

振动辅助塑性成形机理及应用研究进展*

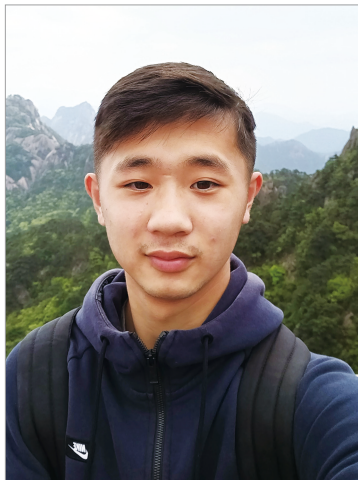
张海栋, 邓 磊, 王新云, 金俊松

(华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074)

[摘要] 振动辅助塑性成形相比于传统工艺,能够减小成形载荷、提高材料成形性能、改善零件表面质量,是一种先进且具有广阔应用前景的塑性成形工艺,近些年相关研究取得了较大进展。介绍了振动辅助塑性成形效应及相关机理研究工作,阐述了振动辅助塑性本构模型及数值模拟技术的研究进展,并对振动辅助塑性成形工艺、超声振动和低频振动装置进行了综述,最后探讨了振动辅助塑性成形机理及应用中存在的问题及发展趋势。

关键词: 振动; 塑性成形; 机理; 数值模拟; 装置; 本构模型

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.16.022



张海栋

博士研究生,主要从事振动辅助塑性成形技术研究。

塑性成形工艺包括挤压、拉拔、拉深、锻造等,在航空航天、汽车工业、能源工业等领域的零件制造中应用广泛。随着装备服役工况不断突破原有极限,例如超高温、超低温、高低温循环、强腐蚀、高真空、高应力等极端服役条件,对塑性成形零件的性能要求也不断提高^[1]。与此同时,零件的结构趋于整体化、薄壁化、复杂化,这就要求不断发展更加先进的塑性成形工艺,以满足低成本、高效率制造高性能、高精度零件的需求。

科学研究发现,在塑性成形过程中施加振动,可以提高金属材料的成形性能。早在1955年,Blaha和Langenecker将超声振动施加到单晶锌的拉伸试验中,试验结果表明材料的屈服应力和流动应力均降低,这一现象被称为超声塑性效应,也被称为Blaha效应^[2]。随后许多学者对振动辅助成形开展了相关的试验和理论研究,振动逐渐被应用到各种塑性成形工艺中,例如拉拔^[3-4]、冲压^[5]、挤

压^[6-7]、摆辗^[8-9]、渐进成形^[10-11]等。在塑性成形中施加振动具有减小成形载荷、改善零件表面质量的作用,且能够有效减小板料的回弹^[12-16]。近年来,在各种测试手段和控制技术发展的推动下,振动辅助塑性成形的机理和应用研究有了较大的进展(图1)。本文首先对振动辅助塑性成形效应以及相关机理进行阐述,然后对振动辅助塑性成形工艺及相关装置的研究进展进行综述,并探讨该领域目前存在的问题和发展趋势。

振动辅助塑性成形效应

自超声塑性效应被发现以来,已经有许多学者对振动辅助塑性成形效应进行了研究,包括降低流动应力、减小界面摩擦、调整残余应力、改善表面性能、细化晶粒等^[12-18]。一般认为振动的影响可以分为体积效应(Volume Effect)和表面效应(Surface Effect)。体积效应指的是振动对于材料内部物理性能的影响,表面效应

*基金项目: 国家杰出青年科学基金(51725504); 中央高校基本科研业务费专项资金(2019KFYXMBZ030)。

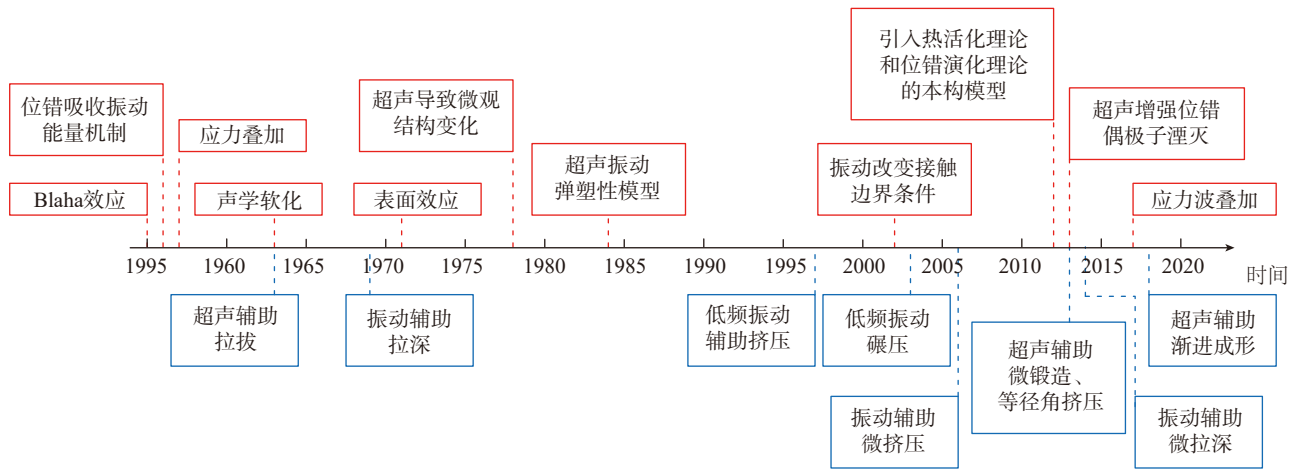


图1 振动辅助塑性成形机理及应用发展

Fig.1 Development on mechanism and application of vibration assisted plastic forming

指的是振动对于工件-模具界面之间摩擦的影响。不同材料的振动辅助塑性成形效应存在差异,并且受到振动参数和加载条件的影响。

1 振动对材料流动应力的影响

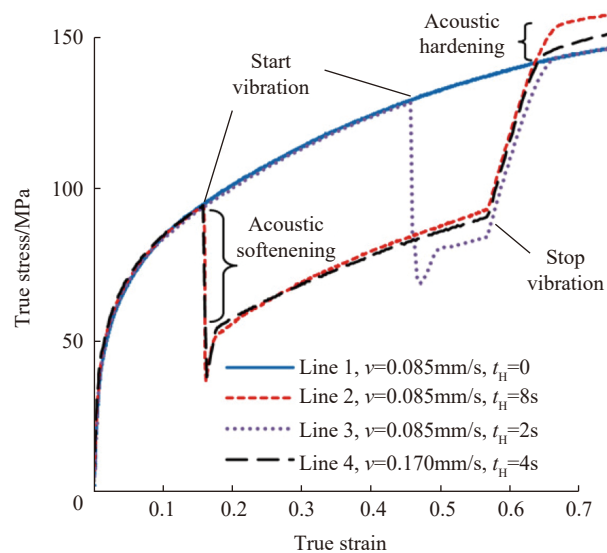
在塑性成形过程中施加振动会产生流动应力减小的现象,并且流动应力的减小受到振幅、频率以及材料的影响^[15,19]。振幅对流动应力影响较为明显,Huang等^[20]在纯铜的超声辅助压缩中观察到流动应力降低幅度与振幅成正比,并且通过与纯金的试验结果比较,认为振动软化效果可能在很大程度上受晶体结构而不是材料类型的影响。早期学者认为,由于振动频率远小于位错环的固有频率(一般认为是 10^9Hz)而无法产生共振,因此认为频率大小对流动应力没有影响^[21],但这种解释不能完全排除频率对于振动软化的影响。Zhou等^[16]观察到在20~40kHz的范围内增加频率会减弱振动软化效果,作者认为频率增加会使应变速率增加,使材料强度提高。

对于振动辅助塑性成形中振动软化的机理,主要有以下4种解释。(1)应力叠加,材料在周期性加载和卸载作用下,平均流动应力减小^[15]。(2)振动的温度效应使材料温度升高,产生热致软化的现象^[22-24]。(3)

声学软化效应,材料中位错等内部缺陷吸收振动能量而使塑性变形机制或物理性能发生变化。振动能量被位错等缺陷优先吸收,使得位错分布改变,新的位错源被激活,位错迁移率增加,使材料的流动应力降低^[24]。关于振动对位错的作用方式,Kempe等^[25]提出了位错吸收振动能量的3种方式,即共振、弛豫和滞后;Dutta等^[26]提出振动可以增强位错偶极子的湮灭能力,并且促使位错传播更长的距离,从而增加了位错湮灭的可能性。(4)应力波叠加,即当模具的

运动速度小于使模具和坯料保持接触的临界速度时,变形过程中模具与坯料不断碰撞,在坯料内部产生具有不同传播速度的弹性波与塑性波,不断在材料表面反弹,在材料内部产生应力波叠加,导致流动应力减小^[27-28]。

在振动辅助成形中停止振动后,材料表现出残余的软化或硬化现象,称为残余效应。铝的超声辅助压缩应力-应变曲线中就出现了残余硬化现象^[29-30],如图2^[30]所示。残余软化和残余硬化的产生通常被认为

图2 超声辅助压缩应力-应变曲线(v 为振动速度; t_H 为振动持续时间)Fig.2 Stress-strain curves of ultrasonic vibration assisted compression (v is punch speed; t_H is vibration duration)

是由于振动导致位错密度以及微观组织的变化造成的,不同的频率、振幅以及材料都可能导致不同的残余效应。据相关文献报道,在铝合金和冷轧钢中观察到残余硬化,而在钛合金、锌单晶、纯铜和纯金中观察到残余软化的现象^[16,20,24,31]。Zhou等^[29]认为铝合金的残余硬化可以通过基于边界增强机制的Hall-Petch效应来解释,而钛合金的残余软化行为是由于超声振动促进形变孪晶的饱和而使孪晶边界变少,形变孪晶引起的应变硬化效果减弱而出现残余软化的现象。

2 振动对界面摩擦的影响

在金属塑性成形过程中引入振动,可以减小工件与模具之间的摩擦,即所谓的表面效应,从而促进材料的流动,改善工件的表面质量。表面效应产生的原因被认为主要有以下3个方面:(1)工件与模具在振动作用下产生瞬时分离;(2)工具与模具的周期性分离使得润滑介质更容易进入并储存在接触界面中,并且有研究表明振动可以减小润滑膜的破损率^[32];(3)摩擦力矢在每个振动周期内发生变化,使摩擦在部分阶段有利于变形,从而减小平均摩擦系数^[15]。另外,姚喆赫^[32]认为在干摩擦条件下,振动软化导致剪切强度降低和界面接触由塑性接触转变为弹性接触也是摩擦降低的原因。一般来说在振动作用下,振幅越大减摩效果越好,并且受到界面润滑状态的影响^[33-34]。对于接触界面复杂以及大变形情况,振动的减摩效果相对较差^[7,35]。

3 振动对零件性能的影响

在塑性成形过程中施加振动,会在材料内部产生交变应力,使一些处于弹性应力状态的部分发生塑性屈服,释放残余应变,起到减小零件残余应力的作用^[36]。王宇飞^[37]在低频振动辅助弯曲试验中观察到残余应力与位错密度同时减小,残余应力

产生的物理本质是晶格畸变,而晶格畸变在很大程度上由位错产生,这在一定程度上解释了振动作用下残余应力的变化。

振动辅助表面微塑性处理可以提高零件表面硬度和耐磨性,改善表面质量。Xie等^[34]在铝合金的超声辅助镦粗试验中观察到,在超声振动作用下表面硬度增加,粗糙度降低,并且振幅越大,效果越好。Wang等^[12]采用超声表面滚压技术对40Cr材料表层进行纳米晶化处理,表面硬度提高了52.6%,显著提高了材料的耐磨性能。

总体来说,振动辅助塑性成形应具有高度的复杂性,是多种机制的耦合作用效果。近年来学者们通过试验测试和理论分析对振动辅助成形中摩擦减小、应力叠加、声学软化和残余效应分别进行了讨论,加深了对振动作用机理的认识。但现有的研究结果多基于简单的单轴拉伸或压缩试验,与实际成形条件存在一定的区别,需要对多种因素的耦合机制以及每种因素的量化表征进行更为系统和深入的研究。

振动辅助塑性行为的本构建模与数值模拟

在物理试验中难以对振动辅助成形材料的瞬态变形行为进行监测,数值模拟的方法可以对成形过程进行定时定量分析,有助于振动辅助塑性成形的机理研究和工艺研发,而构建能准确描述振动作用下材料流动行为的本构模型,是保证振动辅助塑性成形数值模拟准确性的必要条件^[38-39]。

经典的连续介质理论和弹塑性模型难以对振动软化和残余效应进行精确的描述。早期的学者将振动辅助成形的数值模拟工作集中在修改摩擦系数和描述应力叠加,其采用的本构模型中没有包含反映声学软化或者残余效应的因子,不足以对

振动辅助成形过程中材料的变形行为进行精确的描述^[40-41]。因此,许多后续工作集中在通过唯象模型和基于物理的模型来描述材料在振动辅助成形中的流变行为。在唯象本构模型方面,Siddiq等^[42]通过修改常规的晶体塑性模型以纳入声学软化效应,开发了基于唯象微观力学的本构模型。Xie等^[43]基于Johnson-Cook模型建立了6063铝合金在室温超声振动下的本构模型,定量分析了振幅和频率对屈服强度、硬化系数和硬化指数的影响。在基于物理的本构模型方面,Rusinko^[44]将其提出的超声缺陷密度引入本构模型,准确描述了材料在超声辅助成形中的软化和无静载条件下的硬化行为。姚喆赫等^[30]通过热活化理论和位错演化理论分别描述了声学软化和残余硬化效应,构建了基于晶体塑性理论的声塑性本构模型。Sedaghat等^[45]通过考虑材料在超声振动下的位错动力学和声能传递机理,提出了一种基于物理的本构模型,可以较好地预测超声振动作用下材料的变形行为。Wang等^[46]通过声能密度和基于振幅的幂律表达式分别描述了声学软化和应力叠加的影响,建立了一种混合模型。

许多学者采用数值模拟的方法,如有限元模拟、晶体塑性有限元模拟、分子动力学模拟分别从宏观、介观和微观尺度对振动辅助塑性成形机理和工艺进行研究。Siddiq等^[38]将修改的本构模型用于超声辅助板料成形、镦粗和拉丝工艺,定量研究了超声振动对摩擦力和成形载荷减小的影响。Li等^[11]采用基于物理的晶体塑性本构模型对超声辅助渐进成形进行数值模拟,结果表明考虑软化作用的本构模型可以提高数值模拟的精度,有限元模型的绝对误差会随着成形深度的增加而减小,总体误差低于20%。Zhang等^[47]采用分子动力学模拟的方法研究了1GHz高

频振动对非晶合金变形行为的影响,发现施加振动载荷几乎不会降低平均变形抗力,但在去除振动载荷后产生了明显的残余硬化效果,同时振动可以提高剪切局部化程度,有利于非晶合金的变形。

数值模拟技术是振动辅助塑性成形发展中关键的一环,为振动辅助塑性成形的机理研究和工艺开发提供了一种十分有效的手段。近年来,基于物理的本构模型通过引入热活化理论、位错演化理论和声能传递机理对声学软化和残余效应进行了较好的描述,而唯象本构模型通过定量描述振幅、频率等振动参数对材料变形行为的影响,也体现了较好的准确性。各种本构模型的建立增加了振动辅助塑性成形模拟的准确性和适用性,使数值模拟可以更好地预测材料的变形行为,有利于振动辅助塑性成形的机理研究和工艺开发。

振动辅助塑性成形工艺

振动辅助成形具有近净成形、成形性好、加工难变形金属的潜力,最早被应用在拉拔工艺中,随后在振动辅助板料成形、挤压等其他工艺也逐渐得到了发展,被应用于铝、钛、铜、钢等材料的成形中。振动辅助塑性成形根据振动频率的不同可分为低频振动辅助成形和超声振动辅助成形,前者常用的频率一般为几 Hz 到几百 Hz,后者则一般在 15~40kHz 左右。

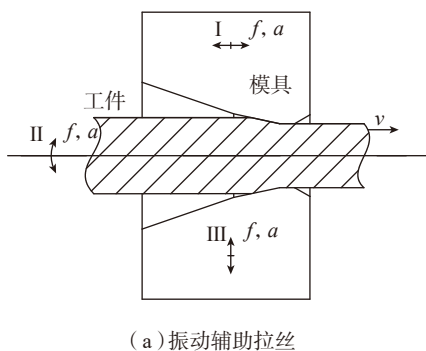


图3 振动辅助拉拔工艺 (f 为频率; a 为振幅; v 为速度)

Fig.3 Vibration assisted drawing process (f is frequency; a is amplitude; v is speed)

1 振动辅助拉拔成形

振动辅助拉拔主要包括振动辅助拉管和拉丝,自 20 世纪 60 年代就得到了工业应用,取得了良好的效果。拉拔和挤压是受界面摩擦影响较大的工艺,因此振动的表面效应能够显著减小成形载荷、改善表面质量。此外,振动辅助拉拔工艺可以提高延伸系数、减少拉拔道次、减少拉拔过程中的断裂现象,有效提高生产效率和产品质量,有助于难变形材料零件的成形,如航空发动机散热系统用高温合金毛细管的成形^[48]。

振动辅助拉拔的原理如图 3 所示,即在丝材或管材拉拔过程中将轴向、径向或者切向的振动引入到拉拔模具或芯轴中。在工业应用中考虑到对设备的改动较小,常采用芯轴振动的方案^[49]。Murakawa 等^[4]发现径向振动拉丝具有更高的极限拉拔速度,但轴向振动拉丝可以得到更好的表面质量和更小的流动应力;与常规拉丝相比,轴向振动拉丝最大应力下降约 91%,而径向振动拉丝下降约 67%^[3-4]。除了普通材料外,振动辅助拉丝也被应用在高强度材料如钛合金、高温合金的拉拔中。单小彪等在钛合金丝材拉拔中施加频率为 21kHz、振幅为 20 μ m 的切向扭转复合超声振动,成形力与轴向振动拉丝相比降低了 15.6%,与不施加超声相比降低了 23%。复合超声振动具有比单一轴向超声振动更好的成形效

果,为难变形金属的拉拔成形提供了一种新思路^[50-51]。低频振动辅助拉拔也取得了比较好的成形效果,姜志宏等^[52]将低频振动引入到薄壁铜管的游动芯头拉拔中,随着振幅的增加拉拔力明显降低,但频率的影响不是很明显。

2 振动辅助板料成形

板料成形件在航空航天、汽车等领域中应用广泛。振动辅助板料成形工艺主要包括振动辅助拉深、冲裁、弯曲、拉伸、渐进成形等,关注的研究点包括成形性能、模具磨损、板料回弹、成形件质量等。振动辅助拉深根据施加位置和振动方向的不同主要有如图 4 所示的 5 种形式,可用于加工杯形件等回转件或盒形件等非回转件。Jimma 研究了冷轧钢和 304 不锈钢的超声辅助拉深工艺,发现施加超声振动后极限拉深比 (LDR) 增加了 12%~16%,起皱现象得到改善并且最大成形载荷减小约 15%^[5],并且相关研究表明低频振动辅助拉深同样具有提高板料成形极限的效果^[53]。

回弹是板件精度控制中一个十分关键的问题,振动的引入可以有效降低板料成形中的回弹现象。柏玲磊等^[36]设计了振动辅助拉伸成形装置,研究了飞机蒙皮的振动辅助拉伸

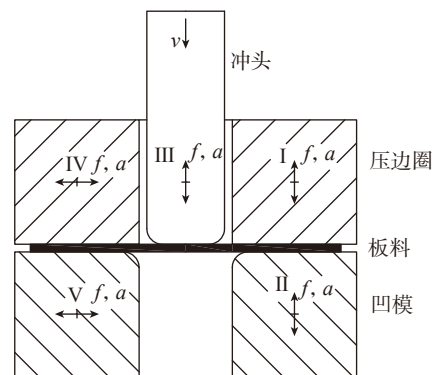


图4 振动辅助拉深工艺

(f 为频率; a 为振幅; v 为速度)

Fig.4 Vibration assisted deep drawing process (f is frequency; a is amplitude; v is speed)

成形,结果表明低频振动可有效减小飞机蒙皮拉伸成形后的回弹,并且在试验参数范围内(频率 10~30Hz,振幅 0.5~1.5mm),回弹量随振幅的增加而减小,而对频率变化不敏感。丁婕^[54]在铝合金板料超声辅助弯曲中观察到回弹角最大降幅达 37%,最大载荷降幅为 56%。

振动辅助冲裁一般是在冲裁时对冲头施加振动,可以提高断面质量。程涛等^[55]研究了中碳钢的超声辅助冲裁工艺,发现超声振动可以减小精冲件的塌角尺寸,并能够促使裂纹提前萌生,从而提高光亮带的比例。Liu 等^[56]对厚度为 0.2mm 的铜箔进行了超声辅助微冲裁,采用的纵向超声振动频率和幅度分别为 36.1kHz 和 1.66 μm ,光亮带最大比例从 79% 提高到 84%,减少了毛刺的产生,并且冲裁过程中剪切面上的抛光效果可以减小表面粗糙度。

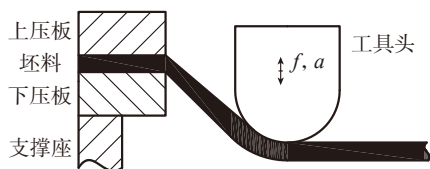


图5 振动辅助渐进成形工艺
(f 为频率; a 为振幅)

Fig.5 Vibration assisted incremental forming process (f is frequency; a is amplitude)

板料渐进成形是将板料的三维模型沿垂直方向分层离散成一系列等高层,在各等高层上形成加工轨迹,数控机床控制工具头沿加工轨迹对板料进行逐层加工,最终成形出设计零件^[57],振动辅助渐进成形则是在原有设备的工具头上引入振动(图5)。板料渐进成形工艺具有较大的柔性且不使用凹模,可以成形形状较为复杂的零件,在小批量生产中优势明显。李燕乐等^[10-11,58]对超声辅助板料渐进成形工艺进行了系统的研究,结果表明施加超声振动后材料流动应力减小,材料的流动面积增加,更多的材料参与变形,有利于改善材料堆积、起皱和破裂的问题。

3 振动辅助挤压成形

振动辅助挤压成形有较多的应用,除了常规的工艺优点外,还具有增大挤压比、减少材料折叠的作用。在超声辅助挤压成形中,成形力的降低受到挤压速度的限制,在高速时成形力下降不明显^[59]。这可能是由于材料在大变形、快速挤压、大接触面积和高压变形中,超声振动使界面局部温度升高,导致摩擦力增加^[7]。Xie 等^[34]对 6063 铝合金环进行了超声振动压缩试验,发现超声能量在传播过程中的损耗使与工具头接触的上表面的表面质量、硬度和减摩效果明显优于下表面。Bagherzadeh

等^[60]对超声辅助等径角挤压工艺进行了研究,如图6所示,将频率为 20kHz、振幅为 15 μm 的超声振动直接施加在铝合金坯料上,与不加超声振动相比,成形力降低了 31%,平均塑性应变增加 58%,消除了材料的折叠缺陷,并提高了变形的均匀性。

受到超声振动装置功率的限制以及超声能量在传播中的耗散影响,超声辅助挤压难以加工尺寸较大的零件,因此近年来许多学者对振动辅助微成形和低频振动挤压进行了研究。Lou 等^[6]研究了纯铜的超声辅助微挤压,结果表明材料的流动应力、摩擦系数和显微硬度随振幅的增加而减小,表面质量升高;由于零件尺寸较小,晶粒尺寸效应不可忽略,因此振动对微成形中材料性能的影响比较复杂。低频振动辅助挤压工艺在部分研究中已经被用于成形微槽道薄板^[61]、花键^[62-64]、齿轮^[65-66]等零件,取得了较好的成形效果。

4 其他振动辅助成形工艺

也有学者对其他振动辅助成形工艺进行了研究。Suh^[67]将超声辅助冷锻应用在冷轧机切边刀的生产中,刀具表面产生了纳米级细小晶粒和残余压应力,提高了刀具寿命和可靠性。Bai 等^[68-69]研究了金属箔的振动辅助微锻造工艺,发现较大的振幅可以得到更好的表面质量。蔡改贫等^[8-9]研究了振动摆辗工艺,发现与普通摆辗相比,振动摆辗的成形力小、成形时间短、成形质量高,并通过该工艺生产了内花键套。Rasoli 等^[70]将超声振动引入铝合金管的旋压工艺中,结果表明低功率超声振动可以改善样品的内表面质量;大功率超声振动可以使径向力减小 4%~13%,并减少物料溢出。铆接是飞机装配中一种重要的连接方式,解振东^[71]研究了超声辅助铆接工艺,超声振动使钉杆变形更加均匀,并增大了铆接结构的干涉量和均匀度,有助于提高铆接结构的剪切强度和疲劳寿命,在

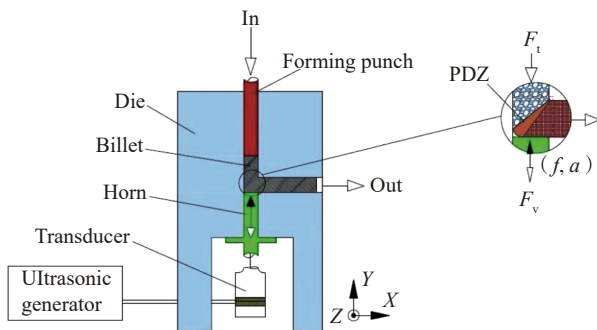


图6 超声辅助等径角挤压工艺

(PDZ为塑性变形区; F_s 为静力; F_v 为振荡力; f 为频率; a 为振幅)

Fig.6 Ultrasonic assisted equal channel angular extrusion process (PDZ is plastic deformation zone; F_s is static force; F_v is pulse oscillatory force; f is frequency; a is amplitude)

频率 28kHz、振幅 4.32 μ m 时,可分别使 45 钢、6063 铝合金、T2 铜的铆接结构剪切强度提高 10.47%、10.22%、9.2%。

振动辅助塑性成形应用在板料成形与体积成形中都取得了较好的效果。首先,振动可以减小成形载荷、改善材料的塑性,对于难变形、塑性较差材料以及变形量较大零件的加工优势明显。其次,振动减小板料回弹的作用,可以显著改善板料的成形效果,提高板件成形精度。另外由于表面效应,振动应用于拉拔、挤压等成形工艺,对零件表面质量的提升效果较为明显。超声振动装置的局限性使得超声辅助成形局限于坯料体积较小、成形力较小、模具结构比较简单的工艺。目前振动辅助成形工艺具有向微成形、多向复合振动辅助成形、振动局部加载成形或低频成形的方向发展的趋势,以解决超声功率低的问题。

振动辅助成形装置

振动辅助塑性成形是在塑性成形中通过振动发生装置将振动引入到模具或者坯料中实现的。根据振动频率和产生方式的不同,主要有超声振动辅助成形装置和低频振动辅助成形装置。

1 超声振动辅助成形装置

超声振动辅助成形装置一般由超声发生器、超声换能器、变幅杆和工具头组成,如图 7 所示。超声发生

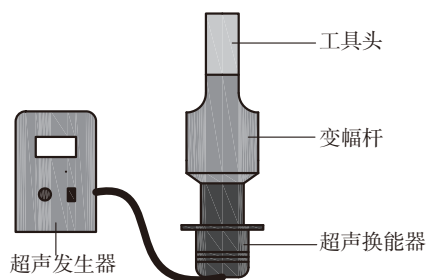


图7 超声振动辅助成形装置

Fig.7 Ultrasonic assisted forming apparatus

器用于将工频交流电信号转换为超声频率的电振荡信号,然后经超声换能器将电振荡信号转换为超声振动,频率一般为 15~40kHz。常用的超声换能器有压电陶瓷换能器和磁致伸缩换能器。通常超声换能器产生的振动的振幅较小,需要经过变幅杆放大,然后直接或经工具头引入坯料。彭卓等^[72]设计的超声辅助微挤压成形装置采用双换能器和双变幅杆驱动形式,并对矩形六面体变幅杆的结构进行优化,可负载坯料及模具实现竖直方向的整体超声谐振。

当施加的频率和系统固有频率相等时能够产生共振,超声振动可以产生最大的效果^[73]。成形过程中载荷和温度的变化,会导致系统固有频率变化而无法产生共振^[28],因此在一些研究中运用了具有自动调节能力的超声发生装置,可以在成形过程中在一定范围内自动产生谐振。对于不同的应用条件,往往需要设计不同的变幅杆以达到良好共振的效果。共振状态下,振幅比较高,可能会导致机械系统崩溃自毁。超声振动成形装置受到成形力的限制,在载荷较大时存在无法起振的现象,需要开发更大功率的超声振动装置。

2 低频振动辅助成形装置

低频振动辅助成形工艺采用的振动频率一般在几 Hz 到几百 Hz,采用的振动装置除了伺服电机外,主要是低频振动发生器。伺服电机可以通过精确控制滑块的伺服运动来实现成形过程中低频振动的叠加,增加了振动辅助成形过程的可控性,频率、振幅的可调性更好,装置通用性也更好。低频振动发生器根据原理的不同,一般可以分为机械式、气动式、电磁式和电液式^[74-75]。机械式振动发生器是通过偏心轮等机械结构产生低频振动,可以得到较大的输出功率,但振动频率和振幅的可调性较差,并且在振动过程中会产生较大的噪声。气动式振动发生器通过机

械结构将压缩气体转换为低频机械振动,通过调整活塞质量和气体压力分别调节振动频率和激振力。电磁式振动发生器通过电磁感应原理将电振荡信号转换为不同波形的低频机械振动,频率可调节范围较大。电液式振动发生器是通过电动激振器带动液压伺服阀,控制液压缸中的活塞产生机械振动,可以得到较大的激振力,在大型设备上应用较多。

前文提到低频振动挤压被用于生产齿轮、花键等,具有较好的成形效果,许多企业开发了相应的压力机。德国的 FELSS 公司开发的立式振动挤压机是比较具有代表性的产品,该装置在凹模上施加低频振动,频率约为 20Hz^[75]。合肥合锻公司开发了 1000kN 轴向振动成形液压机,采用的电液式振动发生器频率可以在 10~30Hz 之间调节,可用于花键生产并提高生产效率^[76]。除了伺服压力机外,低频振动成形装置的通用性相对于超声振动成形装置较差,需要开发专用压力机,超声振动成形装置只需要附加在普通压力机上,设备成本相对较低。超声换能器在高温下性能会急剧恶化,而大多数低频振动成形装置在较高温度下仍能良好工作,因此相对于超声振动,低频振动在热加工中的应用优势明显。

结论

与传统塑性成形工艺相比,振动辅助塑性成形工艺具有降低成形载荷、提高零件表面质量、改善材料成形性能的优点,已经在工业生产中得到了广泛应用,但仍存在一些问题亟待解决。

(1) 对于振动辅助塑性成形机理缺乏统一和明确的解释,对于“表面效应”和“体积效应”中各种机制的耦合作用缺乏清晰的认识;微成形中振动与尺度效应的耦合作用机理缺乏明确的解释;振动对非晶合金、金属基复合材料等特殊材料变形

行为的影响机制不明确;不同材料在振动辅助成形中的微观组织演化、失效形式以及变形机制缺乏系统的研究;各种理论的应用范围具有一定的局限性,这在一定程度上也限制了本构模型的建立和数值模拟技术的发展。此外,目前研究中较少有从原子层面对振动辅助成形机理进行解释,进一步研究中可采用分子动力学模拟以及原位试验等方法对相关机制进行解释;数值模拟可以对振动辅助成形过程进行定时定量研究,基于物理的本构模型与混合本构模型有助于获得准确的模拟结果,应当予以关注。

(2)在振动辅助塑性成形工艺方面,存在振动功率不足、振动损耗、适用范围窄并且缺乏明确的工艺标准的问题。进一步研究中,应对微成形、多向复合振动辅助成形、振动局部加载成形、低频辅助成形或振动辅助热成形等工艺予以关注,对关键工艺参数如振幅、频率、变形速率等的确定进行系统化研究以建立工艺标准。

(3)在成形装置方面,振动对成形过程稳定性、成形精度以及设备疲劳性能的影响需引起关注;需要研制大功率的振动发生装置,并且具有对输入能量、振幅和频率等参数更好的量化调节能力;同时,进一步提高成形系统的控制精度、模具精度、稳定性、系统刚度以及自动化水平,以满足对成形力较大及形状较为复杂零件的成形需求,提高在工业生产中的适用性。

虽然还存在一定的问题,但随着相关研究的进行和问题的解决,振动辅助塑性成形工艺将具有更加广阔的应用前景。

参考文献

[1] 陈永来,张帆,单群,等.精密成形技术在航天领域的应用进展[J].材料科学与工艺,2013,21(4):57-64.

CHEN Yonglai, ZHANG Fan, SHAN Qun, et al. Application progress of precision forming technology in aerospace[J]. Materials Science and Technology, 2013, 21(4): 57-64.

[2] BLAHA F, LANGENECKER B. Dehnung von zink-kristallen unter ultraschalleinwirkung[J]. Naturwissenschaften, 1955, 42(20): 556.

[3] 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): 30-35.

[4] 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(1-3): 81-86.

[5] 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.

[6] LOU Y, HE J S, CHEN H, et al. Effects of vibration amplitude and relative grain size on the rheological behavior of copper during ultrasonic-assisted microextrusion[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(5-8): 2421-2433.

[7] HUNG J C, HUANG C C. Evaluation of friction in ultrasonic vibration-assisted press forging using double cup extrusion tests[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(12): 2103-2108.

[8] 蔡改贫,姜志宏.振动摆动辗压成形实验分析[J].中国机械工程,2010,21(14):1726-1731.

CAI Gaipin, JIANG Zhihong. Experimental analysis of vibrational rotary forging deformation[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(14): 1726-1731.

[9] 蔡改贫,徐建波,翁海珊.扭转振动摆动辗压精密成形机理研究[J].锻压技术,2006,31(1):40-42,53.

CAI Gaipin, XU Jianbo, WENG Haishan. Research of precision form mechanism by torsion vibro-rotary forging[J]. Forging & Stamping Technology, 2006, 31(1): 40-42, 53.

[10] LI Y L, ZHAI W D, WANG Z J, et al. Investigation on the material flow and

deformation behavior during ultrasonic-assisted incremental forming of straight grooves[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(1): 433-454.

[11] LI Y L, CHENG Z N, CHEN X 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(5-8): 2287-2299.

[12] WANG T, WANG D P, LIU G, et al. Investigations on the nanocrystallization of 40Cr using ultrasonic surface rolling processing[J]. Applied Surface Science, 2008, 255(5): 1824-1829.

[13] AMANOV A, CHO I S, PYOUN Y S, et al. Micro-dimpled surface by ultrasonic nanocrystal surface modification and its tribological effects[J]. Wear, 2012, 286: 136-144.

[14] ROY S, FISHER J W, YEN B T. Fatigue resistance of welded details enhanced by ultrasonic impact treatment (UIT)[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(9-11): 1239-1247.

[15] EAVES A E, SMITH A W, WATERHOUSE W J, et al. Review of the application of ultrasonic vibrations to deforming metals[J]. Ultrasonics, 1975, 13(4): 162-170.

[16] ZHOU H Y, CUI H Z, QIN Q H. Influence of ultrasonic vibration on the plasticity of metals during compression process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 251: 146-159.

[17] LIU T, LIN J, GUAN Y J, et al. Effects of ultrasonic vibration on the compression of pure titanium[J]. Ultrasonics, 2018, 89: 26-33.

[18] HU J, SHIMIZU T, YOSHINO T, et al. Ultrasonic dynamic impact effect on deformation of aluminum during micro-compression tests[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 258: 144-154.

[19] DNWSON G R, WINSPEER C E, SANSOME D H. Application of high and low frequency scillations to the plastic deformation of metal[J]. Metal Forming, 1996, 231(8): 234-238.

[20] 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): 113514.1–113514.6.
- [21] BLAHA F, LANGENECKER B. Ultrasonic investigation of the plasticity of metal crystals[J]. *Acta Metallurgica*, 1959, 7(2): 93–100.
- [22] DAUD Y, LUCAS M, HUANG Z H. Superimposed ultrasonic oscillations in compression tests of aluminium[J]. *Ultrasonics*, 2006, 44(S): e511–e515.
- [23] ENDO T, SUZUKI K, ISHIKAWA M. Effects of superimposed ultrasonic oscillatory stress on the deformation of Fe and Fe–3%Si alloy[J]. *Transactions of the Japan Institute of Metals*, 1979, 20(12): 706–712.
- [24] LANGENECKER B. Effects of ultrasound on deformation characteristics of metals[J]. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1966, 13(1): 1–8.
- [25] KEMPE W, KRONER E. Dislocation damping of aluminum single crystals at room temperature[J]. *Zeitschrift für Metallkunde*, 1956, 47: 302–304.
- [26] 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.
- [27] DENG L, LI P, WANG X Y, et al. Influence of low-frequency vibrations on the compression behavior and microstructure of T2 copper[J]. *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2018, 710: 129–135.
- [28] 刘艳雄, 华林. 高强度超声波辅助塑性加工成形研究进展[J]. *塑性工程学报*, 2015, 22(4): 8–14.
- LIU Yanxiong, HUA Lin. Review of study on high-intensity ultrasonic vibrations assisted plastic deformation process[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2015, 22(4): 8–14.
- [29] ZHOU H Y, CUI H Z, 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.
- [30] YAO Z H, KIM G Y, WANG Z H, et al. Acoustic softening and residual hardening in aluminum: modeling and experiments[J]. *International Journal of Plasticity*, 2012, 39: 75–87.
- [31] LUM I, HUANG H, CHANG B H, et al. Effects of superimposed ultrasound on deformation of gold[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(2): 024905.1–024905.5.
- [32] 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 Zhehe. Theories and experimental studies on effects of ultrasonic energy field in micro/meso metal forming[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [33] 蔡改贫, 张晖, 刘峥. 金属脉冲振动拉拔成形一维表面效应机理分析[J]. *锻压技术*, 2009, 34(1): 130–134.
- CAI Gaipin, ZHANG Hui, LIU Zheng. One dimension surface effect mechanism analysis for metal drawing deformation with pulse vibration[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2009, 34(1): 130–134.
- [34] XIE Z D, GUAN Y J, ZHU L H, et al. Investigations on the surface effect of ultrasonic vibration-assisted 6063 aluminum alloy ring upsetting[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(9–12): 4407–4421.
- [35] YAO Z H, KIM G Y, FAIDLEY L, et al. Experimental study of high-frequency vibration assisted micro/mesoscale forming of metallic materials[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2011, 133(6): 1–8.
- [36] 柏玲磊, 陈梁玉, 赵坤民. 飞机蒙皮振动辅助拉伸成形工艺分析[J]. *锻压技术*, 2017, 42(11): 18–25.
- BAI Linglei, CHEN Liangyu, ZHAO Kunmin. Analysis on vibration-assisted stretch forming of aircraft skin panel[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2017, 42(11): 18–25.
- [37] 王宇飞. 铝合金振动辅助成形的残余应力研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- WANG Yufei. Study on residual stress of aluminum alloy in vibration-assisted forming[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [38] SIDDIQ A, SAYED T E. Ultrasonic-assisted manufacturing processes: variational model and numerical simulations[J]. *Ultrasonics*, 2012, 52(4): 521–529.
- [39] 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, 7(1): 9–15.
- ZHONG Chongkai, GUAN Yanjin, JIANG Liangbin, et al. Research status and development tendency of ultrasonic-vibration assisted metal plastic forming[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2015, 7(1): 9–15.
- [40] DAUD Y, LUCAS M, HUANG Z H. Modelling the effects of superimposed ultrasonic vibrations on tension and compression tests of aluminium[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 186(1): 179–190.
- [41] KIRCHNER H O K, KROMP W K, 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.
- [42] SIDDIQ A, SAYED T E. Acoustic softening in metals during ultrasonic assisted deformation via CP-FEM[J]. *Materials Letters*, 2011, 65(2): 356–359.
- [43] XIE Z D, GUAN Y J, LIN J, et al. Constitutive model of 6063 aluminum alloy under the ultrasonic vibration upsetting based on Johnson-Cook model[J]. *Ultrasonics*, 2019, 96: 1–9.
- [44] RUSINKO A. Analytical description of ultrasonic hardening and softening[J]. *Ultrasonics*, 2011, 51(6): 709–714.
- [45] SEDAGHAT H, XU W X, ZHANG L C. Ultrasonic vibration-assisted metal forming: constitutive modelling of acoustoplasticity and applications[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 265: 122–129.
- [46] WANG C Y, LIU Y, GUO B, et al. Acoustic softening and stress superposition in ultrasonic vibration assisted uniaxial tension of copper foil: experiments and modeling[J]. *Materials & Design*, 2016, 112: 246–253.
- [47] ZHANG M, LI Q M, ZHANG J C, et al. Influence of vibrational loading on deformation behavior of metallic glass: a molecular dynamics study[J]. *Metals*, 2019,

9(11): 1197.

[48] 王震, 万敏, 孟宝, 等. 超声振动场对高温合金薄壁毛细管微拉拔成形性能及表面质量影响研究 [C]// 创新塑性加工技术, 推动智能制造发展——第十五届全国塑性工程学会年会暨第七届全国华人塑性加工技术交流会. 济南: 中国机械工程学会, 2017.

WANG Zhen, WAN Min, MENG Bao, et al. Study on the effect of ultrasonic vibration field on micro-drawing formability and surface quality of superalloy microtube[C]//Innovative plastic processing technology to promote the development of intelligent manufacturing—The 15th National Plastic Engineering Society Annual Conference and the 7th Global Chinese Plastic Processing Technology Exchange Conference. Jinan: Chinese Mechanical Engineering Society, 2017.

[49] 王春举, 郭斌, 单德彬, 等. 高频/超声振动辅助微成形技术研究进展与展望 [J]. 精密成形工程, 2015, 7(3): 7–16.

WANG Chunju, GUO Bin, SHAN Debin, et al. Research progress and outlook of high-frequency/ultrasonic vibration assisted microforming[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(3): 7–16.

[50] YANG C Q, SHAN X B, XIE T. Titanium wire drawing with longitudinal-torsional composite ultrasonic vibration[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(1–4): 645–655.

[51] LIU S, SHAN X B, GUO K, et al. Experimental study on titanium wire drawing with ultrasonic vibration[J]. Ultrasonics, 2018, 83: 60–67.

[52] 姜志宏, 姜晓锋, 许永强. 薄壁铜管游动芯头低频振动拉拔力影响规律 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(1): 113–116.

JIANG Zhihong, JIANG Xiaofeng, XU Yongqiang. Law of affecting low-frequency vibration pulling force of thin-walled copper tube swimming core[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(1): 113–116.

[53] 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.

[54] 丁婕. 铝合金超声振动辅助弯曲成形研究 [D]. 济南: 山东大学, 2016.

Ding Jie. Research of ultrasonic vibration assisted aluminum alloy bending[D]. Jinan: Shandong University, 2016.

[55] 程涛, 刘艳雄, 华林. 超声波振动辅助精冲成形工艺研究 [J]. 锻压技术, 2016, 41(4): 25–30, 35.

CHENG Tao, LIU Yanxiong, HUA Lin. Research on the technology of ultrasonic vibration assisted fine blanking process[J]. Forging & Stamping Technology, 2016, 41(4): 25–30, 35.

[56] LIU Y, WANG C J, HAN H B, et al. Investigation on effect of ultrasonic vibration on micro-blanking process of copper foil[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(5–8): 2243–2249.

[57] 刘强. 用于板料渐进成形的超磁致伸缩超声振动装置的研究与设计 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019.

LIU Qiang. Research and design of giant magnetostrictive ultrasonic vibration device for progressive forming of sheets[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.

[58] 翟维东, 陈晓晓, 李燕乐, 等. 超声振动对渐进成形过程成形力的影响 [J]. 锻压技术, 2018, 43(8): 80–84, 102.

ZHAI Weidong, CHEN Xiaoxiao, LI Yanle, et al. Influence of ultrasonic vibration on forming forces in incremental forming[J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43(8): 80–84, 102.

[59] AKBARI MOUSAVI S A 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.

[60] BAGHERZADEH S, ABRINIA K, HAN Q Y. Analysis of plastic deformation behavior of ultrafine-grained aluminum processed by the newly developed ultrasonic vibration enhanced ECAP: simulation and experiments[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 50: 485–497.

[61] 周旋, 邓磊, 金俊松, 等. 5A06 铝合金微槽道薄板件等温振动辅助成形研究 [J].

精密成形工程, 2016, 8(3): 25–29.

ZHOU Xuan, DENG Lei, JIN Junsong, et al. Vibration-assisted isothermal forging of 5A06 aluminium micro-channel thin-plate parts[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(3): 25–29.

[62] 马鹏举, 许志永, 程向, 等. 调频调幅轴向花键挤压试验研究 [J]. 机械科学与技术, 2018, 37(2): 258–262.

MA Pengju, XU Zhiyong, CHENG Xiang, et al. Investigation of axial spline extrusion with frequency and amplitude modulation[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2018, 37(2): 258–262.

[63] 马鹏举, 程向, 许志永, 等. 调频调幅式轴向振动挤压花键成形过程实验研究 [J]. 锻压技术, 2017, 42(4): 96–102, 122.

MA Pengju, CHENG Xiang, XU Zhiyong, et al. Experimental investigation on the extrusion process of axial vibration with frequency and amplitude modulated for spline[J]. Forging & Stamping Technology, 2017, 42(4): 96–102, 122.

[64] 张琦, 贲宁宇, 王聚存, 等. 花键轴振动挤压成形试验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(11): 110–115.

ZHANG Qi, BEN Ningyu, WANG Jucun, et al. Experimental research on oscillating extrusion of splined shaft[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(11): 110–115.

[65] 杨绍荣, 胡新华, 李新广. 凹模周期性振动对锥齿轮冷挤压的影响 [J]. 铸造技术, 2017, 38(9): 2254–2257.

YANG Shaorong, HU Xinhua, LI Xinguang. Effect of periodic vibration of die on cold extrusion of conical gear shaft[J]. Foundry Technology, 2017, 38(9): 2254–2257.

[66] 衡明, 杨程, 张文旭, 等. 低频振动辅助齿轮成形的减摩机理研究 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26(2): 238–244.

HENG Ming, YANG Cheng, ZHANG Wenxu, et al. Study on antifriction mechanism of low frequency vibration assisted gear forming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(2): 238–244.

[67] SUH C M, SONG G H, SUH M S, et al. Fatigue and mechanical characteristics of nano-structured tool steel by ultrasonic cold forging technology[J]. Materials Science and

Engineering A: Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2007, 443(1-2): 101-106.

[68] BAI Y, YANG M. Optimization of metal foils surface finishing using vibration-assisted micro-forging[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(1): 21-28.

[69] BAI Y, YANG M. Investigation on mechanism of metal foil surface finishing with vibration-assisted micro-forging[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(3): 330-336.

[70] RASOLI M A, ABDULLAH A, FARZIN M, et al. Influence of ultrasonic vibrations on tube spinning process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(6): 1443-1452.

[71] 解振东. 镁 / 铝合金超声振动辅助塑性成形中的材料变形行为与超声作用机制研究 [D]. 济南: 山东大学, 2019.

XIE Zhendong. Study on materials

deformation behaviors and ultrasonic acting mechanisms of ultrasonic vibration assisted Mg/Al alloys metal forming[D]. Jinan: Shandong University, 2019.

[72] 彭卓, 韩光超, 李凯, 等. 超声辅助微挤压成形系统设计 [J]. 振动与冲击, 2017, 36(15): 259-264.

PENG Zhuo, HAN Guangchao, LI Kai, et al. Design of an ultrasonic-assisted micro extrusion forming system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(15): 259-264.

[73] DJAVANROODI F, AHMADIAN H, NASERI R, et al. Experimental investigation of ultrasonic assisted equal channel angular pressing process[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2016, 16(3): 249-255.

[74] 姜志宏, 曾艳祥, 许永强, 等. 一种激振力与振动频率分别可调的气动激振装置: CN206343367U[P]. 2017-07-21.

JIANG Zhihong, ZENG Yanxiang, XU Yongqiang, et al. Pneumatic excitation device

with adjustable excitation force and vibration frequency: CN206343367U[P]. 2017-07-21.

[75] 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 De'an, ZHAO Shengdun, LI Yongyi, et al. Key technology of plastic forming with low frequency vibration[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2014, 21(4): 7-13.

[76] 胡彬彬, 周志江, 方昆. 1000kN 轴向振动成形液压机的研制 [J]. 锻压装备与制造技术, 2015, 50(2): 46-47.

HU Binbin, ZHOU Zhijiang, FANG Kun. Research and manufacture of 100t axial vibration forming hydraulic press[J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2015, 50(2): 46-47.

通讯作者: 邓磊, 博士, 副教授, 主要研究方向为轻合金精密塑性成形技术, E-mail: denglei@hust.edu.cn.

Research Progress on Mechanism and Application of Vibration Assisted Plastic Forming

ZHANG Haidong, DENG Lei, WANG Xinyun, JIN Junsong

(State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

[ABSTRACT] Vibration assisted plastic forming, which can help to reduce the forming load, improve the formability of metallic materials and refine the surface quality of formed parts compared with traditional processes, is an advanced process with broad application prospects and has made great progress in recent years. Vibration assisted plastic forming effects and related mechanism are introduced, constitutive modeling and numerical simulation of vibration assisted forming are summarized. In addition, vibration assisted plastic forming processes as well as the apparatus of ultrasonic vibration and low-frequency vibration are reviewed. Finally, the problems and development trends in vibration assisted plastic forming mechanism and application are discussed.

Keywords: Vibration; Plastic processing; Mechanism; Numerical simulation; Apparatus; Constitutive model

(责编 雷松)