航空发动机小孔特种加工技术

Special Machining Technology of Mini-Hole in Aeroengine

西安航空发动机集团有限公司　何　英　朱红钢
北京航空制造工程研究所　韩　野

何　英
西安航空发动机集团有限公司工程师，长期从事航空产品制造技术系统的管理，对不同规模航空产品制造时所采用的工艺技术和不同工艺技术的实施效果有一定的研究。

本文综合阐述了航空发动机中主要小孔特种加工技术方法的原理、特点、指标和适用范围，总结归纳出了小孔特种加工技术的发展方向，并对航空发动机制造过程中选用小孔特种加工工艺的原则提出了建议。

航空发动机是技术密集、结构复杂的热力机械，是军用飞机和民用客机的主要动力。随着飞机各项性能的不断提高，对航空发动机也提出了更高的要求，各种新结构、新材料和复杂形状的精密零部件大量应用于航空发动机中，显著增加了航空发动机的制造难度。

因为减重、散热、通气等需求，航空发动机中有相当数量的零部件上需要进行各种小孔的加工，小孔这种特征的制造已经成为航空发动机制造技术中相当重要的内容。目前国内外还未对小孔、微孔提出确切的定义，一般来说，将直径小于 3mm 的孔称作小孔。小孔按用途可以分为非配合孔和配合孔，非配合孔的精度和表面质量要求不高，配合孔则具有较高的加工精度和表面质量。小孔按结构特点可以分为通孔、盲孔；圆形孔、异形孔；深孔、一般深度孔[1]等。

航空发动机制孔与民用工业中的制孔有着较大的差别，主要表现为：

（1）航空发动机中所用的钛合金、复合材料、功能陶瓷、高温合金等多种材料具有高硬度、高强度、高韧性、高熔点和高脆性等特点，难以进行机械切削；

（2）所需加工的型孔多位于具有复杂型面或干涉结构的零部件上，如涡轮叶片、燃烧室、机匣、喷嘴[2]等；

（3）航空发动机中常需要在一些薄壁零件、弹性零件等低刚度零件的表面进行制孔；

（4）在航空发动机传感器、液压元器件等高精度要求零件表面需要进行精度达 μm 级的高精度小孔制造；

（5）在航空发动机具有高可靠性和长寿命要求的热端部件上需要进行具有良好表面完整性的小孔制造；

（6）在火焰筒等零部件上需要进行大量具有不同空间角度的小孔加工；

（7）在精密控制元件和微系统等零部件上进行直径小于0.10mm的微小孔的加工；

（8）在具有特殊需求的零部件上进行不同外形的异形孔加工。

针对航空发动机中具有不同技术要求的小孔，目前主要采用多种工艺进行单独或组合的加工，这些工艺技术的特点、实施方法和适用范围存在着很大不同，但从这些工艺技术的本质上来说，都可以归于机械加工和特种加工的范畴。

由于航空发动机零件的特殊性，采用机械加工技术，如钻削、镗削、拉削、冲孔、磨削、铰孔、珩磨、研磨、挤压等工艺技术进行制孔时，在使用效果和应用范围上受到众多限制[3]，而特种加工则由于其独特的成型原理和实施方法，成为了发动机中重要零部件小孔制备的主要工艺技术。

本文综合阐述了航空发动机中主要小孔特种加工技术方法的原理、特点、指标和适用范围，总结归纳出了小孔特种加工技术的发展方向，并对航空发动机制造过程中选用小孔特种加工工艺的原则提出了建议。

小孔的特种加工技术

特种加工技术是借助于电能、热能、声能、光能、电化学能、化学能及特殊机械能等多种能量或者它们的组合来实现材料切除的加工方法，由于这些工艺方法赖以切除材料的能量方式不同，因此特种加工具有以下一系列的特点：

（1）工具电极的硬度可以低于被加工材料的硬度，甚至于不使用工具也可进行加工，能够达到“以柔克刚”的效果；

（2）多种特种加工工艺，仅需与进给运动结合，就可以加工出复杂的三维型面；

（3）特种加工不借助于机械能切除材料，不受材料硬度的限制，适于超硬材料、特殊性能的金属和非金属材料等的加工；

（4）特种加工过程中，一般不存在切削力，零件变形小，缺陷少，可以获得良好的表面质量[4]；

（5）一些工艺方法可以复合，形成突出优越性的新工艺方法，便于扩大应用范围。

目前应用于航空发动机小孔的特种加工技术种类很多，按照各种工艺技术的特点，可以划分为高能束流加工、电化学加工、电火花加工、液体喷射加工、超声加工、微波加工等类别，各类别小孔特种加工工艺的原理和优缺点、适用范围、制孔效果等主要内容分别阐述如下。

1 高能束流加工技术

高能束流加工是利用能量密度很高的激光束、电子束或离子束等，通过熔融的方式，去除工件材料的特种加工方法的总称。其中激光和电子束加工方法，应用于航空发动机小孔的加工。

激光加工是激光束高亮度、高方向性特性的一种技术应用，激光小孔加工的基本原理是把具有足够功率的激光束聚焦后照射到材料适当的部位，材料在接受激光照射能量后，迅速将光能转变为热能，被照部位迅速升温，根据不同的光照参量，材料可以发生气化、熔化、金相组织变化以及产生相当大的热应力，从而达到零件材料被去除等目的。

激光几乎能在所有材料上加工小孔，速度快，效率高，可在易变形零件上加工，并能够加工细而深的小孔，但激光加工的小孔表面粗糙度较差，圆度不好，易形成喇叭口，同时容易在孔的加工表面留下较大的再铸层或热影响产物。激光加工小孔工程化应用时最小孔径可达4~5μm，深径比可达10以上[5]，加工精度一般低于IT8级，表面粗糙度一般差于R_a3.2μm。激光加工工艺技术适于在超硬或绝缘材料上进行精度、表面质量和表面完整性要求均不高的大量群孔的高效加工。

电子束小孔加工是通过聚焦的高速电子流使工件上的受冲击点熔化和汽化，从而达到去除材料的目的的工艺方法，为了避免电子束与气体分子接触而产生散射，加工应在真空室中进行。

采用多脉冲加工方法时，电子束可以加工深径比达100的深小孔，并且可以进行型孔的有效制备。电子束加工属于高能加工，无论何种材料均可进行高效微孔制备[6]。目前电子束最小斑点尺寸为0.013~0.025mm，加工孔径范围为ϕ0.025mm（厚度为0.02mm时）~ϕ1mm（厚度为5mm时），孔的锥度一般为1°~2°，材料去除效率最高可达40mm^3/s，加工精度一般可达±0.025mm，表面粗糙度一般可达R_a1.0μm，但在加工表面常会有一层厚度为0.025mm左右的再铸层或热影响产物[7]。因此电子束加工技术适于进行中小型构件上数量众多的无表面完整性要求的，如测流孔等微小孔的加工。

2 电化学加工技术

电化学加工是通过电化学反应去除工件材料或在其上镀覆金属材料等的特种加工。其中电液束、照相电解、电解成型、成型管电解、电喷射电解和电铸等工艺技术等在航空发动机小孔加工中应用较多。

电液束（ESD）加工小孔技术源于毛细管电解加工技术，经过发展成为电解的一个特殊类型，其特点是利用高电压（加工电压是电解加工或成型管电解加工的10倍以上）和酸类电解液加工直径较小的孔，电液束加工的工具是专门制造的玻璃管喷嘴，

其直径比加工孔径略小。在喷嘴内或管腔内有一根电极，以保证与酸类电解液接触通电。电液束能够在导电耐蚀材料上加工直径 ϕ（0.2~1.0）mm的小孔，深径比一般在 50 左右，最大深径比能够达到 300，加工进给速度可达 0.76~4.6mm/min，孔型加工精度可达 ±0.025mm，表面粗糙度一般在 R_a（0.4~1.6）μm 范围内[8]。电液束加工小孔适用于具有高表面完整性要求的、由耐腐蚀材料制成的零件上大深径比小孔的加工。

电解成型加工是利用金属在电解液中产生阳极溶解的电化学反应原理而对金属材料进行成型加工的一种工艺方法，也就是电能与化学能的综合作用而产生的反电镀的过程，其加工范围广，能在大部分导电材料上进行小孔加工，生产率高，能够达到较好的表面粗糙度，加工中不存在切削力，加工表面无显著缺陷层，工具阴极在加工中不损耗，可以长期使用，但电极设计较为复杂，电解液对机床、夹具和零件会产生一定的腐蚀[9]。利用电解成型加工小孔时，最小孔径可达 ϕ0.05mm，深径比可达 200，加工精度可达 ±0.05mm，表面粗糙度通常为 R_a（6.3~1.6）μm。电解成型加工小孔技术由于准备工艺复杂，实施成本高，一般用于对表面完整性有严格要求的难加工金属材料上大深径比或表面质量要求高的小孔的批量生产。

成型管电解加工是采用一根横截面形状与加工孔型相似的金属型管作为工具阴极，电解液从型管内喷出的同时，型管以一定的进给速度来进行小孔的加工，加工圆孔时，为提高孔的形状精度，型管还应以一定的速度旋转，为保证加工质量，型管的外侧面应涂上绝缘层。所需加工孔的直径即为型管的外径、侧面加工间隙和涂层厚度 3 部分之和，因此限制了该技术在孔径较小的型孔加工中的应用。目前采用成型管电极加工的小孔最小直径为 ϕ0.50mm 左右，深径比可达 300，加工精度可达 ±0.08mm，表面粗糙度不优于 R_a3.2 μm，适用于由耐腐蚀金属材料制成的精度要求不高、表面质量要求高的、具有一定数量的无干涉构件小孔的加工。

电喷射电解加工小孔是一种高电压的电解加工过程，其本质是通过内部装有阴极的特制绝缘喷管，将高压泵加压后的电解液高速喷射到工件表面进行加工的工艺方法。一般情况下，使用电喷射电解工艺加工小孔时，孔径为射流直径的 4 倍，且孔有 5°~10° 的锥度，能够加工直径 ϕ（0.076~0.76）mm 的深小孔，最大深径比可达 50，加工精度最高达 ±0.10mm，表面粗糙度一般可达 R_a1.6 μm，加工速度能够达到 3mm/min，加工出的孔表面机械性能好，并可通过喷嘴角度的改变进行多种角度的小孔加工。该工艺适合于精度要求不高，但表面质量要求高的大深径比小孔的批量加工。

照相电解加工技术，也称为光化学加工技术，是曝光制版技术和化学或电化学加工技术的组合，用以加工复杂精细图形的工艺方法。照相电解加工工艺技术由掩膜版制作、表面预处理、抗蚀层制备、电化学腐蚀、除胶等一系列工序有机组成，主要用于机械加工难于获得的型廓复杂或密集通孔的薄壁零件以及零件表面的刻蚀，通常加工深度不超过 2mm 的薄板或薄壁零件，加工型孔的深径比一般在 1 左右，最佳电化学腐蚀深度为 0.01~0.6mm，最小加工孔径为 ϕ0.15mm，加工精度可达 ±0.10mm，表面粗糙度一般可达 R_a3.2 μm，其加工精度与腐蚀深度直接相关，加工过程无应力，可以大面积同时加工，属于高效群孔加工。该技术适于金属材料制成的无干涉开敞性好的薄壁构件上大数量群孔的批量加工。

电铸是用可以导电的原模做阴极，用于电铸的金属（即零件材料）做阳极，金属盐溶液作为反应过程的导电溶液，溶液中的金属离子与阳极相同，在外加电源的作用下，溶液中的金属离子还原为金属，沉积于阴极表面，阳极则不断溶解，当原模上的电铸层达到一定的厚度时，把原模脱出，就能获得与原模相反的电铸件。利用电铸工艺不能在现有结构件上进行制孔，只能进行带有小孔的小型零件制造。最小孔径可达 ϕ0.15mm，加工精度可达 ±0.15mm，表面粗糙度可达 R_a3.2 μm，最大深径比可达 20。由于该技术实施时工艺环节多，加工速度慢，并需要其他工艺进行零件外形的精加工，因此电铸工艺多用于制造一些特别细小的、薄壁的、弯曲的带有小孔的小零件，也可以用来制造一些小孔无缝管件或异形小孔管件，以及薄的小孔过滤网等。

3 电火花加工技术

电火花加工是通过工件和工具电极间的放电而有控制地去除工件材料，以及使材料变形、改变性能或镀覆的特种加工工艺。目前在航空发动机小孔上应用较多的电火花工艺主要有电火花成型、高速电火花穿孔和线切割加工 3 种。

电火花成型加工是在工件与工具之间存在一定绝缘介质的条件下，利用两极之间产生的脉冲性火花放电的电腐蚀现象，使导电材料（工件）被去除而达到加工目的的工艺方法[10]。电火花成型加工时通过对电极材料、工艺参数、排屑方式等的选择，能够实现导电材料上多种型孔的优质加工，并可以通过加工方式的改变和夹具的调整，实现群孔的同时高效加工，电火花成型加工的最小孔径为 ϕ0.03mm，表面粗糙度可达 R_a0.1 μm，加工精度可达 ±0.005mm，深径比可达 30[11]。电火花加工也属于热熔加工，会在加工表面生成一定厚度的再铸层，再铸层的厚度与电流、波形等工艺参数有关。电火花加

工也是非接触加工，加工过程无加工应力，可以在薄壁件等易变形零件的小孔加工中采用，但电火花加工的电极会产生损耗，多次使用后会影响加工质量。因此电火花工艺适于加工难切削导电材料和复杂结构上表面完整性要求不高的单独或大量的精密型孔。

高速电火花穿孔是由电火花成型加工制孔引申出的一种工艺方法，其基本原理是以去离子水为绝缘介质，通过空心电极的旋转，使放电电弧连续产生，从而达到高速去除工件材料的目的。高速电火花穿孔采用的典型的 RC 电源，加工效率高，一般可以达到 1~2mm/s 的进给速率，加工小孔的孔径范围为 ϕ（0.2~3）mm，加工的深径比可达 100，但是采用高速电火花穿孔工艺时，加工精度差，最高加工精度仅能达到 ±0.03mm，表面粗糙度一般低于 R_a3.2μm，加工的孔越深，精度越差，同时加工出的表面粗糙度也较差，电极损耗也大，除了在孔加工表面产生再铸层以外，还会产生无规律的微裂纹，因此，高速电火花穿孔适于无精度和无表面性能要求的深径比较大的小孔，如穿丝孔的加工。

线切割加工是电火花加工的一种专门方式，是通过线状工具电极与工件之间规定的相对运动，对工件进行脉冲放电加工，在电极丝与工件切缝之间喷射液体介质，只要有效地控制电极丝相对于工件的运动轨迹和速度，就能切割出一定形状和尺寸的工件[12]。线切割加工分为低速走丝和高速走丝两种加工方式，是对已有孔进行精加工或成型加工的一种工艺方式。线切割加工必须用于通孔加工，依靠电极丝放电，不需专门制造电极，可以通过编程实现各种复杂型孔（包括上下异形孔）的加工，操作方便，加工效率高。目前最细的电极丝直径已可达 ϕ0.025mm，能够切割出 ϕ0.04mm 的圆孔，加工精度可达 ±0.001mm，加工厚度可达 1.6m，表面粗糙度可达 R_a0.05μm，切割效率可达 670mm^3/min。线切割加工工艺适于加工导电材料上精度要求高、表面质量好、轮廓复杂的、必须具备穿丝孔的多种型孔。

4 液体喷射加工技术

液体喷射加工是利用水或者在水中加添加剂的液体，经水泵及增压器产生高速液体束流，喷射到工件表面，从而达到去除材料的目的。

高压水射流切割技术是以高速水射流的动能作为切割能，对材料进行冲蚀和挤压，使材料迅速破坏的加工技术，目前广泛应用的有纯水射流切割和磨料水射流切割两种方式。

该种工艺方法的加工效率高，复杂轮廓切割仅需依靠高压喷嘴的平面运动即可实现，随着断续水射流、气蚀射流、脉冲射流等新型喷射结构的应用和发展，高压水射流切割技术水平也得到了提高，目前，高压水射流切割最小切缝已达 0.15~0.30mm，加工深度可达 400mm，薄板切割时的表面粗糙度可达 R_a0.8μm。

高压水射流切割工艺一般用于发动机中精度要求较低、加工效率要求高、由绝缘材料或超硬材料制成的零件上无干涉通孔的加工。混合磨料的水射流系统如图 1 所示。

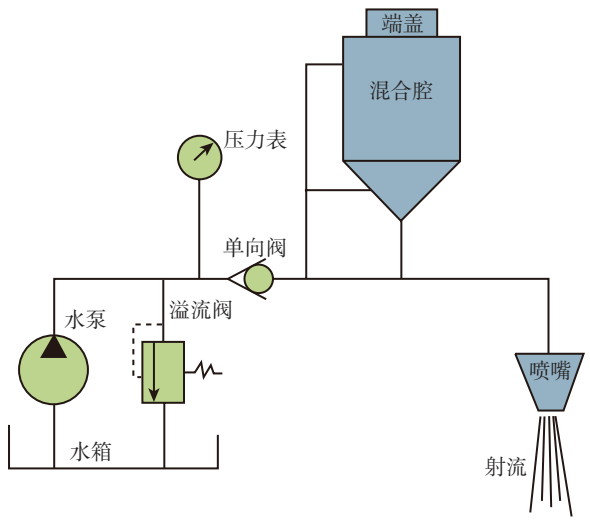

图1 混合磨料的水射流系统简图

5 超声加工技术

超声加工是利用超声频振动的工具通过磨料加工材料的一种工艺方法。

通过超声换能器产生超声频纵向振动，借助于变幅杆将位移振幅放大，驱动工具在磨料和液体组成的悬浮液中振动，通过磨粒的冲击、高速振动抛磨、脉冲液压冲击等综合作用，使得工件材料被逐渐去除，将工具形状复制出来，当电极为细丝或细管时，即可进行小孔加工[13]。影响超声加工的主要工艺因素是工件和工具的材料性质、工具振幅和频率、进给力和磨料及其悬浮液的性质。目前超声加工时，最小孔径达 ϕ0.05mm，加工精度可达 ±0.02mm，表面粗糙度可达 R_a0.8μm，深径比可达 5。超声制孔可以加工各种外形的型孔，加工精度和表面质量高，但加工效率较低，电极的装夹和防颤都比较困难，因此一般用于宝石、绝缘陶瓷、玻璃等利用其他工艺难以加工的，并有较高质量要求的小孔的制备。

6 微波加工技术

微波加工小孔是应用由波导管传来的微波电磁能加工小孔的一种方法，其加工的基本原理是通过矩形波导管传递微波，在波导管末段垂直于导管壁的方向固定两根电极针，电极针由铱丝或钢丝制成，薄板类型的零件夹在两电极针之间，零件和电极针之间加入一定数量的绝缘油，微波通过波导管时，两电极针之间的电位梯度变得很大，从而在电极针端部最接近零件的位置产生放电现象，从而实现小孔的加工[14]。

微波加工工艺可以运用于各种导

电和非导电材料的小孔加工中，一般适于直径 ϕ（20~100）μm 的小深径比小孔加工，孔的直径越大，加工效率越低，加工质量越差。微波加工的精度最高达 ±0.05mm，表面粗糙度可达 R_a0.8 μm，深径比不超过 3。微波加工工艺技术现还未达到工程化应用的程度，多为针对特殊需求零件开展的小批量试制加工。

以上仅为航空发动机零件小孔制备中相对应用较多的特种加工工艺，其他如聚焦等离子加工、磨料喷射加工、绝缘管电解加工等目前在我国航空发动机中运用较少的特种工艺技术尚未在此进行阐述。

小孔特种加工技术的发展

随着新材料、新结构在航空发动机中越来越多的应用，以及低油耗、环保、长寿命、可靠性等技术要求的越来越严格，小孔特种加工技术也得到了快速的发展，主要呈现出以下 5 个特点：

（1）自动化装备技术的普及和提升。特种加工中的各项工艺技术都是通过特种加工装备这个平台实现的，随着工艺装备中自动化水平的提升，高性能控制系统和电源系统的发展[15]，使得小孔特种加工技术在实施过程中大量减少了外界的人为不良影响，从而也提高了小孔加工的效率和质量。

（2）不同小孔特种加工技术的复合化成为一个发展趋势[16]。针对某些具有特殊要求的型孔，单独的一种工艺方式很难满足所有的加工需求，而两种或多种工艺技术的有机复合，则能够达到理想的效果。如超声加工与钻削加工的复合，显著提高了加工效率，而超声加工与电火花加工的复合，则显著提高了加工质量。

（3）新材料在小孔特种加工技术中的应用增多[17]。不断涌现的新材料不止应用于发动机的零部件中，在小孔特种加工技术也广泛应用，提高了小孔加工技术的能力。如高密度石墨电极的采用，使得电火花加工的效率、质量和电极不损耗程度都有了明显提高。

（4）新工具或新装置显著地提高了小孔特种加工技术的水平。各种基于试验和工程应用的新工具或新装置在小孔特种加工工艺中的应用[18]，提高了小孔加工的技术水平和拓宽了应用范围。如蠕动式进给系统的应用，就显著提高了微细电火花加工微小孔时质量和效率。

（5）新型小孔特种加工技术不断被开发出来。基于不同原理的新型小孔特种加工技术，不断被开发出来，并逐步投入应用。如聚焦等离子加工技术，是一种适合加工直径在 ϕ0.08mm 以下，深径比超过 10 的微小孔的新型工艺技术，现已向工程应用阶段发展。

小孔加工技术在航空发动机中应用的建议

航空发动机制造技术中涉及到特种加工方面的多种小孔加工工艺，这些特种加工技术特点各异，应用不同，因此选用合适的小孔加工技术进行不同需求小孔的加工，对于航空发动机的性能、制造成本、可靠性等均有着重要的意义，有必要针对小孔特种加工技术在航空发动机制造中的选择和应用制定相应的指导原则，特提出以下建议：

（1）首先保证小孔的使用性能。满足小孔加工精度、表面完整性、表面质量等技术指标，是选择小孔加工工艺最重要的标准。

（2）保证小孔加工的稳定性。保证同类型小孔在加工过程中的具有高度的一致性和稳定性，质量一致性应作为小孔加工工艺选择的第二要素。

（3）提高小孔的加工效率。降低小孔的加工时间，尤其是对于具有数量众多的小孔的零件来说，加工效率也是小孔加工工艺选择的一个重要因素。

（4）降低小孔的加工成本。在满足小孔技术需求的前提下，选择成本较低的小孔加工工艺对于工程化应用有重要的影响。

（5）简化小孔的加工过程。去繁就简，选择尽量简单的工艺路线实现小孔的加工，是规模化生产管理所要达到的目标之一，也是小孔加工工艺优化发展的动力之一。

参 考 文 献

[1] 王峻 . 现代深孔加工技术 . 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2005.

[2] 《航空制造工程手册》总编委会 . 航空制造工程手册——特种加工分册 . 北京：航空工业出版社，1996.

[3] 王世清 . 深孔加工技术 . 西安：西北工业大学出版社，2003.

[4] 王世清 . 孔加工技术 . 北京：石油工业出版社，1993.

[5] 霍尔登 ·J· 斯温哈特著 . 深孔加工 . 管光晋译 . 北京：国防工业出版社，1974.

[6] 谢建新 . 材料加工新技术与新工艺 . 北京：冶金工业出版社，2004.

[7] 刘晋春 . 特种加工 . 北京：机械工业出版社，2000.

[8] 张建华 . 精密与特种加工技术 . 北京：机械工业出版社，2003.

[9] 王金凤 . 机械制造工程概论 . 北京：航空工业出版社，2005.

[10] 邢鸿雁 . 机械制造难加工技术 . 北京：机械工业出版社，2009.

[11] 姚福生 . 先进制造技术 . 北京：清华大学出版社，2003.

[12] 沈其文 . 材料成形工艺基础（第三版）. 武汉：华中科技大学出版社，2003.

[13] 盛晓敏 . 先进制造技术 . 北京：机械工业出版社，2000.

[14] 米曾榜 . 小孔加工 . 北京：机械工业出版社，1988.

[15] 周骥平 . 机械制造自动化技术 . 北京：机械工业出版社，2001.

[16] 庞滔 . 超精密加工技术 . 北京：国防工业出版社，2000.

[17] 袁哲俊 . 精密和超精密加工技术 . 北京：机械工业出版社，1999.

[18] 王先逵 . 机械制造工艺学 . 北京：机械工业出版社，2001.

（责编 泰山）