1所示,试验系统由蒸汽发生器、空气压缩机、试验段进气整流装置、试验段、试验段加热装置、排气装置及控制、数据采集系统等几大部分组成。



- 1—冷却空气压缩机;2—冷却空气过滤器;
- 3—冷却空气储气罐;4—蒸汽发生器;
- 5—叶片内冷通道试验段进气整流器;
- 6—叶片内冷通道试验段;7—排气消音器

图1 涡轮叶片内冷通道强化换热试验平台系统图

试验方法与步骤:蒸汽发生器提供流量为(40—600) kg/h,最高压力为0.8 MPa的试验用蒸汽,经试验段进气整流装置进入试验段。然后开启试验段加热装置,以一定的热流密度将流经试验段的蒸汽加热,最后,被加热的蒸汽经排气整流装置排向大气。内冷通道空气冷却试验流程与上述蒸汽试验流程相同。

该试验平台可进行重型燃气轮机叶片内冷通

道蒸汽、空气冷却机理的试验研究。该冷却试验的构思为:将蒸汽/空气通入比其温度更高且内部带有肋片的试验通道,达到稳态后,测试蒸汽/空气流量,进出口及试验段内表面的温度压力等参数,以此获得蒸汽/空气在试验通道内的换热特性和摩擦阻力特性。该试验平台满足相似性原理,即试验与模拟的对象具有相同的相似准则和相似的单值性条件^[14],综合考虑温度、压力和投资情况,确定该试验系统的主要技术指标为:冷却蒸汽温度:100℃—230℃,冷气蒸汽压力:(0—0.8) MPa;冷却蒸汽最大流量:600 kg/h;冷却空气温度:室温—250℃;冷却空气压力:(0.1—0.7) MPa;冷却空气最大流量:10 Nm³/min。

2 试验平台结构组成部分设计

2.1 气(汽)源及管路系统设计

如图1所示,空气工质由1台螺杆式压缩机提供,其最大流量为10 Nm³/min,最大压力为0.7 MPa。压缩空气经过滤器进入空气储气罐,储气罐至试验段整流装置之间依次装有流量计、截止阀、气动闸阀、气动调节阀及手动闸阀。过滤器主要用来过滤压缩空气中的水分和油分,保证压缩空气的清洁;储气罐主要用来稳定气源压力,使进入试验段的气体压力波动较小;截止阀主要是用来阻断气源与试验段之间的气流,一般在设备检修或者更换试验段时使用;气动闸阀的作用与截止阀相似,该阀门一般只会在系统发生危险时启动,立刻阻断气流,保证系统安全;气动调节阀主要是用来调节流经试验段气体的流量;手动闸阀是用来隔断空气系统与蒸汽系统,使每个系统可以单独工作。

试验段出口至排气装置之前依次装有气动调节阀、截止阀和止回阀。气动调节阀是用来调节试验段内气体的压力,使其达到试验工况;截止阀用来阻断其前后设备,一般在设备检修时使用;止回阀是在系统不工作时防止气体回流,保护设备及试验段。

蒸汽工质由一台蒸汽发生器提供,流量为

(40—600) kg/h,最高压力为 0.8 MPa。蒸汽发生器由一台普通电热锅炉和一个蒸汽过热器组成。试验时,可以根据试验要求调节锅炉的蒸发量和过热器的温度以满足不同的试验工况需求。蒸汽发生器至试验段整流装置之间依次装有流量计、截止阀、气动闸阀、气动调节阀,其作用于上述空气管路各相应阀门相同。

试验段进气整流装置内部装有紊流发生器,整流装置的作用是平稳气流,调节进气紊流度,在试验段进口处形成突然进入的工况^[15],来更好地模拟实际燃机叶片内通道流动工况。

试验段加热装置的作用是平稳地加热流经试验段的蒸汽。该加热装置由一台控制器和一台变压器组成,可以根据试验工况的要求,调节通过试验段的电流来调节加热量。该加热装置的最大通过电流可以达到 4 500 A,最高电压为 7.5 V。

2.2 试验段及加热装置设计

试验段及其加热装置是本试验平台最主要的部分。图 2 为实际叶片的外型图,其内冷通道可以近似简化为带肋的矩形通道。蒸汽通过这种带肋的矩形通道来冷却高温燃气机叶片。为了达到结构相似的条件,该试验段设计也采用矩形带肋通道形式。考虑安全及材料的限制,经研究比较确定试验段壁温为(300—400)℃。

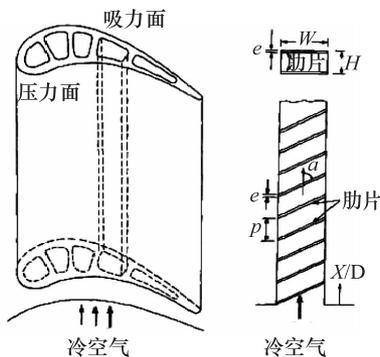


图 2 叶片内冷通道示意图

目前国内外同类试验平台^[8—13,15]的试验段加热温度大多低于 120℃,甚至为常温实验,选用的材料基本为特氟龙,树脂,耐热玻璃和木材等,而本试验段温度较高,而且通入的蒸汽压力较高,上述材

料均不可用,需要选用耐温、承压而且导热性较好的材料。综合考虑以上情况,参考国外高温叶栅试验平台^[16],本试验段材料选定为耐热不锈钢 1Cr18Ni9Ti,其物性参数如表 1 所示^[17]。

表 1 1Cr18Ni9Ti 的电物性及使用极限值

熔点	/℃	1 400—1 500
抗氧化最高使用温度	/℃	850
热强度最高使用温度	/℃	650
抗拉强度	/(N·mm ²)	550
电阻率	/(Ω·cm)	7.3 × 10 ⁻⁵
伸长率	/%	40

国内外现有的试验平台一般是将薄片加热器粘贴在试验通道的内壁面上,然后通电加热。这种方式不宜用于热流密度太高的场合。本试验段需要加热到(300—400)℃,其热流密度约为 50 kW/m²。由于热流密度太高,采用薄片加热的方式不适用,此外,由于本试验段采用耐热不锈钢焊接而成,薄片式加热器无法粘贴在通道内壁。经过细致地考察和调研,试验段采用低电压,大电流方式加热。将电极直接固定在试验段的两端,同时用绝缘绝热材料硅酸铝纤维纸将试验段与相邻管道绝缘绝热。采用此种方式加热试验段比较安全,加热量可以根据试验需要调节,而且温度测点的布置比较简单,直接将热电偶焊接至试验段表面即可。试验段结构如图 3 所示:

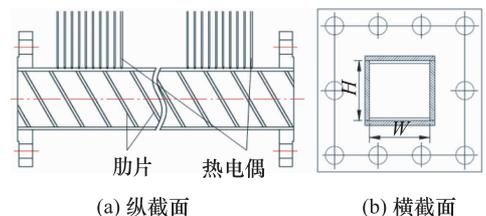


图 3 叶片内冷通道试验段结构图

2.3 数据采集及参数控制系统

实验室数据采集系统采用的是横河公司的 mx100 系统,同时可以采集 70 个(4—20) mA 标准电流信号,230 个自制热电偶信号,具有防尘、防湿、适用范围宽、抗电磁干扰强等特点。

试验平台的试验段加热装置采用电热方式,加

热量可以通过调节试验段的电流大小来调节,试验段内气流的压力和流量通过整流装置前的调节阀和试验段后的调节阀来调节。试验段内的流体流量可以通过整流装置前调节阀的开度来调节;试验段内流体的压力可以通过试验段后调节阀的开度调节。由于试验平台的温度和压力都比较高,手动现场控制比较危险,所以试验平台控制系统采用远程自动控制,根据试验要求,只需设定好试验段内的温度、压力和流量,系统会根据设定好的参数自行调节,直至达到试验工况。

3 试验平台特色

在国内外现有空气冷却试验平台的基础上设计建立的这个高温涡轮叶片内冷通道强化换热试验系统具有的优点特色如下。

3.1 功能多样化

试验平台不仅可以研究蒸汽冷却特性,还可以进行空气冷却特性的对比试验研究;其最大蒸汽供应量为 600 kg/h,最大空气供应量为 600 Nm³/h,试验工况较宽;平台控制系统采用的是国际一流公司的最新控制产品,使得本试验平台可以实现自动控制,实验人员只需要将试验工况的参数设定好,系统会自动调节各设备参数,直至达到试验要求,参数测试准确度高。

3.2 加热方式简单,测点布置方便

本试验平台采用低电压,大电流的方式加热试验段,将电极直接固定在试验段的两端,试验段热流密度可以通过调节电流大小来调节热流控制准确。此外这种加热方式比较安全,热流密度高,而且因加热方式的改变,使得温度测点的布置变的简单。

4 结论

燃气机涡轮叶片内冷通道蒸汽冷却特性的试验研究对开展蒸汽冷却叶片的结构设计有重要意义。试验平台建成后不仅可以进行蒸汽、空气在叶

片内通道中的对流、冲击及肋柱扰流等试验研究,还可以通过更换试验段,进行高温两相流及燃气机不同部件的冷却试验研究,具有很好的通用性。

参 考 文 献

- 1 Bohn D, Ren L, Kusterer K. Investigation of the steam-cooled blade in a steam turbine cascade. *Journal of Aerospace Power*, 2007; 22(5):673—382
- 2 Burdick S S, Sexton B F, Kellock L R. Closed circuit steam cooled turbine shroud and method for steam cooling turbine shroud; USA, US 6,390,769 B1. May 21, 2002
- 3 Wang T, Gaddis J L, Li X C. Mist/steam heat transfer of multiple rows of impinging jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005; 48:5179—5191
- 4 胡宗军, 吴铭岚. 采用蒸汽冷却的各种燃气轮机循环性能分析. *上海交通大学学报*, 1999; 33(3):335—338
- 5 董 瑜, 郑洪涛, 谭智勇, 等. 过热蒸汽射流冷却叶片热耦合数值模拟. *航空动力学报*, 2008; 23(2):237—243
- 6 胡宗军, 吴铭岚. 蒸汽冷却及其在先进热力联合循环中的应用. *燃气轮机技术*, 1998; 11(3):27—34
- 7 杨松鹤. GE 公司重型燃气轮机系列发展分析. *燃气轮机技术*, 2000; 13(1):24—27
- 8 Chandra P R, Alexander C R, Han J C. Heat transfer and friction behaviors in rectangular channels with varying number of ribbed walls. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003; 46:481—495
- 9 Chandra P R, Niland M E, Han J C. Turbulent flow heat transfer and friction in a rectangular channel with varying numbers of ribbed walls. *Transactions of the ASME*, 1997; 119:374—380
- 10 Taslim M E, Lengkonk A. 45 deg round-corner rib heat transfer coefficient measurements in a square channel. *Transactions of the ASME*, 1999; 121:272—280
- 11 Korotky G J, Taslim M E. Rib heat transfer coefficient measurements in a rib-roughened square passage. *Transactions of the ASME*, 1998; 120:376—385
- 12 Chang S W, Liou T M, Lu M H. Heat transfer of rectangular narrow channel with two opposite scale-roughened walls. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005; 48:3921—3931
- 13 倪 萌, 朱惠人, 裘 云, 等. 涡轮叶片内流冷却通道中压力系数的研究. *燃气轮机技术*, 2004; 17(4):41—47
- 14 伍荣林, 王振羽. *风洞设计原理*. 北京:北京航空学院出版社, 1985
- 15 Park J S, Han J C, Huang Y. Heat transfer performance comparisons of five different rectangular channels with parallel angled ribs.

International Journal of Heat and Mass Transfer, 1992; 35 (11) :
2891—2903

Contractor Report 182133, 1988;1—172

16 Hylton L D, Nirmalan V, Sultanian B K. The effects of leading edge
and downstream film cooling on turbine vane heat transfer. NASA

17 王振东, 宫元生. 电热合金. 北京: 化学工业出版社, 2006:
1—612

Design of Heat Transfer Enhancement Test Platform of Turbine Blade(Vane) Internal Channel

LIU Jia-zeng¹, GAO Jian-min¹, GAO Tie-yu²

(State key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering¹ and School of Energy and Power Engineering²,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China)

[**Abstract**] For dual fluid cooling technology of high-temperature turbine blade of heavy-duty gas turbine, the steam heat transfer enhancement test platform of turbine blade (vane) internal channel is designed and built with which heat transfer and friction characteristics of steam/air in blade internal cooling channel can be researched with rib turbulators. Steam and air coolants were supplied by air compressor and steam generator, experimental investigation of convection, jet impingement, pin fins of steam/air and heat transfer and friction characteristics of different cooling structures can be carried out with the platform. So, the influence law of flow resistance, heat transfer enhancement, various cooling geometries and steam/air's aerodynamic parameter can be reveal, and the best cooling geometry and heat transfer correlations of steam/air in blade internal cooling channel can be known.

[**Key words**] gas turbine turbine blade dual fluid cooling steam cooling test platform