

文章编号:1674-8190(2013)04-407-07

航空发动机燃烧室冷却结构的发展及 浮动壁结构的关键技术

商体松,赵明,涂冰怡

(西北工业大学 动力与能源学院,西安 710072)

摘要:随着航空发动机燃烧室性能的提高,燃烧室火焰筒热防护问题显得越来越突出。燃烧室内采用浮动壁结构可以减小壁面热应力,改善火焰筒的受力状况。介绍了火焰筒冷却结构的发展历程,包括气膜冷却、多斜孔冷却和多孔层板冷却,并对它们的优缺点进行了阐述;分析了浮动壁冷却结构的发展状况、技术特点和在浮动壁结构基础上采用冲击/发散气膜复合冷却结构的效率;阐述了浮动壁结构的关键技术(材料、制造工艺和冷却结构特征等);展望了冷却结构和浮动壁火焰筒在未来航空发动机中的应用。

关键词:航空发动机;燃烧室;火焰筒;浮动壁

中图分类号:V231.1

文献标识码:A

Development of Aero-engine Combustor Cooling Structure and the Key Technologies of Floating-wall

Shang Tisong, Zhao Ming, Tu Bingyi

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: With the performance improvement of aero-engine combustor, it becomes more and more important to cool the flame tube of combustor. The combustor with floating-wall can effectively reduce the wall heat stress and improve the force situation. The development process of flame tube cooling structure which including film cooling, multi-slant-hole cooling and laminates cooling are introduced, and their advantages and disadvantages are described. Then, the advanced technical characters of floating-wall such as development situation and key components are analyzed. The cooling type of impingement/effusion which based on floating-wall structure be of higher efficiency. Next, the key technologies which include materials, manufacturing processes and characteristics of the cooling structure of floating-wall have been elaborated. Finally, the application of cooling structure and flame tube floating-wall on future aero-engine is prospected.

Key words: aero-engine; combustor; flame tube; floating-wall

0 引言

燃烧室的基本功能是在十分恶劣的环境条件下组织高效燃烧,把燃油的化学能转变为热能,燃烧过程发生在燃烧室的功能单元——火焰筒内部。

通常情况下,燃烧室内火焰温度很高,火焰筒壁面承受着高温引起的热引力、热腐蚀,为了防止过热、烧蚀和延长寿命,必须对火焰筒进行有效地冷却,以保证燃烧室在较长的寿命期内安全可靠地工作^[1]。

随着航空发动机燃烧室进口压力、温度和出口温升逐步上升,以及高温燃气向火焰筒壁面的热辐射强度进一步增强,冷却空气的温度日趋增高及可用的冷气量愈来愈少,这使火焰筒壁温问题显得越

收稿日期:2013-05-20; 修回日期:2013-09-02

通信作者:商体松,1244662323@qq.com

来越突出。解决该问题的主要途径是通过提高火焰筒材料的许用工作温度、改进火焰筒壁面结构以提高空气冷却效率。而目前使用的高温合金材料的许用温度已很难提高,因此提高火焰筒性能的唯一可靠的方法,是改进火焰筒壁面结构,提高空气冷却效率^[2]。

目前,国内外的燃烧室火焰筒已由纯气膜冷却发展为冲击、气膜、层板等多种冷却方式或多种冷却方式相结合的复合冷却方式,冷却结构也由最初的单层壁发展到双层壁、浮动壁等。其中,浮动壁冷却结构正是在此环境条件下发展起来的,在未来航空发动机燃烧室上具有优良的发展前景。

浮动壁冷却结构是一种将先进冷却技术和创新火焰筒结构相结合的新技术,解决了常规火焰筒在高负荷条件下因火焰筒壁温不均匀、火焰筒壁同时承受机械载荷和热负荷而引起的低循环疲劳裂纹等问题。20世纪80~90年代,国外航空先进国家研制的推重比10一级军用航空发动机(F119、YF120、EJ200以及F414)燃烧室均采用了先进高效的火焰筒冷却技术,其中美国普惠公司生产的F119发动机燃烧室采用了浮动壁火焰筒冷却技术。虽然国外研制的浮动壁燃烧室已成功应用于航空发动机,并在改善火焰筒结构壁面受力状况、提高冷却效率、延长火焰筒寿命方面效果显著,但我国并未成熟地掌握相关技术,需要不断加强这方面的理论与试验研究^[3]。

本文介绍了火焰筒冷却结构的发展历程,分析了浮动壁冷却结构的发展状况,阐述了浮动壁结构主要技术和技术特点,最后展望了冷却结构和浮动壁火焰筒在未来航空发动机中的应用。

1 火焰筒冷却结构发展历程

目前,解决先进燃气涡轮发动机高温升燃烧室火焰筒耐热的主要途径是采用先进的冷却方案。发展趋势是由早期的纯气膜到高效的复合冷却。

1.1 气膜冷却

气膜冷却是较为传统的冷却方式,其研究起步较早,具有高效可靠的优点,曾广泛应用于航空发动机燃烧室及高温部件的冷却中,目前仍广泛应用

于发动机的冷却结构中。气膜冷却是由壁面狭缝或者小孔吹出一股较冷的二次流体来阻隔主燃气对壁面加热的一种热防护措施,两种较为常见的分别以总压头和喷溅冷却环为进气形式的气膜冷却结构,如图1所示^[3]。该种结构的火焰筒整体刚性好、冷却流量控制精度高。其缺点是冷却形式单一、冷却效率低、对冷却气流的需求量大,同时沿轴向对火焰筒壁面冷却不均匀,在火焰筒内形成较大的温度梯度,从而产生较大的热应力,导致低循环疲劳故障,降低火焰筒使用寿命^[4]。

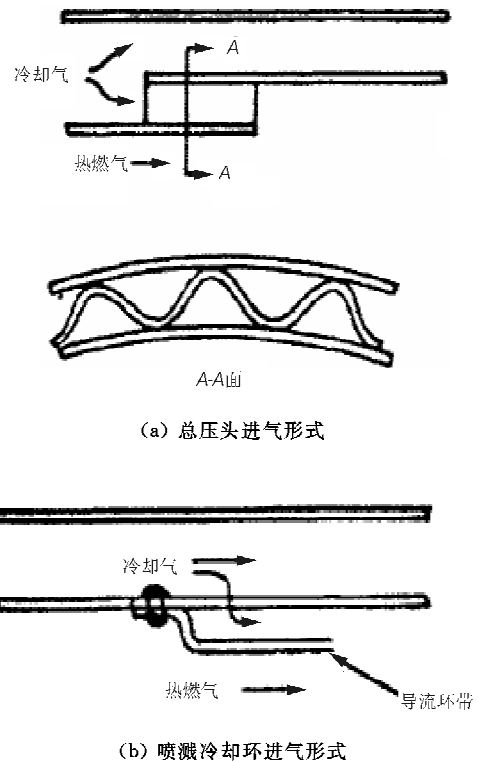


图1 气膜冷却结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of film cooling structure

1.2 多斜孔冷却

为了提高冷却效率,解决高温升燃烧室火焰筒的耐热难题,提出了多斜孔冷却结构,多斜孔冷却又称全覆盖气膜冷却或发汗冷却^[5]。多斜孔结构是利用电火花、电子束数控打孔或者激光打孔等工艺在火焰筒壁面上加工出大量密布的直径很小的孔(孔径一般为0.5~1.0 mm),冷气利用内外环的压差进入小孔,以一定角度入射到高温主流中,将高温主流与壁面隔离,起到保护壁面的作用,多

斜孔冷却结构示意图如图 2 所示。

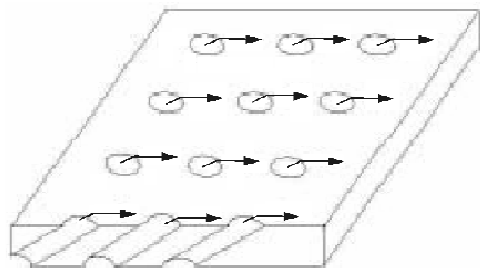


图 2 多斜孔冷却结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of multi-slant-hole cooling structure

与常规的气膜冷却形式相比,多斜孔冷却可节省约 40% 的冷却气量,综合冷却效率可达 0.9,冷却方式比纯气膜冷却的火焰筒壁温约低 150 K,可有效避免径向温度分布较大的问题,有利于延长火焰筒的寿命^[6]。

1.3 多孔层板冷却

层板冷却又叫类发汗冷却,是一种高效的冷却结构,英、美、俄等国开展了该技术的研究并成功应用于燃烧室火焰筒。层板一般是由数层经电化学腐蚀的金属板扩散焊接而成,有的是直接在每层的层板上加工出内部流动通道,进气孔进来的冷却气体先冲击到层板上,然后沿着气流通道流向出气孔;有的是在层间通道中,布满许多扰流柱,用来增加换热面积和加强冷却气对壁面的冷却^[7]。多孔层板冷却用气量较少,火焰筒冷却气量比纯气膜时减少了约 60%,明显提高了冷却效率。美国第四代战斗机 F-22 的动力装置 F119 涡扇发动机的加力燃烧室和喷口隔热板采用了多孔层板冷却结构。美国联合攻击战斗机 (JSF) 高性能涡扇发动机 F136 的主燃烧室也采用了多孔层板冷却火焰筒,耐热性能得到了极大提高。然而,层板工艺复杂、价格昂贵、通道易被氧化物堵塞等,并且结构重量大,压力损失也较大^[6]。因此,后续发展起来的浮动壁冷却结构与之相比,不失为一种更为理想的冷却结构。层板冷却结构如图 3 所示^[8]。

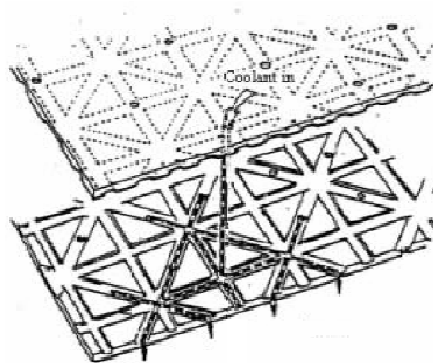


图 3 层板冷却结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of laminates cooling structure

2 浮动壁结构的应用与发展状况

2.1 国外

普惠公司早就结合 E3 节能发动机计划研究浮动壁燃烧室,美国空军和海军也曾资助 GE 公司研究浮动壁燃烧室,但前者发展得最为成熟,并发展了三代浮动壁燃烧室。20 世纪 90 年代初,普惠首先将其应用到 V2500 发动机,并取得成功,生产的 V2500 浮动瓦块式火焰筒结构示意图如图 4 所示。在 V2500 之后,普惠公司又将其应用到 F119 和 PW4084、PW6000 等发动机。

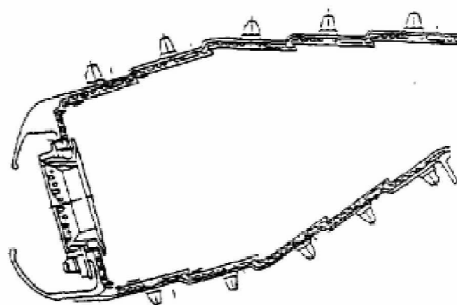


图 4 V2500 发动机浮动壁结构火焰筒结构

Fig. 4 Floating-wall structure of V2500 aero-engine flame tube

20 世纪 70~90 年代,美国开展的“高效节能发动机(E3)研究计划”、“发动机热端部件技术(HOST)计划”以及“综合高性能涡轮发动机技术(IHPTET)计划”均对浮动壁火焰筒的冷却设计技术进行了研究。在 E3 研究计划中,普惠公司选用逆向平行流翅壁结构冷却方案,而 GE 公司选用冲击+气膜式双层结构冷却方案^[9]。此外,为了满足

火焰筒指标,两个公司的内外火焰筒采用周向和径向的分块式结构,大大减少了燃烧室正常工作条件下由热环境所诱发产生的应力。分块式的火焰筒结构是浮壁式火焰筒的较早形式^[10]。HOST计划采用冲击+气膜复合冷却浮动壁结构,使热应力和疲劳裂纹减至最小,并在TF30-P-100发动机火焰筒中得到验证。IHPDET计划验证了在宽广油气比范围和高温升情况下,冲击气膜浮动壁火焰筒只需极少的冷却空气。上述研究成果在V2500、PW4000和F119等军、民用航空发动机中得以成功应用^[4]。

在IHPDET计划下,惠普公司还在环形燃烧室试验件中验证了涂有C/SiC陶瓷基复合材料涂层的浮动瓦片和冲击气膜冷却技术。此种陶瓷基复合材料耐腐蚀、耐高温性能强,是未来浮动壁冷却结构上的一种理想化材料。

2.2 国内

国内对燃烧室火焰筒浮动壁结构的研究起步较晚,多数仍处于试验研究阶段。赵清杰等^[11]进行了浮动壁结构下冲击/发散高效复合冷却的试验,并测试了火焰筒壁温分布;许全宏等^[12]在单头部高温高压燃烧试验台上对三种结构的冲击/发散双层壁实验件进行单头部高温高压综合验证考核试验,试验检验了冲击/发散双层壁冷却方式在真实工况下的冷却效果。

针对浮动壁结构的参数设计,国内也有许多学者进行了相关研究。高建辉等^[13]以浮动瓦块为研究对象,利用神经网络与遗传算法相结合的方法对冷却结构变量和安装位置变量进行同步优化,得到了刚度和强度综合性能更优的浮动瓦块结构;石炜^[14]采取了模糊遗传算法与有限元结合的方法对浮动壁结构的合理性进行优化设计;张宏建^[15]采用递进式优化策略对浮动壁结构中的支杆布局和壁板厚度以及冲击高度、冲击孔冷却孔布局等变量进行优化,以期找出能够与火焰筒最优匹配的浮动壁结构,为燃烧室技术进步提供可靠的技术途径。

3 浮动壁结构的主要技术特点

浮动壁火焰筒为双层壁结构,外层为承力部件,内层为承热部件(亦即浮动壁),火焰筒浮动壁通过一定数量的浮动瓦片组成,浮动瓦片结构示意图

如图5所示。浮动瓦片一般是耐热、耐腐蚀、抗氧化能力好的优质高温合金、镍基合金材料^[16]。瓦片通过支杆、螺柱挂靠在外层承力壁上,在每片瓦片的中部均有一处主定位,其余为辅助定位,相邻瓦片之间的四周均留有间隙,可保证瓦片结构在内层热应力作用下能够沿轴向和周向产生小幅度的自由膨胀,从而达到释放火焰筒热应力、改善火焰筒壁面受力状况、大幅延长使用寿命。某型发动机燃烧室浮动壁火焰筒结构示意图如图6所示^[17]。

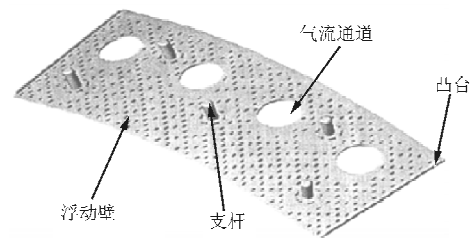


图5 浮动瓦片结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of floating tiles structure

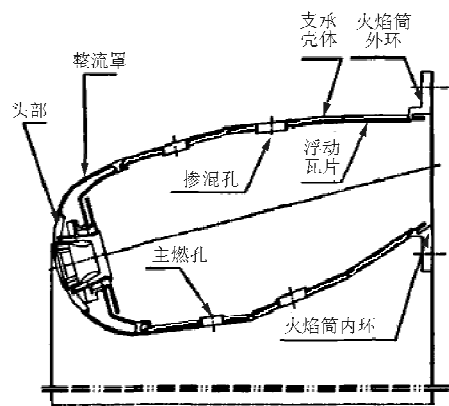


图6 浮动壁火焰筒结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of floating-wall flame tube

惠普公司发展的第三代浮动壁结构所采取的冷却方式为冲击/发散气膜复合冷却(或称冲击+致密孔发散气膜冷却)结构,如图7所示。它是一种双层壁结构,内层为多斜孔壁,外层为直孔壁。从外层壁小孔进入的冷却空气冲击到内层壁,然后进入斜孔内,最后进入火焰筒内沿多斜孔壁内侧形成基本连续均匀的保护气膜,冷却空气经过冲击和斜孔内时强行对流换热以及随后形成的气膜保护可以极大地提高冷却效率。PW6000发动机采用了冲击/发散的浮动壁火焰筒冷却结构^[10,18]。

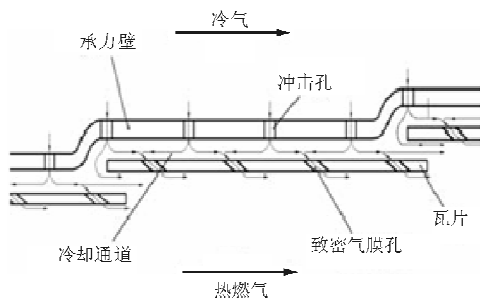


图 7 冲击/发散气膜复合冷却结构

Fig. 7 Impact and effusion cooling floating-wall structure

针对高温升燃烧室,国内在浮动壁基础上研究了冲击+扰流柱阵列对流的浮动壁火焰筒冷却和冲击+致密孔发散气膜(或称冲击/发散气膜复合冷却)的冷却形式^[10],冲击+扰流柱阵列对流冷却结构如图 8 所示。它是双层壁结构,冲击孔在火焰筒的外层壁,冷却空气在外层壁与机匣构成的二股通道中流动,冷却空气沿外层壁的冲击孔进入外层壁与浮动瓦片形成强对流冷却通道内,然后经扰流柱分顺逆两个方向流动,最后从相邻瓦片间的气缝槽流出,在瓦片热边的前后缘形成保护气膜,从而使浮动瓦片壁温保持在较低水平^[16]。与冲击+扰流柱结构相比,冲击+致密孔发散气膜冷却结构的不同之处是:在浮动壁上设计出一系列的致密气膜孔,冷却空气进入承力壁与浮动壁形成的气流通通道后,对瓦片进行直接冲击,然后从瓦片对应位置附近的气膜孔流出,在瓦片热边形成均匀连续的保护气膜并对瓦片进行冷却。与带扰流柱的结构相比,此种结构减轻了浮动壁的质量,具有更高的冷却效率,是当前先进航空发动机燃烧室浮动壁结构中应用最为广泛的冷却形式。

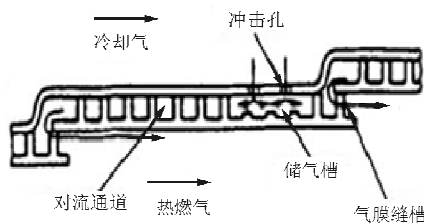


图 8 冲击+扰流柱阵列对流冷却结构

Fig. 8 Impact and array with fin-pins convection cooling structure

在燃烧室火焰筒上采用浮动壁的冷却结构,除了能提高冷却效率、改善火焰筒的壁温分布外,浮

动瓦片还具有可单独更换、拆卸简单方便、维修费用低等优点。

在火焰筒浮动壁结构的基础上,研究人员可灵活地选择先进的冷却方式和冷却材料^[19],例如:冲击+逆向对流+气膜冷却、冲击+光板对流冷却等。新型复合材料的不断发展,也为未来航空发动机的发展增光添彩,将其与浮动壁结构一起应用于燃烧室冷却结构中,必将大大提高火焰筒的冷却效率,从而改善航空发动机的整体性能^[20]。

4 浮动壁结构的关键技术

4.1 浮动壁燃烧室的材料及制造工艺

先进的材料和制造工艺技术,不仅能有效延长火焰筒的使用寿命、提高浮动壁结构的整体性能,还能减轻发动机重量、提高发动机的整机效率。

由于传统材料(钛合金、高温合金等)很难满足高温升燃烧室火焰筒的耐高温、抗氧化性能要求,因此,国外早就开始了金属基复合材料、陶瓷基复合材料、C/SiC 复合材料的研究并将其应用于燃烧室火焰筒及发动机高温部件。普惠公司将 C/SiC 复合材料涂层应用于浮动瓦块结构上,该材料能够使瓦块结构避免腐蚀,从而提高其承受高温的能力并延长其寿命。此外,GE 公司开发的高温升浮动壁燃烧室采用碳化硅纤维增强的碳化硅基复合材料的火焰筒结构,在 1 480 °C 的壁温下仍能工作,验证了燃烧室具有更高的性能。未来推重比 15 一级发动机燃烧室也把陶瓷基复合材料的浮动壁火焰筒结构作为其关键技术之一^[21]。

浮壁式火焰筒瓦块结构刚性差、尺寸精度要求高、结构复杂等难点,给火焰筒的加工过程带来了很大困难。因此,在加工过程中,除了严格控制焊接变形外,瓦型面、螺栓定位、冲击孔及扰流柱精铸的相对位置等都要非常精确^[2]。目前,浮动壁结构中的关键制造技术主要包括:浮动瓦片用精密铸造而成,采用螺纹加工并在其表面喷涂耐热涂层;冲击孔及气膜孔采用电火花或激光束加工工艺;承力壁轮廓加工一般选择精车或铣加工工艺,并对其进行热处理以保证轮廓精度。加工过程拟采用特种焊接技术、特种加工技术、热障涂层技术等。此外,为了保证冲击孔与气膜孔的位置不重叠,筒体冲击孔和瓦片装配定位孔的位置都需非常精确,因此加

工过程需采取特殊的加工方式。

4.2 浮动壁燃烧室的关键结构特征设计

要实现浮动瓦块的浮动和可靠工作,其关键结构的特征设计显得十分重要,可为后续的再优化、特征设计及其冷却效率的提高提供相关的技术支持。浮动壁的关键结构特征主要包括连接结构特征和冷却结构特征。

(1) 连接结构特征

浮动瓦块中支杆的高度、直径、数量及支杆的排布位置和不同的排布方式对冷却效率有一定影响。采用递进式分阶段优化设计法对浮动壁的力度进行优化计算以获取最佳位置分布^[15],支杆高度则由冲击高度和外套厚度决定。

(2) 冷却结构特征

浮动壁冷却结构特征与其冷却方式紧密相连,在采用冲击+扰流柱阵列对流冷却时,除了瓦块厚度、冲击孔高度、冲击孔和气膜孔排列方式以及不同的孔间距等相关参数,还需要考虑到扰流柱的数量及相关尺寸参数。在浮动壁的结构设计中,以其中一个或多个参数作为设计变量对其冷却效果进行优化。如冲击孔和气膜孔的排列中,有顺排和叉排两种排列方式,采用叉排排列比采用顺排排列冷却效果好。瓦块厚度变量需根据火焰筒承受压力及机械载荷等因素进行优化设计;冲击孔高度、冲击孔和气膜孔间距等相关变量需根据不同的冷却方式进行确定^[16]。

浮动壁火焰筒的关键结构特征设计是浮动壁结构设计的核心内容,通过对其冷却结构和连接结构进行分析,可以得出浮动壁结构的壁温分布和应力分布特征,

5 结束语

燃烧室火焰筒浮动壁结构是一种先进的冷却结构,能有效提高燃烧室冷却效率、改善火焰筒壁温分布、延长火焰筒材料的使用寿命并提高飞机发动机的整体性能。国内在浮动壁燃烧室技术研究方面虽具备了一定的基础,但与国外相比差距较大。因此,开展浮动壁燃烧室关键结构研究,探索浮动壁燃烧室设计关键技术解决途径,可加强浮动壁燃烧室应用基础研究和工程设计之间的联系,为早日实现浮动壁燃烧室这一先进结构形式在国内

航空发动机上的工程应用打下基础,从而缩短国内航空发动机燃烧室研制水平与航空先进国家的差距。

浮动壁火焰筒结构和冷却设计的工程应用前景良好,但仍有一些问题需要研究解决。未来浮动壁冷却结构在燃烧室中的应用与发展,应立足于其冷却形式及结构可靠性方面的设计和优化,并将该结构形式与先进复合材料相结合,以期尽早实现浮动壁先进冷却结构在航空发动机中的工程应用。

参考文献

- [1] 程波. 航空发动机双层壁火焰筒冷却设计研究[D]. 成都: 电子科技大学机械电子工程学院, 2011.
Cheng Bo. Cooling design studies of aero-engine double-wall flame tube[D]. Chengdu: School of Mechanical and Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)
- [2] 邵天巍, 杨秀娟, 任萍, 等. 航空发动机浮壁式燃烧室制造技术[J]. 航空制造技术, 2013(9): 55-57.
Shao Tianwei, Yang Xiujuan, Ren Ping, et al. Manufacturing technology of aeroengine floating-wall combustor[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(9): 55-57. (in Chinese)
- [3] 郭家良. 浮动壁式火焰筒壁温优化研究[D]. 南京: 南京航空航天大学能源与动力学院, 2010.
Guo Jialiang. Research on the optimization about floating-wall's temperature of the combustor[D]. Nanjing: College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [4] 胡超, 许全宏, 徐剑, 等. 冲击/发散冷却壁温分布和冷却效率研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(10): 1800-1804.
Hu Chao, Xu Quanhong, Xu Jian, et al. Investigation of the wall temperature distribution and cooling efficiency for impingement/effusion cooling scheme[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(10): 1800-1804. (in Chinese)
- [5] Champion J L, Deshaies B. Experimental investigation of the wall flow and cooling of combustion chamber walls[R]. AIAA-95-2498, 1995.
- [6] 王璐. 某型驻涡燃烧室冷却技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学能源与动力学院, 2011.
Wang Lu. Research on cooling technology of a trapped vortex combustor[D]. Nanjing: College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [7] 罗艳春, 姜晓莲, 陈宇. 航空发动机燃烧室先进冷却方式研究[J]. 装备制造技术, 2012(5): 8-12.
Luo Yanchun, Jiang Xiaolian, Chen Yu. Research on advanced cooling ways of aero-engine combustor[J]. Equipment manufacturing technology, 2012(5): 8-12. (in Chinese)
- [8] Wassell A B, Bhanga J K. The development and application

- of improved combustion wall cooling techniques[R]. ASME 80-GT-66, 1980.
- [9] Stouffer S D, et al. Development and combustion performance of a high-pressure WSR and TAPS combustor[R]. AIAA-2005-1416, 2005.
- [10] 高建辉. 浮壁式火焰筒瓦块结构的优化分析方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学能源与动力学院, 2011.
Gao Jianhui. Research on the optimization about floating-wall of the flame tube[D]. Nanjing: College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [11] 赵清杰, 李彬, 陈志杰, 等. 浮动壁燃烧室试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2004, 17(1): 17-19.
Zhao Qingjie, Li Bin, Chen Zhijie, et al. An experimental study of floating-wall combustor[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(1): 17-19. (in Chinese)
- [12] 许全宏, 林宇震, 刘高恩. 主燃烧室冲击/发散双层壁冷却方式壁温试验研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(2): 197-201.
Xu Quanhong, Lin Yuzhen, Liu Gaoen. Rig test of impingement/effusion double wall cooling methods for the main combustor[J]. Journal of Aerospace Power. 2005, 20(2): 197-201. (in Chinese)
- [13] 高建辉, 温卫东, 崔海涛. 火焰筒浮动瓦块的壁温-结构一体化优化[J]. 航空动力学报, 2012, 27(3): 588-594.
Gao Jianhui, Wen Weidong, Cui Haitao. Optimal design for temperature and structure of the floating-wall of flame tube[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(3): 588-594. (in Chinese)
- [14] 石炜. 模糊遗传算法—有限元与浮动壁结构优化研究[D]. 南京:南京航空航天大学能源与动力学院, 2006.
Shi Wei. Fuzzy genetic algorithm and finite element method of floating-wall optimization[D]. Nanjing: College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [15] 张宏建. 燃烧室浮动壁结构优化方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学能源与动力学院, 2005.
Zhang Hongjian. Structure optimization method of the float-tile[D]. Nanjing: College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)
- [16] 黎武. 浮动壁燃烧室关键结构设计研究[D]. 成都:电子科技大学机械电子工程学院, 2011.
Li Wu. Key structural design and research of floating-wall combustor[D]. Chengdu: School of Mechanical and Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)
- [17] 李彬, 吉洪湖, 江义军, 等. 浮动壁火焰筒壁温试验和计算分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(6): 771-774.
Li Bin, Ji Honghu, Jiang Yijun, et al. Experimental and numerical analysis of temperature distribution on floating-wall flame tube of combustor[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 39(6): 771-774. (in Chinese)
- [18] 许全宏, 张宝华, 林宇震, 等. 冲击加多斜孔双层壁冷却方式气膜绝热温比研究[J]. 航空动力学报, 2000, 15(4): 387-390.
Xu Quanhong, Zhang Baohua, Lin Yuzhen, et al. The adiabatic film effectiveness of the double wall with inclined multihole and discrete-hole for combustor liner[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(4): 387-390. (in Chinese)
- [19] 尚守堂, 程明, 张军峰, 等. 低排放长寿命燃烧室关键技术分析[C]//大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会2007年学术年会论文集, 2007: 1-7.
Shang Shoutang, Chen Ming, Zhang Junfeng, et al. Key technique analysis of Low emissions and long-lived combustor[C]// High-level Forum of Key Technologies of Large Aircraft and China Aviation Association Proceedings of 2007 Annual Conference, 2007: 1-7. (in Chinese)
- [20] 李功, 高云峰, 李长林. 陶瓷基复合材料浮动壁燃烧室应用进展及结构方案探讨[J]. 航空维修与工程, 2006(2): 36-38.
Li Gong, Gao Yunfeng, Li Changlin. Advances in application of ceramic-matrix composite on floating-wall combustor[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2006(2): 36-38. (in Chinese)
- [21] 王占学, 刘增文, 蔡元虎, 等. 推重比15一级发动机关键技术及分析[J]. 航空发动机, 2010, 36(1): 58-62.
Wang Zhanxue, Liu Zengwen, Cai Yuanhu, et al. Key technologies and analysis of aeroengine with thrust to weight ratio up to level of 15[J]. Aeroengine, 2010, 36(1): 58-62. (in Chinese)

作者简介:

商体松(1989—),男,硕士研究生。主要研究方向:发动机强度、振动与可靠性。

赵明(1966—),男,博士,副教授。主要研究方向:发动机强度、振动与可靠性,传热、传质与热结构。

涂冰怡(1992—),女,硕士研究生。主要研究方向:发动机强度、振动与可靠性。

(编辑:赵毓梅)