

超声振动辅助塑性成形技术研究综述

符文雯 指导老师：校文超

(中国地质大学(北京), 北京 100089)

摘要：超声振动辅助塑性成形已成为近年来塑性成形领域的重要研究方向。其引起的表面效应和体积效应能够有效降低工件的成形力、减小工件与模具间的摩擦、提高产品表面质量。本文从体积效应和表面效应两个方面对其作用机制进行了概述，从塑性成形工艺、设备及应用方面进行研究，并且结合有限元技术进行分析，了解了超声振动塑性成形现如今所存在的问题及未来的发展趋势。

关键词：超声振动；塑性成形；作用机制；有限元

前言：超声振动辅助塑性成形技术是指在塑性加工中作用于加工材料的，用可以控制的特定方向、振幅和频率的超声振动的一个工艺过程。随着超声振动塑性成形的发展迅速，在这一趋势下，各个专家已经提出并研究了许多新的设计要求和理论概念，可以看出，在很多程度上，超声振动可以提高材料的性能。此外，对于一些特定的金属来说，超声振动也是非常有效的工艺。

一、超声振动塑性成形理论

在 20 世纪 50 年代时，Blaha^[1] 和 Langenecker^[2] 首次把超声振动和金属塑性加工结合起来，起因是他们在做一次对单晶锌拉伸试验进行超声振动时，在其中发现单晶锌的变形力突然变小，出现了所谓的软化现象。

同时，这种“软化现象”也称为软化效应以及 Blaha 效应。自此，越来越多的学者对这种现象进行了研究，得出了超声振动可以减小材料的变形力这一结论，同时也发现这种现象可以提高产品质量和材料成形极限，将其运用在普通金属材料的塑性加工，可以显著改善材料加工性能，提高成形质量。

就目前的研究来说，超声振动辅助塑性成形具有两种效应，分别是：

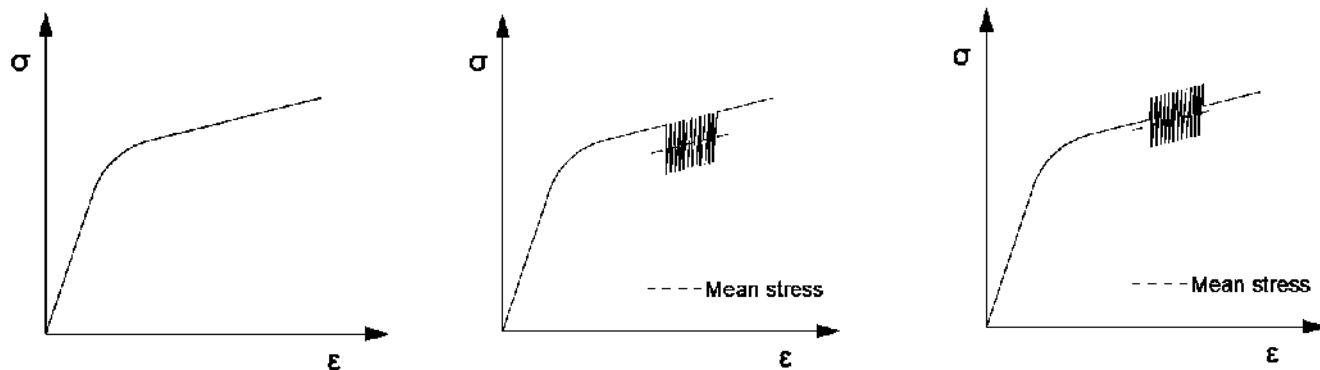
(一) 表面效应

表面效应可以分为宏观与微观，其中，微观表现在材料的表面晶粒的变化，其晶粒的分布非常均匀并且这些晶粒都被细化了。而宏观表现也就是其优势，主要是可以将金属材料的表面质量提高，并且能减小刀具与材料之间的相互摩擦力，使得两者之间的润滑效果变得更好等。大部分研究对于超声振动塑性成形表面效应的解释基本上都是基于宏观的现象：由振动引起的金属材料与模具之间瞬间分离有利于改善加工润滑环境；超声振动过程中，摩擦力不是固定不变的，有时会出现摩擦力方向反向的现象，使得摩擦力有利于塑性变形；在振动过程中，工件接触表面粗糙度得到改善，也会降低摩擦力；工件接触表面会出现局部热效应，表面局部升温，从而避免工件与模具局部表面之间的黏着。

(二) 体积效应

超声振动中的体积效应则指的是向在进行塑性变形的金属施加超声振动后，会对金属材料的内部产生影响，这种情况就是超声振动辅助塑性成形中的体积效应。

一般情况下，应力叠加效应用于说明宏观角度上的体积效应。如图 1 所示，图 (a) 是一条典型的静态应力 - 应变曲线，而图 (b) 可以看出其表示的是在对材料的塑性变形过程中将振荡应力叠加一定的时间间隔后，最大的振荡应力的路径遵循的应力 - 应变曲线的路径，而且可以看出曲线最终的走向也是平行于静态的应力 - 应变曲线的。在图 (c) 中可以看出，该曲线显示出了最大振荡应力将平行于但可以大于静态应力。



(a) 标准的静态应力 - 应变曲线 (b) 振荡应力叠加一定的时间间隔的应力 - 应变曲线 (c) 最大振荡应力的应力 - 应变曲线

图 1 应力 - 应变曲线

就其模型得出，超声频率下平均流应力降低的机制类似地是振荡应力叠加的结果，尽管尚未得到实验测量的证实。这是由于无法测量较高频率下的振荡响应，因此该研究不得不从平均压缩力的测量中得出结论。

在以前的研究中，在许多情况下，应力 - 应变关系会偏离从这个理想的应力叠加模型虽然压力叠加特征作为解释的一部分，进行了测量平均成型载荷的减少归因于或其他几种可能的机制。

(三) 声波硬化和声波软化

声波硬化指的是在软化效应中得出材料拉伸应力会变大，而同时拉伸应力的反弹也会变大；而声波软化同体积效应类似，它指的是，在对进行塑性成形过程的金属施加超声振动后，由于金属材料的内部晶粒吸收了能量而发生增殖和迁移的过程。

AzizandLucas 学者对施加了超声振动的实验的超声振动幅值和材料的成形力影响进行了研究，其主要通过建立了一种模具和装置，而这种装置是基于超声振动的一种金属板料的成形，而因此得出当超声振动幅值比较大并且材料易于软化时，材料的成形

力降低得更为明显。这个结论的得出是在对黄铜进行超声振动辅助镦粗的实验中得出的。

二、超声振动塑性成形工艺

现如今, 超声振动的应用已经非常广泛, 比如: 超声拉拔、超声挤压、拉深成形等。尤其在金属塑性成形的工艺过程中更是一件非常普遍的事情, 其中超声拉拔指的是利用压电效应, 然后通过工件变幅杆的放大以及耦合作用, 将传递过来的超声振动传递到其中的拉丝膜上, 实现超声振动对于拉拔过程的一个改善作用。

而超声挤压的作用主要是, 将金属的变形抗力降低并且使其塑性增加, 以及减小金属模壁与坯料的摩擦系数, 其润滑的效果就会增大。拉深成形则指的是在振动拉深压边中的成形工艺, 其是在这个过程中对模具压边圈添加振动的条件, 产生振动变压边力, 使零件坯料在加工过程中产生一些有助于拉深成形的加工特性。

在有限元分析中在一维的理论中开展的主要有两种方法, 分别是传统解析法和四端网络法。这两种方法都是不加以计算横向

的振动耦合影响, 而这样的计算方法会有一定的偏差。所以必须根据此解析式而得到对应的换能器内部的应力分布与位移分布等其他量。因此纵向的耦合振动与横向的耦合振动都要考虑进去。

当然, 这样也不会得到更加精确的结论, 当适当的加细网格的划分, 基于以上得出的结果会比较准确, 且计算的结果会是以数值的形式给出, 可以直观的从图形中观察到。

以金属镁合金为原材料, 采取不同的方法进行研究, 分别采用常规的拉伸和施加了超声振动的拉伸变形再结合有限元分析进行对照。

由图 2 (a) 所示的应力 - 应变关系曲线, 它指的是在常规拉伸条件下的曲线, 是一条光滑的曲线, 然后再对其施加 $f=20\text{kHz}$ 的超声振动后, 可以由图 (b) 看出, 应力应变一同变化了, 将发生变化的区域放大后, 可以看出图 2 (b) 中的虚线指的是在施加了超声振动后的曲线。则实线表示将虚线的上下波动取一个平均值之后的应力应变图像。

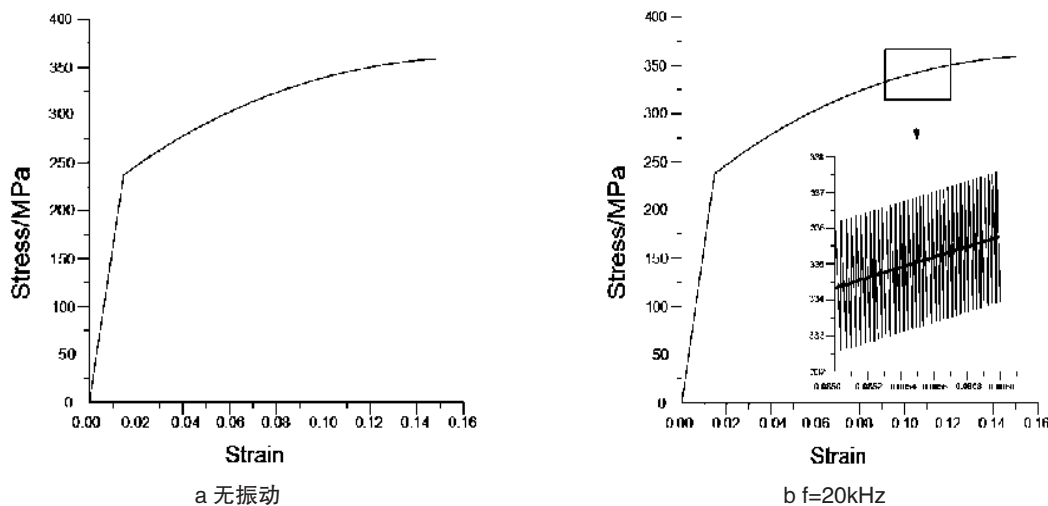


图 2 镁合金应力 - 应变曲线

在同样的频率下, 对镁合金施加不同的振幅条件, 然后在振幅相同的情况下, 又施加了不同的频率, 则结果曲线如图 3。由图中可以看出, 当频率一定时, 振幅越大, 则曲线的降幅也会越大。其次, 由以上图可以看出施加超声振动的曲线与常规的曲线走势是相互平行的。

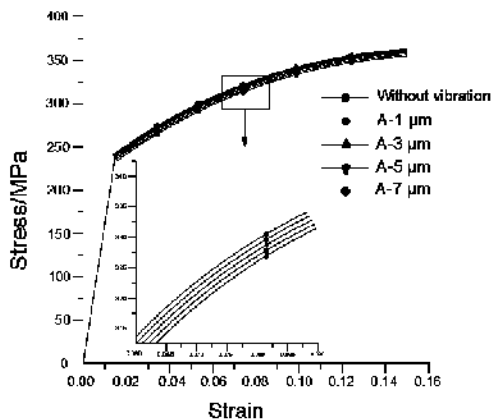


图 3 $f=20\text{kHz}$ 时镁在不同振幅条件下的应力 - 应变曲线

最后, 在对其进行有限元分析时, 与实验的结果相比较, 在

镁合金进行拉伸试验时施加超声振动后, 镁合金的拉伸屈服强度下降的幅度比较小, 由于超声振动而使材料内部的晶粒发生变化的影响也比较小。

将有限元分析后的结果与真正的实验结果进行对比, 可以看出, 施加振动后引起的应力降低不仅仅是简单的应力叠加, 此外, 还有一定的声学软化。由图 2 可知, 在不同的振幅条件下, 对镁合金施加超声振动, 其会提前发生颈缩。

三、超声振动塑性成形的设备及应用

一个旋转运动单元和一个超声振动单元是旋转超声振动系统的主要组成部分。日本是世界上第一个开始研究超声振动技术的国家, 如图 4 所示, 他们将超声加工应用于普通的机械加工设备中, 在那之后, 超声加工发展的非常迅速, 广泛应用于塑性加工和其他领域。

但是, 超声波发生器通常很复杂, 设备之间的关系尺寸和振动模式很难确定, 而且超声振动的振动特性研究设备不足。因此, 进一步研究发展工件的超声波振动对于提高工件的制造质量非常重要。

2007 年, Daud, Y 等学者做了一个专门用超声加工对铝合金做微拉伸和压缩的实验的超声系统。图 5 为超声振动的整体设备, 其主要的振动频率为 20kHz , 振幅为 $10\mu\text{m}$ 。而图 6 和 7 为施加了

超声振动的材料拉伸和压缩系统。

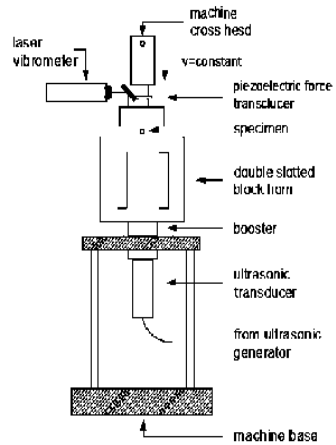


图6 微拉伸振动系统

图7 微压缩振动系统

通过参考大量文献可知，利用 Lloyds 试验机（如图 6、图 7）可以来将各种不同的金属进行拉伸和压缩实验，以此来对于超声振动塑性成形得出实验结论。

超声振动已经应用于各种塑性成形工艺的研究，在工程中应用比较广泛的是铆接，如图 8 所示。铆接过程是工艺过程中比较简单并且可靠性高的一种方式，它不仅可以进行简单的检查而且还可以作为故障排除的一种方法，铆接的连接强度稳定，但是对于一些复杂结构的金属或非金属连接，铆钉连接就会使铆接的变形很大这就造成了手工劳动量较大而且劳动条件差等不好的方面。而为了进行进一步的改善和提升，各个学者正在开发新的工艺或辅助手段。



图8 试样的局部三维表面面貌

在超声振动塑性成形技术不断地发展的过程中，有越来越多的学者尝试将超声振动应用于铆接工艺过程中。并且研究了超声振动对钛合金铆接过程的影响，结果表明超声振动可降低铆力，且降幅会随着振幅的增大而增大，但只能应用于模具结构较简单的成形工艺中。

四、总结与展望

本篇文章主要通过对超声振动辅助塑性成形技术的应用以及有限元分析表明了其在塑性成型工艺中应用的非常广泛。而且通过实验研究和有限元分析，对在金属塑性成形的工艺过程中施加超声振动而产生的影响进行了分析研究。

而近年来随着研究的深入，学者们在超声塑性成形方面已经取得了一定的成果，比如解振东通过研究 AZ31 镁合金和 6063 铝合金在超声振动作用下成形过程中的作用物理机制，得出在塑性变形阶段施加超声振动，其带来的软化作用会明显优于在弹性变形阶段施加，而普通塑性成形则没有此现象。这种现象表明了超声振动使两种材料的塑性变差，并且其未实现检测振幅以及变形

过程中成形力的实时精确检测。

综上所述，要想对超声振动辅助塑性成形技术有更加深刻的研究，就需要对塑性成形变形规律进行研究，同时也要结合虚拟仿真技术对超声振动塑性成形工艺过程进行分析。

参考文献：

- [1] 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]. 山东大学, 2019.
- [2] 黄志祥. 基于超声振动辅助的钛合金铆钉铆接技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学硕士学位论文, 2016.
- [3] Yusoff Daud, Margaret Lucas, Zhihong Huang. Superimposed ultrasonic oscillations in compression tests of aluminium. 2006, 44: e511-e515.

基金资助：中国地质大学（北京）2021 年度研究生教改建设资助项目。