

夹紧力对薄壁件加工的影响研究

贾峰

(哈尔滨东安实业发展有限公司 黑龙江 哈尔滨 150066)

摘要：随着机械行业的发展，薄壁件在各工程领域中应用日益广泛，尤其在航空航天领域，薄壁零件的应用尤为突出。由于该类零件精度高，刚性弱，加工过程中，夹紧力过大，会导致零件产生变形，影响产品质量；夹紧力过小，无法与切削力平衡，会导致零件被刀具带动，影响加工精度及表面质量。因此，现阶段薄壁件的加工，是机械行业公认的难题。我国大多数机械加工型企业中，往往难以很好的平衡夹紧力与切削力之间的关系，加工此类产品时，往往需要依靠经验丰富的高级技能工人靠感觉装夹、加工，夹紧力大小难以量化，对于想要达到长期、稳定、高效的生产极为不利。

关键词：最小夹紧力矩；正应力；轴向变形量；径向变形量

1 零件在加工过程中的受力状态

为保证零件在加工时，处于正确的位置不动，需足够大的夹紧力将其夹紧。当前机加行业中，较为常用的装夹方式为三爪卡盘夹紧，该方法操作简便，通用性强，但在薄壁件加工过程中，由于零件刚性较弱，为防止装夹变形，一般不采取卡盘装夹的方式，在条件允许的情况下，尽量选择轴向压紧，保证压紧点作用在定位元件所形成的支撑面上。且尽量保证夹紧力与切削力方向一致，此时，切削力主要被切削时定位面产生的反作用力所平衡，夹紧力可以较小，夹紧对零件变形几乎无影响。但大多数情况下，夹紧力与主切削力之间是垂直的关系，如图 1。此时，若要零件保持稳定，则由夹紧力产生的摩擦力要大于切削力的径向分力，同时，夹紧力产生的摩擦力矩要大于切削力产生的切削力矩。

以车削为例，图 1 为零件在实际加工中受切削力的情况， F_r 为总切削力，将其沿垂直于坐标轴分解为 F_x 、 F_y 、 F_z 三个分力。其中 F_z 为主切削力，在国际上以 F_c 表示， F_y 为背向力，国际上以 F_p 表示， F_x 为进给力，国际上以 F_f 表示。即：为保证零件在加工过程中较稳定，零件装夹时，轴向压紧的摩擦力矩要大于 F_z 产生的主切削力矩，同时轴向压紧力所产生的摩擦力要大背向力 F_p 。由于在实际切削过程中，主切削力 F_z 远大于背向力 F_p ，因此，在实际计算过程中，只需校核主切削力矩即可。

2 零件在加工过程中受力计算

零件在切削过程中所受到的切削力，可根据切削手册中

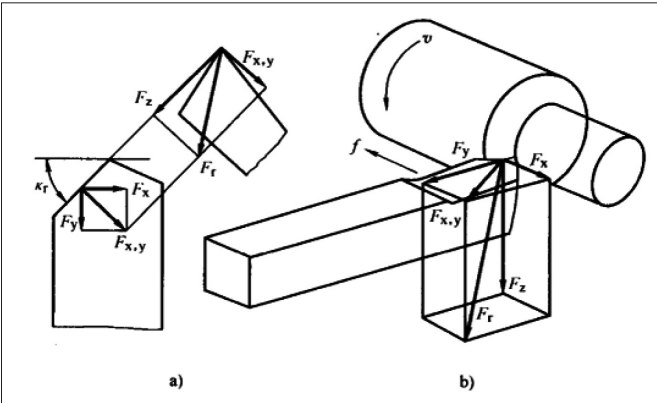


图 1 切削力的分解与合成

经验公式计算得出。以车削为例，主切削力的经验计算公式如下：

$$F_c = C_{Fc} a^{x_{Fc}} f^{y_{Fc}} v^{\eta_{Fc}} K_{Fc} \quad (1)$$

其中， a 、 f 、 v 分别为产品加工过程中实际的背吃刀量、进给量、切削速度。 C_{Fc} ：被加工材料及刀具材质系数， x_{Fc} 、 y_{Fc} 、 η_{Fc} 分别为背吃刀量 a 、进给量 f 、切削速度 v 的指数， K_{Fc} 是当实际加工条件有变化时，各种因素（如：材料机械性能，刀具角度等）对切削力修整系数的乘积。上述各系数指数可根据所加工零件的材质、刀具的几何参数等，由工艺手册中查出。

以硬铝合金 2A12 薄壁筒为例，对产品加工过程中的受力及变形情况进行分析（如图 2 所示）。

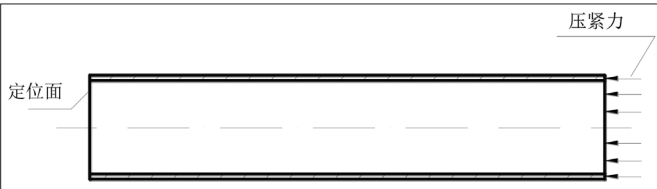


图 2 零件装夹受力示意图

零件加工位置为外径，加工过程中采用芯轴，以端面压紧形式进行加工，压紧为钢质。

刀具参数：材质：硬质合金刀具，前角： 25° ，主偏角： 75° ，刃倾角： 0° ，刀尖圆弧 $R: 0.4\text{mm}$ 。

加工参数：切削线速度： 180m/min ；进给量： 0.3mm/r ，背吃刀量： 0.5mm 。

根据公式 (1) 计算可得：主切削力 $F_c=114.78\text{N}$ 。为保证加工过程中，产品装夹稳定，需保证主切削力矩不大于压紧力产生的切向力矩。

主切削力矩为： $T=F_c \times R$

为保持此时整个系统平衡，零件横截面上会产生一个扭转力矩与主切削力矩相平衡。该扭转力矩由零件端面所受到的剪切力产生。而该剪切力即为零件受到压紧力时，压紧与零件之间产生的摩擦力。即：该零件受到的压紧力所产生的摩擦力矩，需不小于主切削力矩，且零件所受到的正应力不能大于零件材料本身的屈服极限，否则会引起塑性变形。同时还应注意，零件受到不大于材料本身屈服极限的正应力时，虽然不会引起塑性变形，但会产生弹性变形，而且在轴向弹

性变形的同时会引起径向弹性变形，此类变形对零件的加工精度会产生一定影响，施加压紧力时需予以考虑。

下面,针对不同规格,对产品加工时上述各参数进行分析:
规格: $\phi 20 \times \phi 16 \times 100\text{mm}$

由上文可知，主切削力与材料规格无关，上文以求得主切削力 $F_c=114.78\text{N}$ ，因此该产品所受到的主切削力矩： $T=F_c \times R=1.1478\text{N} \cdot \text{m}$ 。

即：加工该产品所需要的最小压紧力所产生的摩擦力矩为 $1.1478\text{N} \cdot \text{m}$ 。下面，根据此主切削力矩，对零件所受到的最大切应力进行计算。

根据材料力学中最大切应力公式： $\tau_{\max}=TR/I_p$ (2)

其中， R 为零件最大半径， I_p 为横截面对圆心 O 的极惯性矩。

根据材料力学中，空心圆筒的极惯性矩公式可知：

$$I_p=\pi(D^4-d^4)/32 \tag{3}$$

其中， D 为零件外径， d 为零件内径。

根据式 (2) (3) 可得：

$$\tau_{\max}=114.78 \times 10/[\pi(204-164)/32]$$

$$\tau_{\max}=1.24\text{MPa}$$

该切应力由压板与零件之间的正应力产生，因此，该零件所受到的正应力为：

$$\delta=\tau_{\max}/\mu$$

上式中， μ 为压板与零件间的摩擦因数，由《机械设计手册》可查得，该数值为 0.15。

经计算可得： $\delta=8.26\text{MPa}$

硬铝合金弹性模量 $E=70\text{GPa}$

产品在该正应力作用下变形情况为： $\varepsilon=\delta \cdot L/E$

其中， L 为零件总长，经计算可得：

$$\varepsilon=8.26 \times 100/70000=0.0118\text{mm},$$

即：该产品在该压紧力作用下会产生 0.0118mm 的轴向弹性变形。

因此可得出,为保证零件正常加工,所需最小夹紧力矩为： $F_c \times R=1.1478\text{N} \cdot \text{m}$ ，在此夹紧力作用下，零件会产生 0.0118mm 的轴向变形。

按上述方法对不同规格的零件进行计算，得出数据如表 1 所示。

表 1 不同规格的零件进行计算结果

序号	规格 (mm)	最小夹紧力矩 (N·m)	正应力 δ (Mpa)	轴向变形量 ε (mm)
1	$\phi 20 \times \phi 16 \times 100$	1.1478	8.26	0.0118
2	$\phi 20 \times \phi 18 \times 100$	1.1478	14.17	0.02
3	$\phi 12 \times \phi 10 \times 100$	0.68868	26.15	0.037

根据表 1 中数据可知，零件直径越小，壁厚越薄，保证装夹稳定时，所受到的正应力越大，产生的轴向变形也就越大。当零件为简单环状结构时，该变化对产品质量无影响。但当零件外径上有其他结构，如：外径环槽时（如图 3 所示）。

加工后去除压紧力，产品轴向弹性变形回复后，会对图 3 中槽的位置尺寸 a 产生一定影响。具体情况需根据尺寸 a 与零

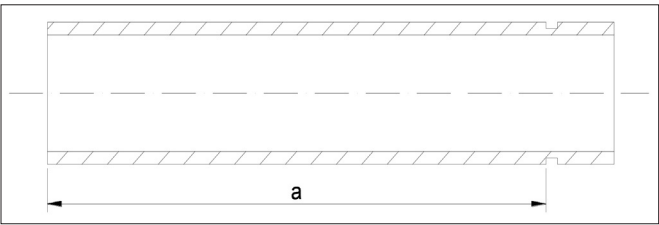


图 3 零件结构示意图

件总长的比例，对应轴向变形量 ε 计算得出。因此，在加工过程中，一定要注意，既需保证压紧力矩大于切削力矩，也需对产品某些结构的轴向尺寸进行分析，避免产品超差；同时，还要注意，正应力不能大于材料本身的屈服强度，如：该例中，选择的材料为硬铝合金，经热处理后，该合金屈服强度约为：400MPa，该强度远大于压紧所需的最小正应力 8.26MPa，因此较为安全，但应注意，本例中选用的是强度较高的硬铝合金，若为防锈铝或纯铝时，材料屈服极限较低，需重点考虑，当压紧力若超过此数值，则将产生永久性塑性变形。

另外，在轴向压紧力使零件产生轴向弹性变形的同时，零件的径向尺寸也会同时发生变化。该变化量可以通过材料的泊松比（材料在单向受拉或受压时，横向正应变与轴向正应变的绝对值的比值）计算。铝的泊松比为 0.3，以 μ 表示（与摩擦因数表示方法相同），以表 1 中序 1 为例计算： $\varepsilon_{\text{径向}}=\delta \cdot \mu \cdot D/E=0.000708\text{mm}$ 。

由上式可知，零件径向变化量与零件直径大小成正比，但直径增大后，该参数是否会成比例增大，可按如下规格进行分析：

规格： $\phi 100 \times \phi 98\text{mm}$

根据式 (2) (3) 可得： $\tau_{\max}=0.37\text{MPa}$

由 $\tau_{\max}$ 可知， $\delta=2.511\text{MPa}$

从而得出： $\varepsilon_{\text{径向}}=\delta \cdot \mu \cdot D/E=0.001\text{mm}$

由上述结果，零件直径增大 5 倍，但径向变化量只差了万分之三那左右，几乎未改变。从计算结果可看出，虽然零件直径与零件受力时径向变化量 $\varepsilon_{\text{径向}}$ 成正比，但由于零件直径越大，所受到的正应力越小，因此零件直径对最终结果影响不大。同时，由上述结果可知，轴向压紧对零件径向弹性变形影响极小，一般精度加工时，完全可以忽略不计。

3 结语

本文从夹紧力矩、零件轴向变化量和零件径向变化量等方面，对零件加工过程中受力情况进行了分析，为加工过程中，较为准确的控制夹紧力提供一定的理论依据。使夹紧力大小能够做到量化，从一定程度上，降低了对操作者技能水平的要求。

参考文献：

[1] 刘鸿文. 材料力学 [M]. 北京：高等教育出版社,2011.
[2] 王先逵. 机械加工工艺手册 [M]. 北京：机械工业出版社,2007.
[3] 秦大同, 谢里阳. 现代机械设计手册 [M]. 北京：化学工业出版社,2011.