

航空发动机难加工材料切削技术探索

■ 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司 (辽宁 110043) 杨金发 卢成玉 兰影铎
王志忠 赵天杨

■ 沈阳黎明航空零部件制造有限公司 (辽宁 110043) 刘 陟

摘要: 通过对难加工材料切削性能的分析, 对先进刀具技术的探索与实践, 总结航空发动机难加工材料切削技术。拓展解决切削技术难题的思路。



高级工程师 杨金发

航空发动机是在高温、高压及高转速的恶劣环境下工作, 航空新产品的开发都意味着零件功能、结构、材料的重大变更, 对切削技术要求更高。钛合金、高温合金等难加工材料, 切削难度

体现在切削力大、切削温度高、切屑不易折断、刀具寿命低以及表面质量不易保证等方面。

1. 难加工材料切削特点

(1) 钛合金性能特点: 钛合金变形系数小, 切削温度高, 单位切削力大, 加工表面生成的硬化层厚度为 $0.1 \sim 0.15\text{mm}$ 。目前钛合金的切削加工选用的刀具材料以不含或者少含TiC的硬质合金刀具为主, 大量实验表明, 选用YG (K) 类硬质合金加工钛合金效果最好。YT (P) 类硬质合金加工钛合金时会发生严重磨损, 效果不好。陶瓷刀具很少被用来加工钛合金。

(2) 高温合金的性能特

点: 高温合金切削力大, 加工硬化严重, 切削温度高, 刀具磨损严重。目前切削高温合金所用刀具以硬质合金刀具为主。硬质合金PVD涂层刀片, 使刀具表层具有较高的硬度和耐磨度, 同时又保持了硬质合金基体的塑性与韧性, 非常有效地延长了刀具的使用寿命, 比较适合高温合金的车削加工。

2. 发动机难加工材料加工对刀具的需求

难加工材料高效切削加工技术作为航空发动机制造中最为重要的一项先进制造技术, 是集高效、优质和低耗于一身的先进制造技术。刀具作为切削加工的

术, 近年来尽管出现了不以切削加工成形为主要工艺手段的复合材料、超塑成形扩散焊等, 但就大部分叶片而言, 其金属成形仍然离不开高精度切削加工方式。因此, 随着切削加工技术的相关设备、刀具和磨具材料性能提升以及新加工理念赋予的技术方法

创新, 其在叶片生产中的主体作用将不可撼动。

参考文献:

- [1] 刘庆琰. 航空发动机叶片制造技术及失效分析[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011.
- [2] 王维朗, 潘复生, 陈延君, 等. 砂带磨削技术及材料的研究现

状和发展前景[J]. 材料导报, 2006, 20 (2): 106-108.

- [3] 王扬, 孔宪俊, 张宏志等. 激光加热辅助切削技术的应用及发展前景[J]. 航空制造技术, 2015, 480 (11): 43-48.

MW (收稿日期: 20170226)

主体之一，在解决航空材料的加工难题中起着重要作用。硬质合金刀具、涂层刀具、陶瓷刀具、立方氮化硼刀具和聚晶金刚石刀具大量应用。在刀具的选择上，应当合理选择与被加工零件在机械性能、化学性能及物理性能方面相匹配的新型高效刀具。不断优化刀具几何参数，优化切削用量。既要提高金属去除率，实现高效切削，又要保证合理的刀具耐用度，提高零件加工质量。

(1) 硬质合金涂层刀具（见图1）。TiC涂层：硬度高，具有良好的抗后刀面磨损和抗月牙洼磨损能力，应用温度在500℃左右，但性脆、不耐冲击。TiN涂层：是工艺最成熟和应用最广泛的涂层，摩擦系数小、应用温度在600℃左右。TiCN涂层：兼有TiC涂层和TiN两种涂层的良好韧性和硬度，不易崩刃。TiAlN涂层：是目前应用最广泛的刀具涂层之一，具有很高的硬度、很好的抗氧化能力，可用于难加工材料的切削。

应用涂层刀具要注意刀具涂层与被加工工件材质的匹配性，只有选用的涂层与所加工的工件材质很好的匹配，才能获得理想的切削加工效果并提高刀具寿命，否则还有可能出现负面影响。根据不同的切削加工系统条件，采用合适的相应涂层，就

可以较好地解决刀具强度和韧性之间以及切削速度与刀具寿命之间、生产效率与加工成本之间的矛盾，大大提高切削速度和刀具的寿命，显著提高切削航空发动机难加工材料切削技术水平。

(2) 陶瓷刀片（见图2）。由于陶瓷刀片切削时产生大量的切削热，所以一般陶瓷刀具不在零件的精车工序使用，以免高切削热影响零件变形。

在陶瓷刀片的应用过程中需要注意以下几点：①刀片寿命的长短，速度是关键。一定要转变观念，大胆提高切削速度。保证在切削过程中产生足够的切削热，这是提高刀具寿命关键中的关键。②陶瓷材料耐磨性不如硬质合金，如果采用相同深度多次切削，势必在刀刃与零件的接触点处出现垂直于刀刃的沟状磨损。因此，一定要想方设法不断改变刀刃与工件的接触点，此方法对延长刀刃的使用寿命非常有效。③陶瓷刀具与硬质合金相比，还是较脆的，因此在切削过程中坚决杜绝振动现象。要求数控机床有足够大的功率，主轴转动平稳，进给均匀。在车削加工时，始终保证充足的冷却液，其不会降低切削区域的温度，却可以大大提高刀具寿命，冷却液必须浇注在切削面上，保证冷却效果。④对于不同硬度的材料要选

用合理的切削参数及走刀路线，保证高效切削。监控陶瓷刀片磨损情况，粗加工时应充分利用陶瓷刀片，可以大大缩短零件的加工时间，对加工流程是一个不错的优化办法。

3. 航空发动机难加工材料切削技术

相对于传统的切削加工，其切削速度、进给速度有了很大的提高，而且切削机理也不相同。到目前为止，高效加工是在保证加工质量的同时采用高主轴转速、大进给量和大切削深度进行高效率的加工。高效切削技术还涵盖了刀具选配及运用技术，加工过程的智能化控制。通过选择小切深、大进给等手段，减少工艺性应力集中，降低加工表面非均匀、非稳定残余应力，以提高零件的抗疲劳强度。

航空发动机高效加工需要建立航空发动机难加工材料切削加工性综合评价体系，从刀具角度评价其切削性能，从零件加工角度评价工件的可切削加工性，实现工件与刀具的合理匹配。

目前，基本掌握了常用航空发动机难加工材料的切削加工特性，同时对机匣、叶片和盘轴等零件，根据实际刀具磨损预测模型，建立了由诸多成本约束条件限制的数学模型。结合优化理论和加工实际，进行优化求解，得到了部分经济效益最大化的高效切削加工参数，并在典型件的加工工艺中获得了验证。目前切削参数的选择没有科学量化的方式，容易导致切削用量保守、切削加工效率低和加工质量不稳定的现象。因此必须以先进航空发



图1 高性能车刀



图2 高性能铣刀

动机对关键件、重要件研制需求为牵引,形成难加工材料典型零件高效切削基础技术研究能力。掌握有效提高加工精度、加工效率和加工表面质量的高效切削成熟工艺,实现稳定产品质量、缩短产品制造周期并降低制造成本等主要目标。

高推重比发动机使用了多种高性能的新合金材料和新结构。这给零件加工和表面完整性控制带来新的困难和要求,需要预先进行系统的试验研究。国内切削加工表面完整性技术还在探索阶段,加工参数对加工表面完整性的影响、加工表面完整性的检测与评价技术还有待开发研究。

切削加工表面完整性技术是抗疲劳制造技术体系中最为重要的组成部分。由航空发动机的使用过程和故障分析得知,各种形式的疲劳破坏几乎都集中在零件的表面或接近表面的地方。当零件处于腐蚀介质和交变载荷的共同作用下,较差的表面完整性将会加快零件的疲劳破坏,降低零件使用寿命。美国金属切削研究联合公司对航空难加工材料和常用工业材料的加工进行了大量试验研究,系统地编制了一整套加工用量手册和表面完整性指导资料。根据研究成果已经发展了三种水平逐及深化的表面完整性试验程序,即最少表面完整性数据组、标准表面完整性组和广义表面完整性数据组,已基本完善了抗疲劳长寿命制造技术体系,并已应用于航空产品的制造中。国外先进航空发动机企业,有着雄厚的切削数据服务支持以及抗疲劳制造技术,表面完整性研究

基础,建立了系列加工参数对加工表面完整性的影响等相关数据库,为用户在零件加工过程中,有效地提供相关解决方案,经济而可靠地达到表面完整性合格标准和传统机加的表面完整性验收等要求。

4. 提高切削技术水平的几点建议

(1) 优化零件加工流程。在零件粗加工后增加热处理工序,消除粗加工过程中产生的机械加工应力,以免将过多机械加工应力积累到精加工工序,此时零件壁厚、强度差,极易释放应力而变形。

① 调整工序间余量分布。在粗加工中保证后续工序变形余量的前提下,尽可能的去除多余的余量,要考虑增加热处理及修基准工序后零件在热处理过程中的变形量,精加工余量要尽可能均匀,以避免由于余量不均匀产生应力不均,而造成零件变形。② 调整零件的装夹方式。除粗车工序不使用四爪自定心卡盘作为装夹零件的工装,在半精车工序、精车工序派制专用工装,能有效保证零件的加工质量。③ 调整零件的加工设备。半精车及精车工序采用数控立式车床加工,相对于普通车床,数控车床具有高精度、高效率且高智能化等优势,数控车床使用的刀具也比普通车床使用的刀具强度高,切削刃更锋利,机械加工应力相对较小。

(2) 运用新型高性能刀具,完善硬件、软件配置,适应智能制造发展趋势。航空发动机零件结构复杂,大量的薄壁件,加工

变形严重,对刀具的刚性、精度要求高,高性能刀具是提高航空发动机切削技术水平的强劲动力。因此应用高性能刀具解决切削加工问题是必然趋势。要针对涡轮机匣、风扇机匣、涡轮盘、风扇盘、长轴、叶片及叶轮等典型关键零部件,提供完整的刀具配套和解决方案。

(3) 有效控制切削加工质量。采用在线检测装置对刀具的破损进行在线检测,在线检测工件状态,必要时进行工件找正,进行刀具补偿。掌握刀具寿命进行强制换刀。在实行强制换刀时,必须对刀具耐用度的设定和更改、实际生产过程中刀具的更换及其记录进行控制,建立一套关于刀具耐用度设定、更改及刀具更换的管理控制程序。

5. 结语

航空发动机制造企业应突破典型零件切削综合优化试验及验证技术。基于工艺特征的切削数据库系统技术、切削物理仿真、高速高效切削、精度与表面质量控制和工件变形预测与补偿等技术,建立综合优化试验设计体系和切削仿真试验验证体系。大力加强航空发动机切削加工过程控制技术、工艺研究和建设,强化创新、实现切削技术不断提升。

参考文献:

- [1] 王聪梅. 航空发动机典型零件机械加工[M]. 航空工业出版社, 2014.
- [2] 韩荣第. 难加工材料的性能特点决定高效加工的有效途径[J]. 航空制造技术, 2010(11): 41-45.

MW (收稿日期: 20170225)