

# 薄壁件车削加工中残余应力的产生与控制

## Generation and Control of Residual Stress for Thin-Wall Part Turning

西安航天动力机械厂 曲中兴 张立武

**[摘要]** 薄壁件车削加工时,已加工表面存在的残余应力将影响工件的使用性能和疲劳强度。阐明了薄壁件车削加工过程中残余应力产生的原因;分析了影响车削残余应力的因素;总结了目前国内常用的残余应力测试方法;介绍了几种可行的用来控制和调整残余应力的方法。

**关键词:** 残余应力 车削加工 薄壁件变形 控制措施

**[ABSTRACT]** Residual stresses are generated in the machined layer for thin-wall parts cutting. The residual stresses impacts the working performance and fatigue strength of parts. The reasons of residual stress generation in the thin-wall parts cutting process are expounded. Affecting factors of residual stresses are also analyzed. At the same time, the domestic test methods of residual stress that are commonly using at present are summarized. Finally, several feasible methods are presented to control and regulate residual stresses in thin-wall parts cutting.

**Keywords:** Residual stress Turning Deformation of thin-wall part Control measure

在现代航空、航天制造业中,大型整体薄壁结构件得到了越来越广泛的应用,它们大多是由一块整体毛坯件经车削加工而成的,材料去除量大都在90%以上。但是,由于其壁薄、刚性差的特点,加工完成后的零件容易产生较大变形,造成结构尺寸超差、内应力集中等缺陷。在实际生产中,为使工件能达到规定的尺寸精度,增加了校形等工序。然而,这不仅增加了加工时间和费用,还使形状较复杂的薄壁结构件的废品率增高。

据分析可知,残余应力的变化是引起大型整体薄壁件加工变形的主要原因之一。物体在外力作用下发生了弹塑性变形;当外力消失后,弹性变形部分的恢复受到塑性变形部分的阻碍,从而产生了残余应力。残余应力是存在于物体内部且保持平衡的力。残余应力对零件的使用性能有重要影响,切削加工表面的残余应力分

为残余拉应力和残余压应力。残余拉应力导致零件疲劳强度降低,使零件表面产生微裂纹,降低其使用寿命;残余压应力对零件疲劳强度的影响较小,但由于分布不均匀,同样对零件的使用性能产生不利影响。与此同时,工件毛坯内部原始残余应力的分布及大小对工件的加工变形也有很大影响。

随着制造技术的不断进步,对精度要求高、结构复杂的薄壁结构件的需求越来越多。为了从根本上提高工件的加工精度,有必要对工件车削残余应力产生的原因、影响因素、测量方法以及消除措施进行分析,从而为准确预知毛坯内部以及工件残余应力变化对工件加工变形的影响做好充分准备。

### 1 薄壁件车削残余应力产生原因

已加工表面残余应力产生的原因可以概括为机械应力和热应力引起的塑性变形效应。

#### 1.1 机械应力塑性变形效应

在剪切区,金属切削层在切削速度方向上承受压应力。使已加工表面在该方向上产生残余拉应力。

在刀具与工件接触的切削区域,切削层金属沿着刀刃钝圆面流动时受刀具挤压而发生塑性流动,使表层发生延展现象。而里层金属发生弹性变形,对表层的延展起到了牵制作用。之后,切削层金属受后刀面的强烈摩擦作用,使表层发生大塑性变形,而里层金属发生弹性变形。切削过后,刀具的作用力消失,里层金属的弹性变形趋向恢复,但受到表层金属的牵制,产生拉应力,而表层产生压应力。

#### 1.2 热应力塑性变形效应

金属在剪切区发生强烈的塑性变形,又在刀具与工件接触的切削区域经受强烈的挤压摩擦作用,从而产生切削热。这些热量使得工件表层的温度比里层的温度高,进而使表层的膨胀速度比里层大,但同时又受到里层的阻碍,表层产生压应力。当切削过后,表层和里层的温度都下降到室温,表层收缩多,里层收缩少,表层收缩受到里层的牵制,因此表层产生拉应力,里层产生压

应力。

可见,机械应力塑性变形效应在表层产生的是压应力,热应力塑性变形效应在表层产生的是拉应力。

## 2 影响薄壁件车削残余应力的因素

工件已加工表面残余应力的性质和大小受很多因素的影响。掌握这些因素的影响规律并明确主次因素,对于降低残余应力和优化切削过程是很有必要的。

### 2.1 工件材料的影响

工件材料自身状态及物理机械性能直接影响加工表面残余应力。塑性好的材料切削加工后通常产生残余拉应力,而塑性差的材料则产生残余压应力。由于工件材料的具体初始应力状态不同,切削加工可使工件内残余应力值“增大”或“减小”。

对屈服极限大的工件材料,车削加工的残余应力亦比较大,而残余应力分布层深度则相应较浅。这是由于车刀接触点前方区域的塑性凸出效应、车刀接触点以下区域的挤光效应及热应力综合作用的影响。此外,受工件材料自身屈服极限的限制,车削加工所产生的残余应力不可能大于工件材料塑性变形的应力极限而使工件材料向“强化”、“颈缩”方向发展。

### 2.2 工件材料的热处理状态

工件材料的热处理状态不同,结果硬度不同,抵抗塑性变形的能力不同,在同样车削条件下的弹性变形量也不同。硬度高,材料弹性变形量小;硬度低,材料弹性变形量大。由于工件深层金属的弹性回复不同,硬度低,车削加工残余应力小;硬度高,车削残余应力则大得多。同理,硬度高材料塑性变形层深较浅,车削加工后残余应力分布层深较浅;硬度低,材料塑性变形层深较深,车削残余应力分布层深也较深。

### 2.3 切削参数的影响

#### 2.3.1 切削深度

不同切削深度对工件表面残余应力及其分布的影响不明显。这主要是由于切削深度的增大对切削温度和工件表面残留热塑性变形的影响不明显。可以说,切削深度对宏观的切削力有影响,但对工件表面残余应力的影响则比较小。

#### 2.3.2 进给量

进给量增大对车削加工残余应力的影响显著。随着进给量的增大,切削温度升高、车削热塑性变形量增大,故车削加工残余应力呈明显增大趋势,且残余应力分布层也加深。

#### 2.3.3 切削速度

随着切削速度的提高,工件表面残余应力呈显著增大趋势(切削速度大于 45m/min 时,残余应力的增大尤为显著)。切削速度提高的同时,在车刀作用下的切削层金属发生弹塑性变形,加上后刀面与工件表面、车刀与切屑摩擦产生的切削热,切削温度也不均匀地升高。尽管切削速度的提高使切削热在极短时间内产生并使温度升高,但切削底层的切削热向其内部的传导要滞后一定时间。因此,切削速度的提高使来不及向切削内部传导的切削热积聚在切削底层,这导致切削温度升高而产生较大的热塑性变形,对车削加工残余应力的产生起着重要作用。

#### 2.3.4 刀具参数的影响

当增大刀具的前角、后角,减小刀尖的圆弧半径和切削刃的钝圆半径时,残余应力减小,达到的深度也减小。Robert D Halverstadt 特别强调,刀具的锋利性、后刀面的磨损或钝圆半径对残余应力的影响很大,其次是刀具前角。

## 3 残余应力的测量方法

### 3.1 残余应力测量方法的基本原理

残余应力的测量技术始于 20 世纪 30 年代,发展至今已形成了数十种测量方法。残余应力的测量方法可分为机械释放测量法和非破坏无损测量法 2 种。

机械释放测量法通过将具有残余应力的部件从构件中分离或切割出来使应力释放,然后测量其应变的变化,求出残余应力。它主要包括钻孔法、分割切条法、逐层铣削法等方法,其特点是测量的精度较高,但对构件的损伤较大。

非破坏性测量方法包括 X 射线衍射法、中子衍射法、磁性法、超声波法、电子散斑干涉法和金属磁记忆法等方法,对被测构件无损害,但成本较高。目前,国内外常用的测定残余应力的方法和原理如下所述。

### 3.2 机械释放测量法

(1) 钻孔法。这种方法的测量精度高,对构件的破坏性小,操作简单方便,在工业实际生产中得到广泛应用。

假设在直径为  $d_0$  的钻孔外侧有一直径为  $d$  的圆环,在圆环上设置与  $x$  轴成  $\alpha$  角的测点。测点释放的径向应变  $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$  与钻孔释放的残余应力之间的关系可根据带孔无限板的弹性理论和同时承受双轴膜应力  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  的条件求解。

确定未知的双轴残余应力时,可采用 3 个应变片组成的应变花。方法如下:将特制的箔式应变花粘贴在预测工件的表面;在应变花中心钻一小孔,使局部应力释放;

应变片感受应变变化。该应变称为释放应变,可由连接各个应变片的应变仪测出。通过弹性力学公式可得到在孔深范围内的平均主应力( $\sigma_1, \sigma_2$ )和主应力方向角( $\theta$ )。

② 切条法。很多情况下可以假设残余应力主要是单轴作用的,在要测量的残余应力的方向上把构件切成大量窄条,并根据释放的应变求得应力,  $\sigma_x = E\varepsilon_x$ 。可用锯条切条,释放应变通过可拆卸的应变计或粘贴的电阻应变计测量。

双轴残余应力的确定是不可缺少的。采用切条法时,需给出相互垂直的  $x$  和  $y$  方向上要测量的正应力  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$ 。假定板厚方向上应力不变,测量基线或应变计通常设置在板两侧,将板切成若干方块,残余应力  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  可根据释放的应变  $\varepsilon_x$  和  $\varepsilon_y$  求出。确定整个平面应力状态时至少需要 3 个测量方向,可采用由 3 个应变片组成的应变花,其原理与钻孔法相似。

③ 逐层铣削法。采用铣、研磨抛光、腐蚀、电解腐蚀或电火花剥蚀等方法对已磨削表面进行剥层,使表面残余应力释放,从而引起试件变形。根据变形量的大小和弹性理论可以推算出被削层内的应力。这种方法的优点是可以测定厚度上梯度较大的内应力。

### 3.3 非破坏性测量方法

① X 射线衍射法。根据晶体晶格对 X 射线衍射的干涉,可求出晶格的面间距并确定残余应力。由于 X 射线的穿透能力不是很强,一般用于测量表层深度  $30\ \mu\text{m}$  左右的范围。X 射线衍射法的优点是可以测量出应力的绝对值,但该方法对试件表面要求十分严格,且所需设备昂贵、操作复杂。美国汽车工程师学会和日本材料学会都把 X 射线衍射法作为测量材料应力的标准方法使用。该方法使用的仪器是 X 射线应力仪,其工作原理如图 1 所示。

② 中子衍射法。该方法是一种测量构件内部残余应力的常用方法。通过研究衍射束的峰值位置和强度,可获得应力或应变的数据。中子的穿透能力相对较强,可以用来测量焊接构件残余应力沿层深的分布。由于材料中参与反射的区域较大,因此中子衍射法可测定很大区域内基体中的平均残余应力。

③ 磁性法。利用磁致伸缩效应来测定应力。当应力变化时,物

体伸缩引起磁路中磁通的变化,并使感应器线圈的感应电流发生变化,由此变化可以测出应力变化。磁性法的最大特点是测量速度快、非接触测量、适合现场,但测试结果受很多因素影响,可靠性和精度差,量值标定困难,对材质较敏感且仅能用于铁磁材料。磁性法需要外部激励磁场来工作,因此带来了磁化不均匀、设备笨重、消耗能源、剩磁和磁污染等问题。

④ 超声波法。当没有应力作用时,超声波在各向同性的弹性体内的传播速度与有应力作用时不同,可利用超声波波速与应力的关系来测量残余应力。从理论上讲,只要发射超声波功率足够大,超声波就可穿透任意厚度的工件,因此超声波法适合测量大型构件的三维残余应力,但其测量精度低,只能测试高值残余应力。目前,该方法还处于试验研究阶段。

⑤ 电子散斑干涉法。电子散斑干涉是一种激光干涉技术。当构件有应力作用时,材料表面产生形变,干涉条纹图形也发生变化,而通过干涉条纹的变化可知构件的应力变化情况。电子散斑干涉法只能测量构件表面的应力情况,且测量时对抗震性要求很高,需在暗室条件下工作,其工作环境受到很大的限制。

⑥ 金属磁记忆法。这是一种新型的无损检测方法,其基本原理是记录工作载荷作用下设备和金属结构局部应力集中区产生的漏磁场。金属磁记忆方法利用了工作载荷作用下形成的金属稳定位错滑移带区域中产生的自有漏磁场。金属磁记忆法兼有无损检测功能和断裂力学所提供的潜力。

除了以上测量方法外,近年来出现了一些新的测量

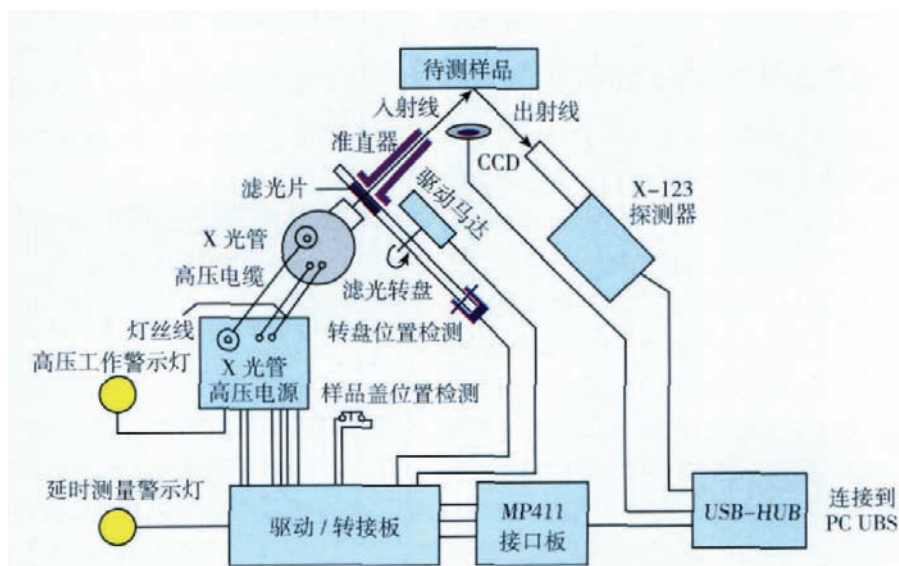


图 1 X 射线应力测量仪示意图

Fig.1 Diagram of X-ray stress measuring instrument

技术,如通过屈服条件确定残余应力法、无损电测法、脆性涂层法、云纹法、反向叠加应力法、热评估法、硬度法、数字散斑法以及压痕叠加应力测量法等方法,有时也可根据具体情况将各种测量方法综合起来应用(表 1)。

表 1 残余应力测量方法比较

所属类别	测量方法	特点	适用范围	局限性
机械释放测量法	钻孔法	操作简单,测量精度高,对构件破坏程度小	三维残余应力	每次逐层钻孔要有一定深度,太深又会加大误差
	剥层法	全面测定内部残余应力,破坏性大	三维残余应力	费时
	裂纹柔度法	简单,灵敏度高,有破坏性	三维残余应力	需专用设备,试样须是平板或者圆筒
	电化学腐蚀法	精度高,损伤试件	二维残余应力	每层剥除量在 1mm 以下
非破坏性测量方法	X 射线法	简单,快捷,不损伤试件	二维残余应力	目前只能测表层应力,不大适合第二、三类残余应力
	磁性法	方便,适用于特大型工件,无损	二维残余应力	测量材料必须是铁磁性材料
	超声法	无损测定应力,穿透工件的任意深度	三维残余应力	没有成熟的仪器

### 3.4 测量方法的选择

为准确测定金属和金属结构残余应力的分布与大小,应该根据工件的具体特点,合理选择最佳的测量方法,通常主要考虑以下几点:①允许结构受损伤的程度;②金属性能变化的影响;③现场测量的适应性;④费用和时间。

### 4 消除薄壁件车削残余应力的方法

为了克服构件中残余应力的不良影响,针对构件中残余应力的控制与消除进行了大量研究。一方面,通过改善加工工艺参数,尽量减小残余应力;另一方面,提出了一些消除残余应力的措施。

① 预应力切削法。切削前对工件施加拉应力,切削后释放拉应力,使整个工件除表层外都会收缩至拉伸的长度,在表层出现残余压应力。该方法的优点是:表面层金属不发生硬化,也不会降低冲击韧性;无需昂贵的设备;在切削过程中通过控制残余应力可提高生产率;能应用于复杂表面。缺点是:设计零件时需要考虑在切削时施加拉应力的条件。

② 熨平切削法。车刀通过带有副后角的圆柱面挤压工件的已加工表面,对其表面层有延展和拉伸作用。

该方法优点是:残余应力的调整与切削同时进行,大大提高了生产率;无需昂贵的设备。缺点是:已加工表面层金属发生硬化,降低了冲击韧性。

③ 热处理法。切削后采用退火、淬火等热处理使蠕变增大,从而使残余应力松弛、减小。该方法优点是:能减小残余拉应力而且简便易行;缺点是:加热温度较高时会降低工件的硬度和强度。

④ 磁振动消除残余应力技术。将工件在固有频率下进行数分钟至数十分钟的振动处理,消除其残余应力,以获得稳定尺寸。振动消除残余应力用振动处理的方法来代替热时效和自然时效,具有投资少、生产周期短、节约能源、降低成本、使用方便、效果显著等特点。尤其对焊接结构,焊接残余应力越高时,振动时效处理降低的应力越多,均化效果越好。

⑤ 爆炸法消除残余应力。利用爆炸冲击波的能量使样品塑性变形,从而达到降低或消除残余应力的目的。爆炸可使金属在拉伸残余应力区产生伸长塑性变形,在压缩残余应力区产生压缩塑性变形,这 2 种情况都可使残余应力降低。

⑥ 喷丸法。切削后,用钢球高速打击已加工表面使之发生塑性变形和延展,从而松弛残余拉应力。该方法的优点是:能在大范围内调整残余应力,既能完全消除残余拉应力,又能将之转化为压应力。缺点是:造成表面金属硬化,降低其冲击韧性;设备价格昂贵;不适用于形状复杂的工件。

### 5 结束语

在整体薄壁结构件的车削加工过程中,已加工表面上产生了较大的塑性变形,以及在较高温度下形成了局部热-力耦合不均匀应力场。可见,切削加工表面残余应力是由于机械应力和热应力共同作用下引起的不均匀塑性变形而产生的。

为了消除残余拉应力对工件使用性能和疲劳强度

(下转第 95 页)

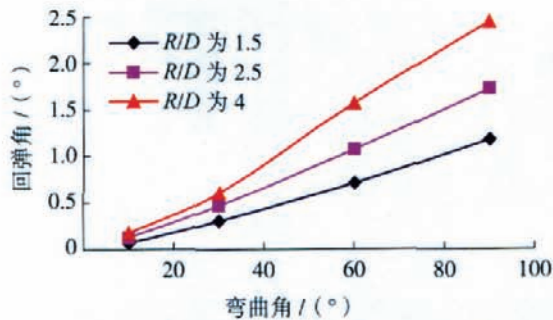


图7 相对弯曲半径对回弹角影响规律图

Fig.7 Influence curves of relative bending radius to springback angle

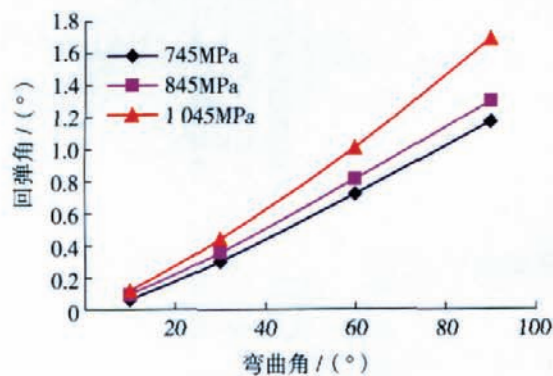


图8 强度系数对回弹角影响规律图

Fig.8 Influence curves of harden coefficient value to springback angle

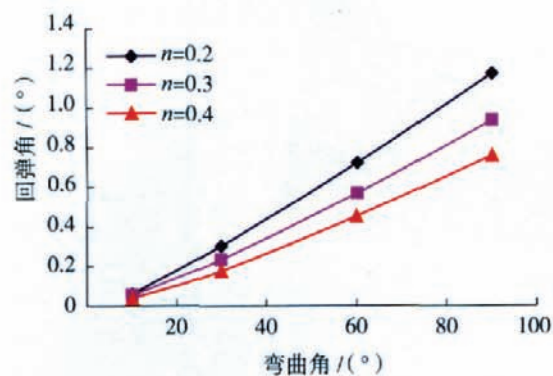


图9 硬化指数对回弹角影响规律图

Fig.9 Influence curves of hardenability value to springback angle

从图8和图9可以观察到,导管的回弹角随材料强度系数的增大而增大。由应力应变关系可知,强度系数越大,应变不变的情况下,材料变形产生的应力越大,卸载产生的回弹应变越大,导管回弹越大;而硬化指数越大,应变不变的情况下,材料变形产生的应力就越小,卸

载产生的回弹应变越小,导管回弹越小。

## 5 结论

① 在考虑楔形角和中性层偏移角的基础上,对大直径薄壁导管弯曲段建立了力学解析模型。

② 解析计算表明,大直径薄壁导管弯曲回弹随弯曲角、相对弯曲半径以及材料强度系数的增大而增大,随材料硬化指数的增大而减小。

③ 计算结果与试验值比较,规律一致。

## 参 考 文 献

- [1] Li H Z, Fagerson R, Stelson K A. A method of adaptive control of rotary-draw thin-walled tube bending with springback compensation. *Journal of Material Processing Technology*. 1994 (24):25-28.
- [2] Al-Qureshi H A. Elastic-plastic analysis of tube bending. *Mashing Tools & Manufacture*,1998: (1) : 151-160.
- [3] Tang N C. Plastic-deformation analysis in tube bending. *Pressure Vessels and Piping*, 2000 (9) : 450-456.
- [4] 张立玲. 管材塑性弯曲回弹量计算. *锻压技术*,2002(3): 37-39.
- [5] 俞汉清,陈金德. 金属塑性成形原理. 北京:机械工业出版社,1999. (责编 淡蓝)

(上接第90页)

的不良影响,首先应该分析工件的特点,确定合理的测量方法,得出残余应力的大小与分布情况;其次,通过试验和经验确定控制和消除残余拉应力的措施。如:在切削时采用预应力加工法和熨平法,同时选择合适的切削条件、刀具参数、工件材料初状态,切削后采用热处理法和喷丸法等方法。如何确定残余应力与工件变形的具体相关关系,是一个需要继续探索的课题,需要通过大量试验积累数据以及借助新的方法。

## 参 考 文 献

- [1] 周泽华. 金属切削原理. 2nd ed. 上海:上海科学技术出版社,1993.
- [2] 陈日曜. 金属切削原理. 北京:机械工业出版社,1985.
- [3] 胡华南. 已加工表面残余应力的理论预测及控制[D]. 广州:华南理工大学,1993.
- [4] 余伟. 基于残余应力的航空薄壁件加工变形分析[D]. 江苏:南京航空航天大学,2004.
- [5] Halverstadt R D. How to minimize and structural phenomena of high-strength steel surface due to EMD and ball-drop forming. *CIRP*, 1988, 31(1):531-536.
- [6] 董兆伟. 铝合金整体结构件铣削加工残余应力及变形研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2006. (责编 良辰)