

综述

## 振动辅助塑性成形工艺及机理的研究进展

孟德安<sup>1</sup>, 朱成成<sup>2</sup>, 董渊哲<sup>2</sup>, 赵升吨<sup>3</sup>

(1. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 工程机械学院, 陕西 西安 710064;  
3. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 振动辅助塑性成形技术是近年来振动利用工程在塑性成形领域发展起来的一门新兴边缘交叉学科, 振动场与塑性力场的耦合能产生诸如材料流动应力下降的体积效应和接触面摩擦力降低的表面效应。综述了振动辅助拉拔、拉深、挤压、轧制等成形工艺原理, 分析了4种典型塑性成形工艺在振动场下的宏观表现、工艺特点和研究进展。在此基础上, 围绕应力叠加效应、振动软化效应、振动残余效应, 对振动辅助塑性成形机理方面的研究进行了总结; 基于振动减摩和振动场下摩擦模型, 对振动辅助塑性成形在界面摩擦行为方面的研究进行了分析; 最后, 对振动辅助塑性成形技术的发展前景进行了展望。

**关键词:** 振动辅助塑性成形; 应力叠加效应; 振动软化效应; 振动残余效应; 振动减摩; 界面摩擦

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.04.001

**中图分类号:** TG306

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 04-0001-13

## Research progress on vibration-assisted plastic forming process and mechanism

Meng De'an<sup>1</sup>, Zhu Chengcheng<sup>2</sup>, Dong Yuanzhe<sup>2</sup>, Zhao Shengdun<sup>3</sup>

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In recent years, vibration-assisted plastic forming technology has become an emerging interdisciplinary subject due to the development of vibration utilization engineering in the field of plastic forming, and the coupling of vibration field and plastic force field can produce volume effect of reducing flow stress of material and surface effect of reducing friction at the interface. Therefore, the forming process principles of vibration-assisted drawing, deep drawing, extrusion and rolling, etc. were summarized, and the macroscopic performance, process characteristics and research progress of four typical plastic forming processes were analyzed under the vibration field. On this basis, the research on the mechanism of vibration-assisted plastic forming was summarized around stress superposition effect, vibration softening effect and vibration residual effect, and the interface friction behavior of vibration-assisted plastic forming was also analyzed based on antifriction by vibration and friction model under the vibration field. Finally, the development of vibration-assisted plastic forming technology was prospected.

**Key words:** vibration-assisted plastic forming; stress superposition effect; vibration softening effect; vibration residual effect; antifriction by vibration; interface friction

随着现代制造业整体向轻量化、高强度和低成本方向发展, 对传统塑性加工技术提出了新的要求, 其中, 难成形材料零件、复杂型面零件、一体化零件成为塑性加工领域的研究热点。振动场与塑性力场的耦合能够产生诸如材料流动应力下降的体积效

应和接触面摩擦力降低的表面效应, 成为解决塑性加工难题极具潜力的手段之一。

振动辅助塑性成形技术是近年来振动利用工程在特种塑性成形领域发展起来的一门新兴边缘交叉学科<sup>[1-4]</sup>, 振动辅助塑性加工能大幅降低加工过程中的变形抗力, 并附带其他提高产品质量的有利影响, 兼具体积效应和表面效应, 具体表现为: (1) 降低成形力; (2) 降低流动应力; (3) 减少模具与工件之间的摩擦; (4) 获得较好的产品表面质量和高的尺寸精度。中国机械工程学会塑性工程分会编制的《塑性成形技术路线图》<sup>[5]</sup>将特种塑性成形技术、冲压技术和挤压技术作为“面向2030年, 塑性成形技术11项关键技术”之一, 并将“成形时施

收稿日期: 2022-02-17; 修订日期: 2022-03-14

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2021JQ-250, 2021JQ-278); 陕西省科技重大专项 (2020zdzx06-01-01, 2019ZDLGY15-01)

作者简介: 孟德安 (1989-), 男, 博士, 讲师

E-mail: flymendel@163.com

通信作者: 董渊哲 (1989-), 男, 博士, 讲师

E-mail: dongyuanzhe1989@chd.edu.cn

加在材料上的特殊物理场和成形力的特殊施加方式”作为特种塑性成形技术发展的重要研究方向。可见,开发振动辅助塑性成形技术新工艺、研究振动辅助塑性成形理论,以及研制新的振动辅助成形装备对提升国家整体制造业技术水平具有重要意义。

本文从振动辅助塑性成形工艺、振动场材料变形机理和振动场下的摩擦行为 3 个方面对振动辅助塑性成形技术进行了总结,重点综述了振动辅助塑性成形新工艺的特点、振动辅助塑性成形机理和振动减摩机理的研究进展,并对未来发展前景进行了展望。

## 1 振动辅助塑性成形工艺研究进展

振动辅助塑性成形技术的研究最早可追溯到 20 世纪 50 年代,经过 60 多年的研究,振动辅助塑性加工技术已被广泛应用于多种金属塑性成形领域,包括拉拔、拉深、挤压、轧制等,大量的工艺实验研究发现,振动在降低成形载荷、降低材料流动应力、降低接触表面摩擦力以及提高产品表面质量上具有显著效果。

### 1.1 振动辅助拉拔

振动辅助拉拔是目前超声振动辅助塑性成形技术中较为成功的工艺,其工艺原理如图 1 所示。根据超声振动施加方式的不同,振动辅助拉拔可以分为湿式和干式两种,湿式振动辅助拉拔工艺中超声振动通过水耦合的方式作用于坯料,除了产生振动软化和振动减摩效果外,还有超声清洁的作用,可以获得表面光洁度极高的线材<sup>[6]</sup>。湿式振动辅助拉拔工艺的操作较为繁琐,为了简化生产工艺,目前大部分采用干式振动辅助拉拔,即将振动直接作用于模具。

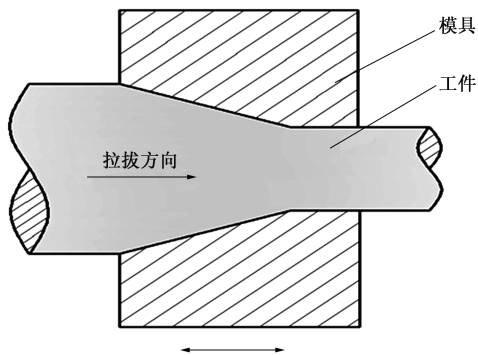


图 1 振动辅助拉拔工艺原理

Fig. 1 Principle of vibration-assisted drawing process

美国海军研究所最早资助了超声金属成形的相关研究工作,在 1963 年的研讨会<sup>[7]</sup>上报道了拔丝工艺中叠加振动时,成形力最大下降了 50%,Langenecker B<sup>[8]</sup>做了大量有关超声金属成形方面的开创性工作。此后大量关于超声拔丝和超声拔管的工艺性研究大量出现,Graff K F<sup>[9]</sup>对 1983 年之前的超声振动辅助拉拔工艺做了系统性总结研究,分析了不同研究中的超声施加方式、载荷下降情况、临界超声拉拔速度、表面质量变化以及成形能量等情况。Siegert K 等<sup>[10]</sup>回顾了 2000 年之前的超声振动辅助拔丝和拔管工艺研究,总结了超声激励模具振动的 4 种方式。Murakawa M 等<sup>[11]</sup>和 Hayashi M 等<sup>[12]</sup>对模具叠加轴向和径向超声振动辅助拉拔金属丝进行了研究,发现径向振动在降低拉拔力以及提高表面质量方面具有更好的效果。

除超声振动辅助拉拔工艺外,低频振动辅助拉拔工艺也取得了一定进展,Rosenfield A R<sup>[7]</sup>进行了低频振动辅助拉拔实验,在模具上施加轴向低频振动,频率为 0~125 Hz,振幅为 1.8 mm,结果表明平均拉拔力大幅下降,而摩擦因数几乎未降低。我国对超声振动辅助拔丝和拔管工艺的研究工作开始于 20 世纪 70 年代,北京科技大学<sup>[13]</sup>、清华大学<sup>[14]</sup>、哈尔滨工业大学<sup>[15]</sup>等高校做了大量研究工作。振动辅助拉拔产生的有益效果主要体现在降低拉拔力和提高制品表面质量这两个方面,并且主要以超声振动辅助拉拔工艺的研究为主。

### 1.2 振动辅助拉深

振动用于金属薄板成形时,研究最多的为筒形件的拉深工艺,对于典型的薄板拉深工艺,其振动的施加方式可以有多种形式,如图 2 所示,振动可以施加于凸模、凹模或者压边圈上。

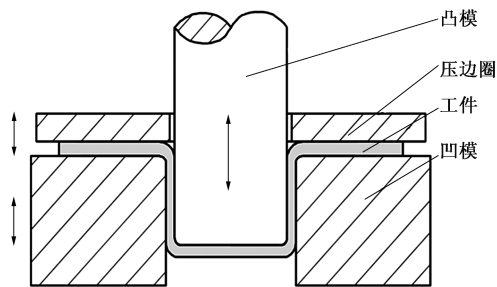


图 2 振动辅助拉深工艺原理

Fig. 2 Principle of vibration-assisted deep drawing process

在早期研究中大部分振动辅助拉深工艺均采用凹模激励形式,Langenecker B<sup>[8]</sup>采用如图 3 所示的装置进行了黄铜筒形件的振动辅助拉深工艺研究,

拉伸比为不加超声振动时的两倍, 并且成形力下降 65%。Pasierb A 等<sup>[16]</sup>在凹模上施加径向超声振动, 对 Al、Cu 和 Zn 进行振动辅助拉深, 实验中由于超声振动的存在, 拉深力下降了 20%~37%, 拉伸比提高明显, 并且可以抑制褶皱和破裂的产生。Jimma T 等<sup>[17]</sup>根据超声振动施加位置(凸模、凹模或者压边圈)的不同, 总结了超声振动辅助拉深工艺的 5 种形式, 并分析了这些工艺特点, 其中凹模底部放置隔振胶板会有较好的拉深效果, 传统冷轧钢板的拉伸比  $LDR$  为 2.58, 压边圈振动时的拉伸比为 2.86, 压边圈和模具同时振动时的拉伸比为 2.94。

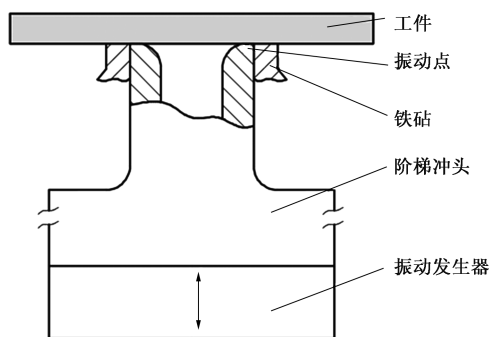
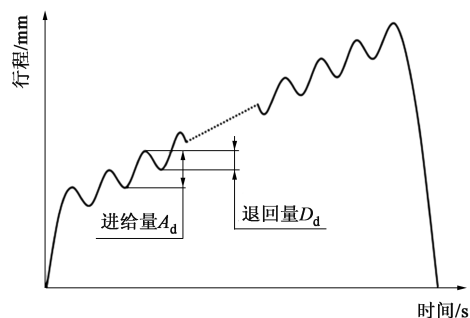


图3 Langnecker B 振动辅助拉深实验方案

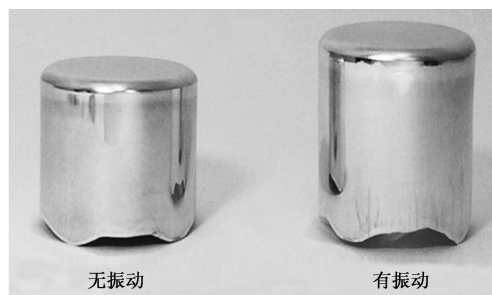
Fig. 3 Scheme of vibration-assisted deep drawing experiment by Langnecker B

在振动辅助拉深工艺中, 当筒形件尺寸较大时, 超声振动由于功率的限制并不能有效地将振动能量传递到坯料表面, 因此, 很多学者尝试将低频振动施加于模具、冲头或压边圈。Kristoffy I<sup>[18]</sup>最早研究了拉深成形时对凸模施加 20 Hz 低频振动时引起表观力 (Apparent Force) 下降的现象, 下降幅值与材料的刚度和振幅成正比, 而与频率无关。日本学者对薄板低频振动辅助拉深工艺的研究较多, Koga N 等<sup>[19]</sup>研究了 1050 铝合金低频振动辅助拉深和变薄拉深工艺, 实验中发现压边圈作轴向低频振动 (2.9~12.4 Hz) 时极限拉深比可以提高 0.15, 在变薄拉深过程中对凸模施加低频振动 (12.1~12.4 Hz), 使得变薄拉深比提高了 10% 以上, 该工艺主要依赖于伺服压力机的高精度控制, 上模运动行程曲线如图 4a 所示, 其中振动进给量的范围为  $0.5 \text{ mm} \leq A_d \leq 6.0 \text{ mm}$ , 退回量的范围为  $0.01 \text{ mm} \leq D_d \leq 5.00 \text{ mm}$ , 加工出的零件表面光滑, 拉深比与不施加振动时相比有了明显提高, 如图 4b 所示。

韩光超等<sup>[20]</sup>对 304 不锈钢圆筒件分别进行了工件超声振动和压头超声振动辅助拉深实验, 结果表明, 工件振动有利于降低最大成形力, 而压头振动



(a)



(b)

图4 伺服压机运动模式 (a) 与低频振动辅助拉深效果 (b)

Fig. 4 Motion mode of servo press (a) and effect of low frequency vibration-assisted deep drawing (b)

改善板料起皱的效果更好; 随着振幅的增大, 板料超声硬化效应更明显, 压头超声振动更容易产生拉深破裂。

Komatsu I 等<sup>[21]</sup>控制伺服压力机位移曲线, 使凸模以脉动形式运动, 运动曲线与图 4a 类似, 实验中成形工件未起皱, 如图 5 所示, 而且压边力也比传统方式降低了 2/3。Krieckenbauer S 等<sup>[22]</sup>介绍了德国 Fraunhofer IWU 公司目前正在使用的一台全新伺服压机, 如图 6 所示, 该压机由 S. DUNEKS GmbH 公司研制, 采用转矩电机和滚柱丝杠作为主动部件, 通过电机频繁正反转在滑块和压边圈上产生高频振动, 最高可达 50 Hz, 并在该压机的基础上开发了振动辅助拉深工艺, 有效地提高了材料拉深比并抑制了起皱现象的发生。

振动辅助拉深工艺的效果主要体现在降低成形力、提高拉深比、抑制零件破裂和起皱。超声振动在大拉深成形中易发生“泄漏”现象, 将超声振动传递到变形区域存在一定困难。随着伺服压力机的发展, 低频振动在拉深工艺的应用会逐渐增多。

### 1.3 振动辅助挤压

振动辅助挤压也是振动辅助塑性成形技术研究较早的工艺之一, 一般将振动施加于凸模或凹模之



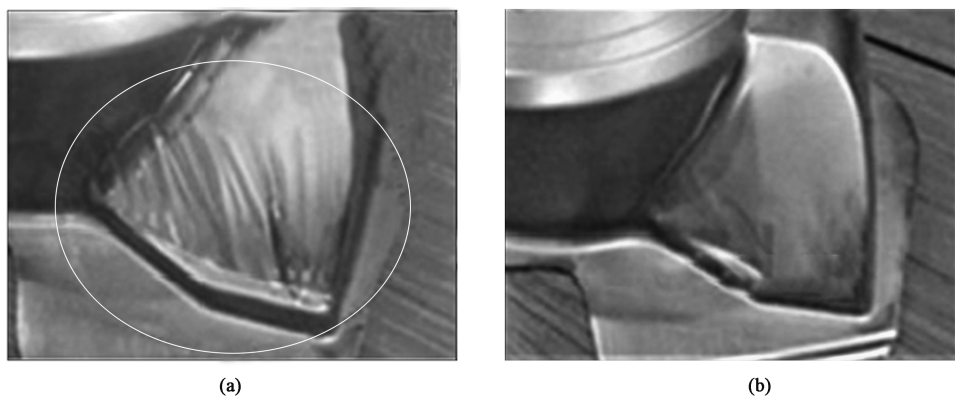


图 5 振动辅助拉深工件对比

(a) 有振动 (b) 无振动

Fig. 5 Comparison of vibration-assisted deep drawing workpieces

(a) With vibration (b) Without vibration

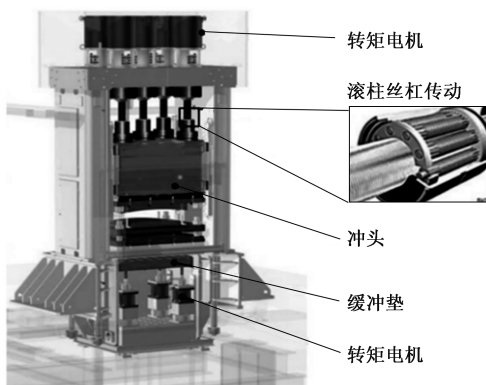


图 6 S. DUNKES GmbH 公司研制的伺服压力机

Fig. 6 Servo press developed by S. DUNKES GmbH

上。为了讨论方便，此处的振动挤压工艺是一种广义上的成形工艺，它涵盖振动挤压、镦粗、锻造等一类具有相似材料流动的体积成形工艺，通过振动辅助挤压工艺可以完成长轴、薄壁和异形断面零件制造，其基本原理如图 7 所示。

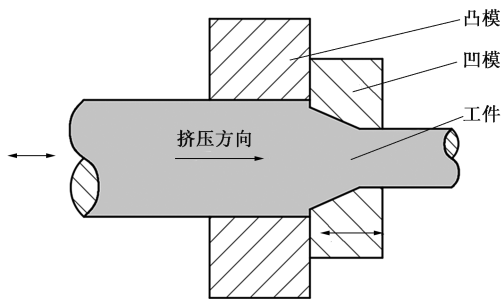


图 7 振动辅助挤压工艺原理

Fig. 7 Principle of vibration-assisted extrusion process

振动辅助挤压工艺最早出现于 1963 年，美国海军研究所报告了振动辅助挤压铅和铝，以及将铝挤

压包覆到钢管上的应用研究。此后大量的学者开始关注不同材料的振动压缩实验，均发现了模具叠加振动时载荷下降的现象。其中，台湾交通大学的洪景华等<sup>[23-24]</sup>在 2000 年之后对超声振动辅助压缩实验做了系统深入的研究，发现超声振动辅助热压缩实验中最大成形力下降了 15%，在圆环压缩以及双杯挤压实验中均发现成形力下降的现象，将载荷下降归结于超声振动的热效应，并在随后的研究中确认了法向超声振动增加了界面摩擦力。此后，又有很多学者<sup>[25-26]</sup>致力于超声振动辅助挤压的有限元模拟研究，通过数值计算验证了存在临界挤压速度，超声振动速度与挤压速度之比越大，载荷下降越明显，而摩擦因数对振动辅助挤压的影响较大，但在不改变材料模型和摩擦模型时，有限元模拟仅能说明平均载荷下降的现象，不能解释最大载荷下降的现象。

近些年，对微型器件的需求大量增加，超声振动辅助挤压成形也开始转向微成形领域。美国 Ngaile G 等<sup>[27]</sup>设计制造了一台桌面式振动辅助微挤压实验平台，可实现正挤压、反挤压和双杯挤压，发现超声振动可有效降低成形力，提高表面质量。韩国 Seo Y H 等<sup>[28]</sup>采用磁致伸缩器件开发了振动辅助微成形系统，实验频率为 100~500 Hz，结果表明振动有利于改善表面精度，提高成形性能。浙江工业大学姚喆赫<sup>[29]</sup>将超声振动应用于金属半固态微成形，并成功制造了具有良好表面形貌的微阵列器件。

在众多的振动辅助挤压工艺中发现，振动诱发的载荷下降现象对频率并不敏感，因此，有很多学者和企业尝试在模具上叠加低频振动。日本大阪大学的 Osakada K 等<sup>[30]</sup>设计了一套可实现振动辅助挤

压直齿的装置, 可以根据成形零件设定不同的振动频率和振幅, 并在振动作用下, 成形载荷大幅下降, 并且获得了良好表面形貌的制品。日本学者 Maeno T 等<sup>[31]</sup>研究了铝合金厚板压缩过程中对冲头施加振动载荷时摩擦力减小和冲压力减小的现象, 在 1500 kN 压力机上进行冲压实验, 滑块运行速度为  $80 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 实验中, 上模运动模式为下降 0.23 mm, 上升 0.15 mm, 单次进给 0.08 mm, 频率为 4 Hz。他指出, 成形力降低的主要原因是振动使模具与坯料间隙接触, 润滑油得以进入, 改善了润滑条件。在该实验中测得的成形力降低了 50% 左右, 如图 8 所示。德国

FELSS 公司<sup>[32]</sup>针对花键轴零件研发了轴向振动辅助挤压成形工艺, 成形工艺原理如图 9a 所示, 传统的轴向挤压成形中, 挤压模具恒速沿轴向挤压坯料, 由于挤压模具与坯料间的变形力和摩擦力大, 容易造成花键轴弯曲, 振动辅助挤压工艺是在挤压模具的步进式进给运动的基础上, 产生一个相对较小的后退量, 二者组成振荡式运动。研究表明, 调频法的采用使得轴向挤压力降低了约 40%, 德国 FELSS 公司研发了立式振动冷挤压机, 如图 9b 所示, 整机功率为 45 kW, 最大成形工件直径为  $\Phi 80 \text{ mm}$ , 最大轴向载荷为 400 kN。

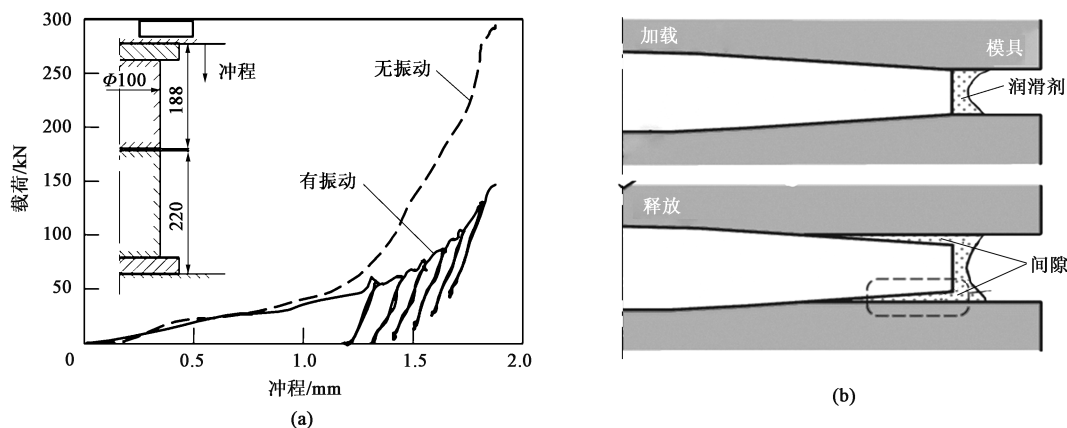


图 8 振动辅助挤压工艺载荷变化 (a) 与润滑状态变化示意图 (b)

Fig. 8 Variation diagrams of load (a) and lubrication condition (b) in vibration-assisted extrusion process

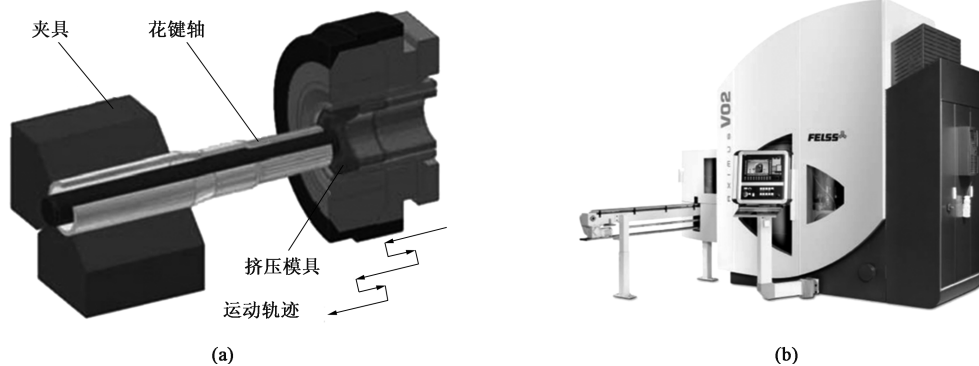


图 9 轴向振动辅助挤压原理 (a) 与立式振动辅助冷挤压机 (b)

Fig. 9 Principle of axial vibration-assisted extrusion (a) and vertical vibration-assisted cold extruding machine (b)

国内也有许多学者对振动辅助挤压工艺进行了研究, 毛华杰等<sup>[33]</sup>对齿轮轴向振动辅助挤压技术进行了数值模拟和实验研究, 推导出凹模振动最佳周期公式, 采用振动凹模技术使极限载荷降低了 19%。陈占斌等<sup>[34]</sup>开发了一种振动直接作用于管材的微小管轴向超声辅助液压成形装置, 针对 TP2 无缝内螺纹铜管的实验表明, 该装置有效地降低了成形过程对轴压载荷和液压力的要求, 加强了材料的

轴向流动。黎向锋等<sup>[35]</sup>对内螺纹低频振动辅助冷挤压技术进行了系统研究, 并开发了专用加工设备。王宇飞等<sup>[36]</sup>对 6082 铝板进行了振动辅助弯曲实验, 结果表明最高可降低残余应力 36.96%; 残余应力随着振幅的增大先降低、后升高, 随着频率的增大先增大、后保持不变, 随着下压速率的增大而增大。

可以发现, 振动辅助挤压研究主要集中于振动

辅助压缩实验,以便更好地理解振动场下材料的变形行为,虽然这些研究很重要,但他们通常不能直接应用于工业领域,而低频振动辅助挤压研究的目更明确,一般针对单一的成形工艺,其更倾向于实际工业应用,超声振动辅助挤压和低频振动辅助挤压均能获得载荷下降现象。

#### 1.4 振动辅助轧制

轧制是将金属坯料通过一对旋转轧辊的间隙使材料截面减小、长度增加的压力加工方法。将振动施加于轧辊上时能产生诸如细化晶粒和降低成形力的有益效果,振动轧制原理如图 10 所示。

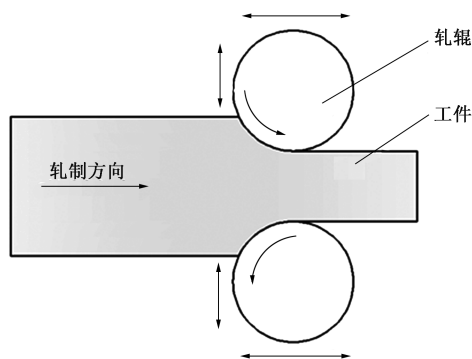


图 10 振动辅助轧制工艺原理

Fig. 10 Principle of vibration-assisted rolling process

将超声振动应用于轧制工艺最早见于美国报道<sup>[37]</sup>,所轧材料为宽度较小的铝、钢和铜的带材。其中最具代表性的是 Biddell D C 所做的研究,他开发了  $\Phi 8$  英寸 ( $\Phi 20.3$  cm) 直径的磁致伸缩辊和压电超声波辊。在较小轧制力下,铝和铅的轧制负荷降低超过 50%,但在较高负荷下载荷下降量减少<sup>[21]</sup>。在轧制较薄材料时,负荷减少变得更加明显。Severdenko V P 等<sup>[38]</sup>系统地分析了各种超声振动辅助轧制工艺后得出,与轧制材料的振动相比,轧辊的振动是必不可少的,并在振动辅助轧制工艺中引入了多种振动形式,如平行于轧制方向、垂直于轧制方向等形式,在随后的研究中<sup>[39]</sup>,他还针对轧制速度对成形过程、振动模态对滚轧力的影响做了大量的基础性研究。

美国西屋公司<sup>[37]</sup>将 5 kW 超声激振器置于轧辊内部,对铝、铜、铅、钢进行了超声振动轧制,取得了较好的实验效果,轧制力最高可降低 65%,为制造小型超声振动辅助轧机提供了可能。振动辅助轧制仅在振动辅助塑性成形技术研究初期得到了短时间的关注,在近些年虽然有很多与超声轧制或振动辅助轧制有关的研究,但是大部分主要

关注超声表面处理,并非传统意义上的振动辅助轧制。尽管振动辅助轧制在降低滚轧力、减少轧制道次以及提高产品表面质量方面有诸多优势,但是将超声或低频振动合理有效地传递到塑性变形区域并非易事。

## 2 振动场下材料变形机理研究现状

振动作用于金属材料时,会在材料内部产生波动的应力场,引起加载、卸载现象,当振动能量传递到塑性变形区时会导致振动软化现象,而振动移除后往往会产生后继屈曲应力上升或下降的残余硬化或残余软化现象,振动场对金属材料流动应力的所有影响统称为振动的体积效应 (Volume Effect)。体积效应机理是振动辅助塑性成形中的重要问题,它是振动辅助塑性成形的基础性理论问题,主要包含两个部分内容:一是振动场下的塑性变形机制,另一个是振动场下材料本构模型。对塑性变形机制的研究主要通过理论分析和微观组织观测的办法,而对振动场下材料本构模型的研究则需要通过连续介质力学和微观塑性力学的基本理论建立本构模型,这两个方面的研究实际上是互相交叉进行的。

振动场下金属材料内部必然会产生波动的应力场,应力出现周期性的加载、卸载现象称为应力叠加效应 (Stress Superposition Effect),应力叠加效应必然存在于振动成形中,但在振动辅助塑性成形工艺的早期研究中,记录载荷的力传感器采样频率远小于超声振动频率,动态信息丢失,载荷传感器实际上采集的是一种类似“平均”的信号,Kristoffy I<sup>[18]</sup>曾在振动辅助拉深中分析了这一点,并认为振动场下明显的载荷下降是由于载荷传感器响应不及时所致,并非真正的下降。Langenecker B<sup>[8]</sup>发现的载荷下降现象与其他早期研究一样,并未区分出成形载荷下降的原因是平均应力下降还是真实振动软化。直到近些年才有学者考虑使用高频响的载荷传感器记录动态应力,姚喆赫等<sup>[40]</sup>在超声振动辅助压缩中采集了高频动态载荷,验证了应力叠加效应和振动软化效应共存的现象,如图 11 所示。

对振动软化现象的解释目前主要有两种:(1)基于应力叠加效应,认为载荷下降是平均应力下降的结果;(2)基于微观塑性理论,认为振动能量促进了塑性变形过程中的位错移动。基于应力叠加效应解释振动软化现象最早是由 Nevill G E 等<sup>[41]</sup>提出的,他们将振动辅助成形中的载荷下降归因于稳定



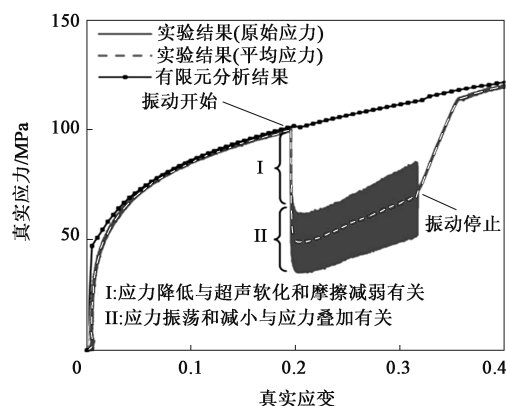


图 11 高频响传感器测得超声辅助振动场下的载荷下降

Fig. 11 Load reduction recorded by high frequency sensor in ultrasonic assisted-vibration field

和交替应力的叠加机制。而基于位错和能量角度的解释得到了许多学者的认同, Oelschlagel D<sup>[42]</sup>研究了位错在软化和硬化效应中的作用, 振动场中屈服应力下降是由于位错吸收了振动能量, 因此增加了位错移动的活性, 从而对应力降低产生有利影响。Abramov O V<sup>[43]</sup>认为超声波在固体中传播时, 能量有 3 种耗散方式, 即: 松弛、滞后和共振, 并且超声能量会在晶体缺陷和晶界处发生耗散, 转化为塑性变形能或热能, 尽管超声波能量耗散理论主要用于高频 (1 MHz) 场合, 但在功率超声振动频率范围内也适应, 并为高能超声加热现象做出了合理解释。关于振动对材料内部微观组织的影响的早期研究较少, 直到 2000 年后才有学者借助电子显微镜等现代观测手段研究振动后的组织变化, Dutta R K 等<sup>[44]</sup>在低碳钢单轴拉伸实验中, 对试样表面施加超声振动, 并对叠加超声振动区域进行 EBSD 和 XRD 实验, 结果发现位错密度、亚晶界数量以及小角度晶界占比下降明显, 对此的解释为振动诱发位错运动加强并加速位错湮灭的发生。Siu K W 等<sup>[45]</sup>在超声振动压痕实验中, 通过 TEM 和 EBSD 观测到振动诱发亚晶界的形成, 认为振动可以促进位错偶极子湮灭。尽管这些微观观测结果可以从侧面反映振动软化现象的原因, 但是由于振动软化效应是瞬时发生的, 移除振动后振动软化消失, 而原位观测振动软化现象十分困难, 目前还没有学者进行相关实验, 这也是振动软化机制长时间未取得统一理论的主要原因。

振动残余效应作为振动软化的附属效应, 在早期关注较少, 直到近 10 年在振动辅助塑性机理的研究中才得到学者的关注, 振动残余效应可以认为与

振动后材料内部位错密度有一定关系。加拿大 Pequegnat A 等<sup>[46]</sup>在细铜丝的超声辅助压缩实验过程中, 既观察到了纯铜在超声作用时的暂时性瞬时软化, 也观察到了超声作用结束后的残余软化; 浙江工业大学姚喆赫等<sup>[40]</sup>在铝合金超声辅助锻造实验中同样观测到了振动硬化现象, 并将振动硬化归因于位错密度的增加; 而清华大学 Huang H 等<sup>[46-47]</sup>在铜和金的超声辅助压缩实验中发现残余软化现象, 并认为位错湮灭是软化的主要原因, 但是并未从微观上研究位错变化。香港中文大学 Siu K W 等<sup>[45]</sup>在铝合金超声辅助压痕实验中发现超声振动引起材料位错湮灭加剧和亚晶界形成; 澳大利亚国立大学 Zhou H 等<sup>[48]</sup>在铝合金和钛合金振动辅助压缩实验中, 通过施加不同振幅和振动时间获得了不同残余效果: 铝表现出残余硬化现象, 而在钛中, 初始残余硬化效应随着所施加的超声振动的幅度的增加而转变为残余软化效应。不同金属在振动后的残余响应不尽相同, 这可能与金属材料的晶体结构和内部缺陷有关, 具体的振动塑性机理还需进一步研究。

振动场下材料本构模型涉及应力叠加原理、振动软化效应和振动残余效应, 目前对振动场下材料本构关系的研究较少。Kirchner H O K 等<sup>[49]</sup>在对铝合金试样进行频率为 0.5~50 Hz 振动辅助压缩实验中, 建立了一个不考虑加工硬化的应变叠加模型来描述各种频率下平均应力下降的现象。对于振动软化效应, Atanasiu N<sup>[50]</sup>给出了超声振动下各种金属材料的屈服强度的定量描述, 认为屈服强度  $R_{el}$  为超声强度  $I$  的指数函数:

$$R_{el}(I) = R_{el0} \exp[a(I_0 - I)] \quad (1)$$

式中:  $R_{el0}$  为超声强度为  $I_0$  时对应的屈服强度;  $a$  为超声强度参数。

式 (1) 给出了最基础的振动软化效应本构关系, 但是方程过于简单, 并未得到广泛推广。蔡改贫等<sup>[51]</sup>分别建立振动场下金属材料弹粘塑性和粘-弹塑性本构模型, 用于描述低频振动场下平均应力下降现象, 但是未建立振动参数与振动软化和残余软化的对应关系。匈牙利 Rusinko A<sup>[52]</sup>引入超声缺陷强度概念, 提出了一种超声软化解析模型, 该模型可以描述超声振动辅助塑性变形中的振动软化效应, 但是未考虑塑性变形后的残余效应。Siddiq A 等<sup>[53-54]</sup>于 2012 基于晶体塑性理论揭示了超声软化现象, 认为超声软化引起的应力下降与声强成正比, 该模型也未考虑残余软化模型。Yao Z 等<sup>[55]</sup>基于晶体热激活模型和位错密度模型建立振动软化和残余

硬化模型,较好地解释了振动软化和残余硬化现象,但是该模型是以超声辅助压缩实验为基础,实验中忽略了摩擦力的潜在影响。

上述研究获得了振动场下的材料变形规律,分析了振动软化原因,并给出了简单的振动软化本构方程。但是,不同振动条件下的金属变形机制不尽相同,尤其是振动后的残余影响,目前振动场下材料变形机理研究主要以超声振动为主,缺少低频振动研究成果。大量研究工作基于圆柱振动辅助压缩实验,摩擦力对成形载荷的影响往往被忽略。因此,振动场下金属材料塑性变形机理仍有待深入研究。

### 3 振动场下材料摩擦行为研究现状

振动辅助塑性成形中,当模具上叠加振动时,模具与坯料的接触状态发生改变并产生摩擦力下降和提高产品表面质量的有益效果,统称为振动的表面效应。对振动表面效应的研究主要集中在 3 个方面:(1) 振动减摩的内在机理;(2) 振动场下摩擦模型;(3) 振动提高表面质量的影响规律,这 3 方

面的研究往往交叉进行。

振动减摩效应在振动辅助塑性技术发展初期均有提及,但只有少数学者致力于超声减摩效应的研究。Pohlman R 等<sup>[56]</sup>设计了如图 12 所示的实验装置,研究了不同超声振动施加方式以及不同滑动速度下的摩擦力下降规律,其中条件 1 下振动方向与逆时针摩擦盘的摩擦方向平行,条件 2 下振动方向与顺时针摩擦盘的摩擦方向平行,条件 3 下振动方向与摩擦方向垂直,条件 4 下振动方向与摩擦方向和接触面均垂直。图 12 中, $R$  为挤压力, $T$  为传感器。条件 1~3 下摩擦力下降明显,条件 4 下摩擦力基本无下降,随着转台速度的升高,摩擦因数逐渐升高,并且存在一个临界线速度  $v=2\pi fA$ ,其中, $f$ 、 $A$  分别为摩擦盘的转速和半径,低于该速度下有振动减摩效应,高于此速度摩擦力不再下降。临界线速度的概念被广泛应用于多种振动辅助塑性成形工艺中。此后,Severdenko V P 等<sup>[38]</sup>搭建了如图 13 所示振动摩擦实验台,用来测试不同振动模式下摩擦力的下降情况,发现当振动方向平行于切线方向时摩擦因数下降最明显,其中, $F$  为摩擦力, $P$  为正压力。

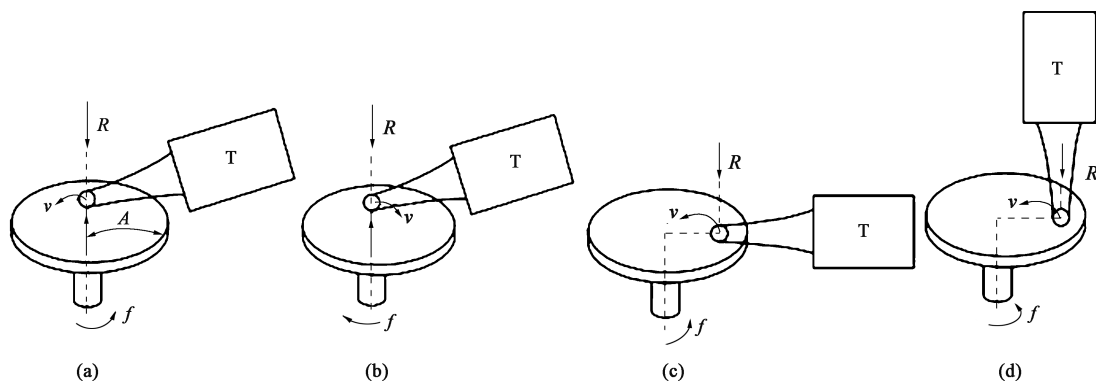


图 12 Pohlman R 等设计的实验装置及不同超声振动施加方式

(a) 条件 1 (b) 条件 2 (c) 条件 3 (d) 条件 4

Fig. 12 Experimental device and different ultrasonic vibration application methods designed by Pohlman R et al

(a) The first condition (b) The second condition (c) The third condition (d) The fourth condition

相对滑动速度和振动作用方向对摩擦力下降幅度的影响较大,并且面内(In-plane)振动减摩效应最为显著,因此,许多学者将研究重点放在研究面内振动减摩机理上。Siegert K 等<sup>[57]</sup>设计了水平超声振动减摩实验装置,如图 14 所示,其中  $F_N$  为法向力, $\lambda$  为波长,超声振动方向与滑动速度平行,频率为 20~22 kHz。实验结果表明,摩擦因数下降与相对滑动速度成反比,并与正压力和润滑剂存在一定关系。Kumar V C 等<sup>[58]</sup>也设计了类似的实验装置,并分别研究了振动方向与滑动方向平行和垂直

时的摩擦力响应,观察到滑动摩擦显著降低(>80%),在相同的振幅和频率下,纵向振动比横向振动产生更大的摩擦力下降。在高振幅下,摩擦力的降低小于模型预测值,这是因为磨损加剧导致模具金属表面粘连软的金属。Popov V L 等<sup>[59]</sup>设计了振动摩擦盘实验,超声振动器振动频率为 40~70 kHz,结果显示摩擦因数是滑动速度与振幅的函数,并与理论值吻合较好。

尽管振动减摩效应研究主要以超声振动为主,但是低频振动辅助塑性成形中也存在摩擦力下降现



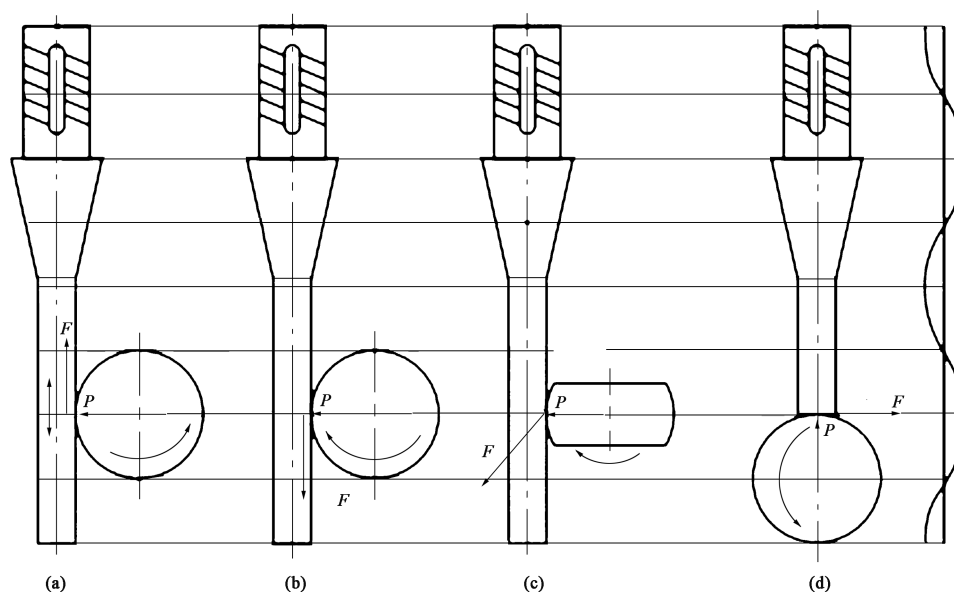


图13 Severdenko V P 等设计的实验装置及不同超声振动施加方式

(a) 条件 A (b) 条件 B (c) 条件 C (d) 条件 D

Fig. 13 Experimental device and difference ultrasonic vibration application methods designed by Severdenko V P et al

(a) Condition A (b) Condition B (c) Condition C (d) Condition D

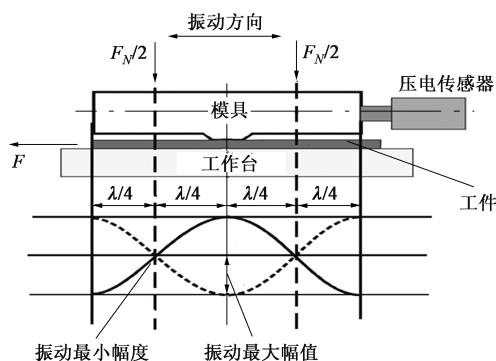


图14 Siegert K 等设计的实验装置

Fig. 14 Experimental device designed by Siegert K et al

象。Matsumoto R 等<sup>[60]</sup>提出了一种采用伺服压机脉动和阶梯式加载反挤压深孔的工艺,在冲头每次后退时,润滑油都会重新提供到模具内部,实验结果发现深孔表面质量大大提高,成形载荷下降明显。Maeno T 等<sup>[61]</sup>在不锈钢阶梯零件冷挤压过程中,凸模采用脉动加载方式,并观测到成形力下降现象,冲头每次反向时,由于模具和坯料的弹性恢复量不同,在模具与坯料接触边缘容易产生间隙,而润滑油由于毛细现象自动填入,改善了界面润滑状态。Ben N Y 等<sup>[62]</sup>和 Maeno T 等<sup>[63]</sup>在外花键轴和内花键轴振动冷挤压成形中均发现载荷下降现象,振动中模具与坯料表面润滑条件的改善对摩擦力下降产生有益影响; Ben N Y 等<sup>[62]</sup>的研究表明振动成形中再

润滑现象最大程度地避免了模具与坯料的硬接触,进而降低摩擦因数,其原理如图15所示,其中 $F'$ 为挤压力。

振动场下摩擦模型较为复杂,涉及静态和动态摩擦模型的切换、振动场下润滑机理以及振动场下磨损机理。在研究振动场下的摩擦关系时,往往采用简化模型,不考虑振动对润滑和磨损的影响,目前,被广泛接受的摩擦模型为摩擦力矢改变引起的平均摩擦因数下降模型,Storck H 等<sup>[64]</sup>和 Kumar V C 等<sup>[58]</sup>分别在2002年和2004年基于库伦摩擦定律提出了描述摩擦反转效应的数学模型,并与预测实验结果吻合良好。该模型主要用于解释超声振动辅助成形中的振动减摩效应,但它忽略了高频振动时的动态特性,实际上是一种近似模型。Tsai C C 等<sup>[65]</sup>将静态摩擦模型替换为更为复杂和准确的Dahl动态摩擦模型,准确地预测了实验中摩擦力的动态变化特性,模拟结果与实验结果较为吻合,但是该模型未考虑相对滑动速度以及正压力对摩擦力的影响。Teidelt E 等<sup>[66]</sup>对于金属接触表面间的粘滑行为建立数学模型,以此来解释法向超声振动引起的摩擦因数降低现象,该模型仅适应于弹性接触和低速滑动条件。一些学者<sup>[67]</sup>认为,高接触应力下金属材料间的摩擦因数是相对运动的函数,随着相对滑动速度的增大而减小,胡新华等<sup>[68]</sup>通过该理论解释了低频振动下的摩擦力下降

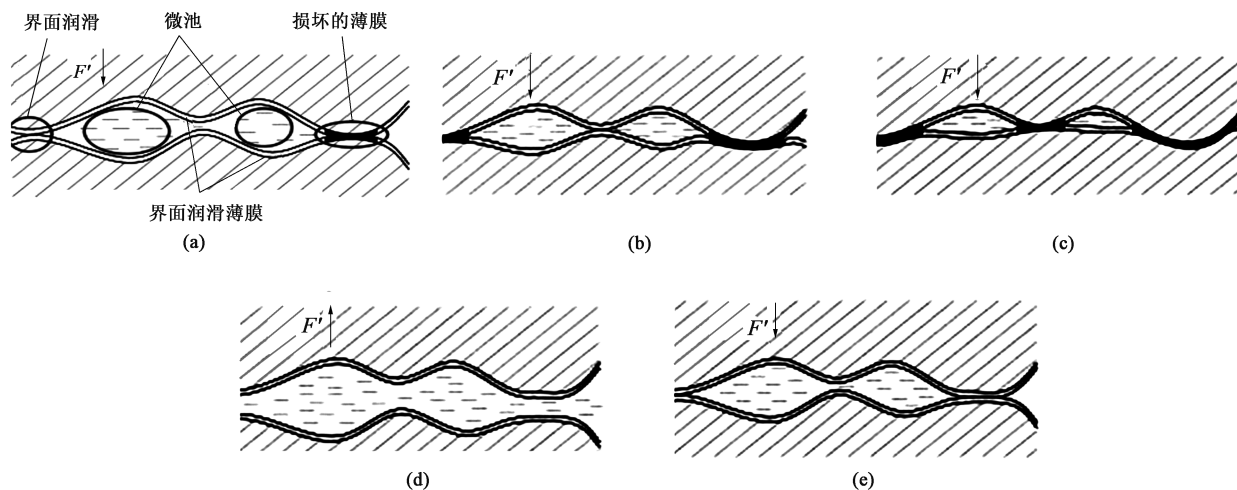


图 15 振动辅助成形中的再润滑现象

(a) 行程初期 (b) 行程中期 (c) 行程末期 (d) 回程再润滑 (e) 下次行程

Fig. 15 Relubrication phenomenon in vibration-assisted forming

(a) Beginning stroke (b) Middle stroke (c) End stroke (d) Relubrication at return stroke (e) Next stroke

现象,但是未建立准确的摩擦模型。

振动表面效应研究集中于振动减摩擦效应机理和摩擦模型建模,目前主要以超声振动为主,大量的研究均是以实验为基础探讨某一实验装置或某一成形工艺下的摩擦现象,不同实验装置下的摩擦结果有略微差异,但是结论基本相同,摩擦力矢反向导致的振动周期内平均摩擦力下降的模型被广泛接受,但是更为准确的动态摩擦模型有待进一步研究。低频振动辅助成形中的摩擦现象更为复杂,相对滑动速度、振动频率、幅值、正压力以及润滑状态均对摩擦的影响较大。目前对低频振动减摩擦机理和摩擦模型处于定性研究阶段,而随着伺服控制技术和先进激振技术发展,工业中采用低频振动辅助塑性成形的工艺逐渐增多,并且主要以表面效应为主,因此,研究低频振动场下的振动减摩擦机理和摩擦模型更有实际意义。

## 4 结论

(1) 振动辅助塑性成形在金属拉拔、拉深、挤压、轧制等成形领域得到了广泛应用,振动能场可以有效地改变材料的成形性能,改善工件和模具间的摩擦条件,降低成形力,获得较好的产品表面质量和尺寸精度。

(2) 金属材料在塑性变形过程叠加振动会发生软化现象,在一定条件下会发生残余硬化或软化效应。振动场下材料变形机理研究主要以超声辅助压

缩实验为主,基于位错和能量角度对振动软化效应的解释,得到了更多学者的认同。振动的残余效应随着材料、实验条件等参数的改变而不尽相同。振动场下材料的本构模型并未形成统一理论。

(3) 在超声振动和低频振动作用下,金属摩擦副间摩擦力均存在下降趋势。振动减摩擦解释主要有振动改变摩擦力矢方向、振动改变摩擦副间相对滑动速度和振动改善界面润滑状态,其中低频振动减摩擦效应主要由于振动诱发再润滑现象。摩擦力矢反向导致的振动周期内平均摩擦力下降的摩擦模型被广泛接受,考虑材料表面微观形貌的更为准确的动态摩擦模型有待进一步完善。

(4) 目前,国内外振动辅助塑性加工的研究成果主要以超声振动辅助成形为主,受超声功率的限制,在大尺寸零件成形过程的应用效果不佳。随着伺服控制技术和先进激振技术发展,工业中采用低频振动辅助塑性成形的工艺逐渐增多,蕴藏更大激振能量的低频振动辅助塑性成形技术具有更好的应用前景。将振动与常规塑性成形技术相结合,开发塑性成形技术新原理、新工艺、新装备,应用于棒管料拉拔、板材拉深、长轴/薄壁零件挤压、齿形零件滚轧等金属塑性成形领域,对于解决航空航天、汽车制造等行业典型零部件冷成形材料变形抗力大、摩擦力大、表面质量差等难题具有重要的现实意义。

### 参考文献:

- [1] 孟德安,赵升吨,李永峰,等. 低频振动式塑性加工的关键技术探讨[J]. 塑性工程学报, 2014, 21 (4): 7-13.

- Meng D A, Zhao S D, Li Y Y, et al. Key technology of plastic forming with low frequency vibration [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2014, 21 (4): 7-13.
- [2] 吴晓, 李建军, 郑志镇, 等. 振动场作用下金属塑性成形机理的研究和应用进展 [J]. *塑性工程学报*, 2015, 22 (4): 1-7.
- Wu X, Li J J, Zheng Z Z, et al. Research and application progress of metal plastic forming mechanism under vibration field [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2015, 22 (4): 1-7.
- [3] 赵升吨, 李泳峰, 范淑琴. 超声振动塑性加工技术的现状分析 [J]. *中国机械工程*, 2013, 24 (6): 835-840.
- Zhao S D, Li Y Y, Fan S Q. Status analysis of plastic processing technology with ultrasonic vibration [J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24 (6): 835-840.
- [4] 仲崇凯, 管延锦, 姜良斌, 等. 金属超声振动塑性成形技术研究现状及其发展趋势 [J]. *精密成形工程*, 2015, (1): 9-15.
- Zhong C K, Guan Y J, Jiang L B, et al. Research status and development tendency of ultrasonic-vibration assisted metal plastic forming [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2015, (1): 9-15.
- [5] 中国机械工程学会塑性工程分会. 塑性成形技术路线图 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2016.
- China Society for Technology of Plasticity. *Plasticity Forming Technology Roadmaps* [M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2016.
- [6] 何劼. 振动塑性加工过程中的非线性动力学研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2000.
- He Q. Study on the Nonlinear Dynamics of Oscillatory Plastic Working Process [D]. Shenyang: Northeastern University, 2000.
- [7] Rosenfield A R. The application of ultrasonic energy in the deformation of metals [R]. Battelle Memorial Inst Columbus Ohio Defense Metals Information Center, 1963.
- [8] Langenecker B. Effects of ultrasound on deformation characteristics of metals [J]. *IEEE Transactions on Sonics & Ultrasonics*, 1966, 13 (1): 1-8.
- [9] Graff K F. *Power Ultrasonics Applications of High-intensity Ultrasound* [M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015.
- [10] Siegert K, Ulmer J. Superimposing ultrasonic waves on the dies in tube and wire drawing [J]. *Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the ASME*, 2001, 123 (4): 517-523.
- [11] Murakawa M, Jin M. The utility of radially and ultrasonically vibrated dies in the wire drawing process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 113 (1): 81-86.
- [12] Hayashi M, Jin M, Thipprakmas S, et al. Simulation of ultrasonic-vibration drawing using the finite element method (FEM) [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 140 (1-3): 30-35.
- [13] 李连诗, 张力行, 杨效平, 等. 超声波振动拔管拔丝的研究 [J]. *钢铁*, 1995, (3): 39-44.
- Li L S, Zhang L X, Yang X P, et al. Tube and wire drawing with ultrasonic vibration [J]. *Iron and Steel*, 1995, (3): 39-44.
- [14] 孟永钢, 刘新忠, 陈军. 超声波在拔丝加工中减摩降载作用的研究 [J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 1998, (4): 28-32.
- Meng Y G, Liu X Z, Chen J. Investigation on the effect of ultrasonic vibration on reduction in drawing force [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 1998, (4): 28-32.
- [15] 齐海群. 超声振动拉丝相关理论及其实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- Qi H Q. Relative Theory and Experimental Research on the Wire Drawing Using Ultrasonic Vibration [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [16] Pasierb A, Wojnar A. An experimental investigation of deep drawing and drawing processes of thin-walled products with utilization of ultrasonic vibrations [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1992, 34 (1-4): 489-494.
- [17] Jimma T, Kasuga Y, Iwaki N, et al. An application of ultrasonic vibration to the deep drawing process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, 80-81: 406-412.
- [18] Kristoff I. Metal forming with vibrated tools [J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1969, 91 (4): 1168-1174.
- [19] Koga N, Asaka M, Junlapen K. Deep-drawing and ironing of 1050 aluminum sheets loaded with vibration using NC servo press machine [J]. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, 2007, 57 (6): 240-244.
- [20] 韩光超, 刘军, 温晓宁, 等. 基于不同振动模式的超声辅助拉深精密成形工艺 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (9): 118-123.
- Han G C, Liu J, Wen X N, et al. Precision forming process by ultrasonic assisted deep drawing based on different vibration modes [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (9): 118-123.
- [21] Komatsu I, Murakami T. Practical Use of Servo Press [M]. Tokyo: Nikkan Kougyou Shinbunsha, 2009.
- [22] Krieckenbauer S, Mauermann R, Muller P. Deep drawing with superimposed low-frequency vibrations on servo-screw presses [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 81: 905-913.
- [23] Hung J C. Evaluation of friction in ultrasonic vibration-assisted press forging using double cup extrusion tests [J]. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*, 2012, 13 (12): 2103-2108.
- [24] Hung J C, Tsai Y C, Hung C. Frictional effect of ultrasonic-vibration on upsetting [J]. *Ultrasonics*, 2007, 46 (3): 277-284.
- [25] Mousavi S A, Feizi H, Madoliat R. Investigations on the effects of ultrasonic vibrations in the extrusion process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 187: 657-661.
- [26] Liu Y, Han Q, Hua L, et al. Numerical and experimental investigation of upsetting with ultrasonic vibration of pure copper cone tip [J]. *Ultrasonics*, 2013, 53 (3): 803-807.
- [27] Bunget C, Ngaile G. Influence of ultrasonic vibration on micro-extrusion [J]. *Ultrasonics*, 2011, 51 (5): 606-616.
- [28] Seo Y H, Chan J P, Kim B H, et al. Development of audio frequency vibration microforming system [J]. *International Journal of*



- Precision Engineering & Manufacturing, 2012, 13 (5): 789–794.
- [29] 姚喆赫. 超声能场在金属微/介观成形中的作用理论及实验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- Yao Z H. Theoretical and Experimental Studies on Effects of Ultrasonic Energy Field in Micro/meso Metal Forming [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [30] Osakada K, Matsumoto R, Otsu M, et al. Precision extrusion methods with double axis servo-press using counter pressure [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2005, 54 (1): 245–248.
- [31] Maeno T, Osakada K, Mori K. Reduction of friction in compression of plates by load pulsation [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51 (7): 612–617.
- [32] Gmb H F. Axial forming [EB/OL]. <http://www.felss.com/topic/35/2018>. 2011–5–18.
- [33] 胡子非, 毛华杰. 可轴向振动挤压模体精锻过程中振幅影响的数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2007, 36 (13): 78–80.
- Hu Z F, Mao H J. Numerical simulation of axial oscillation of extrusion container in different amplitudes during precision forging [J]. Hot Working Technology, 2007, 36 (13): 78–80.
- [34] 陈占斌, 杨连发, 李贤章, 等. 微小管轴向超声辅助液压成形装置的设计与开发 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (4): 69–75.
- Chen Z B, Yang L F, Li X Z, et al. Design and development on axial ultrasonic assisted hydroforming device for microtube [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (4): 69–75.
- [35] 梁瑜轩, 黎向锋, 左敦稳, 等. 内螺纹低频冷挤压振动加工装置设计 [J]. 兵器材料科学与工程, 2011, 34 (5): 66–69.
- Liang Y X, Li X F, Zuo D W, et al. Design of vibration processing equipment of internal thread formed by cold extrusion [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2011, 34 (5): 66–69.
- [36] 王宇飞, 周芃, 邓磊, 等. 振动辅助弯曲对残余应力的影响 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (10): 27–34.
- Wang Y F, Zhou F, Deng L, et al. Influence of vibration assisted bending on residual stress [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (10): 27–34.
- [37] 马道章. 超声波在金属塑性加工上的应用 [J]. 有色金属材料与工程, 1980, (3): 31–40.
- Ma D Z. Application of ultrasonic in plastic processing of metals [J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 1980, (3): 31–40.
- [38] Severdenko V P, Klubovich V V, Stepanenko A V. Ultrasonic Rolling and Drawing of Metals [M]. New York: Springer US, 1972.
- [39] Severdenko V P, Stepanenko A V, Zayash I V. The effect of roll velocity on the efficiency of the ultrasonic oscillation technique [J]. Russian Ultrasonics, 1972, 2 (1): 33–36.
- [40] Yao Z H, Kim G Y, Faidley L A, et al. Effects of superimposed high-frequency vibration on deformation of aluminum in micro/meso-scale upsetting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212 (3): 640–646.
- [41] Nevill G E, Brotzen F R. The effect of vibrations on the static yield strength of a low-carbon steel [J]. Proceeding of American Society for Testing Material, 1957, 57: 751–758.
- [42] Oelschlagel D. Recent investigations into the ultrasonic influence on crystal plasticity [J]. Acta Phys. Austriaca, 1964, 18 (2–4): 175–179.
- [43] Abramov O V. Ultrasound in Liquid and Solid Metals [M]. London: CRC Press, 1994.
- [44] Dutta R K, Petrov R, 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.
- [45] Siu K W, Ngan A H W, Jones I P. New insight on acoustoplasticity-Ultrasonic irradiation enhances subgrain formation during deformation [J]. International Journal of Plasticity, 2011, 27 (5): 788–800.
- [46] Huang H, Pequegnat A, Chang B H, et al. Influence of superimposed ultrasound on deformability of Cu [J]. Journal of Applied Physics, 2009, 106 (11): 1144–1198.
- [47] Lum I, Huang H, Chang B H, et al. Effects of superimposed ultrasound on deformation of gold [J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105 (1): 1–5.
- [48] Zhou H, Cui H, Qin Q H, et al. A comparative study of mechanical and microstructural characteristics of aluminium and titanium undergoing ultrasonic assisted compression testing [J]. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2017, 682: 376–388.
- [49] Kirchner H O K, Kromp W, Prinz F B, et al. Plastic deformation under simultaneous cyclic and unidirectional loading at low and ultrasonic frequencies [J]. Materials Science and Engineering, 1985, 68 (2): 197–206.
- [50] Atanasiu N. Metal forming in the ultrasonic field [J]. Advanced Technology of Plasticity, 1984, 2: 799–804.
- [51] 蔡改贫, 姜志宏, 翁海珊. 低频振动塑性成形粘弹塑性模型的体积效应分析 [J]. 机械强度, 2007, 29 (2): 346–350.
- Cai G P, Jiang Z H, Weng H S. Volume effect analysis of visco-elasticity plasticity models for plastic deformation with low-frequency vibration [J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29 (2): 346–350.
- [52] Rusinko A. Analytical description of ultrasonic hardening and softening [J]. Ultrasonics, 2011, 51 (6): 709–714.
- [53] Siddiq A, Sayed T E. Acoustic softening in metals during ultrasonic assisted deformation via CP-FEM [J]. Materials Letters, 2011, 65 (2): 356–359.
- [54] Siddiq A, Sayed T E. A thermomechanical crystal plasticity constitutive model for ultrasonic consolidation [J]. Computational Materials Science, 2012, 51 (1): 241–251.
- [55] Yao Z, Kima G Y, Faidley L A, et al. Acoustic softening and residual hardening in aluminum: Modeling and experiments [J]. International Journal of Plasticity, 2012, 39 (39): 75.
- [56] Pohlman R, Lehfeltdt E. Influence of ultrasonic vibration on metallic friction [J]. Ultrasonics, 1969, 4 (4): 178–185.

- [57] Siebert K, Ulmer J. Influencing the friction in metal forming processes by superimposing ultrasonic waves [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2001, 50 (1): 195-200.
- [58] Kumar V C, Hutchings I M. Reduction of the sliding friction of metals by the application of longitudinal or transverse ultrasonic vibration [J]. Tribology International, 2004, 37 (10): 833-840.
- [59] Popov V L, Starcevic J, Filippov A E. Influence of ultrasonic in-plane oscillations on static and sliding friction and intrinsic length scale of dry friction processes [J]. Tribology Letters, 2010, 39 (1): 25-30.
- [60] Matsumoto R, Hayashi K, Utsunomiya H. Experimental and numerical analysis of friction in high aspect ratio combined forward-backward extrusion with retreat and advance pulse ram motion on a servo press [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214 (4): 936-944.
- [61] Maeno T, Mori K, Hori A. Application of load pulsation using servo press to plate forging of stainless steel parts [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214 (7): 1379-1387.
- [62] Ben N Y, Zhang Q, Meng D A, et al. Analysis of real contact area and re-lubrication in oscillating bulk forming process by corrosion method [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 253: 178-194.
- [63] Maeno T, Mori K, Ichikawa Y, et al. Use of liquid lubricant for backward extrusion of cup with internal splines using pulsating motion [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 244: 273-281.
- [64] Storck H, Littmann W, Wallaschek J, et al. The effect of friction reduction in presence of ultrasonic vibrations and its relevance to travelling wave ultrasonic motors [J]. Ultrasonics, 2002, 40 (1): 379-383.
- [65] Tsai C C, Tseng C H. The effect of friction reduction in the presence of in-plane vibrations [J]. Archive of Applied Mechanics, 2006, 75 (2-3): 164-176.
- [66] Teidelt E, Popov V L. Influence of ultrasonic oscillation on static and sliding friction [J]. Tribology Letters, 2012, 48 (1): 51-62.
- [67] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- Wen S Z, Huang P. Principles of Tribology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [68] 胡新华, 王志恒, 鲍官军, 等. 电液颤振对 6061 铝合金反挤压成形过程的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2015, 25 (9): 3056-3063.
- Hu X H, Wang Z H, Bao G J, et al. Influences of electric-hydraulic chattering on backward extrusion process of 6061 aluminum alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25 (9): 3056-3063.

### “第十七届全国塑性工程学术年会暨第九届全球华人塑性技术研讨会”会议通知

“第十七届全国塑性工程学术年会暨第九届全球华人塑性技术研讨会”(以下简称“年会”)将于2021年5月27—29日在天津市举行,大会主题为“创新驱动,砥砺奋进,推进塑性加工核心技术发展”。

**组织单位:**中国机械工程学会塑性工程分会主办,北京机电研究所有限公司、江苏太平洋精锻科技股份有限公司、太原理工大学、山东大学、河北工业大学承办,《塑性工程学报》、《锻压技术》媒体支持。

#### 会议内容:

(1) 大会主旨报告:邀请国内外知名专家学者作大会主旨报告,报告人及题目如下:

潘复生院士——高塑性镁合金的研究与应用;  
单忠德院士——数字化智能成形制造技术与装备;  
雷丙旺总工——TC4钛合金大规格环件挤-辗复合成形工艺研究;  
华林教授——机器人智能增材锻模再制造;  
夏汉关董事长——汽车零部件精锻成形技术开发应用新进展;  
姜正义教授——Bimetal composites and their applications in mining facility;  
胡卫龙博士——适应未来智能化成形技术仿真本构模型需满足的预测功能;  
王洪新总经理——超大型材轧制成形技术与装备;  
李淑慧教授——高强铝合金短流程高性能热冲压关键技术与研究进展;  
姜军博士——镁合金在冷热加工下的塑性变形和再结晶行为。

(2) 分组学术交流。

**会议注册:**详情请登录分会官网 [www.cstp-cmes.org.cn](http://www.cstp-cmes.org.cn), 点击相关链接或扫描右侧二维码, 直接注册。

**相关活动:**年会期间,将举办塑性工程领域新技术、新工艺、新装备展,参展单位报名后可获得3 m×3 m的宣传展位1个。届时,参展单位也可申请在年会资料袋及年会程序册、《年会论文集》(电子版)、《年会论文摘要集》(纸质版)和年会现场进行企业宣传和产品推介。欢迎有意向的企业、科研院所及高校积极报名参加展览助力大会成功举办。

**联系人:**秦思晓(15201461873, 投稿及报名), 薛红燕(18810080219, 财务咨询), 周林(13811919643, 会议展览等)

李佳盈(15711302068, 会员咨询), 金红(13911560582, 组织协调)

**E-mail:** duanya@cmes.org; sxgxb@263.net; fst@263.net



会议注册