拉深薄壁件余量加工新工艺

New Process of Drawing Thin-Walled Workpiece Allowance Machining

南京航空航天大学机电学院　马振武

[摘要] 拉深薄壁件刚性差，易变形，其余量加工相当困难。为了解决传统工艺存在的效率低、加工质量差、后处理工序多的问题，提出了一种利用冷冻液做支撑、夹持，进行高速铣削的新工艺。制作了一套无痕自动装夹系统，进行了相关的设计计算，并从金属切削理论角度分析了高速铣削的必要性。试验结果证明了此工艺的可行性。

关键词：拉深薄壁件　余量加工　致冷器

[ABSTRACT] Because of poor rigidity, easily deformed property, margin processing of drawing thin-walled workpiecehave is quite difficult. In order to solve the problem of the traditional process that exists low efficiency, poor processing quality, a new technology of high speed milling is put forward,which make use of frpzen liquid do support. Making an automatic clamping system,we do some theoretical calculations, and from the metal cutting theory perspective analyze the necessity of the high speed milling. Experiments results show that the technology is feasible.

Keywords: Drawing thin-walled workpiece　Allowance machining　Refrigerator

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.20.073

高速铣削加工是一种全新工艺，具有高效、高精度、高表面质量的特点，高速铣削工艺因其突出优点在国内外得到了迅速发展和广泛应用。国外无论是在理论研究还是工艺推广方面都比较成熟。国内中物院孔金星等[1-8]研究了高速铣削参数对工件表面质量的影响，北理工、南京航空航天大学等高校在高速铣削机理和刀具的磨损机理、高速铣削数控系统等领域开展研究并取得了一系列成果。国内在航空薄壁件和薄壁蜂窝结构的高速铣削方面非常成功。目前我国的高速铣削工艺还处于起步阶段，需要向多领域推广，把高速铣削的优势展示出来[1,4-6]。

弹壳属于拉深薄壁件，理论上完全可以应用高速铣削工艺对其余量进行加工，但是在实例加工时遇到了装夹的难题。冷冻液固液态可随温度转化，覆盖凝固时可无痕固定工件。半导体致冷器是一种特种冷源，根据工作电流的大小和方向就可以确定致冷器的制冷、加热、恒温状态，加上特殊冷冻液，可组成自动无痕装夹系统。

本文从工艺筛选、工装设计、理论计算到以某型弹壳余量加工为例的试验加工证明了新工艺的可行性。

1　工艺筛选

某型弹壳材料为 H68，$\sigma_{10} \geqslant 40\%$，导电。生产中由于模具的几何形状及材料性能等因素的各向异性，经过拉深工序后，拉深件的口部不齐且长度不均。为了得到高质量的弹壳需要对其余量进行加工。

传统加工工艺主要有：

（1）模具切边工艺。

模具切边工艺主要分为聚氨脂橡胶切边模、浮动式水平切边模和内涨式切边模几类。本例弹壳尺寸小，余量去除量少，且底部存在一工艺凸缘，应用模具切边工艺有很大的局限性，准备周期长，加工结束后工件口部会出现毛刺，加工质量差。模具切边工艺不适合本例余量加工。

（2）车床精车工艺。

车床车边工艺比较简单，精度也较高，设计了相应的夹套并用精密小车床进行了试加工，效果不错，但是切屑进入了薄壁件型腔，后续处理工艺困难，否则将影响弹药发射质量，因此该工艺不适合弹壳的余量加工。

（3）电火花线切割工艺。

线切割加工中工件基本不受力，加工精度也比较高，采用线切割机床对弹壳余量进行了试切，试加工发现线切割加工速度很慢，加工结束后工件表面存在黑色附着物，表面质量较差，不符合工艺要求。

2　新工艺的提出

为了解决传统工艺的装夹困难、加工质量差、加工效率低的问题，提出了一种基于冷冻原理的无痕自动装夹系统，如图 1 所示，主要由高速铣刀、工件、箱体、自动致冷器、工件夹体、隔热垫圈、特殊冷冻液、底台组成。

（1）箱体采用铝合金材质，导热性好，刚度偏小，能够抵抗冷冻液在凝固过程中产生的微量膨胀，箱体各接触面平面度小于 0.03mm，便于与致冷器粘结。在与致冷器粘结之外的表面涂上隔热层，减少能量损耗。

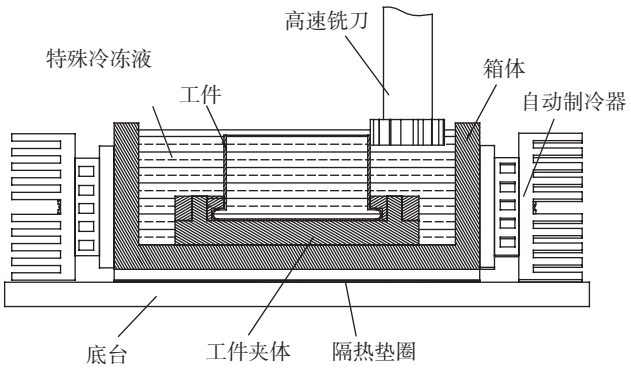

图1 装夹系统原理

Fig.1 Principle of the clamping system

（2）工装夹体采用重量轻、刚度大的金属复合材料制作，利用了该材料的耐腐蚀性、耐磨性、噪音低和减振性好等优点。工作时将待加工工件精确定位，避免了工件在冷冻液凝固之前产生的漂浮、倾斜等现象，保证加工精度。

（3）为减少能量损耗，箱体与基座连接处安装隔热垫圈。

（4）特殊冷冻液为含有速冻剂、防腐剂、增塑剂、强化剂的特殊溶液，目的在于提高冷冻速度，降低冷冻液脆性，提高工件的机械加工性能。高硬度石蜡同时满足该工艺需求。

（5）自动致冷器采用螺栓压缩固定（图 2），安装时首先将储冷板、半导体组件、散热板各安装面均匀涂上厚度为 0.03mm 的导热硅脂，然后将半导体组件的热面和散热板的安装面、半导体组件的冷面和储冷板的安装面平行接触，挤压过量的导热硅脂，确保各工作面接触良好，再用螺栓将散热板、半导体组件、储冷板 3 者紧固。

（6）高速铣刀（图 3）设计为底部切断刀片加四周碎屑刀齿组合形式，切断刀片直径比碎屑部分直径大 1mm 左右。刀具在进行切削时，切断刀片预先在轴向切断余量，然后由碎屑刀齿部分将分离余量部分切碎。

操作过程为：工件精确定位→冷冻液注入→致冷器凝固冷冻液→致冷器切换恒温→高速铣削→致冷器切换加热→融化→断开致冷器电源→冷冻液排出→取出工件→工件热水浴。

3 设计计算

3.1 致冷器功率设计计算

技术要求：给定使用环境温度 $T_h=T_1$，被冷却物体所达到的最低温度 $T_c=T_2$，由热能计算公式得：

$$P_{理论}=Q/t=(m\times c\times d_T)/t$$

式中：$P_{理论}$为理论制冷功率；c 为冷冻液比热容；m 为冷冻液质量 $m=\rho V$，kg，其中，ρ 为冷冻液密度，V 为冷冻箱体积；d_T 为冷冻液温度变化；t 冷冻过程所需时间；

$$P_{损}=P_{理论}\times\alpha$$

$$P_{总}=P_{理论}+P_{损}=(1+\alpha)P_{理论},$$

$$P_{致冷器}=(1+\alpha)(\rho VcdT)/t \quad (1)$$

式中，α 为热损失系数。由公式（1）根据冷冻箱的尺寸可查得致冷器的功率，匹配相应的致冷器件。

在箱体尺寸一定，致冷器功率一定的工况下可得：

$$t=(1+\alpha)(\rho VcdT)/P_{致冷器}。 \quad (2)$$

由公式（2）可以得到下述结论：

（1）冷冻时间的长短与损失功率的大小有关，热损失系数越大所需冷冻时间越长。本设计中采用导热硅胶加速传热，绝热垫圈减少热量损失的方法来减小热损失系数以缩短冷冻时间。

（2）冷冻时间的长短与冷冻液的密度、比热容大小有关。本设计中冷冻液为含有速冻剂、防腐剂、增塑剂、强化剂的水质溶液，缩短了冷冻时间。

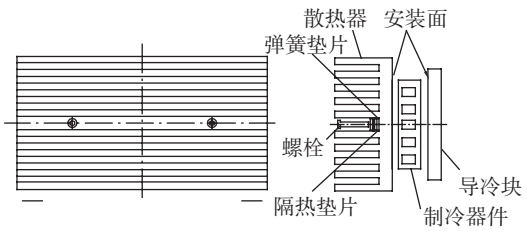

图2 自动制冷器

Fig.2 Automatical refrigerator

图3 高速铣刀

Fig.3 High speed milling cutter

3.2 装夹性能分析

如图 4 所示，有铣削力 F_a，冷冻液与各面结合力 F_b，夹体装夹力 F_c，重力 G，工件内外挤压力 F_d、F_f，根据静力学原理，物体处于平衡状态时作用在物体上的力对任意轴取矩的代数和为 0[9]。Z 轴垂直平面内建如图 4 所示坐标系，则：

$$\sum M_x=0,\ \sum M_y=0,\ \sum M_z=0$$

铣削合力 F_a 与 X、Y 轴相交，则：

$$M_x(R)=0,\ M_y(R)=0$$

因此，由 $\sum M_z=0$ 对 Z 轴取矩得：

$$F_bL_b+F_cL_c+GL_G+F_dL_d+F_fL_f-F_aL_a=0,$$

式中，L_a 为铣削力 F_a 与 Z 轴的距离，L_b 为冷冻液结合力 F_b 与 Z 轴的距离，L_c 为夹体装夹力 F_c 与 Z 轴的距离，L_G 为重力 G 与 Z 轴距离，工件内外挤压力 F_d、F_f 与 Z 轴的距离为 L_d、L_f。且 F_d、F_f 大小相等方向相反，则：

$$F_aL_a=F_bL_b+F_cL_c+GL_G。$$

加工过程中，工件同时受到拉应力跟剪应力的作用（设固态冷冻液抗拉、抗剪结合系数分别为 λ 和 μ）。由在相同的条件下抗拉结合力大于抗剪结合力[10]，有：

$$F_aL_a \leqslant \mu A+F_cL_c+GL_G,$$

式中：A 为工件面积。据此可把铣削力控制在一定范围

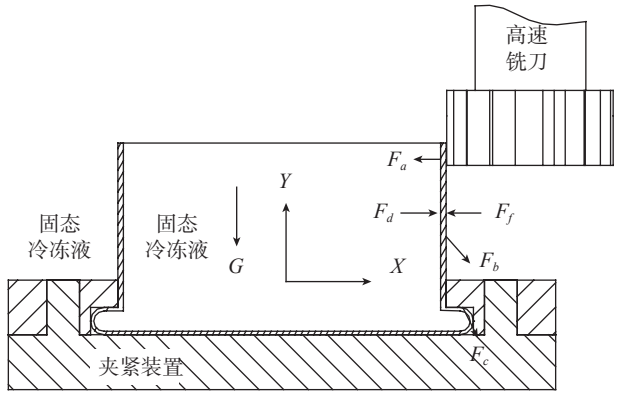

图4 工件受力图

Fig.4 Force diagram of workpiece

内，不致破坏冷冻液损伤工件，保证足够的加工精度。

4 高速铣削理论

4.1 铣刀参数对铣削力的影响

由金属切削理论可知，立铣时，铣削宽度：$b_D=a_p$，铣削厚度：$h_D=f_z\cos\theta$。

式中：a_P 为切削深度 mm；f_z 为每齿进给量，mm/z；θ 为刀具切削刃位置角。

铣削合力为：$$F_a=\frac{\tau a_p f_z\cos\theta}{\sin\varphi\cos(\varphi+\beta-\gamma_0)}。\qquad(3)$$

主切削刃法向剖面力：$F_n=F_a\sin(\beta-\lambda_0)$；$F_t=F_a\cdot\cos(\beta-\lambda_0)$

F_n，F_t 转化为刀具 x，y，z 3 方向的铣削力：

$$\begin{cases}F_x=F_n\cos\theta+F_t\cos\lambda_s\sin\theta\\F_y=F_n\sin\theta-F_t\cos\lambda_s\cos\theta\\F_z=F_t\sin\lambda_s\end{cases},\qquad(4)$$

式中：τ 为剪切面上的剪应力；β 为前刀面与切屑间的摩擦角；λ_0 为刀具前角；φ 为刀具剪切角；λ_s 为刀具主切削刃倾角。

由式（4）知：

（1）铣削力大小与铣刀刀齿所在位置有关，铣刀参数对铣削力影响很大。

（2）可根据生产的批量和质量选取最佳铣刀参数甚至特制铣刀。

本例为切削材料短和余量小的薄壁件，使用了密齿面铣刀，铣削平稳。

4.2 铣削速度对铣削力的影响

真实切应力 τ 与应变 ε 的关系为：$\tau=\tau_s\varepsilon^n$[6]，其中 τ_s 为材料的剪切屈服强度，n 为材料的强化系数。

代入公式（3）得：

$$F_a=\frac{\tau_s\varepsilon^n a_p f_z\cos\theta}{\sin\varphi\cos(\varphi+\beta-\gamma_0)}。\qquad(5)$$

公式（5）可知铣削合力 与工件的材料属性、铣床铣削用量、铣刀参数相关。

由金属切削原理，

$\mu=\varepsilon^n(\cot\varphi+\tan(\varphi+\beta-\gamma_0))=aB_k+b$，可以得到：

$$F_t=T_S a_p f_z\cos\theta\mu=T_S a_p f_z\cos\theta(aB_k+b),\qquad(6)$$

式中，a、b 为与工件、刀具材料相关的参数，B_k 为金属切削变形系数。

切削变形系数 B_k 是大于 1 的数，当切削速度大于工件材料的 V_0 后，随着切削速度的增大 B_k 会逐渐减小直至接近常数 B_0[8]。由公式（6）可知在 f_z 和 a_p 确定后，在一定范围内选取较高的铣削速度，可以减小 F_t，减小工件变形和工件夹持力，降低表面粗糙度，提高加工质量。

在一定范围内，工件夹持力随致冷器制冷温度的降低而增大，铣削用量的选取需考虑工装的夹持性能。铣削用量选取不当，铣削力过大，会致使夹持失败。因此，要使各向切削力最小，必须提高切削速度，选用高速铣削工艺。

5 应用实例

薄壁件刚度低，如果固持不当，易造成装夹变形。由于现有工艺的局限性，只能通过牺牲加工效率来得到满意的加工质量。利用新的固持方法结合高速铣削工艺，解决了这个问题，实现了薄壁件余量的高效高质加工。

本例设计装夹系统箱体尺寸 1000×1000×50，箱体四侧串联 28 个 TEC1-12712（最大电流 12.0A；最大温差 67℃；最大电压 15.4V；最大功率 100W；尺寸 50.0mm× 50.0mm×3.8mm）制冷组件，控制和供电系统选用天津精易工贸生产的控制电源。设计数量为 10000 件。

高速铣削参数选用：n=22000r/min，a_p=1.6mm，a_e=0.5mm，f_z=0.5mm/齿。T_1=17℃、T_2=-15℃，密排 100

（下转第 79 页）

接近传感器相对位置不满足要求的情况下进行调整。(3)在安装设计完成之后,应进行运动测试,检查接近传感器的接近特性是否满足设计要求。

3.2 智能检测技术

接近传感器信号需要经过处理为代表上锁、开锁或到位、不到位的离散信号才能用于系统控制并向其他系统提供。信号处理关系到系统控制及信号可靠性,对于起落架系统,负责向全机很多系统发送轮载及起落架位置信号。如果信号的可靠性差,将严重影响飞机系统的正常工作。目前,接近传感器有多种检测方法,如相位检测法、电桥检测法等。在实现上,接近传感器信号处理电路优先采用纯硬件解算,具有通道故障检查功能。根据国外应用情况,每个接近传感器都应有独立的信号处理硬件通道。为方便应用,国外供应商将接近传感器的处理电路集成在独立的芯片上,将机构的到位和远离状态(如锁的上锁和开锁状态等)处理为高低电平的输出信号,并带有接近传感器通道的故障检测功能。而且,集成电路也在不断发展,处理能力也从处理单个接近传感器发展到同时处理多个通道接近传感器信号。采用集成电路处理不仅可以减少器件数量,而且大大提高了整个接近传感器通道的可靠性。目前,国内在接近传感器接口集成电路方面的产品较少,亟待开展相关的研制和生产工作。

3.3 控制及指示逻辑设计

位置指示特别是起落架放下、机身舱门等位置指示的准确性直接影响到飞机安全和任务执行,这不仅与接近传感器的安装有关,也和位置指示逻辑的设计息息相关。基于双/多余度接近传感器的逻辑设计,需有效利用接近传感器正常信息,编制具有覆盖各种状态,信息提取完整,具备容错能力和安全保护能力,高度可靠的控制与指示逻辑,保证位置指示的可靠性。接近传感器接口电路在输出“目标近”和“目标远”信号的同时,还输出接近传感器的正常状态,即接近传感器通道的“正常”和“故障”信息。在进行控制和指示逻辑设计时,应利用接近传感器正常判断该通道信号是否有效的情况下进行综合逻辑判断,同时实现逻辑中对故障通道进行隔离。同时,还应考虑系统中可能出现的各种状态,使系统的控制和指示逻辑具有更好的适应性。

4 结束语

电感式接近传感器以其高可靠性、长寿命和较强的环境适应能力正逐步得到国内飞机设计领域的重视。同时,从接近传感器及相关产业发展来看,国内各生产商也应加大对电感式接近传感器及其处理电路研究的投入力度,丰富接近传感器的产品系列,增强系统集成研发能力。可以预见,电感式接近传感器在国内后续各型号军民用飞机的研制中会得到越来越广泛的应用。

参 考 文 献

[1] Development and test criteria –solid state proximity switches/systems for landing gear applications. SAE AIR 1810,2003.

[2] 郁有文,常健.传感器原理及工程应用.西安:西安电子科技大学出版社,2000:46–52.

[3] 黄继昌,徐巧鱼,张海贵,等.传感器工作原理与应用实例.北京:人民邮电出版社,1998:269–273.

(责编 叶枫)

(上接第 75 页)

个弹壳,试加工时间(冷冻、加工、加热)为 33min。分析是对产品测量得 L =14.01mm,圆柱度公差为 0.050,表面粗糙度 R_a 为 0.6μm,平端面 t=19.8s/ 个,符合要求。

6 结论

本文研究设计了一套无痕自动装夹系统,实现了薄壁工件的批量装夹;从金属切削理论角度分析了选用高速铣削工艺的必要性;介绍了弹壳余量加工工装设计参数和铣削参数的选取,可为同类工件加工提供借鉴;冷冻液滤去切屑可重复利用,加工成本低,对设备进行少量改装即可对同类工件进行加工,工艺适应范围广。其不足之处有:工件的装夹及定位靠手工操作,人为因素影响较大,装夹自动化方面需要深入研究;加工效率受环境温度和工件尺寸影响,数值波动较大;致冷器各级制冷参数与高速铣削参数互相制约,在装夹系统与高速铣床配套方面需要深入研究。

参 考 文 献

[1] 柯映林,金成柱,刘刚. NOMEX 蜂窝芯高速铣削加工工艺的优化.中国机械工程,2006(12):93–96.

[2] 贾广杰.薄壁壳体石蜡填充高速加工法.新技术新工艺,2009(3):4–6.

[3] Kug W K, Hyo–Chol S. Tte element method and thermoviscoplastic cutting model in manufacuaing systems. NewYork: CRC Press,2001:24–30.

[4] 武凯,何宁,姜澄宇,等. 立铣空间力学模型分析研究. 南京航空航天大学学报,2002,34(6):553–556.

[5] 李尚政,刘宏,张日升.弱刚度件精密加工技术研究.机械制造,2002(11):33–35.

[6] 孔金星,雷大江,岳晓斌,等.高速铣削参数对工件表面质量的影响.机床与液压,2007(2):80–82,85.

[7] 张雷.高速铣削力学模型. 煤矿机械,2002(11):39–41.

[8] 周泽华.金属切削原理.上海:上海科学技术出版社,1993.

[9] 周照宣,周起钊,殷金生.理论力学.北京:北京大学出版社,1982.

[10] 李文彬.电子冷冻切削加工.北京:兵器工业出版社,1987

(责编 赤非 叶枫)