

超声振动对渐进成形件表面性能的影响

李金慧^{1,2}, 李燕乐^{1,2}, 赵刚林^{1,2}, 袁昊^{1,2}, 李方义^{1,2}

(1. 山东大学机械工程学院, 山东 济南 250061;

2. 山东大学机械工程学院 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061)

摘要: 为了探究超声振动对渐进成形件的表面性能及表面形貌的影响, 选取步距和超声振动作为实验变量, 综合分析了超声振动对成形件表面形貌(波纹、凹坑和表面粗糙度)和表面性能(硬度和接触角)的影响。结果表明, 超声振动使成形件的表面波纹高度降低, 使凹坑深度发生变化。施加超声振动后, 成形件的表面粗糙度明显下降, 且随着步距的增加而减小, 成形件表面出现规律性凹坑。与原始板材相比, 渐进成形件的硬度大幅提升, 但是施加超声振动的成形件的表面硬度小于传统成形件, 且硬度随着步距的增加而增大。施加超声振动后, 接触角可达 112° , 表现为疏水性。

关键词: 渐进成形; 超声振动; 表面形貌; 表面性能; 步距

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.01.007

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940(2023)01-0059-07

Influence of ultrasonic vibration on surface properties for incremental forming parts

Li Jinhui^{1,2}, Li Yanle^{1,2}, Zhao Ganglin^{1,2}, Yuan Hao^{1,2}, Li Fangyi^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China;

2. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: In order to explore the influence of ultrasonic vibration on surface properties and surface morphology of incremental formed part, the step size and ultrasonic vibration were selected as the experimental variables, and the influences of ultrasonic vibration on the surface morphology (waviness, pit and surface roughness) and the surface properties (hardness and contact angle) of the formed parts were comprehensively analyzed. The results show that the ultrasonic vibration reduces the surface waviness height and changes the pit depth of formed part. After applying ultrasonic vibration, the surface roughness of the formed parts decreases obviously, it decreases with the increasing of step size, and the regular pits were observed on the surface of the formed parts. Compared with the original sheet, the hardness of the incremental formed part is significantly increased, but the surface hardness of the formed part applied with ultrasonic vibration is lower than that of the traditional formed part. Meanwhile, the hardness is increased with the increasing of the step size. After applying ultrasonic vibration, the contact angle can reach 112° , showing hydrophobicity.

Key words: incremental forming; ultrasonic vibration; surface morphology; surface properties; step size

渐进成形是一种无模快速成形技术, 具有低成本、高质量、个性化制造等优势^[1]。然而, 由于加工过程中存在板材回弹、刀具磨损等问题, 限制了渐进成形的应用与推广, 故引入超声振动以改变工具头与板材之间的接触状态, 提高表面质量。

成形件的表面质量是学者们的研究重点之一。Hagan E 等^[2]通过对渐进成形过程中不同成形阶段的表面形貌进行研究, 按照成形件表面特征将表面形貌分为大尺度波纹度和小尺度粗糙度。宋修成等^[3]通过渐进成形实验对影响表面质量的各要素(成形角、工具头半径、步距、材料、摩擦状态等)进行了分类, 并解释了其作用原理。国内外学者对超声辅助渐进成形展开了详细研究, 发现超声振动降低了表面粗糙度^[4], 提高了表面质量^[5]。Vahdati M 等^[6]发现表面质量提高的原因之一是超声振动的施加降低了成形件的回弹。Sakhtemanian M R 等^[7]

收稿日期: 2022-04-11; 修订日期: 2022-07-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51975328)

作者简介: 李金慧(1997-), 女, 硕士

E-mail: 992751228@qq.com

通信作者: 李燕乐(1989-), 男, 博士, 教授

E-mail: yanle.li@sdu.edu.cn

通过理论模型研究发现, 超声振动的施加有利于降低摩擦因数。翟维东^[8]对渐进成形表面进行表征, 并建立了解析模型和有限元模型, 以探究超声振动对材料流动特性和塑性变形行为的作用效果。陈晓晓^[9]通过超声辅助渐进成形实验研究了工艺参数对成形性能的影响。

为了进一步探究超声振动和工艺参数对表面性能和表面形貌的作用效果, 本文通过实验和理论计算的手段, 研究了成形件表面粗糙度、硬度和接触角的变化规律。通过对表面波纹和凹坑进行分析, 研究了超声振动和工艺参数对表面的共同作用。

1 实验设计

选取步距和超声振动两个参数作为实验变量, 探究超声辅助渐进成形件的表面性能及表面形貌的变化规律。超声辅助渐进成形实验平台如图 1 所示, 其中刀柄的固有频率为 29 kHz, 实验设备在设计时其振动频率即已被结构所确定。为了保证超声振动的作用效果达到最佳, 振幅为设备所能实现的最大振幅 (10 μm), 在振动参数不变的前提下选择步距作为实验参数。为了方便后续表面形貌、硬度及接触角的测量, 选取方锥件作为目标形状, 采用螺旋进给加工, 如图 2a 所示。方锥件开口为 90 mm \times 90 mm, 成形深度为 40 mm。成形件的测试取样区域及测试点如图 2b 所示, 选取与轧制方向平行的成形面作为测试面, 各测试点在成形深度上间隔 5 mm, 采用电火花线切割机切割样件, 沿深度方向进行测试。

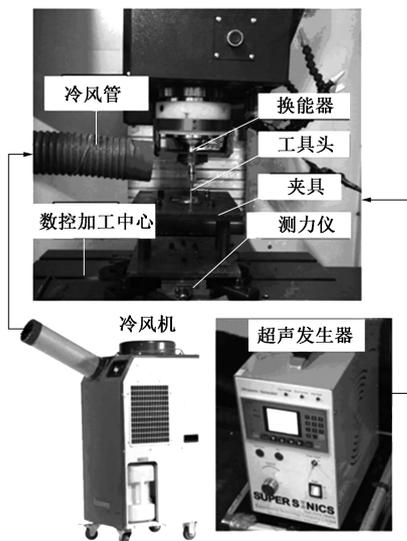


图 1 超声辅助渐进成形实验平台

Fig. 1 Experimental platform for ultrasonic-assisted incremental forming

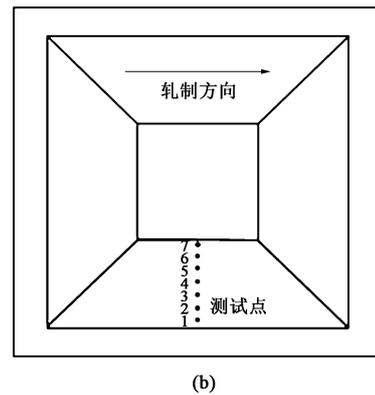
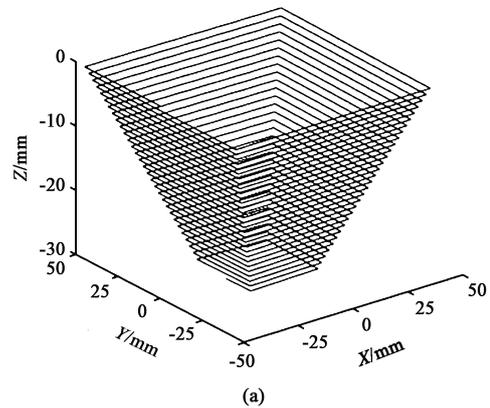


图 2 方锥成形件

(a) 螺旋进给成形轨迹 (b) 取样区域及测试点

Fig. 2 Pyramid formed part

(a) Forming path of spiral feeding (b) Sampling area and test points

实验板材的材料为 AA1050-O 铝合金, 厚度为 1 mm。选用直径为 $\Phi 5$ mm 的工具头进行加工。为了探究步距和超声振动对成形件表面的作用效果, 选取 0.20、0.10 和 0.05 mm 步距下加工的成形件表面进行研究。具体实验参数设计如表 1 所示。

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

实验编号	步距/mm	板厚/mm	振幅/ μm	超声频率/kHz
0.20-NO	0.20	1	0	0
0.20-US	0.20	1	10	29
0.10-US	0.10	1	10	29
0.05-US	0.05	1	10	29

2 超声振动对表面形貌的影响

2.1 波纹

超声辅助渐进成形加工的成形件表面形貌特征主要有波纹、凹坑和表面粗糙度等。渐进成形的犁

沟效应会使垂直工具头进给方向形成一系列规律分布的波纹^[10]，超声辅助瞬态敲击效应会使波纹中形成分布均匀的凹坑^[8]；另外，工具头与板材的接触摩擦也会引起板材表面粗糙度的改变。首先，利用高斯滤波器将垂直进给方向上的波纹特征分离出来，如图 3 所示，将波纹的波峰与波底的高度差定义为波纹高度，将相邻两波峰之间的距离定义为波纹宽度。

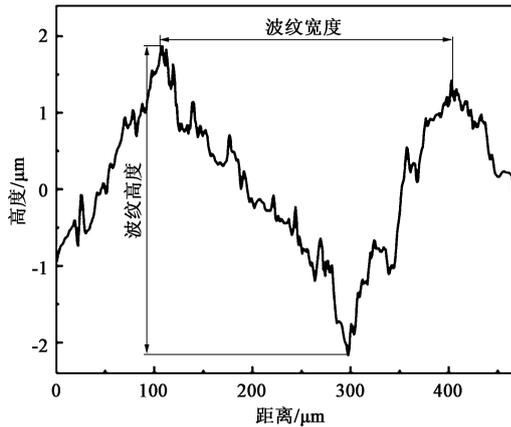


图 3 无超声振动时 0.2 mm 步距下的表面波纹形貌
Fig. 3 Surface waviness morphology at step size of 0.2 mm without ultrasonic vibration

根据工具头与成形件表面间的运动轨迹关系，推导成形件表面形貌的波纹数量公式为：

$$n = \frac{L \times \sin\alpha}{\Delta z} \quad (1)$$

式中： n 为波纹数量； L 为白光显微镜视野的宽度，在 10 倍镜下其值为 $467 \mu\text{m}$ ； α 为成形件的成形角； Δz 为成形步距。

不同步距下波纹数量的理论值与测量值如表 2 所示，结果表明，在不同步距下波纹数量的测量值与理论值均基本吻合，如步距为 0.05 mm 时，无论是否施加超声振动，波纹数量均稳定在 7.00 左右。

表 2 不同步距下波纹数量的理论值与测量值
Table 2 Theoretical and measured values of waviness number at different step sizes

步距/mm	理论值	测量值
0.20	1.65	1.50
0.10	3.30	3.50
0.05	6.50	7.00

不同工艺条件下表面波纹的二维形貌如图 4a 所示，在步距为 0.20 mm 时，与未施加超声振动

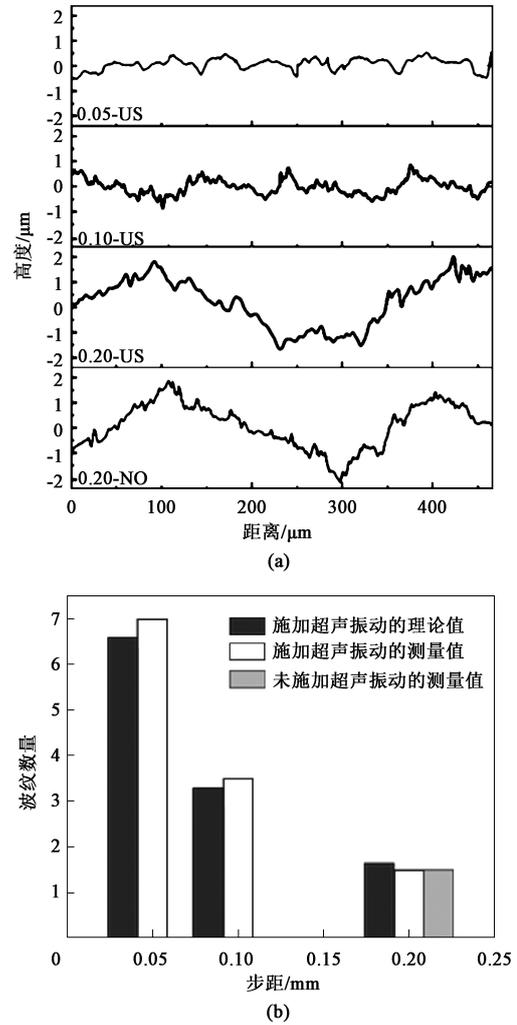


图 4 不同步距下的表面波纹
(a) 垂直进给方向的二维形貌 (b) 波纹数量
Fig. 4 Surface waviness under different step sizes
(a) 2D morphology along vertical feeding direction
(b) Number of waviness

(0.20-NO) 相比，施加超声振动后 (0.20-US) 的表面波纹高度变小，这是因为：工具头的振动消减了表面的波峰，使表面变得更加平坦，但是超声振动的施加不会改变波纹数量，即超声能场的施加不会改变犁沟效应所产生的波纹形貌。对比超声能场下不同步距的波纹形貌可以发现，随着步距的减小，波纹高度在逐渐减小^[11]。图 4b 比较了不同步距下波纹数量的理论值与测量值，可以看出理论值与测量值基本一致。其次，波纹数量随着步距的增大而减小，这是因为加工过程中相邻波纹的距离随着步距的增加而增加，所以波纹数量减少。

2.2 凹坑

根据工具头的加工轨迹及超声振动的运动，推导出沿进给方向上相邻凹坑之间的距离公式为：

$$w = vT = \frac{v_f}{60} \times \frac{1}{f} \quad (2)$$

式中： w 为相邻凹坑之间的距离； v 为工具头移动速度； T 为工具头移动时间； v_f 为工具头进给速度； f 为超声振动频率。

由式 (2) 可得，当超声振动频率为 29 kHz 时，在 20 μm 的视野内有 11 个周期，相邻凹坑距离为 1.7 μm 。

为了考察超声振动产生的凹坑分布规律，利用分析软件测量不同步距下凹坑的二维形貌，如图 5a 所示。为了更加直观地描述凹坑的变化，测量出凹坑深度，如图 5b 所示，发现凹坑深度随着步距的增加而增加，当步距从 0.05 mm 增加至 0.20 mm 时，凹坑深度从 0.18 μm 增加至 0.30 μm 。这是因为在小步距时，超声振动的施加使凹坑被工具头反复碾压，导致凹坑变得不明显。这说明超声振动的反复成形会减小凹坑深度，所以，在较大步距下表面会产生较深的凹坑。此外，在不同步距下，相邻凹坑距离的测量值相似，且与理论值相近，说明相同超

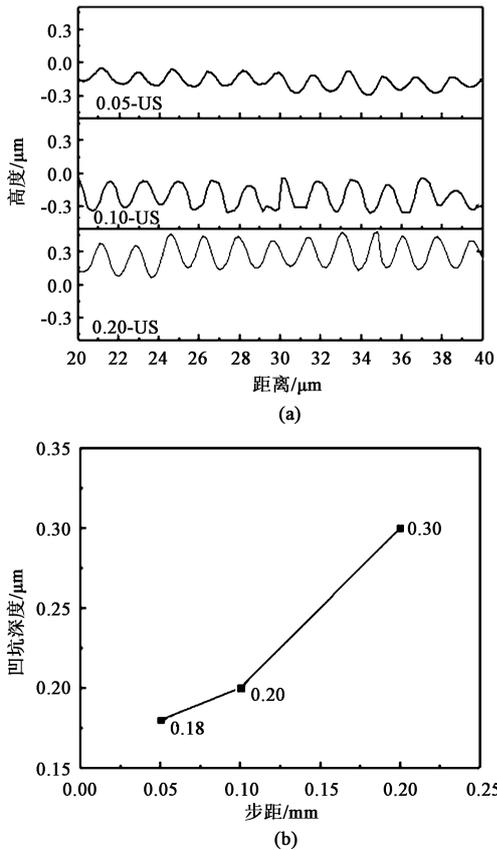


图 5 不同步距下的凹坑

(a) 凹坑形貌 (b) 凹坑深度随步距的变化曲线

Fig. 5 Pits under different step sizes

(a) Pit morphology (b) Changing curve of pit depth with step size

声能场下，步距不会影响沿进给方向上的凹坑分布间距，进给方向上的凹坑分布只与进给速度和超声频率有关。

2.3 表面粗糙度

为了探究超声振动对成形件表面性能的影响，利用白光干涉仪获得成形件的表面粗糙度。由于超声辅助是在工具头上叠加高频振动，这会与工艺参数相互影响，从而改变成形件的表面形貌特征。因此，采用低通滤波器对其表面进行滤波分离，通过统计与计算获得表面粗糙度来对其进行参数表征，本文选用相对于轮廓平均线偏差的均方根差值 Rq 来评价表面粗糙度。

由图 6a 可知，在未施加超声能场的情况下，均方根差值 Rq 随成形深度的增加而增加。随着成形深度的增加（从 5 mm 增加至 35 mm），表面粗糙度从 0.78 μm 增加至 1.36 μm 。这是因为：随着成形深度的增加，工具头与板材的接触面积会不断增加，

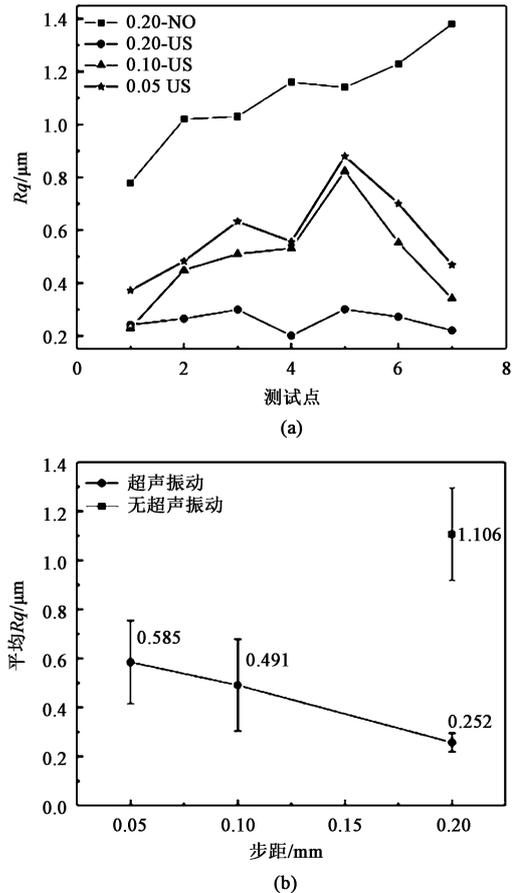


图 6 成形件表面的均方根差值 Rq

(a) 不同成形深度下的 Rq (b) 不同步距下的平均 Rq

Fig. 6 Root mean square difference Rq of surface for formed part

(a) Rq at different forming depths (b) Average Rq under different step sizes

部分材料遭受工具头的反复碾压，使表面磨损加重。另外，在超声振动（US）的作用下，平均 R_q 值（ $0.252 \mu\text{m}$ ）显著小于未施加超声振动时的测量值（ $1.106 \mu\text{m}$ ），表面粗糙度下降了 76.7%，如图 6b 所示。施加超声振动会改变工具头与板材之间的摩擦状态，从而改善了材料流动和表面质量。同时，施加超声辅助能够促进材料流动，使得厚度分布更加均匀，表面粗糙度降低。

为了探究超声能场下步距对成形件整体表面粗糙度的影响，将 7 个沿深度分布的测试点的平均值作为评价指标。超声能场下，平均 R_q 值随步距的变化如图 6b 所示。随着步距的增加，平均 R_q 值从 $0.585 \mu\text{m}$ 下降至 $0.252 \mu\text{m}$ 。步距的增加使得材料被重复加工的次数减少，这有利于减少表面的破坏和波纹的产生，从而使表面粗糙度降低。

3 超声振动对表面性能的影响

3.1 超声振动对表面硬度的影响

表面形貌的改变会影响成形件的表面硬度，成形件的表面硬度会影响部件的接触性能、耐磨性和抗疲劳性能等。为了探究超声振动对成形件表面硬度的影响，利用维氏显微硬度仪对成形件稳定成形区域的表面进行硬度测试，载荷为 100 g，加载时间为 10 s。

图 7 展示了不同步距及超声振动参数下成形件的表面硬度测试结果。板材表面的初始硬度为 25 HV。渐进成形加工后，成形件接触面的硬度大于母材，这是因为成形件发生明显的塑性变形，产生了加工硬化现象。另外，材料表面晶粒破碎产生细小晶粒，同时晶界破裂发生滑移，位错密度增加^[12]。根据霍尔佩奇公式^[13]，晶粒尺寸的减小会

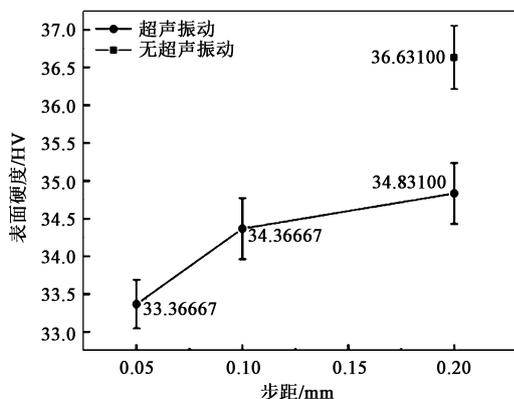


图 7 不同步距下的表面硬度

Fig. 7 Surface hardnesses under different step sizes

使成形件的强度增加，使得接触表面的硬度增加。

与未施加超声振动相比，超声辅助渐进成形加工后，成形件接触面的硬度减小。这是由于超声振动的应力叠加效应^[14]在板材内产生了振荡应力场^[15]，从而使得板材内应力被部分抵消，同时超声振动的施加使得残余拉应力逐渐转变成残余压应力^[16]，降低了成形件的整体残余应力，使表面硬度减小^[17]。此外，由于声软化效应^[18]，材料内的晶界和位错会优先吸收超声能量，从而使临界应力下降，导致接触表面硬度下降。当步距减小时，材料被加工的次数增多，引入的超声能量增加，使表面硬度减小。

3.2 超声振动对表面接触角的影响

超声振动使表面形貌重新分布，改变了表面质量，表面形貌的改变会影响成形件表面的亲疏水性，成形件表面的亲疏水性会影响部件服役时的摩擦状态、导热性能、黏附性能以及抗腐蚀性能等。为了探究超声振动对成形件表面亲疏水性的影响，选取表面接触角作为评价指标，并利用接触角测量仪进行测试。图 8 为步距为 0.20 mm 下、有无超声振动时的表面接触角。图 8a 为无超声振动时的表面接触角，是在成形角为 45° 、成形深度为 40 mm、步距为 0.20 mm 条件下的试件成形区域表面测得的，测试区域如图 2b 所示，为稳定成形区域；图 8b 为超声振动下成形件的表面接触角，其工艺参数同上。可以发现，施加超声振动的表面接触角明显增大，成形件表面的疏水性能提高。

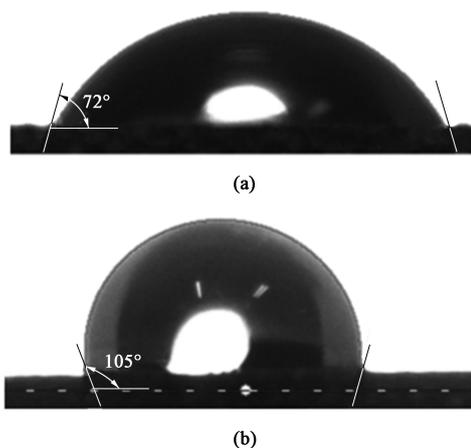


图 8 0.20 mm 步距下的表面接触角

(a) 无超声振动 (b) 有超声振动

Fig. 8 Surface contact angles at step size of 0.20 mm
(a) Without ultrasonic vibration (b) With ultrasonic vibration

图 9 为不同步距下表面接触角的变化情况，可以发现：在未施加超声振动的情况下，表面液体收

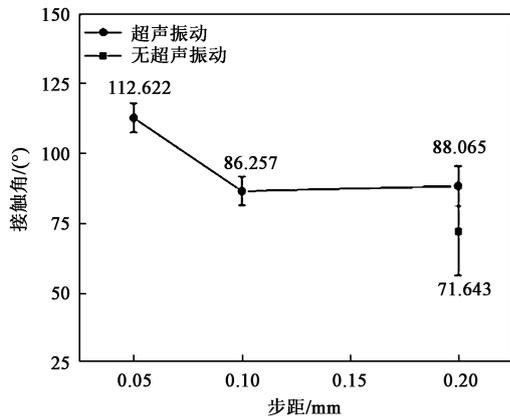


图 9 不同步距下的表面接触角

Fig. 9 Surface contact angle at different steps

缩为珠状，接触角约为 70° ，表现为亲水性；在步距为 0.20 mm 下，施加超声振动的表面接触角大于未施加超声能场的表面接触角，这是因为超声振动使加工表面分布着规律性的凹坑，降低了波峰、波谷间的高度差，使表面粗糙度降低，表面变得更为光滑，因而表面接触角增加。这与 Wenzel 状态^[19]相同，即表面接触角随着粗糙度的降低而增加。

在超声振动作用下，表面接触角在较小步距 (0.05 mm) 时明显增大，表面呈现疏水性。由于渐进成形的犁沟效应，过小的步距会导致表面波纹距离减小，使得单位面积上的波纹数量增加，如步距为 0.05 mm 时， $467\text{ }\mu\text{m}$ 的视野内有 7 个波纹，远大于步距为 0.10 和 0.20 mm 的波纹数量。波纹间存在空气使得水滴悬浮于接触表面，从而使接触角增加，这与 Cassis 状态^[20]相似。

4 结论

(1) 超声振动的施加不会改变波纹的数量，但会在波纹中产生均匀分布的凹坑，且凹坑深度会随着步距的增加而增加，相邻凹坑间距与进给速度和振动频率有关。

(2) 施加超声振动后，成形件表面粗糙度明显下降 (下降了 76.7%)。粗糙度随着成形深度的增加而增加，随着步距的增加而减小。

(3) 施加超声振动后，成形件表面硬度下降，表面硬度随着步距的增加而增加。

(4) 在未施加超声振动的情况下，板材成形后表面表现为亲水性 (接触角小于 90°)，而施加超声

振动后成形件表面的接触角增加 (最高达 112°)，在较小步距时可获得疏水性表面。

参考文献:

- [1] 周六如, 莫健华, 肖祥芷. 板料零件数控渐进成形工艺研究 [J]. 塑性工程学报, 2003, 10 (4): 27-29.
Zhou L R, Mo J H, Xiao X Z. A study of NC incremental sheet parts forming process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2003, 10 (4): 27-29.
- [2] Hagan E, Jeswiet J. Analysis of surface roughness for parts formed by computer numerical controlled incremental forming [J]. Proceeding of the Institute of Mechanical Engineers, Part B. Journal of Engineering Manufacture, 2004, 218 (10): 1307-1312.
- [3] 宋修成, 陆彬, 陈军, 等. 板料渐进成形件表面质量的影响因素分析 [J]. 机械工程学报, 2013, 49 (8): 84-90.
Song X C, Lu B, Chen J, et al. Influencing factor analysis on the surface quality of incremental forming parts [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49 (8): 84-90.
- [4] Amini S, Gollo A, Paktinat H, et al. An investigation of conventional and ultrasonic-assisted incremental forming of annealed AA1050 sheet [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90 (5): 1569-1578.
- [5] Li Y, Cheng Z, Chen X, et al. Constitutive modeling and deformation analysis for the ultrasonic-assisted incremental forming process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104 (20): 2287-2299.
- [6] Vahdati M, Mahdavinjad R, Amini S, et al. Investigation of the ultrasonic vibration effect in incremental sheet metal forming process [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B. Journal of Engineering Manufacture, 2017, 231 (6): 971-982.
- [7] Sakhtemanian M R, Honarpisheh M, Amini S. A novel material modeling technique in the single-point incremental forming assisted by the ultrasonic vibration of low carbon steel/commercially pure titanium bimetal sheet [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102 (1-4): 473-486.
- [8] 翟维东. 铝合金薄板超声辅助渐进成形表面质量及表面材料流动特性探究 [D]. 济南: 山东大学, 2020.
Zhai W D. Study on Surface Quality and Surface Material Flow Behavior During Ultrasonic-assisted Incremental Sheet Forming of Aluminum Alloy Sheets [D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [9] 陈晓晓. 铝合金薄板超声辅助渐进成形塑性软化机理及成形性能探究 [D]. 济南: 山东大学, 2019.
Chen X X. Study on Plastic Softening Mechanism and Forming Properties of Ultrasonic-assisted Incremental Sheet Forming of Aluminum Alloy Sheets [D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [10] Li X, Han K, Li Z, et al. One novel method to improve surface quality in incremental sheet forming [J]. Procedia Engineering,

- 2017, 207: 842–847.
- [11] Liu Z, Liu S, Li Y, et al. Modeling and optimization of surface roughness in incremental sheet forming using a multi-objective function [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2014, 29 (7): 808–818.
- [12] Li Y, Chen X, Zhai W, et al. Effects of process parameters on thickness thinning and mechanical properties of the formed parts in incremental sheet forming [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 98 (9): 3071–3080.
- [13] Petch N J. The cleavage strength of polycrystals [J]. *Journal Iron Steel Inst*, 1953, 174 (1): 25–28.
- [14] Malmberg B S. Dynamic tensile tests with superimposed ultrasonic oscillations for stainless steel type 321 at room temperature [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1987, 100 (3): 281–296.
- [15] 王家鹏, 赵震, 庄新村, 等. 超声振动辅助成形本构模型 [J]. *塑性工程学报*, 2015, 22 (6): 1–6.
Wang J P, Zhao Z, Zhuang X C, et al. Study on constitutive model of ultrasonic vibration assisted forming [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2015, 22 (6): 1–6.
- [16] 苏豪, 沈学会, 巩贤宏, 等. 超声振动辅助滚压参数对钛合金表面残余应力的影响 [J]. *电加工与模具*, 2020, (1): 55–59.
Su H, Shen X H, Gong X H, et al. Effect of ultrasonic assisted burning parameters on residual stress of materials [J]. *Electromachining & Mould*, 2020, (1): 55–59.
- [17] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册 [M]. 第 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2003.
Foundry Institution of Chinese Mechanical Engineering Society. *Foundry Manual* [M]. The 2ed Edition. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [18] Dutta R K, Petrov R H, Delhez R, et al. The effect of tensile deformation by in situ ultrasonic treatment on the microstructure of low-carbon steel [J]. *Acta Materialia*, 2013, 61 (5): 1592–1602.
- [19] Wenzel R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water [J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1936, 28 (8): 988–994.
- [20] Cassie A, Baxter S, Cassie A, et al. Wettability of porous surfaces [J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1944, 40: 546–550.

中国机械工程学会塑性工程分会 2023 年活动计划

序号	活动类别	活动名称	活动组织者	时间/地点	联系人信息
1	学术交流	第 8 届全国精密锻造学术研讨会	中国机械工程学会塑性工程分会 (精密锻造论坛)、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司	5 月 海安	蒋鹏 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司 电话: 010-82415043 邮箱: Jdsxwyh@163.com
2	学术交流	第四届全国管材成形技术论坛	中国机械工程学会塑性工程分会 (管材成形技术论坛)	7/8 月 大连	刘钢、刘伟 哈尔滨工业大学 凡晓波 大连理工大学 电话: 13936491818; 13903600481; 18846456952 邮箱: gliu@hit.edu.cn; liuw@hit.edu.cn; xbfan@dlut.edu.cn
3	学术交流	2023 年度高速成形技术论坛	中国机械工程学会塑性工程分会 (高速成形论坛)	7 月 福州	于海平 哈尔滨工业大学 电话: 13613659152 邮箱: haiping@hit.edu.cn
4	学术交流	第三届先进塑性成形基础研究青年学者论坛	中国机械工程学会塑性工程分会 (青年工作委员会)	8 月 上海	李宏伟 西北工业大学 电话: 15029181303 邮箱: lihongwei@nwpu.edu.cn
5	学术交流	2023 年塑性理论论坛学术会议	中国机械工程学会塑性工程分会 (塑性理论论坛)、上海交通大学	10 月 上海	陈军 上海交通大学 邓磊 华中科技大学 电话: 13916703288; 18986129193 邮箱: jun_chen@sjtu.edu.cn; denglei@hust.edu.cn