

螺旋铣孔技术在航空制造 装配业中的发展应用*

Development and Application of Hole Helical Milling Technology in Aviation
Manufacturing Assembly Industry

天津大学机械学院 秦旭达 陈仕茂 刘伟成
肯纳金属(美国)有限公司 倪旺阳 刘一雄



秦旭达

副教授,硕士生导师。现任中国振动工程学会机械动力学学会第八届理事会理事、副秘书长。主要研究方向为:难加工材料加工过程动力学仿真及其工艺优化技术,制造过程监控技术。发表学术论文 30 余篇,SCI/EI 检索 20 篇次。获省部级科技奖励 2 项,主持国家自然科学基金、天津市基金、国际合作项目各 1 项。

我国制造技术正处于快速发展时期,切削加工作为制造技术的主要基础工艺,其水平取得了很大提高,并进入了以发展高速切削、开发新

在当今机械工业产品发展迅猛、更新换代频繁的时代,特别针对高新技术密集的航空、模具行业,螺旋铣孔技术提高了制孔工艺效率、产品质量和企业收益率。这种技术采用了全新的、先进的工艺,在新型材料(如碳纤维复合材料、钛合金等)上打孔,也能取得非常高的孔质量,从而为促进企业新产品的开发提供了保证。

的切削工艺和加工方法,提供成套技术为特征的发展新阶段。切削加工技术不仅是汽车、航空航天、能源、军事、模具、电子等制造业中重要工业部门的基础工艺和关键技术,也是这些工业部门迅速发展的重要因素,而且还关系到机械加工企业的加工效率、质量、成本、产品性能和竞争实力,是制造技术进步的重要标志。航空制造业是制造业最为重要的组成部分之一,是高新技术最为富集的产业,大量新材料、新技术首先在航空制造业中得到应用。为了降低飞机自重、提高结构强度,一些大型的复杂结构零件大量采用新型复合材料,机翼和一些主承力结构件也普遍采

用新型、轻型材料。大量零部件需要加工成千上万个孔以便进行装配,而对此类航空装配孔要实现高效、高精度、高质量的加工,则需要采用新技术来代替传统钻孔技术。

作为一种新型孔加工方式,螺旋铣孔技术具有切削过程平稳、刀具承受切削力小和一次加工即可满足精度要求的优点。该技术已成为国内外材料加工研究的热点和难点之一。

对于螺旋铣孔技术,国外研究得比较深入;Eric Whinnem 阐述了螺旋铣孔技术的发展及其在波音飞机上的应用;Wangyang Ni 研究了螺旋铣孔的加工机理,并在动力学方面取得了一定的进展;R. Iyer 等人对螺旋铣孔刀具的寿命进行了研究。空客公司已经在飞机的研制中

*天津大学与肯纳金属(美国)有限公司合作项目,国家自然科学基金项目(50705066)资助。

应用螺旋铣孔技术。Novator 公司的研究表明,螺旋铣孔由于能在 1 个工序内完成对不同孔的加工,且省掉了通过拆卸来消除毛刺的工艺,这项技术的加工时间相对于传统钻孔技术缩短了 50%。为了缩短研制周期、降低生产成本,几年前空客公司与 Novator 公司合作启动了一项关于发展轻型便携式螺旋铣孔装置的项目,现已应用于法国、德国的空客飞机装配生产车间中。最近 Novator 公司又推出了 Twin spin PX3 轻型便携式螺旋铣孔装置,空客已经将该项技术应用到了装配生产线上,并且验证了其生产能力,各公司纷纷效仿,部署这项技术的研发工作。图 1 为瑞士 Novator 研制开发的螺旋铣孔便携机。

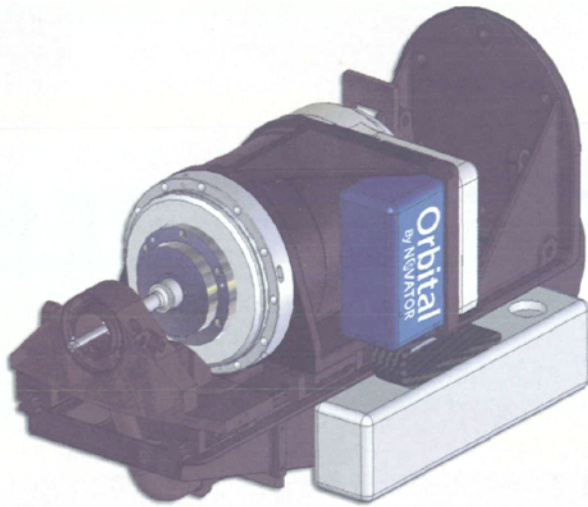


图 1 瑞士 Novator 研制开发的螺旋铣孔便携机

国内对螺旋铣法的研究尚处于起步阶段。天津大学在螺旋铣法的动力学研究方面做了积极有效的探索;天津大学与美国肯纳金属合作开展的螺旋铣削动力学研究,在螺旋铣孔的加工机理方面进行了深入的工作,建立了螺旋铣孔加工过程的铣削力和力矩模型,为螺旋铣削刀具研发提供了有益的参考。

本文将通过比较传统钻削加工工艺与螺旋铣孔加工工艺的特点,进

一步阐述螺旋铣孔在航空制造装配业中的应用。

传统钻削与螺旋铣孔加工工艺比较

1 传统钻削工艺

传统的钻削加工主要有以下特点:其一,在传统的钻孔过程中,主轴中心的线速度为 0,即钻头中心不参与切削,工件的中心区域材料要完全依靠钻机向下的推力将其挤出去,因而钻头所承受的 Z 向力很大,当加工钛合金等难加工材料时,刀具的快速磨损失效也就在所难免了。其二,传统钻孔加工过程是一个连续的切削过程,刀刃始终与工件相接触,切削时接触面温度很高,而钛合金的导热性差,连续的切削过程使

温度不断累积,这也加速了刀具的磨损失效,导致加工表面质量下降。其三,传统钻孔加工的排屑方式也是导致刀具失效的一个原因。钻孔过程中,切屑从钻头狭槽中排出,排屑速度慢,而切削热主要是由切屑带走的,当切削热不能及时疏散时,大量切削热留在了工件和刀具上,这会加速刀具的磨损失效。另外,切屑与已加工孔的表面有直接接触时,加工表面会被划伤,显然这种排屑方式又影

响了孔的表面质量。一般说来,传统钻孔加工质量是无法满足飞机制造业的精度要求的,还必须依靠其他工序来保证孔的表面质量,从而降低了工作效率,同时也提高了加工成本。从技术可行性和经济角度考虑,传统钻孔工艺已不再适用于飞机制造业。

2 螺旋铣孔工艺

与传统的钻削加工相比,螺旋铣孔采用了完全不同的加工方式。螺旋铣孔过程由主轴的“自转”和主轴绕孔中心的“公转”2 个运动复合而成,这种特殊的运动方式决定了螺旋铣孔的优势。首先,刀具中心的轨迹是螺旋线而非直线,即刀具中心不再与所加工孔的中心重合,属偏心加工过程。刀具的直径与孔的直径不一样,这突破了传统钻孔技术中一把刀具加工同一直径孔的限制,实现了单一直径刀具加工一系列直径孔。这不仅提高了加工效率,同时也大大减少了存刀数量和种类,降低了加工成本。其次,螺旋铣孔过程是断续铣削过程,有利于刀具的散热,从而降低了因温度累积而造成刀具磨损失效的风险。更重要的是,与传统钻孔相比,螺旋铣孔过程在冷却液的使用上有了很大的改进,整个铣孔过程可以采用微量润滑甚至空冷方式来实现冷却,是一个绿色环保的过程。第三,偏心加工的方式使得切屑有足够的空间从孔槽排出,排屑方式不再是影响孔质量的主要因素。由此可见,该项技术有着广阔的发展空间和良好的市场前景,但作为新的加工方式,其加工机理有待进一步研究探讨。

螺旋铣孔动力学

螺旋铣孔工艺的显著特点是切削运动由 2 种进给运动复合而成,2 种进给运动分别是刀具主轴的向下进给运动和刀具周向进给运动,且这 2 种运动存在着一定的几何关系,如图 2 所示。图中 D_f 为刀具直径, D_h 为孔径, H 为刀具每旋转 1 转中心

下降的距离, L_1 为刀具每转 1 圈中心移动距离在垂直于中心轴平面上的投影, L_2 为刀具每转 1 圈中心移动的距离, θ 为切削螺旋角。

描述一个完整的螺旋铣孔运动至少需要以下 4 个参数: 刀具主轴转速 N (r/min), 轨道转速 ω (r/min), 轴向进给量 f (mm/min) 和中心偏移距离 s (mm)。如图 2 所示, 各参数间的关系为:

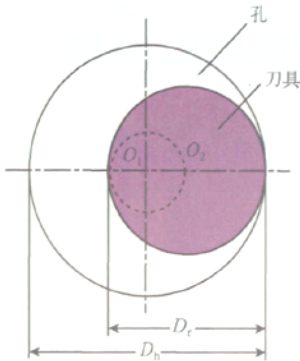


图 2 螺旋铣孔平面示意

$$H=f/\omega,$$

$$L_1=\pi(D_n-D_r),$$

$$\theta=\arctan[f/\omega\pi(D_n-D_r)],$$

$$L_2=H/\sin\theta.$$

若给定铣刀的齿数为 Z_n , 则刀具中心的切削用量

$$\Delta=L_2\omega/NZ_n,$$

由于 θ 角度很小, 故有

$$\theta \approx \sin\theta \approx \tan\theta,$$

便可得到

$$\Delta \approx f/NZ_n \times \pi(D_n-D_r)/f = \pi(D_n-D_r)/NZ_n.$$

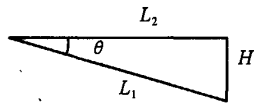
大量切削试验表明, 刀具主轴转速 N 、轨道转速 ω 、轴向进给量 f 和中心偏移距离 s 对铣削力有着不同程度的影响。其中轴向进给量 f 对轴向铣削力的影响最大, 且随着 f 的增大, 铣削力增大, 刀具磨损加剧。

螺旋铣孔的优势

(1) 提高加工孔的质量和刀具寿命。

相对于传统的钻孔技术, 螺旋铣孔显著地提高了孔的质量和强度, 螺旋铣孔属于断续切削, 较低的铣削力使得加工的孔无毛刺; 刀具直径比孔小, 切屑得以顺利排出, 使得孔表面的粗糙度值能大幅降低; 在加工复合材料时, 消除了以往传统打孔由于刀尖钝化导致的脱层、剥离、孔表面质量低等情况。

传统钻孔刀具中心的切削能力



低下, 且易积聚发热快速磨损, 刀具寿命普遍较低; 螺旋铣孔则由于较低的铣削力使刀具寿命显著提高。

(2) 缩短研制周期, 节约加工成本。

在制造飞机或其他重型机器时, 使用螺旋铣孔技术将会大大缩短研发周期, 降低成本。

应用螺旋铣孔技术, 可用同一把刀加工不同直径的孔和复杂形状的孔。由于其加工方法的优越性, 可以节省传统的铰锥孔、铰孔等工作。这意味着, 今后加工孔的刀具种类型号会不断减少。从整个研制周期来看, 使用螺旋技术可减少很多工序(如分解拆卸后对不同的孔分别进行毛刺去除处理、铰孔、清除冷却液, 再进行组装), 大大缩短加工周期。

(3) 高度自动化。

实现更高的自动化程度, 也是降低加工成本的一种方式。由于螺旋铣孔工艺铣削力低, 此项技术才能在

工业机器人装置上得以应用。由于工业机器人装置比较柔弱, 而传统钻孔轴向力太大, 因此传统钻孔是无法应用在此类装置上的。

(4) 促进新材料的使用。

在飞机的零部件中使用新型材料是明显的发展趋势, 钛合金、复合材料等新型材料已得到广泛应用。而新型材料的研制使用需要适合的加工工艺支撑, 在孔加工方面, 研究表明, 相对于传统钻孔技术, 螺旋铣孔技术有着显著的优势。

结束语

目前, 我国已成为世界上飞机零部件的重要生产国, 波音、空客等世界著名飞机制造公司都在我国生产多种飞机、发动机零部件(尾翼、机身、舱门等), 这些零部件的加工生产必须采用先进的加工装备和加工工艺。与此同时, 国外不断涌现出大量高速、高效、柔性、复合、环保的切削加工新技术, 使得切削加工技术发生了根本性的变化。

在当今机械工业产品发展迅猛、更新换代频繁的时代, 特别针对高新技术密集的航空、模具行业, 螺旋铣孔技术提高了制孔工艺效率、产品质量和企业收益率。这种技术采用了全新的、先进的工艺, 在新型材料(如碳纤维复合材料、钛合金等)上打孔, 也能取得非常高的孔质量, 从而为促进企业新产品的开发提供了保证。

螺旋铣孔工艺只需 1 把刀具就可以加工出不同直径、高质量的孔, 既减少了换刀时间, 又节省了精加工的工序, 大大提高了工作效率。鉴于螺旋铣孔技术的优势, 各大企业, 特别是航空、模具行业中的许多企业已开始将它应用到生产实际中。随着这种技术的推广和应用, 传统的钻孔刀具将会慢慢被淘汰, 而新型铣孔装置将越来越多地出现在机械加工车间中。

(责编 小颖)