

世界航空发动机高压涡轮导向器研究综述

Research Review of High-pressure Turbine Vane in Aero-engine

何爱杰 李世峰 李万福 刘强军 孙飞龔 / 中国燃气涡轮研究院

摘要: 针对航空发动机涡轮气冷导向叶片的结构特征, 结合国内外相关工作的研究状况, 本文从多方面对高压涡轮气冷导向叶片结构与制造技术所取得的研究成果进行了总结和分析, 重点介绍了高压涡轮气冷导向叶片的结构特点与制造工艺等。

Abstract: According to the designed feature of high-pressure air-cooled turbine vane in aero-engine, the research production was generalized and analyzed from several aspects with relating to the abroad research situation, which is about to the two-gang air-cooled vane of high-pressure turbine. The structural feature and manufacture process of high-pressure air-cooled turbine vane were mainly introduced. Meanwhile, the future researching scope that is the designed and manufactured technology of high-pressure air-cooled turbine vane is discussed.

关键词: 高压涡轮; 气冷导向叶片; 结构设计; 制造工艺

Keywords: high-pressure turbine; air-cooled turbine vane; structural design; manufacture process

0 引言

为适应未来先进作战飞机对发动机的需求, 发动机推重比要求大幅提高, 目前推重比10的发动机涡轮进口温度达到了1700~1900K, 未来还将更高, 远远超过高温合金材料的熔点温度, 导致高压涡轮导向叶片的工作环境更加恶劣^[1]。为此, 现代航空发达国家在研制新型的耐高温、耐腐蚀抗氧化材料和高效热障涂层材料的同时, 还在气冷涡轮导向叶片的结构上不断创新和改进。为了提高航空发动机涡轮效率, 减少导叶缘板间的漏气损失, 除了在单叶缘板间施加封严外, 还采用了双联导叶、三联导叶和多联导叶以及整铸(整体)导向器等结构。

本文针对航空发动机涡轮气冷导向叶片的结构特征, 从多方面对涡轮子午面为非平直流道的现代航空发动机用双联气冷涡轮导向叶片技术取得的

研究成果进行了总结和分析, 阐述了航空发动机涡轮气冷导向器设计、制造的发展方向。

1 高压涡轮导向器的研究进展

1.1 高压涡轮导向叶片结构特点

研制高效冷却涡轮导向叶片的目的在于不断提高发动机涡轮前燃气温度, 减少高压涡轮端壁损失, 提高涡轮效率, 有效提高涡扇发动机的综合性能。

迄今为止, 经各国多年诸多型号发动机的应用实践证明, 减少涡轮导叶数量与采用非平直流道涡轮子午面, 以及将导叶的叶身设计成复合倾斜式结构, 已经成为减少导叶缘板间漏气损失、提高涡轮效率的手段之一^[2]。据资料记载, 将单个导叶改为双联导叶可提高约1.0%的涡轮效率, 双联或多联结构形式导叶将是今后的发展趋势^[3,4]。

20世纪80年代以来, 美国的CFM-56、E3 和F404 航空发动机高压涡轮导向叶片均采用分块组式双联结构, 即共用的上、下缘板与两个叶身分别铸出后再组焊成双叶; 前苏联的P II-33和A II-31Φ航空发动机高压涡轮导向叶片采用三叶整铸的三联结构; 英国斯贝航空发动机的多级涡轮采用单叶整铸后再组焊成三叶的三联结构。

1.2 三联气冷高压涡轮导向叶片结构特点

三联气冷涡轮导向叶片的典型结构是单叶整铸后再三叶组焊或蜡模组焊, 最后再三叶整铸。由于一模三叶整铸式三联气冷高压涡轮导叶的结构不利于定向或单晶凝固工艺的实施, 且叶片喉道面积较难控制。与单叶的铸造结构相比, 其废品率很高, 所以不宜被采用^[5], 这势必导致双联导叶将成为今后的发展趋势。

1.3 双联气冷高压涡轮导向叶片结构特点^[6]

双联气冷高压涡轮导向叶片主要分为分块组合式、单叶整铸组焊式、一模双叶整铸式等。除一模双叶整铸式双联气冷高压涡轮导叶外,由于涡轮子午面存在平直流道和非平直流道,叶身存在直叶身和复合倾斜叶身,叶片整体存在分块组合式双联和单叶整铸组焊式双联等因素,通常可组合出涡轮子午面为非平直流道(变流道)双联气冷涡轮导向叶片的两种典型结构,即分块组合式和单叶整铸组焊式下的四种双联气冷涡轮导叶。

1) 双联分块组合式气冷高压涡轮导向叶片的缘板与叶身分开铸成,即由两个叶身与共用的各一个(上、下)缘板组焊成一体。为了实现叶身与缘板的组装和焊接,需在叶身的两端设置安装头,并在缘板上设置型孔(即安装孔)。

分块组合式的双联气冷涡轮导叶包括两种结构形式:直叶身变流道分块组合式双联气冷涡轮导叶以及复合倾斜对开叶身变流道分块组合式双联气冷涡轮导叶,他们的共同点包括:

a) 叶身和缘板分开铸造,便于叶身定向凝固工艺的实现。

b) 叶身与缘板通过叶身上的安装头和缘板上的型孔连接,连接面积可以设计得大一些,采用高温真空钎焊的方法就能满足设计需要。

c) 由于叶身与缘板分开铸造,因此可以在叶身和缘板上按需要布设并加工完冷却孔(包括空间孔和异型孔)后再进行组焊,大大减少了冷却孔的加工难度。

d) 组装焊接时需要十分复杂的工装,且喉道面积难以控制。

以上两种结构形式的双联气冷涡轮

导叶还具有不同点。

直叶身变流道分块组合式双联气冷涡轮导叶的叶身为直叶身,因此可在叶身内腔中安装整体冷气导管,非常利于叶身的冷却,这是因为整体冷气导管可以对叶身的叶盆和叶背同时进行冲击强化冷却。通过改变叶身的安装角,即通过改变叶身上安装头的尺寸就可以调整导叶的喉道面积,也就是说由一套模具就可以实现喉道面积的调整,但由于该类型导叶的喉道面积是通过组装焊接来保证的,因此实施难度大。

复合倾斜对开叶身变流道分块组合式双联气冷涡轮导叶将叶身设计成复合倾斜之后,无法在叶身内腔中安装整体冷气导管。当能找到一个回转中心来转动叶身时,也可以通过改变叶身的安装角,即改变叶身上安装头的尺寸来调整导叶的喉道面积。这种导叶的喉道面积也是通过组装焊接来保证的,其实实施难度更大。

综上所述,分块组合式结构的导叶在解决叶片定向凝固、冷却孔加工和连接等问题方面有利,但是工装夹具的设计和制造难度较大。

2) 双联单叶整铸组焊式气冷高压涡轮导向叶片由单独铸造的两个单整叶组焊而成。单叶整铸组焊式的双联气冷涡轮导叶包括两种结构形式:直叶身变流道单叶整铸组焊式双联气冷涡轮导叶以及复合倾斜叶身变流道单叶整铸组焊式双联气冷涡轮导叶。它们的共同点包括:

a) 缘板与叶身为一体,叶身定向凝固工艺的实施有一定困难。

b) 两种导叶的喉道面积是在铸造单叶时保证的,实施起来比前述分块组合式的两种双联导叶难度较小。但由于两个单叶组焊时已不能改变其喉道面

积,因此不同的喉道面积需要不同的模具来实现。

c) 两个单叶是通过缘板的侧面即导叶楔形块的两侧面来连接的,连接面积较小,不能随意加大。因此,必须采用高强度焊缝的焊接方法如电子束焊或扩散焊连接,但是不必考虑叶身与缘板连接的问题。

d) 叶身与缘板为一整体,且为两个单叶组焊,在叶身上和缘板上按需要布设和加工冷却孔就受到一定的限制。

以上两种结构形式的双联气冷涡轮导叶还具有以下不同点。

直叶身变流道单叶整铸组焊式双联气冷涡轮导叶由于采用直叶身,可在叶身内腔中安装整体冷气导管,非常利于叶身的冷却。而复合倾斜叶身变流道单叶整铸组焊式双联气冷涡轮导叶将叶身设计成复合倾斜后,无法在叶身内腔中安装整体冷气导管。由于上、下缘板与叶身为一体,无法将叶身设计成对开式,只能根据需要在叶身内腔中靠叶背边或叶盆边安装导流板即半个冷气导管,对叶身的叶背或叶盆进行冲击强化冷却。

综上所述,单叶整铸组焊式结构可以较为容易地保证喉道面积、减少组装焊与加工的难度,但这种结构形式的导叶对定向和单晶凝固工艺、按需要布设加工冷却孔等技术要求更高。

2 高压涡轮导向叶片结构设计分析

高压涡轮导向叶片结构形式的选取,取决于叶片冷却设计、气动设计、制造工艺、可靠性分析等综合因素。

2.1 冷却设计分析

当涡轮导向叶片材料承受的温度高于1100℃以上时,涡轮导向叶片的高温燃气接触表面不仅需要添加隔热

涂层,还需要采取比较复杂的冷却措施,如在上、下缘板及叶身表面布设许多冷却孔^[7]。其中,对于分块组合式双联叶片来说,冷却孔的加工可在组合焊接前进行。因此,在两叶身之间的叶盆、叶背表面及上、下缘板燃气接触表面上,冷却孔的设计基本上不受空间位置、冷却孔形状和角度的限制。对于单叶整铸两叶组焊双联或三叶组焊三联结构的叶片来说,冷却孔的布设和加工都受到了不同程度的限制,均不利于冷却设计优化。所以,对于复杂冷却要求来说,分块组合式双联结构形式为最佳选择。

2.2 气动性能设计分析

为满足涡轮气动性能要求,通过改变叶片的安装角来调整喉道面积,可以满足发动机调试要求。对于子午面平直通道分块式双联结构叶片,通过改变安装头的尺寸,即可完成涡轮喉道面积的调整,只需制造一套模具。对于子午面非平直通道单叶整铸组焊双联叶片,则必须制造三套模具才能完成涡轮喉道面积的调整。另外,尽管三联叶片的涡轮气动损失比双联叶片小,但由于三联叶片的裂纹问题尤为突出。

2.3 制造工艺性分析

分块组合式双联叶片的叶身便于实现无余量熔模精密铸造以及单晶或定向凝固成型,可满足叶片不同部位的要求,并且上、下缘板也便于采用无余量精铸成型,其流道面上还可进行晶粒细化加工,且各组成部分的报废不会互相产生影响。相比之下,单叶整铸组焊双联或双联整铸的报废率比较高,三联叶片的合格率更低。所以,根据子午面平直通道和非平直通道的不同需要,分别采用分块组合式双联叶片和单叶整铸组焊双联叶片都是合理可行的。

2.4 可靠性分析

分块组合式双联叶片,其叶身和上、下缘板间采用真空高温钎焊连接,使用时能经受由冷热变化带来的应力作用,可靠性较高。单叶整铸后组焊成双叶或三叶,必须采用对接熔焊工艺,对接处厚薄均匀化程度较低,熔焊时难免会产生焊接热应力,当焊接残余应力未完全消除时,在冷热循环作用的工作条件下,极易导致焊缝区域产生不同程度的裂纹。

比较而言,组焊双联式叶片比分块组合式双联叶片的可靠性低,而组焊三联式叶片的焊缝数比双联叶片成倍增加,故其使用可靠性更差。三联叶片在铸造凝固或使用过程中,由于热应力的存在,其缘板易被拉裂。因此,子午面平直通道的叶片均采用分块组合式双联结构,而子午面非平直通道的叶片均采用单叶整铸后组焊双联结构。

3 高压涡轮导向器的发展方向

航空发动机高压涡轮气冷导向叶片设计与制造技术是研制高推重比发动机的关键。目前,发达国家通过多年的研究积累,已在高压涡轮气冷导向叶片结构设计技术方面取得了突破性的进展,但在双联、三联或多联气冷叶片的定向晶或单晶制造技术方面仍存在一些瓶颈。

随着发动机推重比的不断提高,涡轮前温度也不断上升,这势必导致对高冷效、高可靠性高压涡轮导向叶片的需求越来越迫切,因此,三联、多联气冷涡轮导向叶片的定向晶或单晶制备技术,以及叶身之间区域的柔性钻孔技术已经成为亟待解决的问题。未来研究中,应基于先进定向凝固技术与柔性制造技术,结合非平直流道涡轮子午面,采用叶身复合倾斜式结构,进行双联、三

联或多联气冷涡轮导叶整体结构与制造技术的协同设计研究,从而达到既减少导叶缘板间的漏气损失、提高涡轮效率,又减少导叶工艺制造环节、提高可靠性的目的。

AST

参考文献

- [1] 苏云亮,郭文,刘玉芳. 高压涡轮复合倾斜导叶冷却设计[J]. 燃气涡轮试验与研究,2004,17(3): 56-62.
- [2] 何爱杰,王俊才. 某航空发动机高压涡轮导向器结构设计[J]. 燃气涡轮试验与研究,1996,9(2): 36-39.
- [3] 王俊才,何爱杰. 组合式双叶片结构空心气冷涡轮导向叶片叶身与缘板的连接[J]. 燃气涡轮试验与研究,1995,8(3):24-26.
- [4] 王俊才,何爱杰. 跨音速高温涡轮复合式气冷导向叶片(双叶片) 结构设计[J]. 中国航空科技报告HJB961493, 1996.
- [5] 何爱杰,王俊才,刘明刚. 双联和三联气冷涡轮导向叶片结构分析[J]. 燃气涡轮试验与研究,1998,11(3):49-51.
- [6] 王俊才,何爱杰,刘明刚. 四种双联气冷涡轮导向叶片结构特点[J]. 燃气涡轮试验与研究,1999,12(2): 43-46.
- [7] 郭文,吉洪湖,蔡毅等. 复合式气冷涡轮导叶冷却设计与试验[J]. 航空动力学报,2005,20 (3): 456-459.

作者简介

何爱杰,研究员,硕士,主要从事航空发动机总体结构设计研究。

李世峰,工程师,博士,主要从事航空发动机涡轮结构集成设计研究。