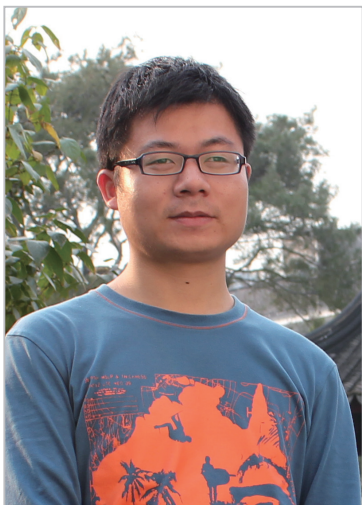


航空发动机高品质小孔 电液束加工技术

Electro Stream Machining Technology of High Quality Hole in Aeroengine

中航工业北京航空制造工程研究所 潘志福 张明岐 傅军英 殷 旻 翟士民



潘志福

硕士,工程师,主要研究方向为电液束加工技术,其研究成果已在航空发动机多种型号叶片冷却气膜孔制造中得到应用。

在现代航空发动机设计中,提高涡轮进口温度是增大发动机推力和提高推重比的重要手段。涡轮部件承温能力是影响涡轮前进口温度的重要技术指标,在某种程度上决定着发动机的性能高低,尤其是高压涡轮工作叶片,在高温、振动、腐蚀、氧化等恶劣工作环境中,承受着巨大的离心力和气动力,其强度及

论述了电液束加工技术的内涵、应用,重点介绍了电液束作为一种优质小孔冷加工技术对航空发动机涡轮叶片制孔应用的重要性,展望了电液束加工技术在高性能发动机研制中的应用前景。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.23/24.064

可靠性至关重要。为使涡轮叶片在极端工作环境下保持足够的强度与寿命,国内外一直不断从材料与结构上进行研究。

在材料选择上,高推重比发动机已由定向凝固高温合金发展到单晶合金。由于单晶合金具有更优质的高温强度、抗氧化和抗热腐蚀性能,可使材料本身的耐高温能力得到了进一步提高;除充分利用材料耐温性能外,采用涡轮叶片冷却技术已成为保证涡轮在更高的温度下可靠运行的重要技术途径。在众多冷却技术中,气膜冷却已成为发动机热端部件主要冷却方式之一^[1]。

航空发动机采用无余量精铸空心涡轮叶片,在其表面布置气膜冷却孔,气膜孔尺寸范围一般在

$\Phi 0.2\sim 1.2\text{mm}$,数量巨大,一台航空发动机上可达到数十万个。气膜孔尺寸微小,深径比大,精度高,小孔表面要求无再铸层、无微裂纹、无热影响区,孔口要求平滑、无毛刺,因此涡轮工作叶片的气膜孔加工工艺须同时达到高效率、高精度、高品质要求,才能满足新型发动机研制的制孔需求。由于单晶材料在传统热加工(如激光、电火花、电子束制孔等)时容易导致晶粒增生,出现再结晶而失去原有强度,成为影响发动机安全的重大隐患。因此,作为冷加工工艺的电液束加工技术倍受设计者的重视。

电液束技术特点及优势

电液束加工技术是基于电化学

阳极溶解原理建立的一种冷加工技术,如图1所示。酸基溶液经毛细玻璃管喷射形成液束流,在电场作用下,液束被阴极化并射向被加工零件,阳极金属工件被“溶解”去除,从而实现小孔的成形^[2]。研究表明,在电液束加工时,其电流密度远大于普通电化学加工气泡稳定时的电流密度,在实际加工中,去除掉的金属量远大于依法拉第定律计算的电化学和化学作用对金属去除量的总和,属于电化学与化学加工复合作用的一种高能加工^[3]。

在叶片的气膜冷却孔加工中,首先,电液束加工技术最大的优势是从根本上消除热加工过程中产生的热再铸层和由此带来的表面微裂纹,避免单晶材料再结晶风险,小孔加工后不需要进行后续处理,小孔“三无”(无再铸层、无微裂纹、无热影响区)的高品质要求得到保证。

第二,电液束加工采用高精度的玻璃管电极加工,小孔精度高,直径尺寸误差可稳定控制在 $\pm 0.02\text{mm}$ 以内,小孔直径的一致性可达到 0.015mm ,基本满足了设计者对气膜冷却孔的精确优化要求。

第三,电液束加工出的小孔孔口过渡圆滑,孔壁平直,无毛刺,加工表面粗糙度低,微观组织保持完整;第四,电液束加工效率高,电液束加工进给速度达到 $3\text{mm}/\text{min}$ 以上,如采用成组电极进行多孔同时

加工,效率还可提高数倍。

采用电液束加工工艺,目前实现了多种高推/功重比型号发动机涡轮叶片气膜冷却孔加工的小批量生产,随着技术不断提升和成熟,电液束加工方法逐渐成为先进高推重比航空发动机重要的制孔工艺之一。

电液束加工技术在航空发动机制孔中的应用

电液束加工技术研究难度较大,且多专用于军工领域,因此各国均作为保密技术进行保护。在公开的国际交流平台上,涉及电液束加工技术的论文与应用介绍资料极少,且基本止于一般性技术简介,在电液束加工电极制备、重要加工工艺参数方面很难获得技术细节。

正因技术封锁缘故,从目前所了解到的国外研究状况来看,各国电液束加工技术的实现方法与应用取向也不尽相同。美国GE公司采用ESD(Electro Stream Drilling)方法加工小孔,如图2(a)所示,拥有多项专利,工程化程度很高,除用于发动机涡轮叶片上的高品质气膜冷却孔加工,也用于涡轮轴心孔加工,实现气膜孔多工位成组电极多孔同时加工,达到极高效率^[4];英国R·R等采用CD(Capillary Drilling)方法加工,如图2(b)所示,其研制的四轴电液束加工机床配有集成酸液系

统,采用闭环流量或压力控制系统,具有电极破损实时检测功能,主要用于涡轮工作叶片气膜冷却孔、高压涡轮导向叶片小孔、大深径比叶片小孔及尾缘孔加工;德国MTU公司近年来报道采用ECF(即CD)方法加工高压涡轮叶片深小孔及叶片干涉孔;俄罗斯在该工艺上的研究较为成熟,几种方法均在研究应用,在报道中除了玻璃管电极的快速封装等技术外,尝试利用中性溶液加工,取得了一定进展。

国内北京航空制造工程研究所对该技术进行了全面系统研究,在毛细玻璃管电极的精密制备、封装、工艺参数调整等关键技术取得了重大突破,在设备上实现了小孔加工穿透自动化监控^[5];以CD加工方法为主,成功加工出合格的叶片气膜冷却孔,满足小孔进出口圆滑、加工表面无再铸层的要求;同时也掌握了深小孔、干涉孔及横向连通孔等特殊结构位置孔的加工技术,在新型航空发动机研制中发挥了重要作用^[6]。

近年来,发动机设计者在涡轮叶片冷却结构改进上进行了深入研究,通过气膜孔的尺寸、形状、排布调节实现叶片力学性能及冷却效率的不断优化。采用大量复合斜孔结构,小孔沿着主流方向及叶高方向设计成不同角度;为均化气液出口速度,小孔的深径比取值较大^[7]。此外,高性能航空发动机及燃气轮机工作叶片开始采用耐温性能更高的单晶材料,对气膜孔的形貌、尺寸精度及表面组织完整性也提出了更高要求。单晶材料涡轮工作叶片表面大量的气膜冷却小孔呈现出小间距、高密度的结构特点,小孔的直径一般为 $0.3\sim 0.5\text{mm}$,尺寸精度控制在 $\pm 0.02\text{mm}$,小孔间距最小处达到 0.7mm ,小孔轴心与叶片表面夹角最小为 20° 。对小孔的入口、出口、孔壁形貌及孔径的一致性要求进行

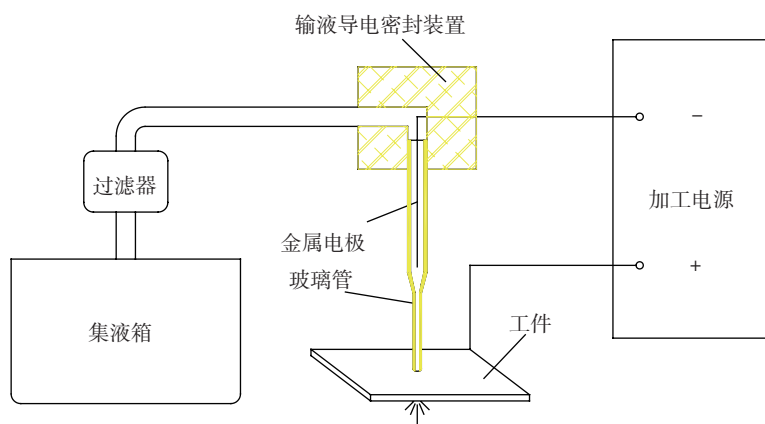


图1 电液束加工示意图

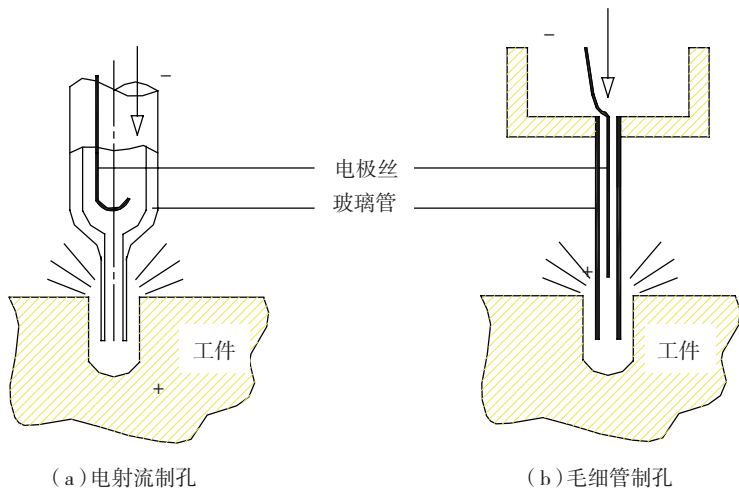


图2 电液束加工方法

了量化。

叶片气膜孔的加工质量直接关系到叶片的安全可靠性,有无再铸层及孔的形貌已成为小孔品质重要的衡量指标。再铸层是在快速冷却下,在材料表面形成的淬火铸造多晶组织,经常伴随微裂纹,其产生的横向结晶会和再结晶一样,在服役过程中易成为裂纹萌生的诱因^[8]。

因此,单晶材料的叶片小孔不允许在加工过程中出现再铸层,必须保证圆滑过渡以避免应力集中,表面组织完整性好,不得有烧伤及过腐蚀缺陷。

气膜冷却孔设计要求的细化,使不同的制孔方法在应用上得到了进一步的细分。传统的激光、电火花制孔工艺将继续应用于导向叶片、定向高温铸造合金的工作叶片、燃烧室火焰筒等冷却孔加工,而单晶合金材料的气膜冷却孔则采用电液束方法加工,以获得圆滑的进出口形貌,无再铸层、组织完整的表面,实现设计所需的高品质要求。图3为电液束加工的单晶材料典型气膜孔形貌,该孔直径为0.3mm,小孔轴心与叶片表面夹角约为60°。

从金相检查可看出,电液束加工表面不存在再铸层、微裂纹及热影响区,进出口形成一定的圆角,孔壁形貌完好,这些特征对于降低制

孔造成的应力集中水平极为重要。在高倍扫描电镜下观察电液束加工表面,从图4可看出孔壁表面组织平整,微观晶相排布整齐、紧凑,无晶间腐蚀,表面完整性好。

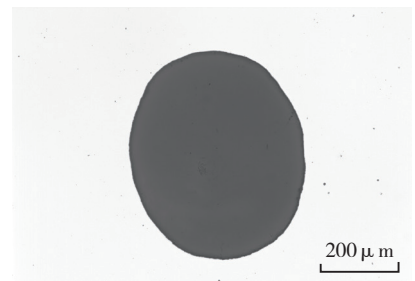
结束语

随着我国武器装备更新速度加快,先进航空发动机及燃气轮机对制造技术的要求越来越高,高压涡轮部件大量采用第二代、第三代单晶材料,其上分布的大量气膜冷却孔与高温运动部件的疲劳强度紧密相关,对发动机设计在制孔形貌、表面完整性等方面提出了更高要求。

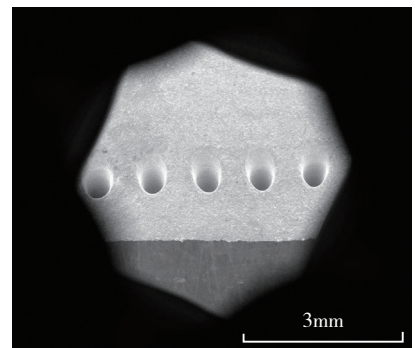
电液束加工技术以其高精度、冷态加工优势,实现航空发动机高品质小孔加工,提高叶片高温疲劳试验考核性能,为新机型号研制和小批量生产提供了关键技术保障。在现代高性能航空发动机关键件的高品质小孔以及窄槽加工中,电液束加工技术也必将发挥更加重要的作用。

参考文献

[1] 朱海南,齐歆霞. 涡轮叶片气膜孔加工技术及其发展. 航空制造技术, 2011(13):71-74.
 [2] 王建业,徐家文. 电解加工原理及应用. 北京:国防工业出版社,2001.
 [3] SEN M,SHAN H S. Response



(a)电液束加工小孔金相形貌



(b)电液束加工小孔体视镜形貌

图3 电液束加工小孔金相

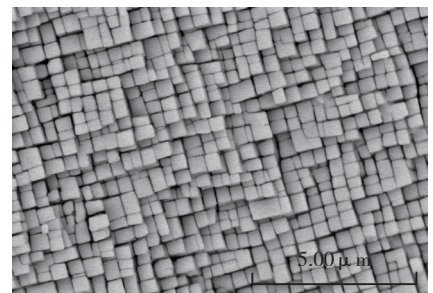


图4 气膜孔孔壁微观组织形貌

surface analysis of electro jet drilled holes. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006,31:82-86.

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

[5] 傅军英,张明岐. 电液束自动化加工监控技术. 航空制造技术, 2010(7):79-80.

[6] 傅军英,张明岐. 细孔与超深小孔电化学加工技术应用分析. 全国特种化工会议论文集, 2011.

[7] 戴萍,林枫. 气膜孔几何结构对涡轮叶片气膜冷却影响的研究进展. 热动力工程, 2009,24(4):415-419.

[8] 刘新灵,陶春虎. 航空发动机叶片气膜孔加工方法及其演变分析. 材料导报, 2013(21):117-120.

(责编 古京)