

叶片气膜孔加工与测量技术的现状与发展趋势*

董一巍^{1,2}, 吴宗璞¹, 李效基¹, 殷春平¹, 尤延铖¹

(1. 厦门大学航空航天学院, 厦门 361005;

2. 厦门大学深圳研究院, 深圳 518057)

[摘要] 高推重比航空发动机普遍采用气膜冷却技术, 叶片气膜冷却孔的加工精度直接影响发动机效能。气膜冷却孔具有孔径小、数量多、深径比高、空间角度复杂的特点, 其加工难度大、成形精度要求高。针对当前国外对叶片气膜孔加工技术与装备的严格保密, 以及国内气膜孔加工中存在的几何精度偏低、质量不稳定的现状, 对气膜孔加工的现状与发展趋势进行归纳总结, 为气膜孔加工技术与装备的发展提供参考。首先, 概述了叶片气膜孔精确加工的必要性及其重要性, 分别介绍了现有气膜孔的加工方法, 分析了当前加工方法存在的问题与面临的挑战。鉴于气膜孔精密测量的需要, 介绍了现有的气膜孔测量技术。最后, 根据气膜孔加工与测量的技术现状及关键核心问题指出了气膜孔加工与测量技术的发展趋势。

关键词: 涡轮叶片; 气膜冷却; 气膜孔加工; 气膜孔测量; 超快激光

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.13.016



董一巍

博士、助理教授、美国麻省理工学院博士后, 主要从事航空先进制造工艺力学与无损检测技术研究, 主持参与了国家自然科学基金、广东省自然科学基金、福建省高校产学研重大项目等多项科研项目, 撰写论文 40 余篇, SCI/EI 检索 10 余篇。

现代航空燃气涡轮发动机涡轮前温度已经超过 2000K^[1-2]。即便是目前较为先进的涡轮材料如英国罗罗公司近年研制的第 4 代单晶合金 RR3010, 能够承受约 1450K 的高温, 也明显低于涡轮前温度^[3]。为确保涡轮叶片能在高温环境下可靠长寿命服役, 就需要借助热防护技术与冷

却技术。其中, 气膜冷却作为一种有效的冷却手段, 已被广泛应用于航空发动机的涡轮叶片上, 有效促进了航空燃气轮机性能和效率的提高。

图 1 所示为典型气膜冷却空心涡轮叶片铸件。气膜冷却是在发动机热端部件的表面轮廓上设计大量孔径约 0.1~0.8mm、孔深达 3mm 以

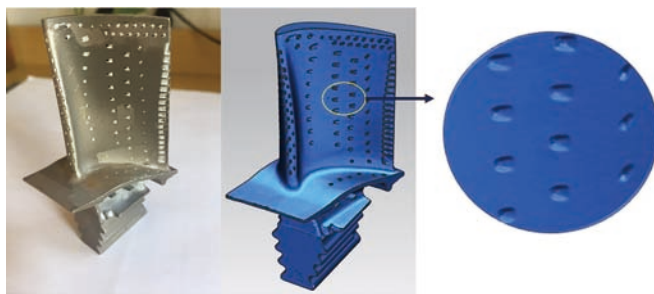


图1 某型航空发动机气膜冷却叶片

Fig.1 A typical hollow turbine blade with cooling holes

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51705440); 航空科学基金项目(20170368001); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(XMU, 20720180072); 深圳市基础研究资助项目(JCYJ20170818141303656)。

上的小孔,利用部件内部释放的冷空气,通过微小孔内对流在部件表面形成薄层冷气膜来达到隔离高温燃气保护部件的目的^[4]。气膜冷却效率是材料、几何参数及其耦合作用在高温高压三维非定常流场下的响应,与气膜孔的形状与位置参数息息相关。

气膜冷却技术的关键在于气膜孔的设计与布局。除了常规的圆柱形孔,当前广泛用于涡轮叶片的主要是异型孔,即具有较为复杂三维形状的孔。Bunker^[5]总结了过去数十年气膜孔的演化过程,并大致将异型孔分为4类,如图2所示,其中, D 为圆孔段直径, L_T 为圆孔段孔长, L 为孔长, α 为孔轴线与出口壁面的夹角, β 为侧向扩张的角度, δ 为松弛扩张的角度。针对异型孔气动流场的分析及气冷验证表明^[6-8],异型孔相对于圆柱形孔具有更好的冷却效率。

图3所示为中科院宁波材料所成功加工出的异型孔^[9]。这些圆柱形孔或异型孔,分布在叶片的复杂三

维型面上,而且数量众多,尺寸一般仅有数百 μm 。气膜冷却微小孔具有孔径小、数量多、深径比高、空间角度复杂、质量要求高等特点,传统的机械钻削手段无能为力,目前主要采用特种加工方法完成,包括电火花打孔、电液束打孔、激光打孔等。

气膜孔加工现状

电火花打孔是目前较为成熟的一种气膜孔加工方法,国内外广泛应用于气膜孔的加工。快速电火花打孔能够加工出圆度和直线度好的深孔且加工速度快,不受材料硬度和韧性的限制,但对于导电性差的叶片陶瓷涂层则难以加工。针对这一问题,国内外研究者提出一系列解决办法。Mohri等^[10]在电火花加工基础上运用辅助电极法实现对绝缘陶瓷材料的加工。Kucukturk等^[11]提出了一种在绝缘材料上涂导电层并添加石墨颗粒于电解液中的电火花加工方法用于加工绝缘陶瓷材料。郭永丰等^[12]在自诱导-内冲液电火花加工

的基础上发明了一种金属电火花加工的电极旋转及夹紧装置,能够实现带绝缘陶瓷涂层的金属的高质、快速加工。Zhang等^[13]通过整合内冲液旋转电极法和辅助电极法成功在带热障涂层的镍基高温合金上加工出倾斜孔。此外,也有研究人员^[14-15]对微小孔电火花加工进行工艺上的研究。但由于传统电火花加工难以避免重铸层、微裂纹的产生,不能用于单晶涡轮叶片的加工^[16],同时还存在电极进给时刚度低、变形大等问题^[17]。这些缺点限制了电火花打孔在涡轮叶片气膜孔加工中的应用。

电液束打孔能获得较好的加工质量,中国航空制造技术研究院目前已研制出电液束加工机床,能在叶片上加工无重铸层和微裂纹、具有光滑进出口的气膜孔^[18]。但由于电液束打孔存在孔形状控制困难和电解液腐蚀等问题,目前尚未成为气膜孔加工工艺的主流技术。

激光加工通过极高的能量密度将光斑照射区域的材料加热、熔化乃至蚀除,具有非接触加工、加工质量好、精度高、加工效率高、材料利用率高、经济效益高、普适性好、热影响区域小等优点^[19-20]。目前,根据激光脉冲宽度将激光分为长脉冲激光(脉宽大于 10^{-7}s)、短脉冲(脉宽在 $10^{-7}\sim 10^{-11}\text{s}$ 之间)以及超短脉冲激光(脉宽在 $10^{-11}\sim 10^{-15}\text{s}$ 之间)^[21]。

毫秒级或纳秒级激光打孔由于存在明显的热效应,材料在快速冷却

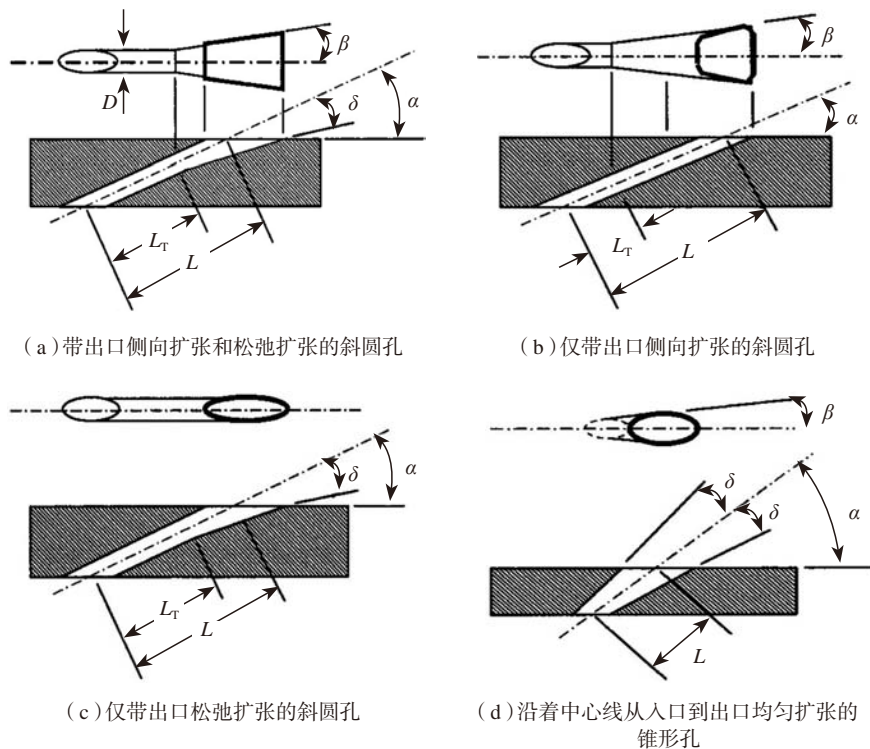


图2 典型气膜冷却孔结构示意图
Fig.2 Typical film-cooling hole configurations



图3 气膜冷却异型孔结构
Fig.3 Shaped film-cooling hole configuration

过程中不可避免地存在重铸层甚至微裂纹^[22]。而超短脉冲激光加工由于其极小的热效应,可实现极小化重铸层、极小化微裂纹加工。

因此,在涡轮叶片气膜孔的加工方面,超短脉冲激光尤其是飞秒激光得到了国内外学者的广泛研究。飞秒激光照射材料后电子吸收光子能量重建费米分布,随后通过电声耦合将能量传给晶格,直到电子温度和晶格温度达到平衡,这个时间称为电声弛豫时间(大约在 10^{-11} s量级,与材料自身属性相关)。飞秒激光由于其极小的脉冲宽度(脉冲作用时间小于电声弛豫时间),电子系统与晶格系统存在明显的能量不平衡^[23],能量在激光照射的材料表面沉积,在远高于材料熔点和沸点的温度下,材料通过等离子体喷射等方式被迅速去除并带走大部分能量,从而对激光照射区周围产生较小热影响。这使得飞秒激光加工具有无材料选择性、无机械与大面积热应变、可实现极小化重铸层、极小化微裂纹等特点。图4^[24]所示为不同脉宽激光在硅材上打孔的效果,可以看出随着脉冲宽度的减小,小孔成形质量明显提高。

虽然飞秒激光理论上可以实现高精度、小热影响区、无重铸层、无微裂纹的小孔加工,但部分学者通过试验发现飞秒激光并不能完全实现真正意义上的“冷加工”。Dausinger^[25]在研究中发现,单纯降低脉宽到皮秒乃至飞秒级别,在实际加工过程中仍难以有效防止重铸层的产生,并且可能出现由偏振导致的孔形状变形等问题。刘新灵等^[24]指出,在用飞秒激光加工定向凝固高温合金和单晶高温合金时,仍有重铸层、微裂纹存在,孔壁上存在棱状的加工痕迹。赵华龙等^[26]设计的复合激光气膜孔成形系统在加工时发现,飞秒激光打孔的效果不及预期,并未达到无热效应的要求,要取得理想加工效果需要优化加工工艺和参数。

目前超短脉冲激光用于热端部件微小孔的加工制造已发展出4种典型工艺:单脉冲加工(Single-Pulse Drilling)、叩击式加工(Percussion Drilling)、环切加工(Trepanning)和螺旋加工(Helical Drilling)^[27-28],图5^[29]为4种加工方式的示意图。

单脉冲打孔利用较大的激光功率一次将小孔冲击成形,小孔质量较差,但加工效率高,适用于薄壁件。叩击式打孔即多脉冲打孔,将激光的能量分散在多个脉冲中,通过多脉冲的作用累积进行孔加工。环切打孔融合了多脉冲打孔和线切割的思想,令激光束按预定轨迹运动,从而加工出需要的孔型。而螺旋打孔则在环切的基础上增加了激光焦点在孔深度方向上的位移,通过激光焦点下移或工件上移实现,适合加工孔径较大的深孔^[27]。

螺旋打孔中,由于待加工工件运动较为困难,激光与工件之间的相对运动一般通过激光轨迹的运动实现,激光轨迹的控制可以通过振镜或光

楔组装置实现^[30]。振镜扫描加工系统中激光被扫描振镜反射,通过一片聚焦透镜聚焦在材料表面,高速扫描振镜由电机带动沿轴旋转调整激光定位,最终达到轨迹控制的目的^[31]。光楔旋转扫描系统通过驱动两个或多个光楔改变光束角度,通过旋转整个光楔结构使光线旋转,可对光楔之间的距离与角度进行调整来改变旋转半径与入射角度。图6^[32]所示为4光楔模组控制激光螺旋扫描轨迹示意图,其中A为激光发射器,激光光束经过四分之一波片B确保出射光为圆偏振光,而后经过激光放大器C增加能量,经扫描振镜D反射后改变传输路径,经过4光楔旋转系统E后由聚焦透镜F聚焦后投射在材料表面进行加工,G为激光射头,H为整个旋切模块,I为工件,J为夹具。已有研究证明,运用飞秒激光螺旋加工能够得到无重铸层的精密微小孔^[33]。

在飞秒激光打孔中,激光参数的选取以及加工环境对加工孔的质量

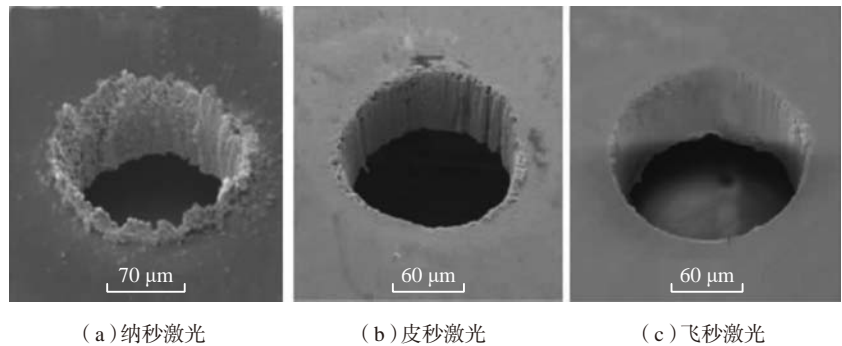


图4 不同脉宽激光打在硅材上的SEM照片
Fig.4 SEM view of microstructures formed on silicon by laser with different pulse width

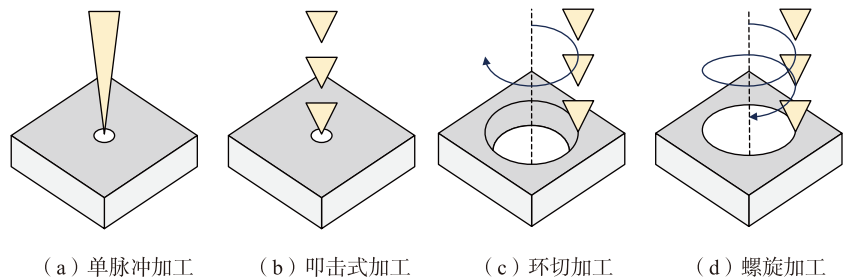


图5 微小孔不同加工工艺
Fig.5 Different processing methods for laser drilling holes

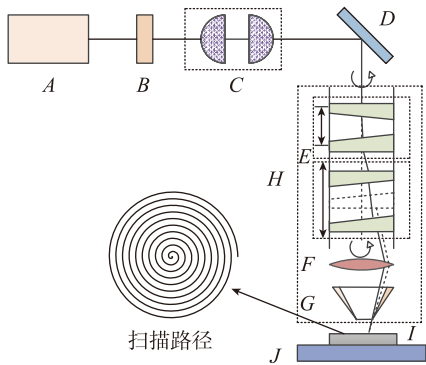


图6 激光螺旋加工4光楔系统示意图
Fig.6 Schematic of 4-wedge system of laser helical drilling

具有重要影响。激光加工参数主要包括单脉冲能量、脉冲宽度、光通量密度、重复频率、离焦量(透镜焦点与材料表面距离)等。加工环境则包括空气环境、其他气体环境及真空环境等。

北京理工大学 Jiang 等^[34]在改进的双温方程基础上,从理论上研究了重复频率对烧蚀的影响,单脉冲宽度和能量不变时,随着重复频率增大,材料达到熔点所需要的脉冲数量越小,但在重复频率达到几十 MHz 及更大后,影响可忽略。另有试验研究了脉冲宽度、光通量密度、重复频率等对激光精密打孔的影响,证明降低脉冲宽度,采用合适的光通量密度有利于孔的高精度加工,而脉冲宽度和功率不变时,重复频率增大将使孔深度减小^[35]。Weck 等^[36]通过试验研究了加工环境对于飞秒激光加工

效果的影响,比较飞秒激光在空气环境(图 7 (a))与真空环境(图 7 (b))中打孔的效果,可以发现在真空环境中打孔效果明显优于空气中打孔的效果。

鉴于超短脉冲激光具有打孔质量高但材料去除率低,而长脉冲激光材料去除率高但打孔质量低的特点,有学者提出将不同脉冲宽度激光进行复合打孔的方法。张晓兵等^[37]提出了毫秒/纳秒二次法加工小孔,即先用毫秒激光加工出一个孔径小于目标孔径的小孔,再用纳秒激光将孔扩至目标孔径。用该方法可以获得只有微小再铸层的小孔,但还存在加工精准度差、加工深度浅(仅 1~2mm)等问题; Lin 等^[38]提出飞秒/纳秒双激光加工方法,并对其作用机理进行分析,基于改进的双温方程和傅里叶传热方程对双激光作用过程进行仿真,最后通过试验对仿真模型进行验证,证实双激光加工可以在精密加工基础上显著提高材料去除率。

类似于不同脉冲宽度的激光复合加工,其余加工方式也可以通过合理复合,发挥各自的优点达到高质量气膜孔加工的目的。

Jones 等^[39]发明了基于激光-旋转电火花加工的小孔加工器,先用激光在叶片上打出一个较为粗糙的盲孔,再由旋转电火花加工方法完成孔的加工,能够精密加工气膜孔。针对异型孔的重铸层去除问题,刘发展

等^[40]提出融合了电火花加工的高精度与电解加工高表面质量的优点的电火花-电解加工,即先用电火花进行成形加工,后运用电解加工去除重铸层,成功得到无微裂纹、无内壁重铸层的高质量异型孔。He 等^[41]也进行了类似研究,试验表明电火花-电解加工的复合有利于提高孔加工效率和表面质量。尹大鹏^[42]在电火花加工后,引入磨粒流加工工艺,获得了无重铸层和微裂纹且进出口有圆角的孔。

超声加工的作用机制主要是工件的超声频振动,过程中没有材料的热物理作用,且不依赖材料导电性^[43],可以作为其他加工方式的辅助,如气膜孔加工。于滨等^[44]介绍了一种微细超声电火花加工方法,从理论分析和试验验证两方面证明其具有微小异型孔精细加工的能力。超声辅助激光加工技术可用于孔加工,一定频率和振幅的超声能够增加材料去除率和孔的深径比^[45],其基本原理如图 8^[46]所示,在激光加工工件的同时,由下方装置对工件施加超声振动,实现超声辅助激光加工。

水助激光加工能有效解决激光加工的深度受限问题,用压力腔将水经过特殊的中空光纤喷出,激光从光纤一端入射,经由光纤和水柱的全反射到达加工端。激光作用的瞬间,可

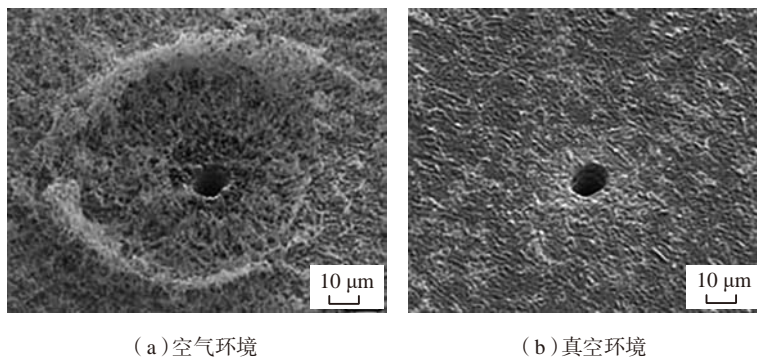


图7 飞秒激光作用小孔入口形貌SEM显微照片
Fig.7 SEM image of micro holes fabricated by femtosecond laser ablation

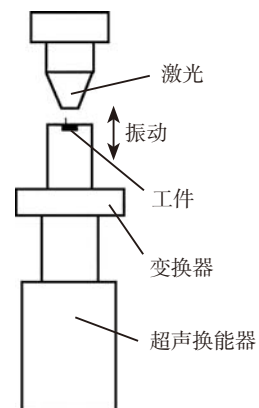


图8 超声辅助激光加工示意图
Fig.8 Schematic of ultrasonic assisted laser machining

以忽略水冷却效应,激光脉冲结束后,可由水流带走加工碎屑,并且冷却材料以免除不必要的热效应^[47]。国内有学者对这一加工方式进行研究,致力于解决激光耦合等技术难题,开发其用于气膜孔加工的潜力^[48-49]。

为解决单一激光加工对带热障涂层空心涡轮叶片材料损伤及孔质量不佳问题,日本三菱重工提出短脉冲-纤维激光打孔方法^[50],其原理是:用短脉冲激光加工陶瓷涂层,用纤维激光加工镍基合金,在陶瓷涂层-镍基合金上进行测试,得到无光镜下可见微裂纹的垂直圆孔和斜圆孔。

除此之外,还有电解辅助激光加工等新的复合加工方法被提出^[51],有望用于涡轮叶片气膜孔的加工。

气膜孔高精高效加工面临的挑战

尽管已有多种加工方法在工程实际中得到应用,涡轮叶片气膜孔的高精高效加工仍面临一些挑战。

在气膜孔加工过程中,存在孔打通之后的背壁损伤问题^[52]。例如,在激光打孔中,气膜孔打通后脉冲激光继续深入就会对叶片腔体后壁造成损伤,如图9(a)所示。图9(b)蓝色区域为激光加工小孔造成的背壁损伤,可以看出明显的熔化灼伤痕迹^[53]。背壁损伤防护的传统手段是在空心叶片腔体内填充石蜡、松脂等物质,以保护腔体后壁,随后再将填充材料清除,这种方式极为耗时效率不高^[54]。另一种思路是研发孔的实时监测设备,通过与加工系统的集成实现孔加工过程的精密控制,进而达到背壁损伤防护目的。由于加工设备及孔加工要求的多样性,往往需要针对性研发设备,高效解决背壁损伤问题仍具有一定难度。

目前,国外最先进的战机涡轮前燃气温度范围已达1811~2144K,除了发展新型先进气冷结构外,在高温

合金热端部件表面喷涂热障涂层也是一种有效的手段^[55],热障涂层一般由金属黏结底层和外面的陶瓷面层组成^[56]。陶瓷面层的材料一般是YSZ(Yttria Stabilized Zirconia),用等离子喷涂法或电子束物理气相沉积法制备。这两种方法所得涂层结构不同,加工气膜孔时的材料破坏损伤机制也不同^[57]。

涂覆热障涂层与气膜孔加工的工艺顺序是一个问题,我国目前普遍用“先打孔,后涂层”的加工工艺^[9],采用此方法需要预先放大孔径以弥补涂层带来的缩孔问题,由于缩孔效应的统计学变化规律并不能适用于所有情况,所以最后成形的孔往往难以达到预先要求^[58],而随之带来二次加工孔的麻烦,扩孔时难以精确定位,因而无法保证精度。因此,“先涂层,后打孔”是发展趋势,然而这面临着不少困难。首先,热障涂层导电性差,电火花加工这一类方法不再适用;而使用普通激光加工又有涂层分层问题^[59],激光加工会在陶瓷面层与金属粘底层、金属黏结底层和涡轮基体材料之间形成分层和材料微损伤。超短脉冲激光加工由于热效应极小,在加工带热障涂层涡轮叶片时有明显优势,张学谦等^[60]通过试验证明,飞秒激光环切加工带涂覆层的高温合金可以得到无附着残渣、无裂纹、无光镜下可见重铸层的锥孔,但仍有纳米颗粒喷射的存在。对于超短脉冲激光加工气膜孔,仍需要工艺上的完善,包括单台激光器一次

装夹完成加工、实现更复杂异型孔的三维可控加工、复杂叶片型面的定位和校正等技术问题^[9]。

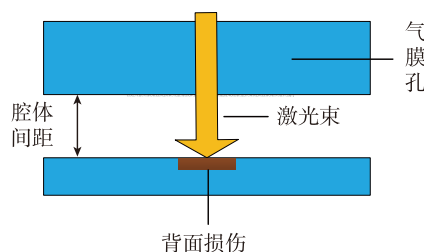
同时,面向制造的气膜孔模型必须考虑制造工艺链中存在的误差积累^[61]。目前,涡轮叶片普遍采用高性能精确凝固成形技术提高承温与承载能力。该过程是一个几何、材料和边界条件三重高度非线性耦合的复杂物理过程,这使得如何保证空心涡轮叶片的高性能精确成形,在我国乃至世界都是一项技术难题^[62]。现阶段我国空心涡轮叶片普遍存在壁厚超差与质量不稳定问题,同时,由于叶片装夹定位中产生的误差传递也缺少数学定量描述,致使基于气膜孔设计模型直接加工易出现盲孔或背壁损伤缺陷,形位精度及保持性差,难以保证叶片的气冷要求。

叶片气膜孔测量技术

加工的叶片气膜孔是否符合设计模型的精度与质控要求,需相应的测量与校准装置。孔的位置一般用轴线的位置和角度表示,对于排孔,其位置还包括孔间距、排间距。对孔本身主要包括孔尺寸与形貌、内壁表面粗糙度与表面完整性等,高深径比的盲孔常需要测量深度及内部形貌。对于异型孔来说更为复杂。

目前工程实践中,涡轮叶片气膜孔主要以接触式或非接触式的无损检测技术为主。

三坐标测量机(CMM)基于接触式方法进行测量,通过带探头的接



(a) 背壁损伤示意图



(b) 背壁损伤造成的熔化灼伤区

图9 激光加工造成背壁损伤

Fig.9 Back-wall damage during laser drilling

触式探针多点测得孔轮廓,进而得到孔的尺寸与形貌。CMM测量要求探针探头小于孔径,对于直径极小(小于1mm)的孔,研究人员研发了多种微小探针^[63-64]。其中,光纤探针能够达到较小尺寸,如崔继文等^[65]利用光纤探针,结合双光纤耦合器,开发了一种微深孔测量方法,能够对直径为0.2mm、深度为2.0mm左右的孔进行较精确的测量。Sajima等^[66]在光纤探针上安装了由压电元件驱动的振动机构,用于精密测量微孔的形貌。Sun等^[67]设计了一种电容探针,并且运用微调机构解决探针与孔的同轴定位问题,经实际测量微孔验证,具有精度高、反应快、电脑控制自动探入测量等优点。在测量机理方面,Stone等^[68]分析了接触探头与孔壁间几何关系,指出更小的探头(从而有更大的探头与孔壁的间隙)有助于减小误差,分析了探头与孔壁间隙极小时可能引起误差放大的因素,并提出减小误差的办法。接触式测量在深孔径比微小孔的测量中有重要应用,具有极高的可靠性且不受工件特性影响。但由于接触式测量通常需要进行多点接触测量,具有测量速度较慢、效率不高的缺点^[69]。

精密非接触式测量一般基于机器视觉和图像采集与分析。研究人员提出多种非接触式精密测量方法。Jin等^[70]分析了传统光学手段测量微深孔时的边缘衍射现象及杂散光的存在等问题,提出一种基于光的干涉光谱分析技术的测量方法,在硅材上的深孔测量中,得到高精度的孔深度及形貌测量结果,有望用于其他需要高深径比微孔测量的领域中。Shetty等^[71]介绍了几种现有气膜冷却孔测量技术,并设计出一种新的光学测量系统,在试验中得到的测量结果与理论分析相吻合。Ramamurthy等^[72]设计了一个装有多轴图像采集设备的自动测量系统专利,具备测量

多个异型气膜孔尺寸参数的能力。为解决在激光加工涡轮冷却气膜孔的过程中的背壁损伤问题,研究人员提出一种实时测量孔深度的方法。将设计的光学测量系统集成到激光加工平台上,能够实时监测孔深度,并且在试验中,将该系统测量的结果与将孔剖开后测量的结果进行对比,验证了该方法的可行性^[73]。

对于三维曲面上孔的位置测量,黎明发动机公司提出了一种建立叶片气膜孔工件坐标系的方法^[74],对于解决气膜孔测量难题有一定帮助;还设计了基于CCD摄像头图像采集技术的叶片气膜孔五轴光学复合坐标测量机^[75],能够满足气膜孔位置度测量的技术要求。Huang等^[69]研制了一套基于二维扫描机构、图像获取单元和精密隔振工作台的机器视觉测量系统,通过在半圆球的孔位置测量试验证明了此系统的测量精度。对于孔的尺寸与形貌测量,杨慕升等^[76]给出了一种基于CCD摄像头采集和数字图像处理的微内孔质量检测方法,在微内孔边缘几何特征分析时采用最小二乘圆拟合算法和新的圆度算法,经试验证明有较高的准确度和检测效率,具有一定的推广价值。对于气膜孔的尺寸与位置测量问题,鲍晨兴等^[77]研制了一套基于CCD图像采集和处理的叶片气膜孔快速检测系统,采用机器视觉结

合4轴机构采集气膜孔图像,运用Halcon图像处理算法库进行处理,能够测量气膜孔轴线位置和气膜孔尺寸。

由于叶片气膜孔的测量难度高,受测量设备本身测量范围或者测量工装的限制与影响,许多情况下无法通过一次或一种测量手段完成对气膜孔的完整测量。因此,需要研究多种测量手段有机结合的方法。美国SURVICE Metrology公司基于光学扫描仪结合工业CT多源测量融合方法分析了叶片气膜孔的成形精度(图10),取得一定进展,但尚未建立气膜孔的几何精度提取与分析平台。美国哈特福德大学Shetty等^[71]设计了基于二级光学扫描融合的检测平台,可有效测量气膜孔孔径、孔深信息,但无法采集气膜孔间距等位置度数据。美国通用公司在专利中提出了一种基于坐标测量机与光学扫描相结合的叶片气冷性能检测方法,但这种方法仅涉及单孔的位置度测量,而忽略了对于孔形状参数的采集^[78]。Elfurjani等^[79-80]提出由声发射作为接触信号的旋转金属丝探针测量理念,并成功搭建出测量系统,实现对0.5mm微孔的精密测量。国内也进行了类似研究,如隋鑫等^[81]基于多传感器技术,将接触式与非接触式传感器集成到坐标测量机上,提高了微孔形体测量的自动化程度。

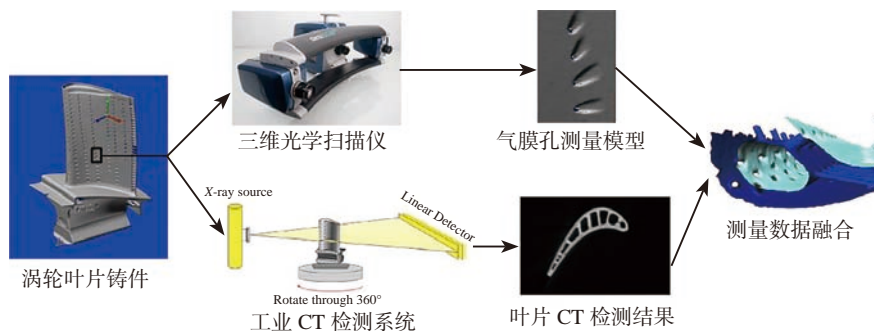


图10 SURVICE Metrology公司基于工业CT结合光学扫描测量叶片气膜孔示意
Fig.10 Measurement of film cooling hole based on ICT and optical scanning by SURVICE Metrology

未来发展趋势

伴随着发动机推重比需求的不断提高,未来涡轮前温度将进一步提高,必然伴随着涡轮叶片材料和冷却技术的不断进步,新的气膜孔构型也将不断涌现,气膜孔的加工技术也必须不断发展以适应更高的要求。随着相关研究的不断深入,诸如叶片气冷结构设计、耐热障涂层高温合金材料、气膜孔高效高精加工工艺等诸多问题均已取得了显著的进展。然而,针对复杂异形气膜孔的高效高精成形要求,其加工过程的精度、可靠性与一致性控制等方面仍面临诸多挑战,未来仍需要研究人员创新加工方法、完善加工工艺以及研发加工设备。其中,超短脉冲激光无损高效气膜孔加工、复合能场气膜孔加工技术、高深径比气膜孔无损检测技术是值得关注的研究方向。

针对叶片气膜孔的几何参数测量实践,还有待进一步开展研究。首先,单一测量手段无法满足对于气膜孔形位多参数精确采集的要求;其次,现有的测量手段多集中在对于孔径与孔深的测量研究方面,而包括孔间距、孔位置度的测量方法讨论较少。因此,亟须开展叶片气膜孔成形精度分析方法研究,开发涡轮气膜冷却孔精密测量手段与测量数据集成分析系统,为涡轮叶片气膜孔的精确测量提供理论方法与平台支持。

参考文献

- [1] 梁春华,王鸣,刘殿春. 战斗机发动机涡轮叶片层板发散热冷却技术的发展[J]. 航空制造技术, 2013, 56(9): 90-93.
- [2] 林宏镇,汪火光,蒋章焰. 高性能航空发动机传热技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
- [3] 陈荣章,王罗宝,李建华. 铸造高温合金发展的回顾与展望[J]. 航空材料学报, 2000, 20(1): 55-61.
- [4] DHUNGEL A, LU Y, PHILLIPS W, et al. Film cooling from a row of holes supplemented with anti vortex holes[J]. Journal of Turbomachinery, 2007, 131(2): 375-384.
- [5] BUNKER R S. A review of shaped hole turbine film-cooling technology[J]. Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME, 2005, 127(4): 441-453.
- [6] YAMAWAKI S, MAYA T, YASU S. Study of film cooling with shaped holes for a hydrogen combustion turbine blade[J]. Hydrogen Energy Progress, 1996, 2: 1905-1908.
- [7] GRITSCH M, SCHULZ A, WITTIG S. Heat transfer coefficient measurements of film-cooling holes with expanded exits[C]// ASME 1998 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1998.
- [8] LU Y P. Effect of hole configurations on film cooling from cylindrical inclined holes for the application to gas turbine blades[D]. Louisiana: Louisiana State University, 2007.
- [9] 张文武,郭春海,张天润,等. 涡轮叶片先进气膜冷却与相关激光打孔技术进展[J]. 航空制造技术, 2016, 59(22): 26-31.
- [10] MOHRI N, FUKUZAWA Y, TANI T, et al. Assisting electrode method for machining insulating ceramics[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1996, 45(1): 201-204.
- [11] KUCUKTURK G, COGUN C. A new method for machining of electrically nonconductive workpieces using electric discharge machining technique[J]. Machining Science & Technology, 2010, 14(2): 189-207.
- [12] 郭永丰,张国伟,葛世祥,等. 一种绝缘陶瓷涂层金属电火花加工的电极旋转及夹紧装置: CN 103447642 A2013[P]. 2013-09-13.
- [13] ZHANG G, GUO Y, WANG L. Experimental study on the machining of inclined holes for thermal barrier-coated nickel superalloys by EDM[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2016, 25(10): 4574-4580.
- [14] 朱钰铎,韦红雨,赵万生. 钛合金深小孔精微电火花加工工艺研究[J]. 电加工与模具, 2006(3): 38-41.
- [15] 张勇,赵航,张广玉,等. 微细电火花加工系统及其工艺技术[J]. 中国机械工程, 2008, 19(5): 526-530.
- [16] 朱海南. 特种加工技术在先进航空发动机中的应用与展望[J]. 金属加工(冷加工), 2016(24): 4-6.
- [17] 王志强,佟浩,李勇,等. 气膜冷却孔电火花加工用复合功能主轴[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(9): 1131-1137.
- [18] 施文轩,张明歧,殷旻. 电液束加工工艺的研究及其发展[J]. 航空制造技术, 2001, 44(6): 25-27.

- SHI Wenxuan, ZHANG Mingqi, YIN Min. R & D of electro-stream machining technology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2001, 44(6): 25-27.
- [19] 周锐, 李峰平, 洪明辉. 激光与物质相互作用及其精密工程应用[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017(2): 024201-1-024201-10.
- ZHOU Rui, LI Fengping, HONG Minghui. Laser interaction with materials and its applications in precision engineering[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica, Astronomica)*, 2017(2): 024201-1-024201-10.
- [20] SHIRK M D, MOLIAN P A. A review of ultrashort pulsed laser ablation of materials[J]. *Journal of Laser Applications*, 1998, 10(1): 18-28.
- [21] 钟敏霖, 李焱. “超快激光加工与微纳制造”专题前言[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 1-2.
- ZHONG Minlin, LI Yan. Introduction of the ultrashort pulsed laser processing and micro-nano manufacturing technology section[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 1-2.
- [22] 郭文渊, 王茂才, 张晓兵. 镍基超合金激光打孔再铸层及其控制研究进展[J]. *激光杂志*, 2003, 24(4): 1-3.
- GUO Wenyuan, WANG Maocai, ZHANG Xiaobing. Recast layer formed by laser drilling of Ni-based superalloys and progress on its control[J]. *Laser Journal*, 2003, 24(4): 1-3.
- [23] HUANG J, ZHANG Y, CHEN J K. Ultrafast solid-liquid-vapor phase change in a thin gold film irradiated by multiple femtosecond laser pulses[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2009, 52(13/14): 3091-3100.
- [24] 刘新灵, 陶春虎, 刘春江, 等. 航空发动机叶片气膜孔加工方法及其演变分析[J]. *材料导报*, 2013, 27(21): 117-120.
- LIU Xinling, TAO Chunhu, LIU Chunjiang, et al. Investigation of processing methods and development of gas holes of engine blade[J]. *Materials Review*, 2013, 27(21): 117-120.
- [25] DAUSINGER F. High precision deep drilling with ultrashort pulses[J]. *The International Society for Optical Engineering*, 2003: 346-351.
- [26] 赵华龙, 周仁魁, 赵鸿雁, 等. 一种提高表面完整性的气膜孔成形方法[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(3): 649-655.
- ZHAO Hualong, ZHOU Renkui, ZHAO Hongyan, et al. A forming method for improving surface integrity of film cooling holes[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(3): 649-655.
- [27] 夏博, 姜澜, 王素梅, 等. 飞秒激光微孔加工[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 1-12.
- XIA Bo, JIANG Lan, WANG Sumei, et al. Femtosecond laser drilling of micro-holes[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(2): 1-12.
- [28] 周明, 杨青峰, 张洪玉. 航空涡轮叶片气膜冷却孔激光加工技术进展[J]. *中国基础科学*, 2016, 18(5): 35-42.
- ZHOU Ming, YANG Qingfeng, ZHANG Hongyu. Advances in laser fabrication of the aeroengine blades' film cooling holes[J]. *China Basic Science*, 2016, 18(5): 35-42.
- [29] WALTHER K, BRAJDIC M, WAWERS W. Drilling[M]// *Tailored Light 2*. Heidelberg: Springer, 2011: 365-393.
- [30] DAUSINGER F, HUGEL H. Micromachining with ultrashort laser pulses: from basic understanding to technical applications[J]. *The International Society for Optical Engineering*, 2003, 5147: 106-115.
- [31] 陈飞. 大功率 Nd:YAG 激光振镜扫描系统的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- CHEN Fei. Study on high power Nd: YAG laser scanning galvanometer system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011.
- [32] 李效基, 董一巍, 殷春平, 等. 飞秒激光螺旋加工小孔几何参数演化实验研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 0502008.
- LI Xiaoji, DONG Yiwei, YIN Chunping, et al. Geometric parameters evolution experiment of hole during femtosecond laser helical drilling[J]. *China Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0502008.
- [33] BREITLING D, DAUSINGER F. Precision drilling of metals and ceramics with short-and ultrashort-pulsed solid state lasers[C]// *International Symposium on Laser Precision Micromachining*. Bellingham: International Society for Optics and Photonics, 2002: 104-107.
- [34] JIANG L, TSAI H L. Modeling of ultrashort laser pulse-train processing of metal thin films[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2007, 50(17): 3461-3470.
- [35] 贾海妮. 航空叶片异型气膜孔飞秒激光加工方法研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所研究生部, 2013.
- JIA Haini. Technique research of femtosecond laser pulses for drilling the shaped micro-hole of turbine blades[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, 2013.
- [36] WECK A, CRAWFORD T H R, WILKINSON D S, et al. Laser drilling of high aspect ratio holes in copper with femto-second, picosecond and nanosecond pulses[J]. *Applied Physics A Materials Science & Processing*, 2008, 90(3): 537-543.
- [37] 张晓兵, 孙瑞峰. 二次法激光加工小孔技术[J]. *航空学报*, 2014, 35(3): 894-901.
- ZHANG Xiaobing, SUN Ruifeng. Sequential laser drilling technology[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(3): 894-901.
- [38] LIN C H, RAO Z H, JIANG L, et al. Enhancement of ablation efficiency by a femto/nano-second dual-beam micromachining system[C]// *SPIE LASE*. San Francisco: International Society for Optics and Photonics, 2010.
- [39] JONES M G, HAYASHI S R, WEI B. Method for drilling hollow components: US6362446[P]. 2002-03-26.
- [40] 刘发展, 曲宁松, 朱增伟. 无再铸层异型孔的电火花-电解组合加工研究[J]. *电加工与模具*, 2010(2): 33-37.
- LIU Fazhan, QU Ningsong, ZHU Zengwei. Research on EDM-ECM combined process for machining holes without recast layer[J]. *Electromachining & Mould*, 2010(2): 33-37.
- [41] HE X L, WANG Y K, WANG Z L, et al. Micro-hole drilled by EDM-ECM combined processing[J]. *Key Engineering Materials*, 2013, 562-565: 52-56.
- [42] 尹大鹏. 航空发动机涡轮叶片冷却气膜孔加工技术[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- YIN Dapeng. Machining technology of cooling air film holes on turbine blades of aero plane engines[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [43] 贾宝贤, 边文凤, 赵万生, 等. 微细孔超声加工关键技术[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(11): 212-216.
- JIA Baoxian, BIAN Wenfeng, ZHAO Wansheng, et al. Key technologies in ultrasonic machining micro holes[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(11): 212-

216.

[44] 于滨, 赵万生, 狄士春, 等. 异形孔的微细超声电火花加工技术研究[J]. 微细加工技术, 2003(1): 44-50.

YU Bin, ZHAO Wansheng, DI Shichun, et al. Study on micro ultrasonic EDM of shaped holes[J]. Microfabrication Technology, 2003(1): 44-50.

[45] ALAVISH, HARIMKAR S P. Ultrasonic vibration-assisted continuous wave laser surface drilling of materials[J]. Manufacturing Letters, 2015, 4: 1-5.

[46] 王哲, 张华, 钱双庆, 等. 超声复合特种加工技术的研究及其发展趋势[J]. 现代制造工程, 2017(1): 157-162.

WANG Zhe, ZHANG Hua, QIAN Shuangqing, et al. The research and development tendency of ultrasonic combined non-traditional machining technology[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2017(1): 157-162.

[47] 张文武, 张天润, 郭春海, 等. 激光打孔在飞机发动机领域的一些新进展[J]. 光电产品与资讯, 2014, 5(11): 23-27.

ZHANG Wenwu, ZHANG Tianrun, GUO Chunhai, et al. New development of laser drilling technology in aero-engine[J]. OE Product & News, 2014, 5(11): 23-27

[48] 李春奇. 水导激光微细加工系统及关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

LI Chunqi. Study on water-jet guided laser micromachining technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

[49] 叶瑞芳, 沈阳, 王磊, 等. 新型水导引激光耦合系统研究[J]. 厦门大学学报(自然版), 2009, 48(3): 369-372.

YE Ruifang, SHEN Yang, WANG Lei, et al. Novel coupling system of water-jet guided laser[J]. Journal of Xiamen University (Nature), 2009, 48(3): 369-372.

[50] OGUMA H, TSUKIMOTO K, GOYA S, et al. Development of advanced materials and manufacturing technologies for high-efficiency gas turbines[J]. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2015, 52(4): 5-14.

[51] 宋强. 喷射液束电解辅助激光加工的基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.

SONG Qiang. Basic research on jet-

electrochemical machining assisted laser beam machining (JECM-LBM)[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.

[52] 王军旗, 赵万生. 基于支持向量机的高速电火花小孔加工穿透检测技术[J]. 电加工与模具, 2017(4): 56-59.

WANG Junqi, ZHAO Wansheng. Breakthrough detection technology of high speed EDM drilling based on support vector machine[J]. Electromachining & Mould, 2017(4): 56-59.

[53] ROCKSTROH T J, SCHEIDT W D, ASH C A. Method of forming cooling holes: US6339208 B1[P]. 2002-01-15.

[54] KREUTZ E W, TRIPPE L, WALTHER K, et al. Process development and control of laser drilled and shaped holes in turbine components[J]. Journal of Laser Micro, 2007, 2(2): 123-127.

[55] 蒋睿嵩, 汪文虎, 王增强, 等. 航空发动机涡轮叶片精密成形技术及其发展趋势[J]. 航空制造技术, 2016, 59(21): 57-62.

JIANG Ruisong, WANG Wenhui, WANG Zengqiang, et al. Precision forming technology and its development trend of aeroengine turbine blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(21): 57-62.

[56] 张志强, 宋文兴, 陆海鹰. 热障涂层在航空发动机涡轮叶片上的应用研究[J]. 航空发动机, 2011, 37(2): 38-42.

ZHANG Zhiqiang, SONG Wenxing, LU Haiying. Application of thermal barrier coating on aeroengine turbine blade[J]. Aeroengine, 2011, 37(2): 38-42.

[57] 孙瑞峰, 张晓兵, 曹文斌, 等. 热障涂层镍基单晶高温合金的激光制孔研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(5): 1193-1198.

SUN Ruifeng, ZHANG Xiaobing, CAO Wenbin, et al. Laser drilling of Ni-base single-crystal superalloy through thermal barrier coatings[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2014, 43(5): 1193-1198.

[58] 程玉贤, 王璐, 袁福河. 航空发动机涡轮叶片热障涂层应用的关键技术和问题[J]. 航空制造技术, 2017, 60(15): 28-34.

CHENG Yuxian, WANG Lu, YUAN Fuhe. Key technologies and problems of thermal barrier coating application on aeroengine turbine vane and blade[J]. Aeronautical Manufacturing

Technology, 2017, 60(5): 28-34.

[59] SEZER H K, LI L. Mechanisms of acute angle laser drilling induced thermal barrier coating delamination[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2009, 131(5): 051014.

[60] 张学谦, 邢松龄, 刘磊, 等. 带热障涂层的高温合金飞秒激光旋切打孔[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 117-122.

ZHANG Xueqian, XING Songling, LIU Lei, et al. Trepanning of supper-alloy with thermal barrier coating using femtosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 117-122.

[61] DONG Y, LI X, ZHAO Q, et al. Geometrical modeling to improve the accuracy of drilled cooling holes on turbine blades[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(1): 1-20.

[62] DONG Y, LI X, ZHAO Q, et al. Modeling of shrinkage during investment casting of thin-walled hollow turbine blades[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 244: 190-203.

[63] MURALIKRISHNAN B, STONE J A, STROUP J R. Fiber deflection probe for small hole metrology[J]. Precision Engineering, 2006, 30(2): 154-164.

[64] CUI J, LI L, LI J, et al. Fiber probe for micro-hole measurement based on detection of returning light energy[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2013, 190(1): 13-18.

[65] 崔继文, 谭久彬, 刘洋. 基于双光纤耦合的微深孔测量方法[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 106-109.

CUI Jiwen, TAN Jiubin, LIU Yang, et al. Measurement of micro-hole with high aspect ratio by double optical fibers coupling[J]. Infrared & Laser Engineering, 2009, 38(1): 106-109.

[66] SAJIMA T, MURAKAMI H, KATSUKI A, et al. Precision profile measurement system for microholes using vibrating optical fiber[J]. Sensors & Materials, 2012, 24(7): 387-396.

[67] SUN X, MA Y Z, YU Y X, et al. Inner hole diameter measuring based on capacitive sensor[J]. Advanced Materials Research, 2013, 739: 596-601.

[68] STONE J, MURALIKRISHNAN B,

SAHAY C. Geometric effects when measuring small holes with micro contact probes[J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2011, 116(2): 573–587.

[69] HUANG J, XU B. A machine vision system for position measurement of small holes on spherical surface[J]. Nanotechnology & Precision Engineering, 2016(1): 32–38.

[70] JIN J, KIM J W, KANG C S, et al. Precision depth measurement of through silicon vias (TSVs) on 3D semicon-ductor packaging process[J]. Optics Express, 2012, 20(5): 5011–5016.

[71] SHETTY D, EPPES T, CAMPANA C, et al. New approach to the inspection of cooling holes in aero-engines[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2009, 47(6): 686–694.

[72] RAMAMURTHY R, HARDING K G, LIAO Y, et al. Method and system for automated shaped cooling hole measurement: US9760986[P]. 2017–12–09.

[73] LIN C H, POWELL R A, JIANG L, et al. Real-time depth measurement for micro-holes drilled by lasers[J]. Measurement Science & Technology, 2010, 21(2): 025307.

[74] 关军, 王呈. 建立叶片气膜孔工件坐标系的方法研究[J]. 计测技术, 2013, 33(3): 41–43.

GUAN Jun, WANG Cheng. Study on establishing coordinate system for workpiece of blade gas film holes[J]. Metrology & Measurement Technology, 2013, 33(3): 41–43.

[75] 王呈, 刘涛, 穆轩, 等. 航空发动机叶片气膜孔测量技术研究[J]. 计测技术, 2012, 32(5): 27–30.

WANG Cheng, LIU Tao, MU Xuan, et al. Research on aero engine blade film hole measuring technology[J]. Metrology & Measurement Technology, 2012, 32(5): 27–30.

[76] 杨慕升, 熊秋菊. 基于数字图像处理的微内孔质量检测技术[J]. 制造技术与机床, 2009(1): 112–115.

YANG Musheng, XIONG Qiuju. Quality inspection technique of micro internal hole with digital image processing technology[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2009, 31(1): 112–115.

[77] 鲍晨兴, 王磊, 李凯, 等. 基于 CCD 的叶片气膜孔快速检测技术研究[J]. 航空精密制造技术, 2017, 53(2): 52–55.

BAO Chenxing, WANG Lei, LI Kai, et al. Research on rapid detection technology of gas film hole based on CCD[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2017, 53(2): 52–55.

[78] BEZDECNY M R, GRAHAM M E, BARTHOLOMEW M L. Methods for testing turbine blades: US 9188504 [P]. 2015–11–17.

[79] ELFURJANI S. Study on dimensional measurements based on rotating wire probe and acoustic emission touch sensing[D]. Victoria: University of Victoria, 2016.

[80] ELFURJANI S, KO J, JUN M B G. Micro-scale hole profile measurement using rotating wire probe and acoustic emission contact detection[J]. Measurement, 2016, 89: 215–222.

[81] 隋鑫, 徐熙平, 孙健, 等. 应用多传感器技术测量微孔几何参量[J]. 光学与光电技术, 2009, 7(4): 79–82.

SUI Xin, XU Xiping, SUN Jian, et al. Microhole geometry measurement applying multi-sensor technology[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2009, 7(4): 79–82.

通讯作者: 董一巍, E-mail: yiweidong@xmu.edu.cn.

Current Situation and Development Trend of Processing and Measurement Technology for Turbine Blade Film Cooling Hole

DONG Yiwei^{1,2}, WU Zongpu¹, LI Xiaoji¹, YIN Chunping¹, YOU Yancheng¹

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Shenzhen Research Institute, Xiamen University, Shenzhen 518057, China)

[ABSTRACT] Turbine film cooling technology is widely used in high thrust-weight ratio aero engine nowadays, so the accuracy in manufacturing of turbine film cooling holes will directly affect the performance of the engine. The film cooling micro-hole has the characteristics of small diameter, high quantity, high depth-diameter ratio, and complex spatial angle, which has a complicated fabrication processes and high precision requirements. The drilling technology and equipment for film cooling holes abroad are strictly kept secret, while, there is still a fact that the low forming and unsteady quality of film cooling holes produced domestically. Therefore, it is of necessity to make a summary of the current situation and development trend of producing film cooling holes for turbine blade to provide a reference for the development of film cooling hole manufacturing technology and its equipment. In this paper, the necessity and importance of the film cooling hole accuracy are summarized and the state-of-the-art manufacturing technologies for producing drilled cooling holes are analyzed, and then, the research content and the solution to the key problems for the film cooling hole drilling technology are proposed based on the analysis. Moreover, in view of the need for precise measurement of the film cooling holes, the existing film cooling hole measurement technology is introduced. Finally, the development trend of drilling and measuring film cooling hole of the hollow turbine blade is generalized according to their technical status and key problems.

Keywords: Urbine blade; Film cooling; Film cooling hole processing; Film cooling hole measurement; Ultrashort pulsed laser

(责编 铃兰)