

DOI : 10.3901/JME.2013.08.084

板料渐进成形件表面质量的影响因素分析*

宋修成 陆彬 陈军 王宇乐

(上海交通大学模具 CAD 国家工程研究中心 上海 200030)

摘要：表面质量控制是板料渐进成形领域的热点研究内容。以典型锥形零件为研究对象，推导不同残余波峰区域形状时残余波峰高度和垂直进给量的转化关系式，提出渐进成形工具对板料的接触频次与残余波峰高度、成形角和工具半径之间关系的数学模型，以此评价成形工具对板料的研磨效应。通过不同的预设残余波峰高度、原始板料表面粗糙度和摩擦类型，对倒锥形零件成形开展全因子试验，分析成形零件表面轮廓曲线与粗糙度值，揭示不同因素对表面质量的影响程度和机理。试验结果表明，在不同轨迹间距条件下，影响渐进成形件表面质量的主要因素是犁沟效应和研磨效应，采用滚动摩擦的方式可以有效地降低该效应。

关键词：板料渐进成形 表面质量 粗糙度 滑动摩擦 滚动摩擦

中图分类号：TG386

Influencing Factor Analysis on the Surface Quality of Incremental Forming Parts

SONG Xiucheng LU Bin CHEN Jun WANG Yule

(National Engineering Research Center of Die & Mold CAD, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)

Abstract : Surface quality control of incremental sheet forming is currently one of the hot topics. Aiming at the in-depth investigation on how the process parameters affect the surface quality of incremental forming, typical cone part is selected as the typical case to build the relationship model between scallop height and step size under different shapes of scallop field. A mathematical model is also proposed to evaluate the abrasion effect, which is the function of scallop height, forming angle and tool radius. Investigations have been made on surface profile measurement, roughness analysis under different pre-set scallop heights, original sheet roughness values and frictional conditions, the sensitive level and the mechanisms. The experimental results demonstrate that the main reasons affecting the surface quality of incremental forming parts are ploughing effect and abrasion effect, which can be reduced by rolling friction rather sliding friction.

Key words : Incremental sheet forming Surface quality Roughness Sliding friction Rolling friction

0 前言

板料数控渐进成形技术^[1]是一种柔性无模成形技术。通过采用简单形状的工具，按照预先设定的轨迹，对板料逐步加工，以成形的累积得到最终的零件形状。该方法可以节省模具制造和维护费用，缩短生产周期，特别适用于小批量和单件生产，也可以制造形状复杂的钣金零件^[2]。

渐进成形在 20 世纪 60 年代由 LESZAK^[3]提出，但直到 20 世纪 90 年代中期以后，才引起各国学者

的广泛关注和研究。与传统的板料成形工艺相比，渐进成形在成形性、成形精度、零件减薄、轨迹优化、成形时间和表面质量等方面都尚存在问题。韦红余等^[4]利用误差位移法对一组圆锥形成形制件进行研究，提出渐进成形过程中金属板料回弹和成形工具系统刚度是影响成形制件精度的主要因素。周六如^[5]分析了材料种类、锥角大小、板料厚度和直壁形状特征对渐进成形变形区厚度的影响规律，并用来指导复杂零件的渐进成形。李泷泉等^[6]采用虚拟靠模导向法实现了渐进成形有限元模拟中复杂空间轨迹的构建。到目前为止，对于渐进成形件表面质量的研究仍然较少。

* 国家科技重大专项资助项目(2011ZX04016-051)。20120830 收到初稿，20130104 收到修改稿

表面质量是评价产品质量的重要标准，不仅决定产品的美观，还直接影响到产品的正常使用。渐进成形作为一种局部成形方法，虽然所需的整体成形力较小，但在工具与板料接触区域压力很大。即使在有润滑的情况下也很难形成有效的流体润滑剂薄膜，因此处于一种边界摩擦状态。由于工具和板料的表面轮廓有微小的起伏，在渐进成形中相互接触时接触压力较大，强度较低的板料的微小波峰会首先产生塑性变形，在之后的相对移动中波峰被剪切，产生碎屑并发生材料转移，继续划伤未磨损的表面，造成连续破坏^[7]。HAMILTON 等^[8]利用粗糙度值 R_a 、 R_z 和成形参数建立了表现橘皮效应的等效粗糙度的模型，发现该模型对零件形状和增量步长非常敏感。为解决表面质量问题，贾俐俐等^[9]采用涂覆层技术和双层板避免工具与下层板的直接接触，改善了下层板的表面质量。HUSSAIN 等^[10]研究了不同润滑剂在不同的润滑方式下渐进成形件的表面粗糙度，并采用涂层改善润滑剂的润滑效果。但是这些方法都会导致高的制造成本，难以在生产中推广使用。

本文拟以典型锥形零件渐进成形为例，针对其中影响表面质量的主要因素，分析其影响程度及影响机理，建立基本的影响规律。拟通过改善加工参数(尤其是预设残余波峰高度)和摩擦方式，达到控制表面质量的效果。

1 表面质量影响因素分析

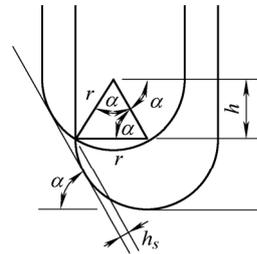
影响板料渐进成形件表面质量的因素可分为加工参数、材料因素和摩擦状态。每类影响因素又包含了多个参数，而且各参数的水平也影响其他因子的作用效果。因此，拟采用全因子试验对各因素进行研究。

1.1 加工参数

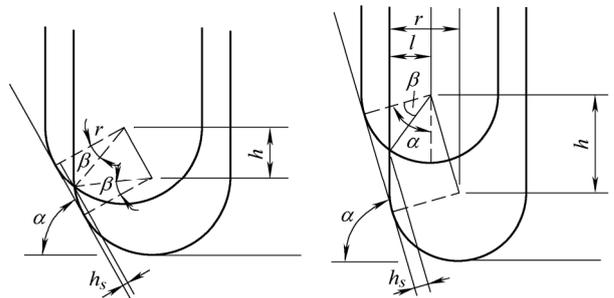
加工参数主要包括成形路径^[11]、进给速度、主轴转速^[12]、成形角、工具半径、预设残余波峰高度和增量步长等。目前在轨迹设计中主要采用恒定垂直增量步长和恒定残余波峰高度的方法^[13]，当成形角和工具半径一定时，垂直增量步长和残余波峰高度有一一对应的关系，如果仅考虑几何形状而忽略材料因素，预设残余波峰高度直接影响被加工表面的最大峰谷高度 R_z 。因此，预设残余波峰高度是加工参数中最为重要的影响参数。

图 1a 所示为相邻两次轨迹形成的残余波峰高度 h_s 示意图。当工具头两次加工轨迹的几何轮廓交点正好位于工具的最大半径时， $h=2r \cos \alpha \sin \alpha =$

$r \sin 2\alpha$ 。当 h 小于该临界值时，残余波峰高度处呈轴对称状态，如图 1b 所示；当 h 大于该临界值时，残余波峰高度处呈非轴对称状态，如图 1c 所示。因此， h 与 h_s 的关系可分以下两种情况计算。



(a) 残余波峰高度 h_s 示意图



(b) 对称残余高度区域

(c) 非对称残余高度区域

图 1 残余波峰高度 h_s 与竖直增量步长 h 转化关系

当 $h \leq r \sin 2\alpha$ 时，如图 1b 所示，可得

$$\sin \beta = \frac{h}{2r \sin \alpha} \tag{1}$$

$$\cos \beta = \frac{r - h_s}{r} = 1 - \frac{h_s}{r} \tag{2}$$

联立方程(1)和式(2)，并考虑到 h_s 远小于 r ，获得到 h_s 与 h 的关系为

$$h_s = r - \left(r^2 - \frac{h^2}{4 \sin^2 \alpha} \right)^{1/2} \tag{3}$$

当 $h > r \sin 2\alpha$ 时，如图 1c 所示，可得

$$\cos \beta = \frac{r - h_s}{r} = 1 - \frac{h_s}{r} \tag{4}$$

$$\sin(\alpha - \beta) = \frac{l}{r} \tag{5}$$

$$l = r - \frac{h}{\tan \alpha} \tag{6}$$

联立式(4)~(6)，消去 β 和 l 后，得到 h_s 与 h 的关系为

$$h_s = r - r \sin \alpha + h \cos \alpha - \frac{\cos \alpha}{\tan \alpha} \sqrt{2rh \tan \alpha - h^2} \tag{7}$$

常用的成形工具半径为 5 ~ 10 mm，而垂直增

量步长一般小于 1 mm, 此时 $h/r < 0.2$ 。由临界条件 $h = r \sin 2\alpha$ 计算得到 $\alpha > 85^\circ$, 所以式(7)通常仅用于成形角接近 90° 的情况。通过式(3)、(7)可以计算不同条件下残余波峰高度 h_s 的值, 即表面最大峰谷高度 R_z 的理论值。当成形角和工具半径确定时, 也可根据 h_s 反求出垂直增量步长 h 的值。

由于渐进成形的增量步长较小, 因此在加工过程中, 同一位置的材料往往会多次与成形工具摩擦。如图 2 所示, 当工具运动到图 2 中虚线位置时, 板料最下层 A 点开始与工具相接触。当工具继续运动到实线所示位置时, 假设 A 点板料沿竖直方向向下运动到 A' 点, 此后板料不会与工具接触, 此时工具垂直方向的运动距离

$$\Delta h = r \sin \alpha \cos \alpha \quad (8)$$

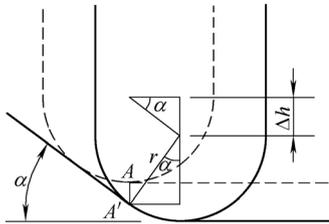


图 2 板料材料与工具接触示意图

一般情况下, 成形角不大于 85° 时, 采用式(3)计算残余波峰高度, 得到 h 与 h_s 的关系为

$$h = 2 \sin \alpha (2rh_s - h_s^2)^{1/2} \quad (9)$$

由式(8)、(9)可计算出工具与该处材料接触的

$$n = \frac{\Delta h}{h} = \frac{r \tan \alpha}{2(2rh_s - h_s^2)^{1/2}} \quad (10)$$

根据式(10)可以计算不同工况下工具与板料的接触频次。图 3 所示为成形角为 30° 、工具半径为 5 mm 时某点材料与工具接触频次曲线, 可以发现, 当预设残余波峰高度由 $10 \mu\text{m}$ 减小到 $1 \mu\text{m}$ 时, 板料某点与工具接触频次由 5 次增加到 14 次, 工具对板料的频繁摩擦将加剧工具对板料的研磨, 对表面质量造成重要影响。

1.2 材料因素

材料因素主要包括工具和板料的材料种类、涂层以及板料的原始粗糙度等。工具和板料的材料特性影响摩擦副的组成, BURWELL 等^[7]提出的黏着摩擦理论证明不同的摩擦副会决定黏着磨损量, 从而影响表面质量。工具和板料涂层技术就是利用摩擦因数低、稳定性好的材料作为阻隔层, 阻止工具和板料的直接接触, 从而改变摩擦副的性质, 改善

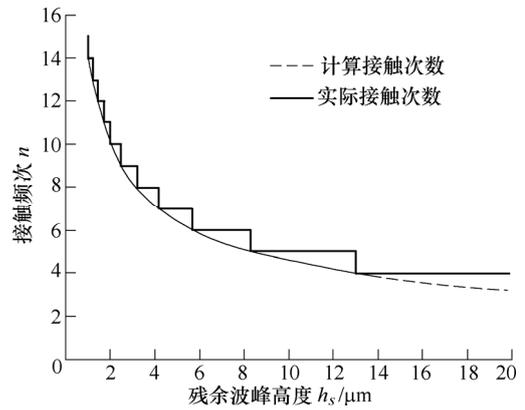


图 3 不同预设残余波峰高度下工具与板料接触次数曲线

表面质量。此外, 对于一般的塑性加工而言, 板料的原始表面状态会直接影响到最终的表面质量。渐进成形中板料原始的表面状态也会影响到加工过程中工具和板料的摩擦副性质, 进而影响成形零件的表面质量。

1.3 摩擦状态

摩擦状态的主要影响方式是工具和板料间的摩擦类型、润滑剂种类和润滑方式等。因此, 如何改善润滑条件和摩擦状态, 对改善表面质量也有重要的影响。

针对当前研究中的不足, 本文主要选取以上各影响因素中的重要参数(预设残余波峰高度、板料原始粗糙度和摩擦润滑类型等)作为研究对象, 采用对比试验方法, 研究这些参数对表面质量的影响规律。

2 试验设备与试验方案

2.1 试验设备、工具及材料

图 4a 为本试验所采用的成形装置, 通过螺栓将板料固定在工作台上, 成形零件形状为图 4b 所示典型圆锥形件。为验证摩擦方式的影响采用刚性头工具和滚动头工具分别进行加工, 工具头半径均为 5 mm, 如图 4c、4d 所示。表面轮廓测量采用接触式表面轮廓仪, 表面形貌观察采用 STEMI2000-C 体视显微镜。

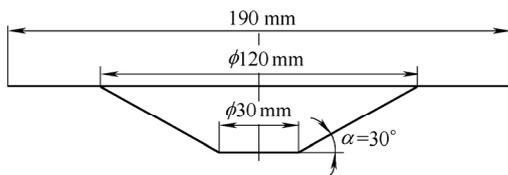
试验用板料为 AA1010 铝板和 DC51 镀锌钢板, 尺寸均为 $190 \text{ mm} \times 190 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$, 表面轮廓曲线和原始粗糙度分别如图 5 和表 1 所示, DC51D+Z 钢板的初始粗糙度高于 AA1010 铝板。

2.2 试验方案

为了研究预设残余波峰高度、原始表面状态和摩擦状态对渐进成形件表面质量的影响, 对 AA1010 和 DC51D+Z 分别在三种预设残余波峰高度 ($1 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$) 下采用刚性头工具进行加



(a) 成形装置



(b) 零件形状

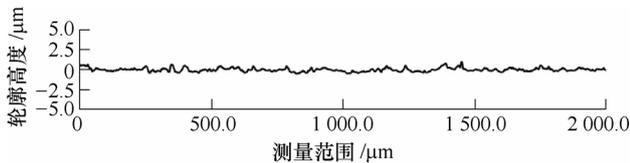


(c) 刚性头的工具

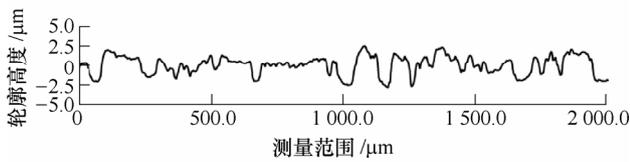


(d) 滚动头的工具

图 4 成形装置、零件和工具



(a) AA1010 铝板



(b) DC51D+Z 钢板

图 5 原始板料表面轮廓曲线图

表 1 试验材料及其原始粗糙度 μm

板料种类	原始粗糙度	
	R_z	R_a
AA1010 铝板	1.51	0.17
DC51 镀锌钢板	5.37	0.97

工，在实际试验中，对滚动摩擦的评定只采用 AA1010，故 DC51D+Z 只进行刚性头工具的加工试验，研究所选用的试验因素和水平如表 2 所示。

表 2 成形试验因素及水平

水平	因素		
	预设残余波峰高度/ μm	原始板料	摩擦状态
1	1	AA1010	刚性头工具
2	5	DC51 镀锌板	滚动头工具
3	10	—	—

3 结果与讨论

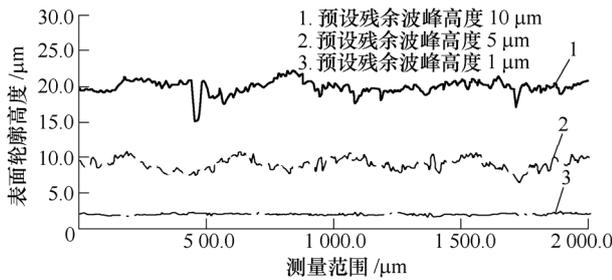
3.1 预设残余波峰高度

AA1010 在三种不同预设残余波峰高度下的表面轮廓曲线如图 6a 所示，试验采用刚性头工具，润滑剂为 MoS_2 与润滑脂的混合物。分析发现，在较大的预设残余波峰高度下，由式(10)计算的工具与板料的接触频次较少，使得相邻犁沟间的间距较大，因此波谷之间的距离较大，此时占主导影响作用的是犁沟效应。而当预设残余波峰高度较小时，同一位置处的板料与工具的接触次数大大增加，原始板料中的波峰与波谷被工具反复研磨，使相近波谷互相抵消而降低了粗糙度，此时占主导影响的是多次摩擦的研磨效应。

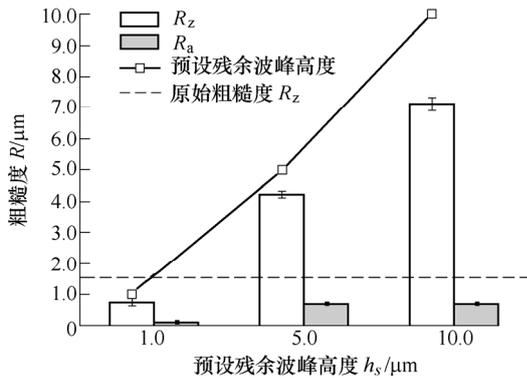
图 6b 为不同预设残余波峰高度下的粗糙度结果。分析发现， R_z 的变化规律与残余波峰高度的理论计算值一致，但稍低于理论计算值。产生差异的原因在于理论计算时，相邻轨迹之间的残余波峰为一尖角，而在实际加工中，工具剪切、磨削和震动等影响导致不会真正形成尖角，从而实际的残余波峰高度小于理论值。当预设的残余波峰高度足够小 ($1 \mu\text{m}$) 时，得到的表面粗糙度 R_z 值甚至比原始板料更小。说明在极小的预设残余波峰高度下，工具和板料间的接触研磨效应明显，在一定程度上可以改善原始板料表面质量，这是传统的板料成形工艺难以达到的。当预设残余波峰高度为 $5 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 时，成形件的表面粗糙度值比原始的粗糙度有不同程度的提升。说明当预设的残余波峰高度大于板料的原始粗糙度时，渐进成形加工使原始板料的表面质量恶化，不能达到改善表面质量的效果。但较小的预设残余波峰高度减小了轨迹间距离，大大延长了加工时间，而较大的预设残余波峰高度作用相反，在实际加工中须根据具体要求来选择。

3.2 板料原始粗糙度

图 7 所示为渐进成形前后 AA1010 和 DC51 的粗糙度值。分析发现，预设残余波峰高度为 $1 \mu\text{m}$ 时，渐进成形后板料的表面粗糙度值相比原始粗糙度都有所降低。原始表面粗糙度值较大的板料采用 $1 \mu\text{m}$ 的预设残余波峰高度加工，得到的最终粗糙度



(a) 表面轮廓曲线



(b) 表面粗糙度

图6 不同预设残余波峰高度下的表面轮廓与粗糙度值

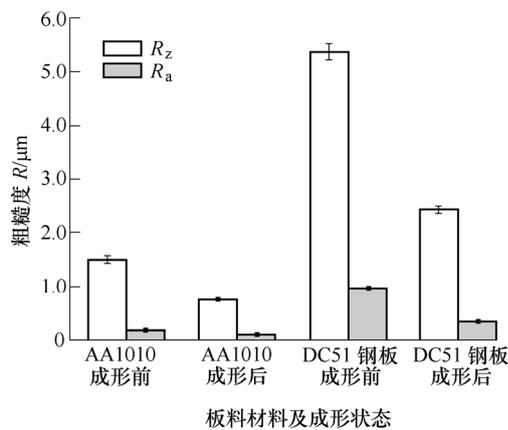


图7 不同原始粗糙度对渐进成形件表面质量的影响

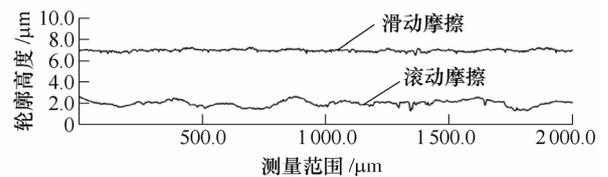
虽然小于原始粗糙度但却大大高于预设残余波峰高度，说明原始粗糙度影响预设残余波峰高度的作用效果。当原始粗糙度较小、板料强度较低时，采用较小的预设残余波峰高度值，在一次成形下就能达到较好的结果；而原始表面粗糙度较大、板料强度较高时，工具不能在预设的研磨次数内使板料粗糙度达到预期的效果，需要进行多次加工进行改善。因此，在选择预设残余波峰高度时，需要考虑到板料的原始粗糙度。只有当预设的残余波峰高度小于原始粗糙度的值时，才能改善表面质量。

3.3 摩擦类型的影响

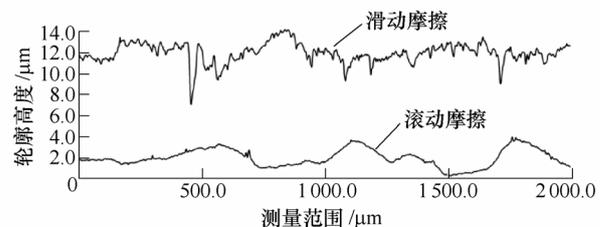
试验采用图 4c、4d 所示两种不同类型的成形工具，刚性头在成形时产生滑动摩擦，滚动头在成形

时产生滚动摩擦。采用刚性头工具加工时需要加入 MoS₂ 和润滑脂的混合物作为润滑剂，采用滚动头工具不需要采用任何润滑，工具直接与板料接触。图 8a 为分别在 1 μm 和 10 μm 的预设残余波峰高度下，在滑动摩擦和滚动摩擦条件下得到的渐进成形件的表面轮廓曲线。

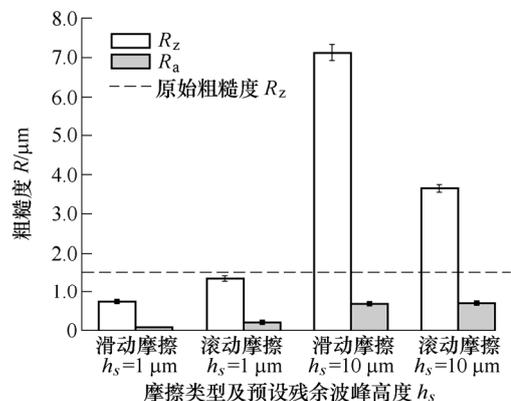
结果分析发现，当预设的残余波峰高度较小(1 μm)时，此时由于工具与板料的接触次数大大增加，刚性头工具的滑动摩擦的研磨效应起主要作用；而滚动摩擦反而不会改善表面轮廓。当预设残余波峰高度较大(10 μm)时，由于工具与板料的接触频次减少，研磨效应减弱，犁沟效应占主导地位，滑动摩擦不会降低犁沟效应，而使表面产生大量的起伏。而且由于相邻犁沟的距离较远，不会相互抵消，因此增大了最大峰谷高度 R_z。此时采用滚动头产生的滚动摩擦可以降低犁沟效应，滚动头与板料间的挤压作用更为明显，使得因犁沟效应引起的表面起伏减少，表面的微变形为主要方式，使得表面起伏相对缓和，达到改善表面质量的效果。分析图 8b 的粗糙度柱状图还可以发现，预设残余波峰高度较小时，



(a) 不同摩擦状态下的表面轮廓曲线 (h_s=1 μm)



(b) 不同摩擦状态下的表面轮廓曲线 (h_s=10 μm)



(c) 不同摩擦状态下的粗糙度

图8 不同摩擦状态对表面轮廓和粗糙度的影响

滑动摩擦的效果要好于滚动摩擦，滚动摩擦不会起改善作用；当预设残余波峰高度过大时，会破坏原始的表面质量，使零件的表面恶化，此时滚动摩擦可以起到改善表面质量的效果。

图9所示为不同摩擦情况下的表面形貌图。使用刚性头工具时，无论预设残余波峰高度值的大小，都有明显的加工犁沟痕迹。在预设残余波峰高度较小下，犁沟痕迹更为致密；而在预设残余波峰高度较大时，犁沟之间距离疏松，表面形貌较为粗糙。使用滚动头工具时，预设残余波峰高度较小时，轨迹痕迹并不明显；而当轨迹间距离较大时，可清楚地看到轨迹间的距离，这种可见的波峰是由于滚动球头和板料间的挤压作用而形成的。为节省加工时间而采用较大的增量步长时，可以采用滚动头工具，在提高效率的同时改善板料的表面质量。

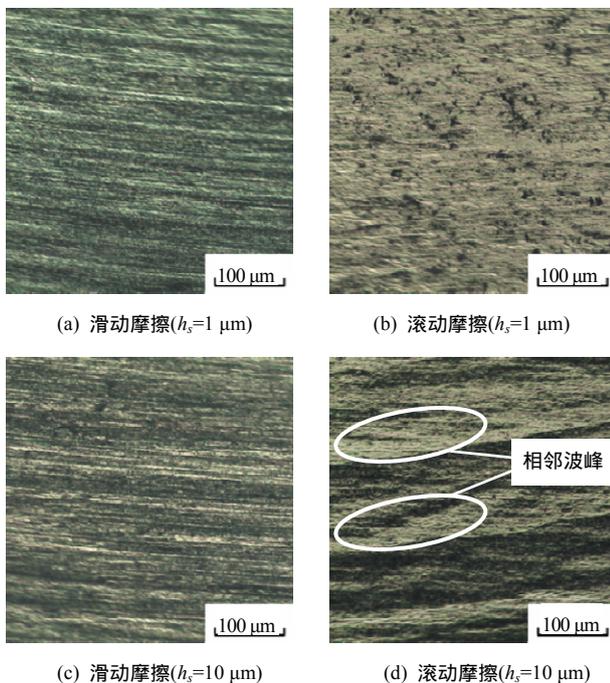


图9 不同摩擦状态下表面形貌图

4 结论

通过渐进成形试验，系统研究了各参数对成形件表面质量影响规律的研究，得到以下结论。

(1) 预设的残余波峰高度是影响渐进成形件表面质量的最主要因素。对于AA1010板料，当预设残余波峰高度从10 μm和5 μm减小到1 μm时，零件粗糙度分别降低了89%和82%。

(2) 原始板料粗糙度决定了预设残余波峰高度的作用效果。当原始板料的表面粗糙度与预设残余波峰高度相近时，得到渐进成形件的 R_z 可以达到或低于预设值；而当原始板料的表面粗糙度远大于预

设残余波峰高度时，虽然可以改善原始表面质量，但是得到成形件的表面 R_z 无法达到设定值。

(3) 滚动摩擦可改善犁沟效应和研磨效应，其作用效果取决于预设残余波峰高度。当预设的残余波峰高度较小时，滑动摩擦压头导致的研磨效应是影响渐进成形件表面质量的主要因素；当预设的残余波峰高度值较大时，犁沟效应是影响渐进成形件表面质量的主要因素。采用具有滚动摩擦效果的压头可以降低犁沟效应，改善表面质量。

(4) 对确定的表面质量要求，在实际渐进成形时需要根据原始板料粗糙度和所需加工时间等因素统筹考虑。对AA1010板料，在不考虑时间成本的前提下，选用刚性头工具，采用预设残余波峰高度为1~3 μm的加工指令，可以获得粗糙度与原始板料相近的零件。如果需要减少加工时间，则可选用滚动头工具，采用预设残余波峰高度为10 μm的加工指令，可以获得表面粗糙度 R_z 为3.67 μm的零件。

参 考 文 献

- [1] JESWIET J, MICARI F, HIRT G, et al. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2005, 54: 623-649.
- [2] 崔震, 高霖, 陆启建. 复杂钣金零件渐进成形方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(12): 235-239.
CUI Zhen, GAO Lin, LU Qijian. Incremental forming methods on complicated sheet parts[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(12): 235-239.
- [3] LESZAK E. Apparatus and process for incremental dieless forming: US, 3342051A1[P]. 1967-09-19.
- [4] 韦红余, 胡铭明, 高霖, 等. 圆锥形渐进成形制件成形精度研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(9): 193-198.
WEI Hongyu, HU Mingming, GAO Lin, et al. Investigation on forming accuracy of cone type sheet metal incremental forming parts[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(9): 193-198.
- [5] 周六如. 板料数控渐进成形变形区厚度变化规律的研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(18): 50-54.
ZHOU Liuru. Research on the thickness change laws in numerical control incremental sheet forming[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(18): 50-54.
- [6] 李龙泉, 高霖, 韦红余. 金属板料渐进成形有限元仿真过程中复杂成形路径的构建方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(6): 227-230.
LI Shuanggao, GAO Lin, WEI Hongyu. Method on generation complex loading path for FEM simulation of incremental sheet forming process[J]. Chinese Journal of

- Mechanical Engineering, 2006, 42(6) : 227-230.
- [7] BURWELL J T, STRANG C D. On the empirical law of adhesive wear[J]. Journal of Applied Physics, 1952 : 18-28.
- [8] HAMILTON K, JESWIET J. Single point incremental forming at high feed rates and rotational speeds : Surface and structural consequences[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(1) : 311-314.
- [9] 贾俐俐, 顾雪艳, 高锦张, 等. 金属板料数控增量成形的覆层技术实验研究[J]. 锻压技术, 2007, 32(5) : 26-28. JIA Lili, GU Xueyan, GAO Jinzhang, et al. Experimental research on cladding technique of NC incremental forming for sheet metal[J]. Forging & Stamping Technology, 2007, 32(5) : 26-28.
- [10] HUSSAIN G, GAO L, HAYAT N, et al. Tool and lubrication for negative incremental forming of a commercially pure titanium sheet[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 203(1-3) : 193-201.
- [11] 徐岩, 何思阳, 高霖, 等. 复杂钣金零件渐进成形表面质量影响因素[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(5) : 559-563.
- XU Yan, HE Siyang, GAO Lin, et al. Influencing factors of surface quality for complicated sheet parts by incremental forming method[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41(5) : 559-563.
- [12] 姜虎森, 王进, 王廷和, 等. 主轴转速对单点渐进成形工件表面粗糙度的影响[J]. 锻压技术, 2011, 36(3) : 33-37. JIANG Husen, WANG Jin, WANG Tinghe, et al. Effect of spindle speed on workpiece surface roughness in single point incremental forming[J]. Forging & Stamping Technology, 2011, 36(3) : 33-37.
- [13] MALHOTRA R, REDDY N, CAO J. Automatic 3D spiral toolpath generation for single point incremental forming[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2010, 132 : 061003.
-
- 作者简介: 宋修成, 男, 1987 年出生。主要研究方向为金属板料渐进成形。
E-mail : whsongxiucheng@126.com
- 陈军(通信作者), 男, 1969 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为新材料冲压及柔性成形、材料塑性成形力学模型与数值仿真方法、智能设计与设计优化。
E-mail : jun_chen@sjtu.edu.cn