航空涡轮叶片气膜孔飞秒激光加工工艺研究

刘华　乔娜　郑伟

【摘要】采用激光加工航空发动机涡轮叶片气膜孔，已成为了现阶段的加工趋势。与传统的微孔加工方法相比，激光加工具有重熔层小，微裂纹少的优势。然而纳秒或是皮秒激光加工小孔的孔壁仍会存在数十微米厚的重熔层，并且再铸层内通常也存在微裂纹，有的甚至会延伸至基体，这些缺陷的存在极大影响了发动机工作的安全可靠性和使用寿命。本文通过对气膜孔加工质量的研究，介绍了一种飞秒激光加工镍基单晶叶片无重熔层气膜孔的方法，提出了一套完整的涡轮叶片气膜孔加工工艺方案。

关键词：涡轮叶片；气膜孔；飞秒激光；重熔层

1. 概述

航空发动机是飞机的心脏，而推质比又是衡量航空发动机性能的最重要的指标。发动机推质比对飞机的性能有直接的影响，特别是军用歼击机要求高机动性，需要有尽可能高的推质比。然而更大的推质比要求更高的热效率，因此提高涡轮前的燃气温度是提高热效率的最简单手段。目前，先进发动机上的涡轮进口温度已达1850～1950K，大大超过了涡轮叶片材料本身能承受的温度甚至其熔点。

为了适应不断提高的涡轮进口温度，国内一方面不断改进涡轮叶片材料本身的耐温性能，例如采用定向结晶合金和单晶合金，通过消除对空洞和裂纹敏感的晶界，使合金的初熔温度相对升高，从而提高了合金的高温强度；另一方面研究采用冷却技术。目前采用的涡轮叶片冷却技术有内部对流冷却和外部气膜冷却。外部气膜冷却就是在叶片上打一排或者几排微孔，让压气机引出的冷却空气从小孔流出从而在叶片表面形成冷空气膜，使叶片与高温气流隔开。先进的冷却方法可使叶片劈面温度下降500～600K，因此气膜孔的加工质量极大地影响了涡轮叶片的冷却效果和使用寿命。

文章基于目前科研现状，研究飞秒激光加工镍基单晶涡轮叶片上的气膜孔，现已能够加工出小孔入口接近无重熔层，孔壁和小孔出口无重熔层、无微裂纹，质量稳定的气膜孔，精度好，效率高，形成一套完整的气膜孔加工工艺方案。

2. 工艺分析

（1）设计要求　某机型涡轮叶片为单晶镍基高温合金叶片，空心气冷结构，内部形腔复杂。叶片上有12排共117个气膜孔，不均匀地分布在叶片曲面上，每个气膜孔的空间角度不同，孔的轴线与加工位置表面法线夹角为0°～60.7°不等，不同气膜孔位置的壁厚尺寸不同，同时孔径有$0.25^{+0.05}_{0}$mm、$0.28^{+0.05}_{0}$mm、$0.30^{+0.05}_{0}$mm、$0.35^{+0.05}_{0}$mm、$0.40^{+0.05}_{0}$mm五种规格；气膜孔位置度为对设计基准偏差≤ϕ0.3mm，孔壁表面重熔层厚度≤0.02mm，表面粗糙度值为3.2μm。这是一个典型的涡轮叶片气膜孔加工案例，孔数多、直径小，且精度要求高于一般的叶

片气膜孔精度要求，因此本工艺研究对于一般涡轮叶片气膜孔加工有较大的参考意义。

（2）工艺对比　涡轮叶片气膜孔常用的加工方法有电火花加工、电液束加工和激光加工。

电火花加工是通过电极放电产生瞬时高温来熔化或者蒸发材料，最终将电极的形状复制在工件上，是目前采用最广泛的气膜孔加工方法。但是采用电火花加工会存在以下问题：加工曲面上的小孔可能出现电极被挤偏而导致小孔空间角度不正确，电极消耗导致加工精度低，电火花加工出的小孔孔壁存在0.02～0.03mm厚的重熔层，重熔层内可能存在微裂纹，各个小孔高度不同加工深度不同，加工准备编程困难等等。

电液束加工是电化学加工的一种，通过把“阴极化”的电束液高速射向阳极材料，使材料发生电化学溶解，实现工件的加工。这种方法加工出的气膜孔无重熔层，无热影响区，成孔质量较好。但该种加工方法存在加工效率低下，玻璃管电极易碰碎等缺点。

激光加工是利用聚焦的高能光束使材料在极短时间内受热熔化及气化，具有效率高，精度高，成孔重熔层小，微裂纹少的优势，过去一般使用纳秒激光或是皮秒激光，加工时小孔的孔壁仍会存在数十微米厚的重熔层，如今飞秒激光技术已经成熟，采用飞秒激光制孔可以做到无重熔层无微裂纹，这又是一个质的飞跃。

涡轮叶片气膜孔加工通常是在所有机械加工工序完成后进行，因此在此工序上造成的任何超差或报废都会造成不小的经济损失。而电火花和电液束加工都有着较大的不合格几率。对比以上种种，采用飞秒激光加工气膜孔具有非常明显的优势。

3. 工艺研究

（1）工艺方法　在正式加工样件前，首先进行气膜孔加工参数的优化，保证加工出气膜孔的尺寸精度、重熔层厚度等达到设计要求，我们采用了同材料同厚度样件进行测试。

为了获得较高的加工质量，研究采用了公司自主研发的四光楔扫描模块，在四个光楔进行自转的同时通过程序控制四个光楔之间的夹角变化，激光通过四个光楔后光斑会产生螺旋线轨迹，光斑从圆心点螺旋扩大到设定的最大圆径，再从最大圆径螺旋缩小到圆心点上，如此往复。该种扫描方式能够快速去除材料，但由于在去除材料过程中小孔内空间较小，一部分未能溅射出去的熔化材料会重新附着在孔壁上，尤其是小孔入口处，因此小孔内会存在部分重熔层、熔渣等。经螺旋切成形的小孔样貌如图1所示。

为保证小孔孔壁质量，需要再采用扫环的方法去除孔壁重熔层、毛刺。通过程序设定好四个光楔之间的夹角后，四个光楔同步自转，激光通过四个光楔后光斑会产生环形轨迹，该种扫描方式能够修整小孔边缘，由于粗制孔后小孔内有较大空间，熔化的材料很容易被高压的冷却空气带走，因此能够做到无重熔层无熔渣，但该种扫描方式不能去厚度较大的材料，一般用于精加工。经扫环加工后的小孔样貌如图2所示。

该种加工方法不仅可以加工出较高质量的气膜孔，而且加工出的孔径尺寸也能达到设计要求，不会出现激光制孔常见的锥孔现象。以其中$0.25^{+0.05}_{0}$mm气膜孔为例，小孔出入口尺寸如图3所示。

经过超声波清洗后采用线切割剖开小孔，在200倍率电子显微镜下观查重熔层孔壁质量，可以观测到小孔孔壁粗糙度优于线切割形成的镜面剖面，完全满足设计要求，且孔壁上无熔渣，无微裂纹，如图4所示。经金相检测，未在小孔出入口及孔壁上发现重熔层，实现了无重熔层气膜

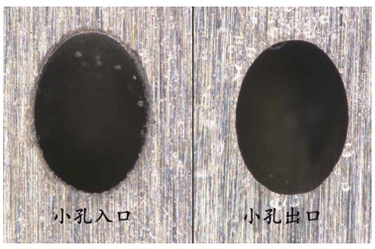

图1　螺旋切成形的小孔样貌

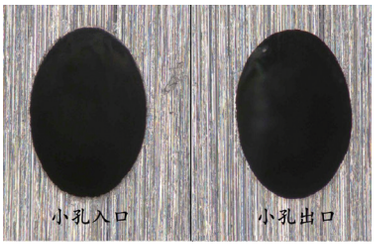

图2　扫环成形的小孔样貌

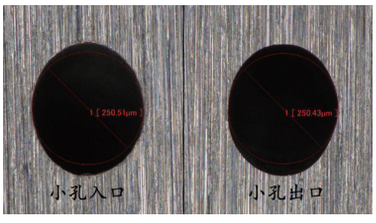

图3　$0.25^{+0.05}_{0}$mm气膜孔出入口孔径寸

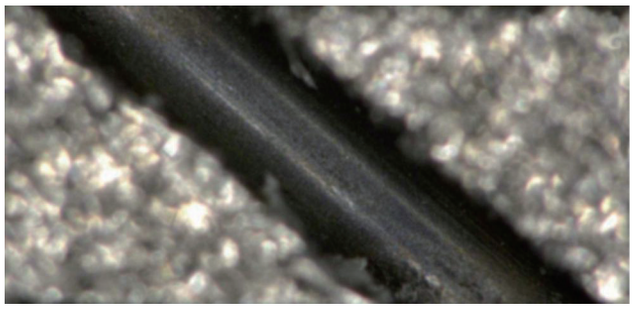

图4　气膜孔孔壁质量

孔的加工，达到设计中孔壁表面重熔层厚度≤0.02mm的要求。

（2）加工准备　在平板材料上测试好各规格孔径的加工参数后，还需要进行正式加工前的准备工作。

首先，夹具设计：涡轮叶片气膜孔的位置度要求较高，为了保证位置度，需使用专用夹具。加工时采用五轴机床，设计一套夹具就可以完成全部角度的气膜孔加工。由于激光加工是非接触加工，无切削力，仅需要考虑装夹方便，定位准确。因此设计了一套以榫齿和侧平面为定位基准，叶片中心线与夹具回转中心重合的夹具，如图5所示。

其次，对壁保护：因为激光具有高方向性，在打通叶片上的小孔后，会对叶片内腔对壁造成损伤。参考以往加工经验，可以使用直径≤0.2mm的二氧化硅作为涡轮叶片激光加工中的对壁保护介质。先对二氧化硅进行研磨，然后将二氧化硅小颗粒通过涡轮叶片顶端的孔灌入叶片流道，填充满叶片的内部型腔，做好对壁保护后再进行激光打孔。

这样激光在透过小孔时，受到对壁前二氧化硅颗粒的散射、反射以及衍射作用，使得激光无法照射到对壁，或者辐照在对壁的激光光斑变大，能量减小，这样辐照在对壁的激光功率密度变小，从而减弱或消除激光对对壁的损伤。打完孔后，用流水通过涡轮叶片顶端的孔将流道内的二氧化硅颗粒冲出，可与超声波清洗穿插进行，保证叶片腔体内无二氧化硅颗粒附着。待二氧化硅颗粒完全被冲出后，用热风吹干，完成零件的清洗。

（3）工艺加工　由于该涡轮叶片气膜孔孔数多，且孔位坐标都不同，但加工方法相同，因此将各个孔的坐标表格和参数表格集成到西门子840D系统中，如图6所示。在表格中只需要输入每个孔的5轴坐标、孔位壁厚，旋切工序和扫环工序的每层扫描时间，每层进给量，孔径设定等参数，采用宏程序调取表格中各个参数，可以依次完成所有气膜孔加工，编程快捷准确且易于排除错误。

在加工时，工件实际尺寸和理论尺寸有一定的差别，在设定好五轴坐标情况下，*Z*轴高度一定会有偏差。当有较大的偏差时就会出现明显的离焦现象，离焦状态使落在样件表面的激光光斑

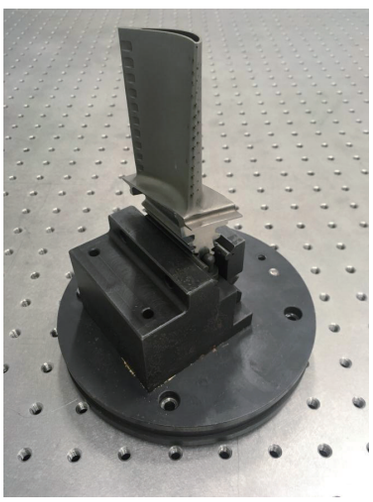

图5　叶片夹具示意

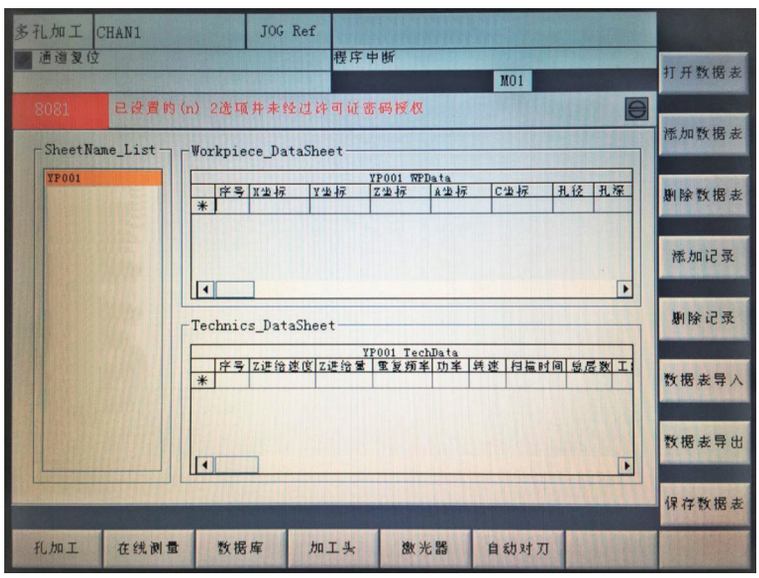

图6　西门子840D集成EXCEL表格界面

变大，能量减小，会影响孔径尺寸及孔壁质量。针对这个问题，本研究增设红外自动对焦模块与工控机相联，加工前利用程序从坐标表格中依次调取所有孔位坐标进行焦点校正，当有偏差时程序会以实测焦点为准并将其补偿到坐标表格中，如此能够消除理论焦点与实际焦点不同带来的问题，并且在理论焦点与实际焦点相差过大时中止程序并发出警报，预防孔位坐标出错。

各气膜孔实际孔位的壁厚尺寸和理论壁厚尺寸也有差别，但由于激光具有高方向性和高强度性，因此在一定范围内的壁厚尺寸差别对孔径影响不大。

我们经过大量试验得到，采用理论壁厚编制的程序，在加工实际壁厚尺寸±0.2mm范围内小孔时，加工出来的小孔孔径尺寸和孔壁质量不会有太大偏差，这是激光加工的另一大优势。

4. 结语

激光加工出无重熔层或接近无重熔层的叶片气膜孔技术的实用化，是国内激光加工发展的一个方向。应用先进的激光新器件，完善加工工艺，选择合适的后续处理方法，是从根本上提高激光加工小孔质量，同时又能满足叶片气膜孔大批量加工要求的基本途径。本研究中从以上三点出发，已形成了一套成熟、完整的工艺方案，可以快速加出工出无重熔层的航空涡轮叶片气膜孔，证明了飞秒激光加工是一种高效、优质的叶片气膜孔加工方法。本研究可以为一般的叶片气膜孔加工提供借鉴，特别是研究中的对壁保护、焦点校正，编程优化等方法，极大化地便捷了加工，提高了加工精度，这也可以为其他高精度零件的加工提供参考。

目前已采用该工艺方案加工出了一批高压涡轮叶片，实现了高效，高可靠性的加工，为今后的批量生产打下坚实的基础。

参考文献：

[1]廉筱纯，吴虎.航空发动机原理[M].西安：西北工业大学出版社，2005.

[2]张聚思，等.新航空概论[M].北京：航空工业出版社，2010.

[3] 施文轩，张明歧，殷文.电液束加工工艺的研究及其发展[J].航空制造技术，2001（6）：25-27.

[4] 张晓兵.激光加工涡轮叶片气膜孔的现状及发展趋势[J].应用激光，2002，22（2）：227-229，246.

作者简介：刘华等，中科中涵激光设备（福建）股份有限公司

MW 20171025

史陶比尔全新TX2系列机器人亮相工博会

在2017年上海·中国国际工业博览会上，史陶比尔工业机器人事业部坚定地以其全新展示概念，聚焦产品研发以及机器人缤纷世界。“有史以来观众第一次亲身探索到我们‘人与机器’理念背后的真实，”史陶比尔工业机器人事业部经理张振惠先生应许道。

得益于开拓性的安全功能，TX2系列六轴机器人能够真正满足不同程度人机良好交互的要求。人们可以用多种方式使其与操作人员共享工作区域并保证安全运行，最终达到“携手”工作的目的。TX2系列不仅适用于少品种、大规模生产，也适用于多品种、小批量生产。

TX2系列六轴机器人

在上海，史陶比尔展示了机器人如何作为人力搭档在真正的智能工厂中完美运行，最终向观众证明工业4.0、物联网和人机交互已彻底落实。

此外，凭借新产品的通信能力，生产过程得以更加透明、更有效率。用户通过智能手机或平板电脑就可以远程监控机器人运行情况。兼容工业4.0的TX2产品数据可以随时通过合适的app下载。新的控制系统还包含远程维护工具，使人们在办公桌上直接进行机器人检查成为可能。

（史陶比尔）