

2015 高效加工研讨会&2015 自动化论坛

——浅析薄壁铝合金零件铣削加工 变形控制

中国商飞上海飞机制造有限公司 陈志锰

手机: 1560 188 5610

邮箱: armond_chen@126.com



目录

- 1 前言
- 2 零件变形原因分析
 - 2.1 切削力的影响
 - 2.2 切削热的影响
 - 2.3 夹具的影响
 - 2.4 残余应力的影响
- 3 零件变形后的校正
- 4 总结



1 前言

- 铝合金材料凭借其良好的机械性能，被广泛应用于航空领域。
- 在民用航空领域，更是大量使用整体铣削铝合金件，代替钣金铆接零件，从而提高零件的比强度。（如图1.1所示）
- 这些零件具有薄壁、材料去除率大、造型复杂、曲面多、配合精度要求高等一系列特点。
- 铝合金整体铣削薄壁零件的变形控制成了民航客机零件制造的主要难点。
- 针对薄壁结构铝合金件的加工变形的原因和变形控制的方法进行了初步探讨。

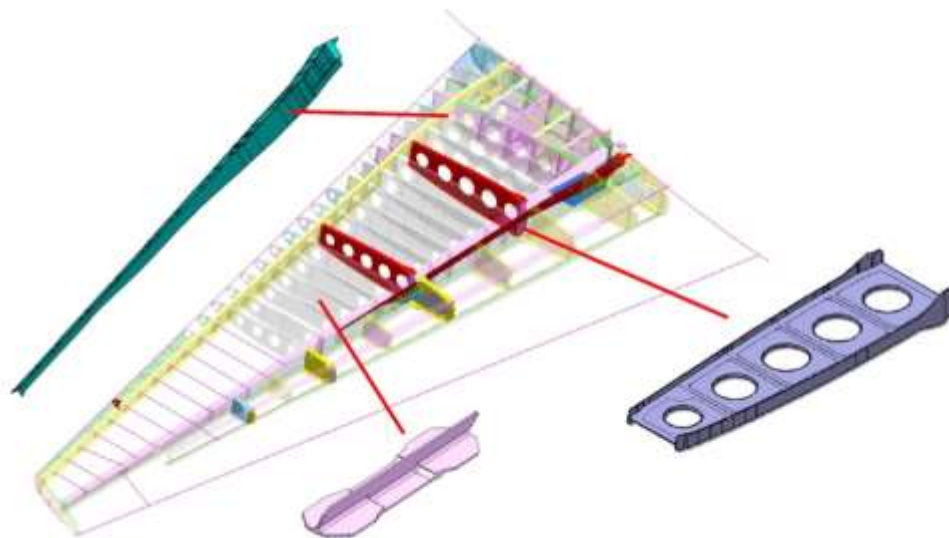
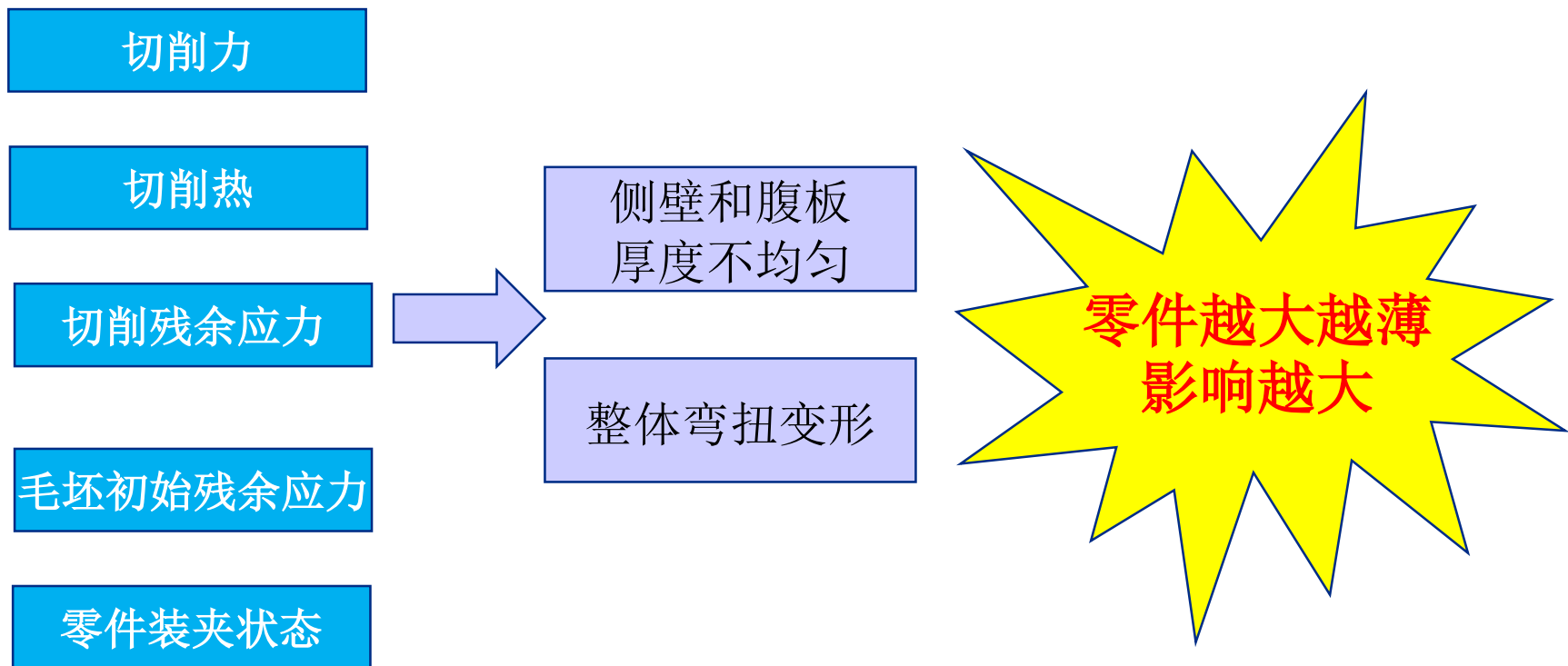


图1.1 民航客机中的典型铝合金零件

2 零件变形原因分析



2.1 切削力的影响

2.1.1 侧面加工的分析

- 在铣削加工中，切削力可以分解为切向 F_x 、径向 F_y 和轴向 F_z 三个方向，如图2.1所示。
- 加工零件侧壁时，由于径向分力的存在，刀具和零件之间相互挤压而产生了如图2.2所示的让刀现象。
- 由于制成刀具的材料具有远超过零件薄壁筋板的刚性，所以让刀常常造成筋板上厚下薄的情况，筋板厚度越小时，现象越明显。

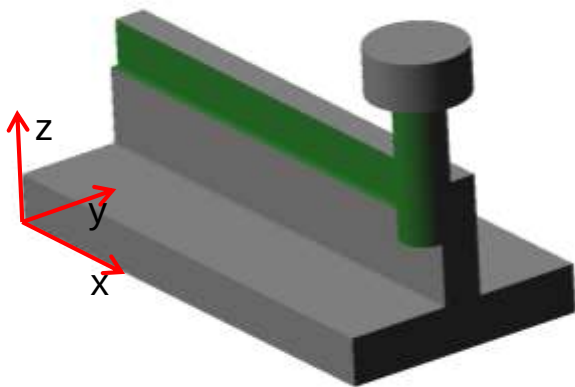


图2.1 侧铣时的切削力

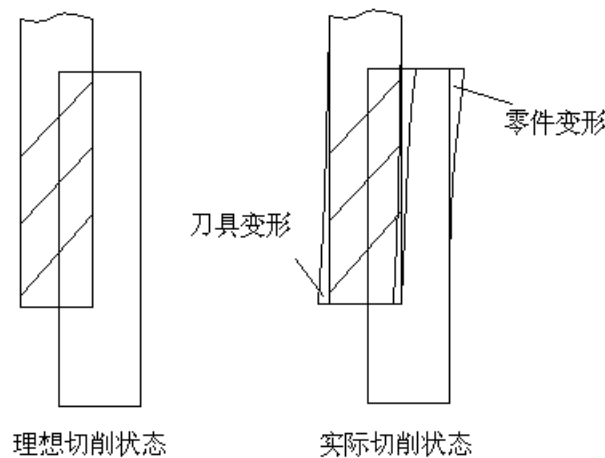


图2.2 侧壁铣削时的让刀

侧壁沿z轴方向变形量分布

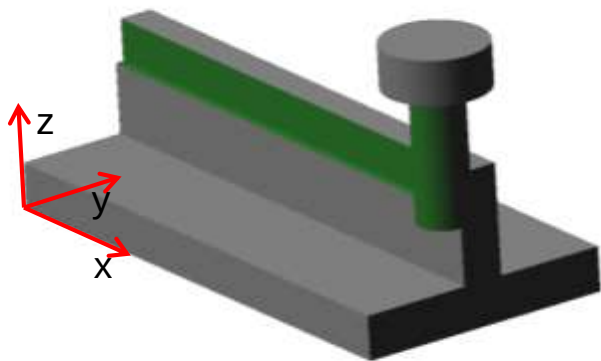


图2.1 侧铣时的切削力

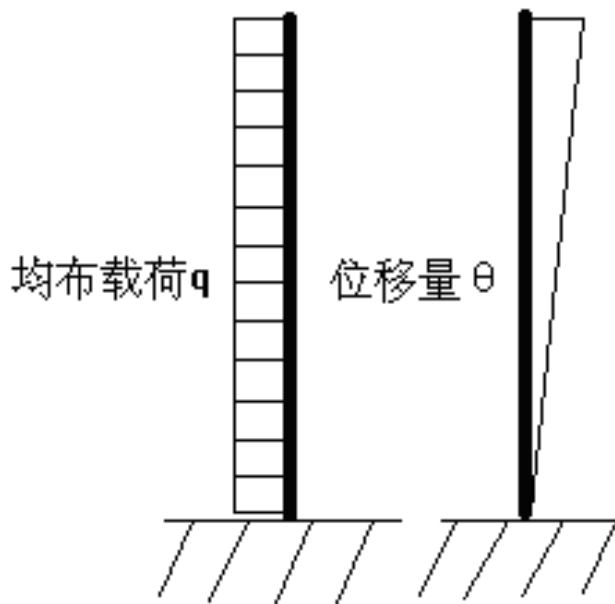


图2.2 侧铣时z向的变形位移量

■沿Z方向上，在理想状态下，假设刀具沿轴向的切削力相同，视作均布载荷 q ，其变形趋势如图2.2。



侧壁结构对于加工变形的影响

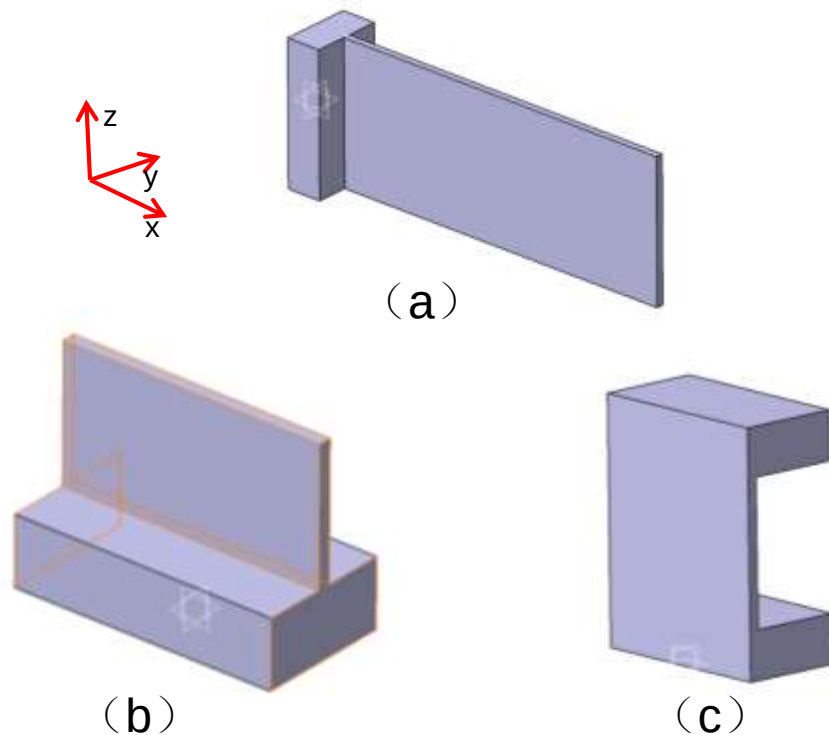


图2.3 侧壁在y方向的三种状态

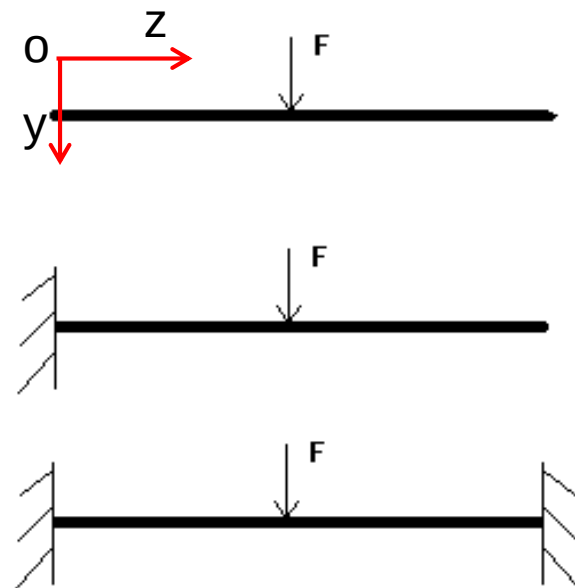


图2.4 侧壁在y方向的受力状态

- 沿y方向上，又可以分为三种状态，即无加强结构、单侧有加强结构和双侧都有加强结构，如图2.3，而受力则简化为沿着z方向上移动的力F。
- 对于第一种情况，零件筋板并不是完全不受约束，实际筋板底部和零件相连，所以中间部分相对于两侧而言，有着更加强的稳定性。
- 随着刀具进给，筋板上的受力点沿着长度方向（z方向）移动。

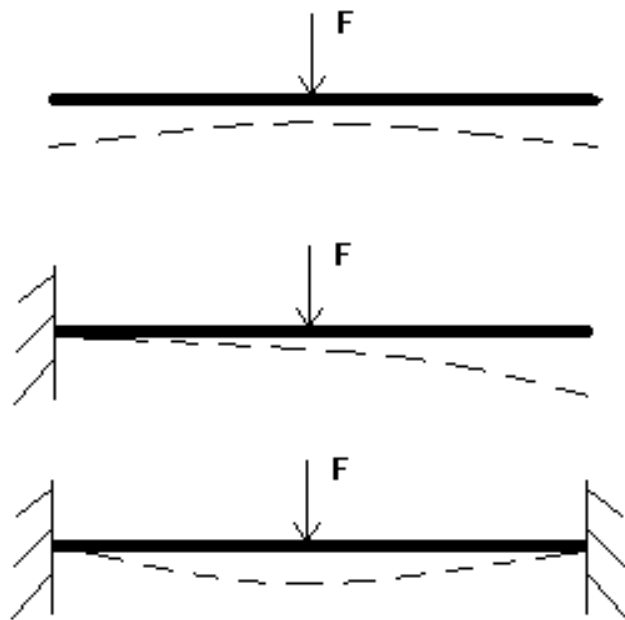


图2.5 侧壁在y方向的变形情况

- 根据有关资料对不同情况下变形位移量分析的结果得到了如图2.5 大致的变形趋势。
- 通过计算分析，在加工侧壁过程中采用摆角补偿和刀具路径补偿可以较好减少因为让刀变形导致的零件筋板尺寸厚薄变化，但在实际操作中，结构的复杂导致计算异常困难，所以不推荐使用。

不同高度厚度比薄壁的加工策略

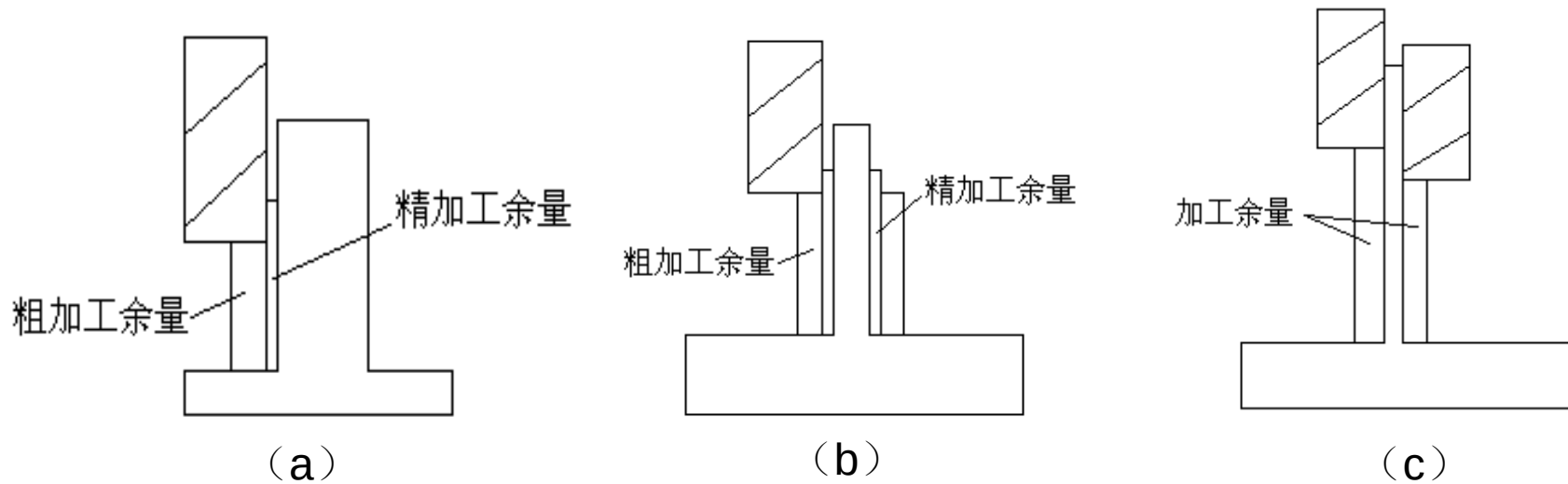


图2.6 不同高度厚度比薄壁的加工策略

- 薄壁的高度厚度比是加工时要考虑的重要因素。
- 当高度厚度比值相对较大时，宜采取径向优先的轴向分层方法如图2.6（a）所示。
- 如果比值很大，而筋板厚度又很小的时候，宜采用对称切削的方法如图2.6（c）所示或者台阶切削的方法如图2.6（c）所示，保留基部厚度来增强整个结构的加工刚性。



顺逆铣对侧壁加工的影响

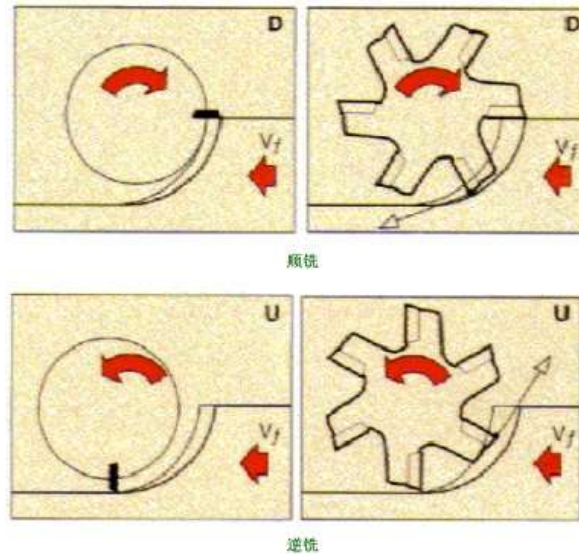


图2.7 顺逆铣示意图

■根据铣刀的旋转方向和切削进给方向之间的关系，可以分为顺铣和逆铣两种。当铣刀的旋转方向和工件进给方向相同时称之为顺铣，反之则为逆铣，如图2.7所示。

■顺铣时，切削厚度由大到小，切向力与零件进给方向相同，径向力为压力，加工效率高，刀具磨损小，零件表面的光洁度好。

■逆铣时，切削厚度由小到太，切向力与零件进给方向相反，有助于抵消丝杠间隙，径向力为拉力，会导致薄壁结构被拉动而造成尺寸偏小，在刀齿切削前，先在零件表面摩擦一段距离，造成表面光洁度差，刀具磨损严重。

■CNC机床的精密度较高，不考虑丝杠间隙问题，因此推荐使用顺铣。逆铣仅在粗加工或半精加工中为避免来回空刀而采用。

2.1.2底面加工的分析

腹板加工变形原因分析

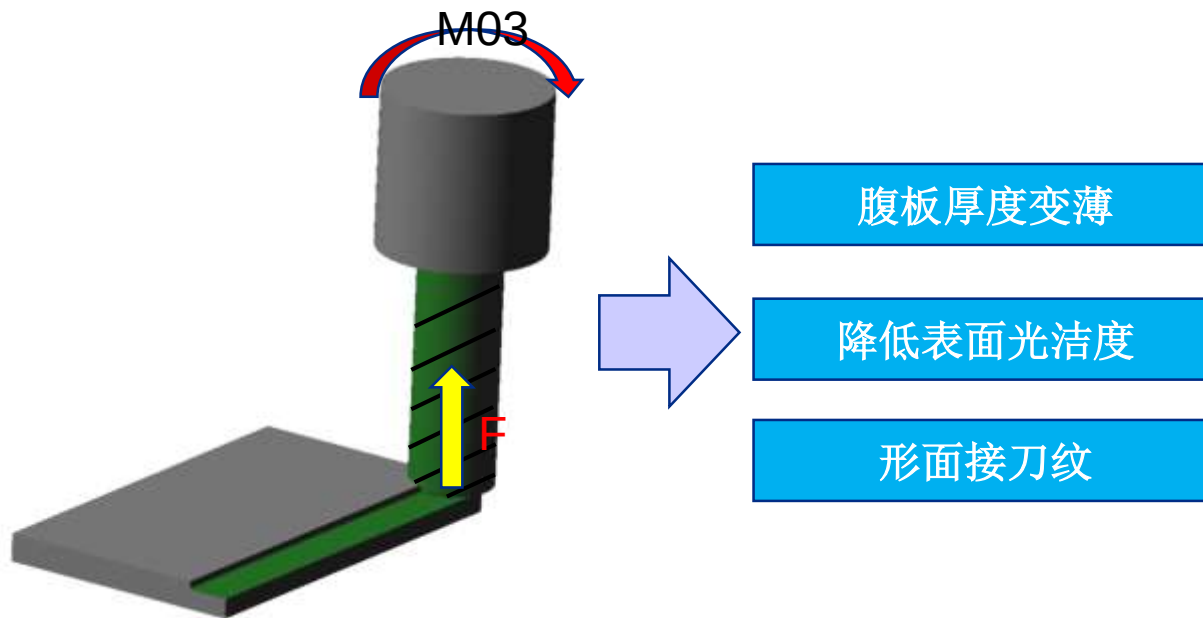


图2.8 腹板加工变形原因分析

- 正轴向前角的铣刀在铣削加工时，不可避免地产生对零件轴向向上的拉力。
- 对于薄腹板的加工影响巨大。

合理安排走刀路径

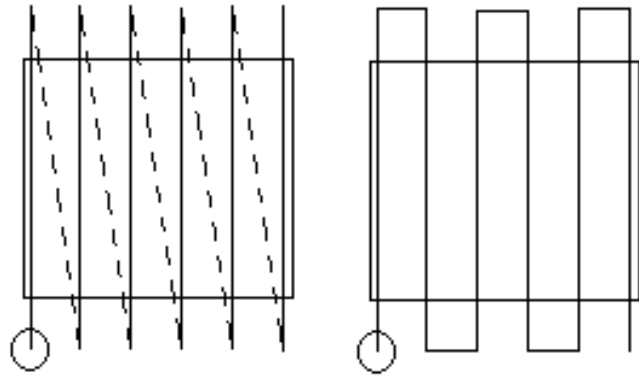


图2.9底面走刀路径

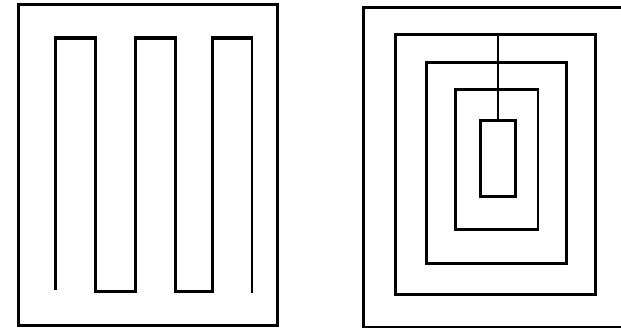


图2.10 型腔走刀路径

- 底面加工常常采取如图2.9所示单向铣削和来回铣削，两种走刀方式。
- 来回铣削节省刀路，加工效率较高，但由于顺逆铣变化等等原因，常常在刀路与刀路之间存在着较大的差异，有时甚至会产生台阶差。
- 单向铣削比较容易保证表面的光洁度，因此推荐粗加工时采用来回方法，而在精加工的时候使用单向铣削。
- 对于腔槽而言，有来回铣削，也有方向一致的环绕铣削。
- 其中环绕铣削又有从内向外和从外向内两种，其对零件变形的影响将在后面阐述。



选择合适的工装

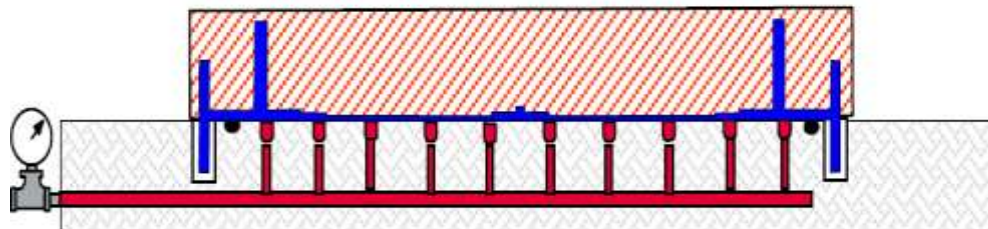


图2.11 真空平台吸附薄壁结构件

- 对于某些薄壁的腹板结构，在加工的时候需要采用真空平台吸附。
- 值得注意的是在真空平台边缘区域易出现吸附力不够的情况，加工过程中零件底面振动或是被拉起，产生明显刀纹台阶甚至尺寸偏小的情况，在边缘区域应当增加抽气槽以加大吸附力。
- 对于某些没有相应真空平台的薄壁零件，在加工时可以使用填充物来补充强度，此处需要注意的是填充物的膨胀和收缩也会导致零件的变形，因此若采用此类方法进行加工的时候应该注意时效。



2.2切削热的影响

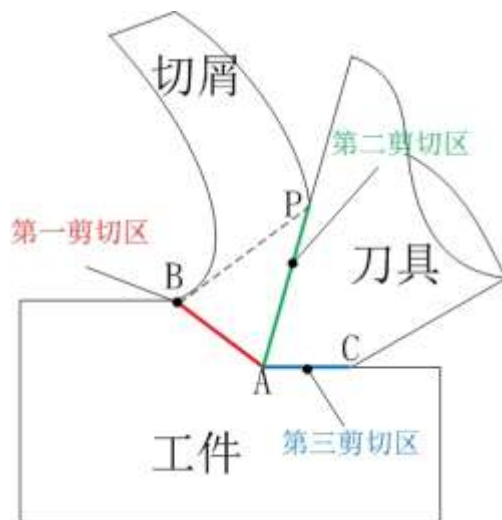


图2.12 塑性金属切削剪切变形模型

■切削 剪切区变形模型：AB为剪切滑移区，AP为刀-屑摩擦区，AC为刀具-工件摩擦区，ABP为主切削区。

■切削时，大部份的热量在第一剪切区产生，产生的热量几乎都是由切屑带走。在排屑顺畅，冷却充分的情况下，不对零件变形产生太大影响。

■第二剪切区产摩擦生的热量分别传导给切屑与刀具，当工件材料的热导率低时，传导给刀具的热量就多，刀具的温度就高，对刀具寿命不利。（钛合金切削、塑料切削）

■第三剪切区摩擦产生的热量分别传导给刀具与工件，影响工具表面状态，从而影响变形情况。刀具选择时，应关注刀具的后角。

实例



图2.13 侧弯变形的缘条

- 图2.13所示为两根因为冷却不到位而由切削热导致侧弯变形的缘条。
- 经调查变形的原因是冷却液喷嘴没有对准刀具，导致切屑与刀具没有得到及时的冷却。同时因为没有冷却液的冲刷，切屑在零件已加工区域堆积，从而改变了零件的应力状态。最终导致零件严重变形。
- 为了避免切削热变形对零件产生影响，应当做到以下四个方面：冷却系统运行良好、排屑顺畅，避免刀具陷在切屑中转动、刀具的转速和进给要匹配，避免高转速而小进给或是停刀的情况。

2.3 夹具的影响

合理的夹具是减少零件变形的重要保障，在这里将夹具对零件变形的影响分为两种情况来分析：装夹力直接导致零件变形、拆卸后的回弹。

2.3.4 装夹力直接导致零件变形

典型的装夹不合理

- 图2.14所示为两种典型的装夹不合理导致零件变形的情况，因此需要避免单侧受力和对弱刚性结构进行挤压。

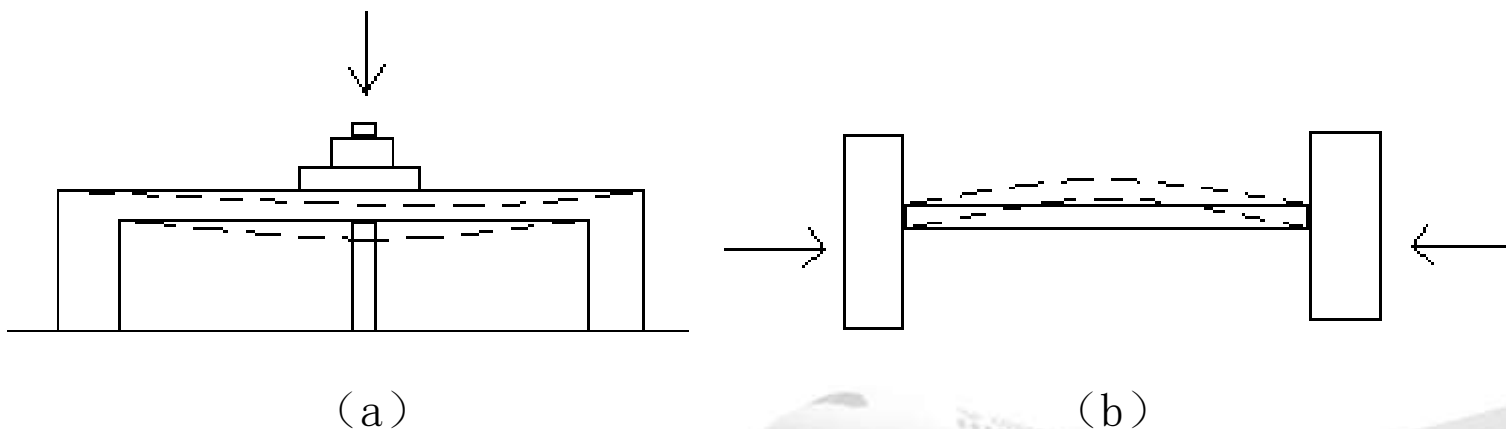
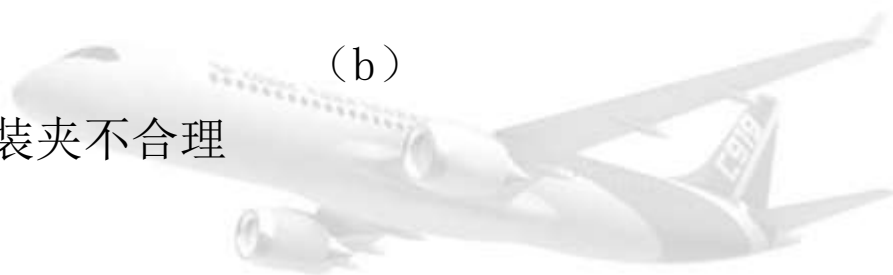


图2.14 典型的装夹不合理



隐性的装夹不合理

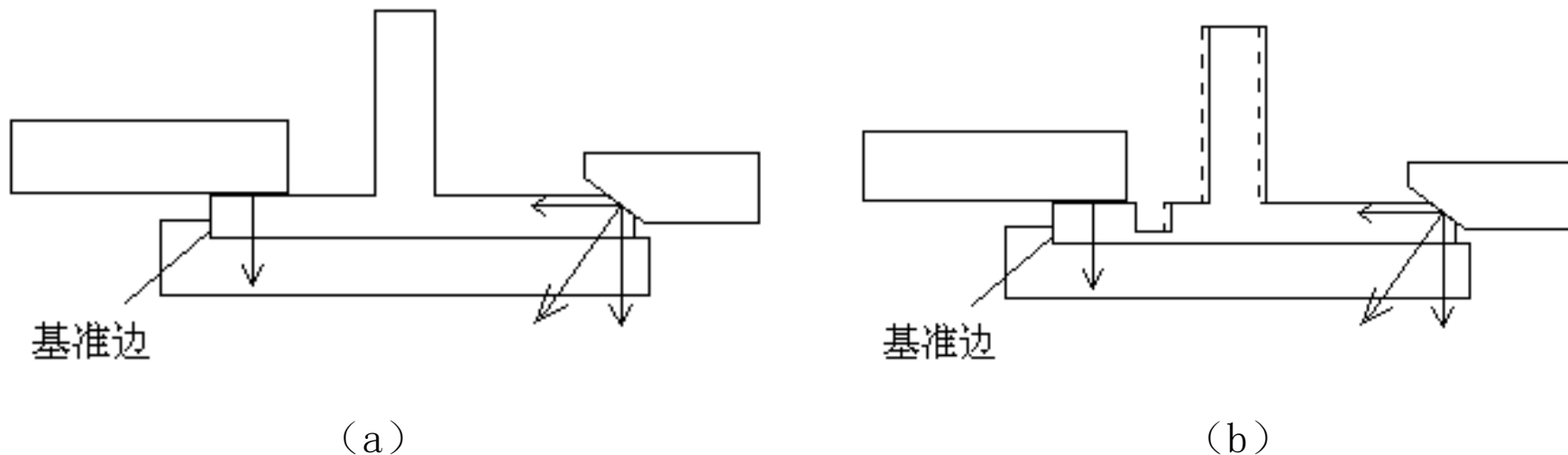


图2.15 隐性的装夹不合理

■在实践过程中，常常会存在隐性的装夹不合理。

■如图2.15（a）所示结构，右侧采用了带角度的压板，产生两个分力，使零件达到底面和左侧基准边均与工装贴合的效果。

■在落料过程中，就产生了如图2.15（b）所示的情况。当左侧结构的厚度减小，刚性减弱之后，右侧压板产生的推力就导致了零件整体左移。



优化的工艺方案

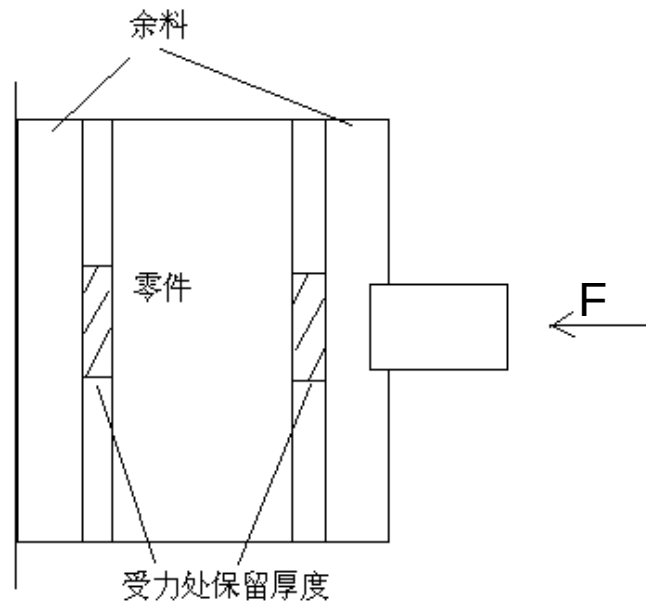


图2.16 优化的工艺方案

■在此情况下，应该采用更加合理的方案，例如图2.16中在受力处保留厚度或者优先加工右侧外形，以避免外形错位和零件体本身产生的扭转。

■鉴于上述问题的存在，为了避免夹紧力直接造成零件变形，应该使受力方向与加工余料去除方向一致，并且对于弱刚性的结构不能直接施加夹紧力，有必要的话应该用工装贴合来补足。

2.3.2 拆卸后的回弹变形

拆卸后的回弹其实就是将加工前毛坯本身的变形或者加工过程中零件的变形保留到了加工后。最显著的情况是毛坯存在变形情况下的强压加工。

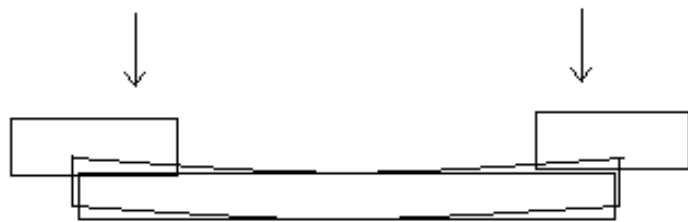


图2.17 拆卸后的回弹变形

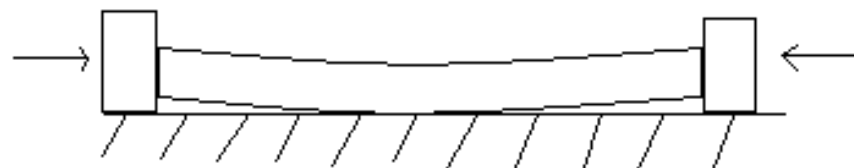


图2.18 回弹变形解决方案

- 如图2.17，板料产生翘曲时采用强压使之平展，但加工项目完成后，板本身弹性变形恢复，产生变形。

解决方案

- 为了消除此类情况，需要对坯料的基准进行加工，在加工的过程中，应使垂直基准面方向的自由度不受限制，如图2.18采用双侧推顶的方式，对上表面进行重新加工，这样在拆卸工装后加工过的基准面将保持平面而不会回弹成曲面。
- 在这种消除毛坯变形的基准加工过程中，对装夹的要求是压紧力垂直于余料去除方向，但要注意和前面关于夹紧力直接导致零件变形的要求是冲突的，在此处，装夹并不应该施加太大的夹紧力，其作用更多是限制而不是施力。

2.4 材料初始残余应力的影响

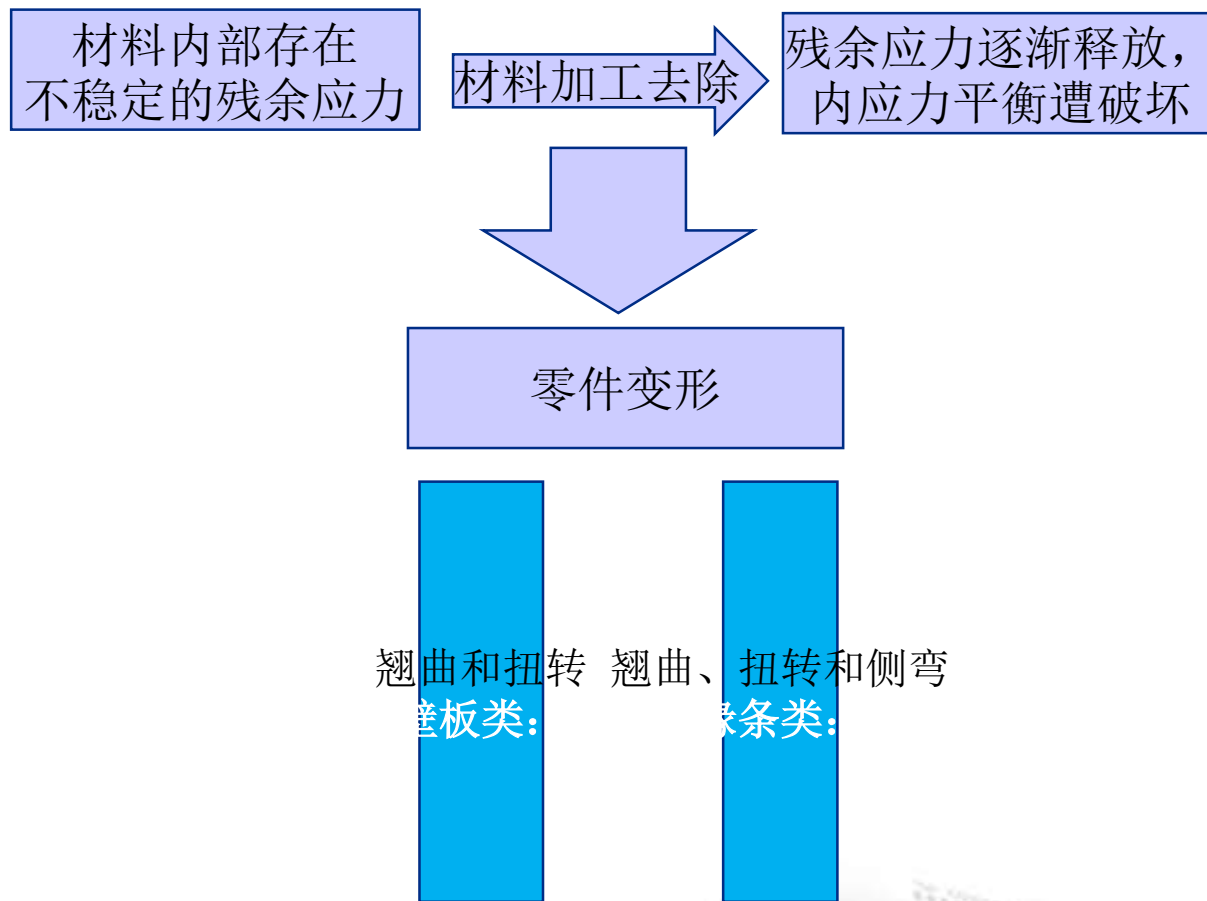


图2.19 材料初始残余应力导致零件变形



材料初始残余应力加工变形控制方法

■ 该类零件的加工，所遵循的原则就是在加工的过程中逐步让零件的变形得到释放，并且在后续的加工中将零件的尺寸加工到位。

■ 粗加工部分：

- ❑ 由于粗加工之后必然产生变形，必须保留足够的加工余量，使粗加工变形量不至于导致零件尺寸无法做出。
- ❑ 粗加工推荐等高线层进方式，这样可以使零件内应力释放较为均匀，加工参数宜小切深高进给，符合渐变渐消除的加工理念，而不会累积起来导致很大的位移量。
- ❑ 应力槽的作用在于将零件预料部分对零件本体变形的限制消除，其数量，位置都会影响到零件最终状态。
- ❑ 在粗加工完成后需要进行时效，宜在温度和环境上保持一定的稳定状态，让粗加工后的残余内应力得到充分释放。
- ❑ 经过时效放置后，零件诸多变形特征体现出来，后续加工中切忌使用强压的装夹方法，而要采用本文在夹具影响部分提出的余量去除方向自由状态重新加工基准面。



■ 半精加工部分

- ▣ 粗加工大余量去除后，大部分的残余内应力已经以位移的方式释放出来，半精加工部分除了让内应力进一步释放，还需要将零件各部分余量厚度加工到均匀的状态，其目的的一方面为了后续精加工能够更好控制尺寸，另一方面和重置基准作用一致，将粗加工完成后变形的余量去除。
- ▣ 半精加工过程中材料去除量仍然很多，加工时刀具的行进方式应该与粗加工类似，尽量避免顺逆铣混合的情况，要特别注意的是，对于薄壁部分要预留足够的厚度以保证刚度。
- ▣ 如果材料的残余内应力比较大，宜进行两次或更多次半精加工，使之逐步到达余量均匀的状态。

■ 精加工部分

- ▣ 材料初始残余内应力对于零件最终状态的影响已经很小了，剩下的部分可以用补偿和偏置来消除，具体的量值需要对零件加工进行记录和统计后得到。



3 零件变形后的校正

- 不论采用何种技术，整体结构件加工变形不会完全消除，这就涉及工件变形后安全校正问题。
- 主要有冷处理校形（机械手段）与热处理校形两种途径，各有特点。
- 冷处理校形易引起工件的破坏，即使工件没有破坏，也容易在内部存在校正应力，对工件的使用也会带来质量隐患。
- 热处理方式校正周期长、成本高。
- 根据整体结构的变形特点及变形量，制定合理的校形方案。

4 总结

- 零件的加工变形是机加领域的重要难题，目前尚无绝对有效的控制方法，本文就工艺设计减少变形的方案进行了初步探讨，供同行们参考和交流。



THANKS