汽车起动齿轮超声波辅助挤压成形模拟试验研究

王晓俊[1, 2]，赵欢[2]，吕青青[2]，杨立权[2]，刘晓东[2]，张贺[2]，齐建豪[2]

1.卧龙电气南阳防爆集团股份有限公司　河南南阳　473008

2.平顶山学院河南省超声技术应用工程研究中心　河南平顶山　467000

摘要：基于Deform-3D软件对汽车起动齿轮的成形过程进行了超声波辅助挤压研究，以传统挤压（无超声波振动辅助）作为对照试验，建立了有限元模型，分析了挤压成形过程中的载荷、应力场、应变场和成形温度的变化规律。试验结果表明：超声波辅助振动作用下，峰值载荷降低了4.7%，平均载荷降低了7.5%；最大等效应力降低了9.13%，平均等效应力降低了9.8%。降低工模具的工作应力和载荷，对服役寿命延长有着潜在的意义。等效应变和成形温度分别提高了9.3%和5%，坯料温度提升有利于提高塑性、降低内应力；等效应变提高，表明材料变形更加充分，金属流动性更好，有利于充满模具型腔。

关键词：起动齿轮；超声波挤压；应力；应变

Simulation experimental study on ultrasonic assisted extrusion forming of automotive starting gear

WANG Xiaojun[1, 2], ZHAO Huan[2], Lü Qingqing[2], YANG Liquan[2], LIU Xiaodong[2], ZHANG He[2], QI Jianhao[2]

1. Wolong Electric Nanyang Explosion Protection Group Co., Ltd., Nanyang 473000, Henan, China

2. Henan Province Engineering Research Center of Ultrasonic Technology Application, Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, Henan, China

Abstract: The ultrasonic-assisted extrusion process of automotive starter gears was investigated based on Deform-3D software in this study. Conventional extrusion (without ultrasonic vibration assistance) was used as a control experiment. A finite element model was established, and the variations in load, stress field, strain field. and forming temperature during the extrusion process were analyzed. The results of the control experiment showed that, under the influence of ultrasonic-assisted vibration, the peak load was reduced by 4.7%, and the average load was reduced by 7.5%. The maximum equivalent stress was reduced by 9.13%, and the average equivalent stress was reduced by 9.8%. The working stress and load on the tools and dies were reduced, which was considered to have potential significance for extending their service life. The equivalent strain and forming temperature were increased by 9.3% and 5%, respectively. The increase in billet temperature was found to be beneficial for improving plasticity and reducing internal stress. The increase in equivalent strain indicated that metal deformation was more thorough, and

基金项目：河南省重点研发与推广专项［科技攻关］（242102111173、242102111172）；平顶山学院机械重点学科基金项目（PXY-JXZDXK-202306）。

第一作者：王晓俊，硕士，高级工程师，硕士生导师，主要研究方向为先进制造技术与装备，E-mail：wxiaojun521@126.com。

通信作者：吕青青，硕士，讲师，主要研究方向为先进制造技术与装备，E-mail：2696@pdsu.edu.cn。

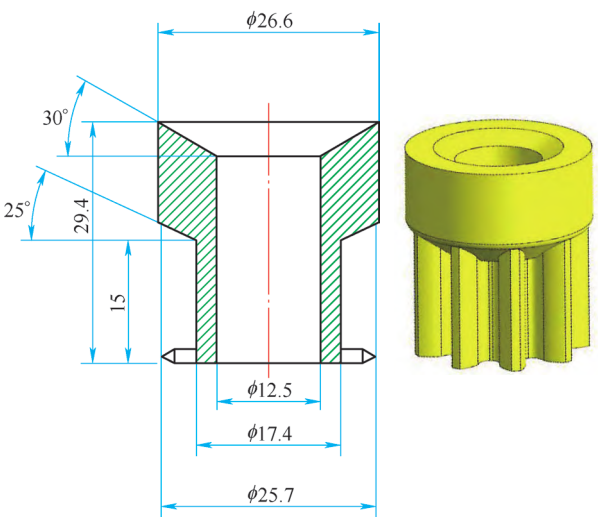
the enhanced metal flow was conducive to filling the mold cavity.
Keywords: starting gear; ultrasonic extrusion; stress; strain

1 序言

随着汽车产业的智能化、数字化发展，汽车零部件的高性能特种制造也越来越被重视起来[1, 2]。汽车起动齿轮作为基础传动件，对其生产效率、加工技术和使用性能都提出了更高要求，也使得起动齿轮的生产加工更加注重效率、产能和自动化水平。通过挤压成形的方法可以使毛坯材料的利用率大幅度提高，性能提升，起到了节约成本、提质增效的作用[3, 4]。挤压成形工艺比较适合易变形的低碳钢且变形量较大或成形形状复杂的工件。超声波挤压技术是在普通挤压基础上发展起来的一种特种成形方法，利用超声波振动在挤压过程中产生的高频微冲击作用，可以有效增加材料的塑性、流动性，降低挤压力，消除应力，细化晶粒，改善金属组织的均匀性，提高挤压件的综合性能；同时还可以减小摩擦系数、降低模具磨损，延长模具寿命[5-8]。

本文采用传统挤压（Conventional Extrusion，CE）与超声波挤压（Ultrasonic Extrusion，UE）对汽车起动齿轮的成形工艺进行数值模拟，分析两种方式下各因素对齿轮加工的影响，选择最合适的成形工艺[9-11]，汽车起动齿轮结构如图1所示。

本文通过Deform-3D软件对成形过程应力和温度的分析后得出仿真结果，可以清楚观察到坯料在挤压成形过程中的各项变化，揭示了超声波挤压成形过程中的载荷行程、应力、温度变化规律，能更好地指导挤压成形的相关工作[12-16]。此外，大量的超声波辅助研究成果已表明，超声波辅助技术在零件制造和模具设计中已经得到有效的应用，超声波辅助技术可以大大增加零件的使用寿命，有助于传统的挤压成形工艺转型升级，并且对成形工艺和模具的设计具有一定的实际应用价值和理论指导意义。



a）结构尺寸　　b）三维图

图1　汽车起动齿轮结构

2 试验材料与方法

2.1 挤压成形工艺分析

零件材料为15MnCr5钢，适合挤压温度为20～1200℃。挤压毛坯的制备与挤压件的质量、生产效率和节约成本等因素有重要关系。按照挤压毛坯的等体积质量性质，根据目标零件的尺寸大小建立三维模型，计算出准确体积，反推设计出毛坯的尺寸与特征，最终得到毛坯体积为9879mm^3，其挤压毛坯尺寸如图2所示。

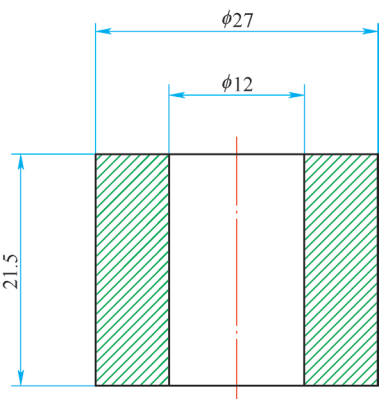


图2　挤压毛坯尺寸

参考同类研究文献，考虑到温度、应变速率等对流变应力的影响，选用Deform-3D软件内置的Arrhenius模型进行模拟[17, 18]，其表达式为

$$\varepsilon = C\left[\sinh(\alpha\sigma)\right]^{n}\exp\left[-Q/(RT)\right] \quad (1)$$

式中　ε——应变速率（1/s）；

C、α——材料的特征常数；

σ——材料的流动应力（MPa）；

n——材料的应力指数；

Q——变形激活能（J）；

R——气体常量［J/（mol·K）］；

T——热力学温度（K）。

考虑到挤压的合理性和方便性，模具设置为桶形挤压模具，将起动齿轮的齿轮端设计为模具的下端，模具整体设置为圆柱体，成形部分设在下模，上模与毛坯结构相似。

为了能顺利取出工件，设计拔模斜度为0.5°，设在下模的上半部分。在下模底端设置顶杆，挤压完成后，用顶杆将工件与模具脱离，借助拔模斜度取出工件。由于起动齿轮为空心件，所以顶杆的设置不能设置在下模中心，并且要使工件受力平衡，因此顶杆要设置为中心对称。

2.2 建立有限元挤压模型

根据起动齿轮的结构，利用UG建立三维参数模型，将模型导入Deform-3D软件中，为了便于仿真，在建模时以垂直方向为Z轴，并且在UG软件中将毛坯、上模和下模装配好，制作为*.stl文件导入Deform-3D软件中，如图3所示。

前处理设置坯料为四面体网格，数量为50000，毛坯温度为600℃，模具温度为20℃，工件与毛坯的热导率为1W/（m·K）。设置模拟控制，通过计算可得，当上模沿着$-Z$方向运动9.3mm时，挤压结束，故选择步长控制，最小步长取0.00001s，总步数设置为465步。定义接触关系，选择剪切摩擦方式Shear，摩擦系数通常设为0.3。

在超声波辅助挤压过程中，上模的运动是挤压

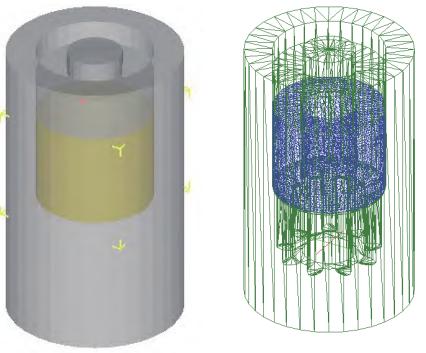


图3 有限元挤压模型

进给运动与超声波简谐振动的复合运动[19]，上模的运动方程可表示为

$$z=v_0t+A\sin 2\pi ft \tag{2}$$

式中 v_0——进给速度（mm/s）；

t——挤压时间（s）；

A——超声波振幅（mm）；

f——超声波振动频率（kHz）。

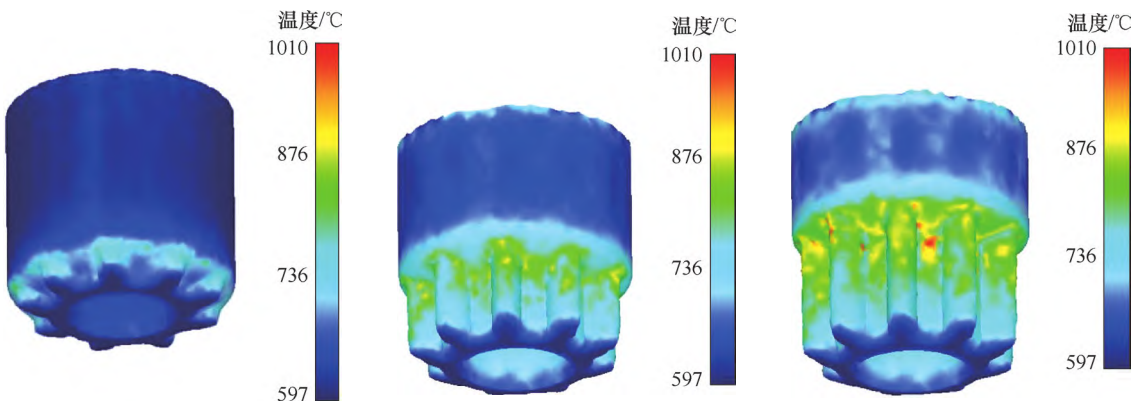
参考同类研究文献[20, 21]，本文取v_0=2mm/s、A=0.01mm、f=24kHz；当超声波振幅A=0mm时，即为传统挤压方式。

3 传统挤压与超声波挤压对比分析

3.1 成形载荷分析

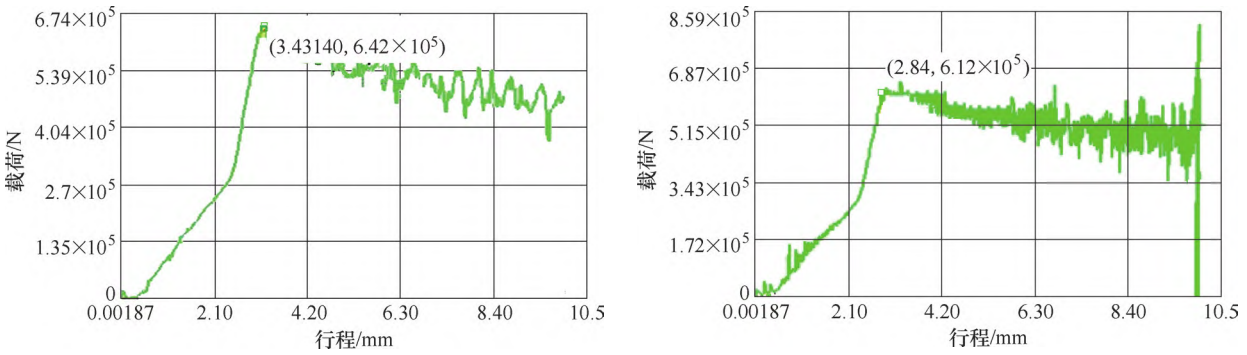
传统挤压成形时上模随时间做匀速直线运动，挤压毛坯沿Z轴负方向运动，起动齿轮的外形完全由下模的内腔决定，毛坯材料填充下模齿轮腔时，发生剧烈形变，整个挤压成形过程中关键变形步骤如图4所示。

传统挤压和超声波挤压成形过程的载荷变化如图5所示，两种挤压方式在整体上均呈现出先急剧



a）初期阶段　　b）中间阶段　　c）终了阶段

图4 传统挤压成形过程



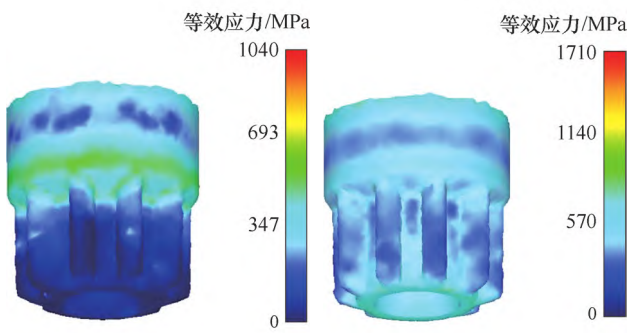
a）传统挤压　　b）超声波挤压

图5　挤压载荷曲线

增大，达到峰值后趋于稳定并且缓慢降低的趋势。传统挤压成形载荷峰值为6.42×10^5N，超声波挤压成形载荷峰值为6.12×10^5N，降低了3.0×10^4N，降幅4.7%；载荷大体趋于稳定时传统挤压的平均值为5.63×10^5N，超声波挤压的平均值为5.21×10^5N，降低幅度为7.5%。超声波挤压过程中的高频振动促进了材料的流动，可以有效降低成形载荷。

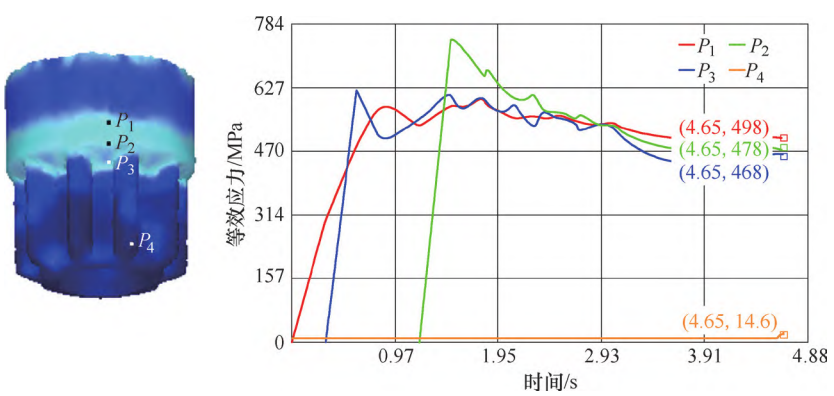
3.2　应力场变化分析

传统挤压和超声波挤压的等效应力场与等效应力变化对比如图6、图7所示。从图6可看出，施

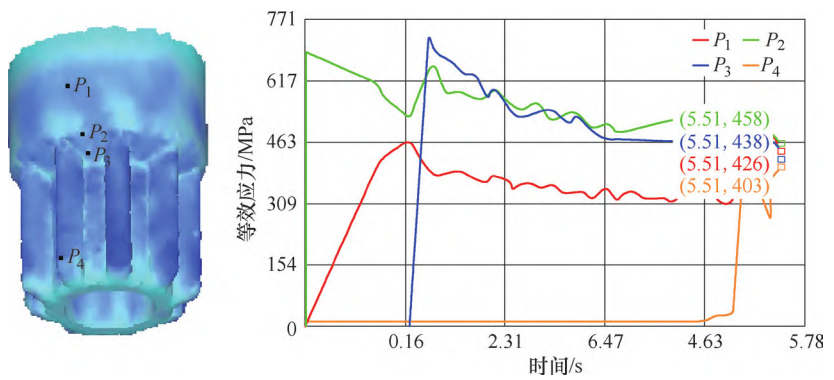


a）传统挤压　　b）超声波挤压

图6　等效应力场云图



a）传统挤压



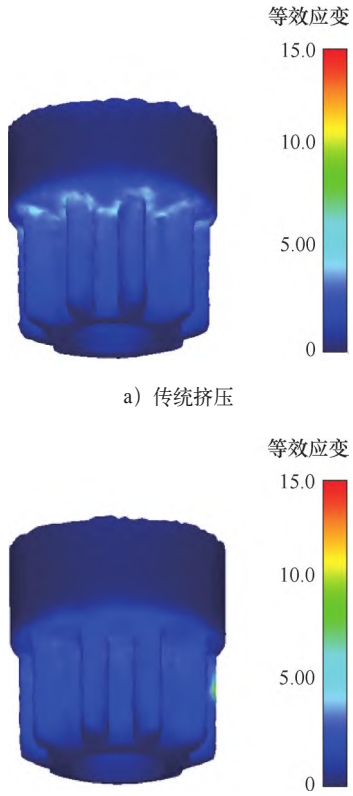
b）超声波挤压

图7　等效应力变化过程

加超声波之后的工件等效应力分布更均匀。传统挤压最大等效应力为1040MPa，超声波挤压最大等效应力为945MPa，降低了9.13%。传统挤压平均应力在481MPa左右，超声波挤压平均应力在432MPa左右，平均降低了9.8%。传统挤压的4点追踪标准差为167.3，超声波挤压的4点追踪标准差为17.2，标准差降低了89.7%。超声波挤压等效应力的分布均匀度得到大幅度提高。这是因为材料在挤压成形过程中受到高频振动的作用，使材料的流动阻力降低，局部应力集中被打破，流动性和可塑性增加，从而能使应力和应变的分布更加均匀。

3.3 应变场变化分析

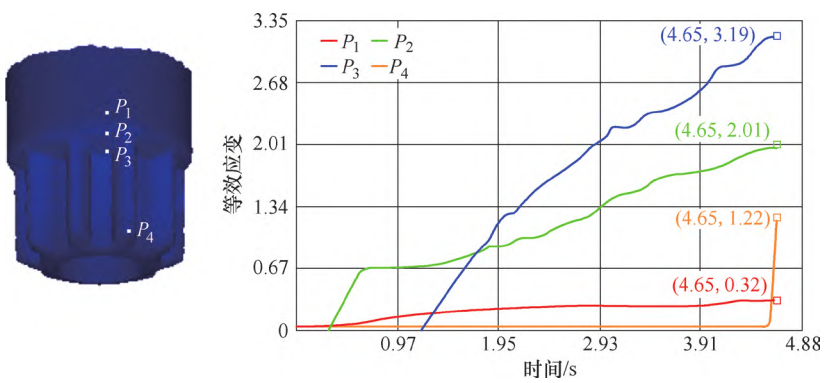
传统挤压和超声波挤压等效应变场云图如图8所示。从图8可知，传统挤压的应变区间在0.0628～9.25，超声波挤压等效应变区间在0.0437～15.6。选取代表性的点位，追踪成形过程中应变的变化，如图9所示。从图9可知，传统挤压的平均应变为1.69，而超声波挤压的平均应变为1.84，平均等效应变增加了9.3%。挤压成形时施加高频振动，会使挤压过程中的材料产生复杂的动态变形，从而改善



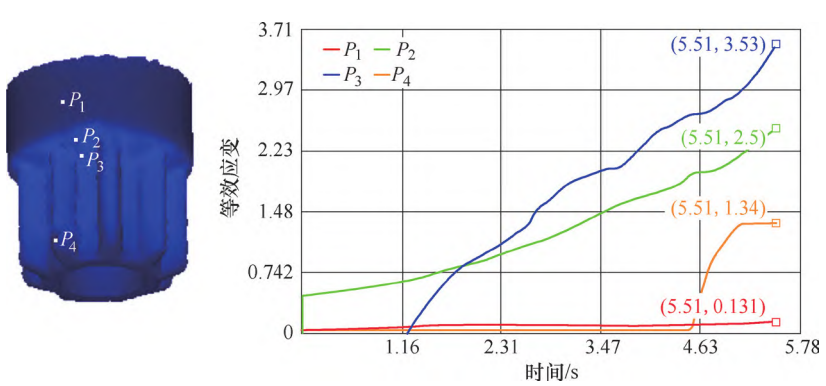
a）传统挤压

b）超声波挤压

图8 等效应变场云图



a）传统挤压



b）超声波挤压

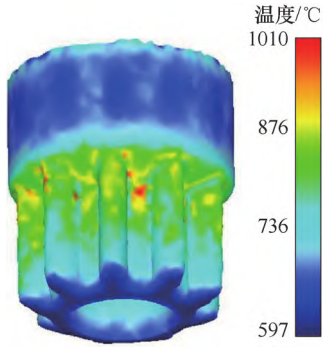
图9 等效应变变化过程

材料的可塑性和流动性，使挤压过程中的等效应变增加。

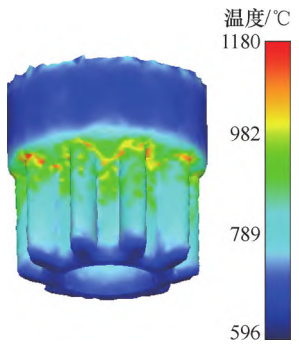
因此，超声波挤压可以通过增加挤压过程中的等效应变来改善材料的流动性和可塑性，从而获得更高质量的挤压成形产品。同时，超声波挤压能够使挤压过程中的应力分布更加均匀，缩小等效应变分布的范围，从而降低材料在挤压成形过程中的失效和疲劳风险。

3.4 温度场变化分析

传统挤压和超声波挤压的温度场云图如图10所示。在整个挤压过程中，传统挤压最高温度为1010℃，超声波挤压最高温度为1180℃，升高了170℃，增加了14.4%，在更小的挤压力作用下获得了更高的挤压温度，有利于材料的软化流动，从节能的角度出发，超声波挤压在更低的预热温度下也可以获得较为理想的成形温度。沿着起动齿轮的轴向取点，追踪成形过程的温度，如图11所示。从图11可知，传统挤压和超声波挤压时平均温度分别为765.5℃和810.75℃，平均温度增加了5%。

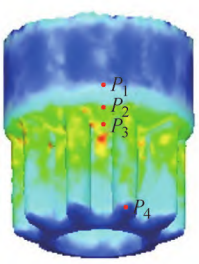


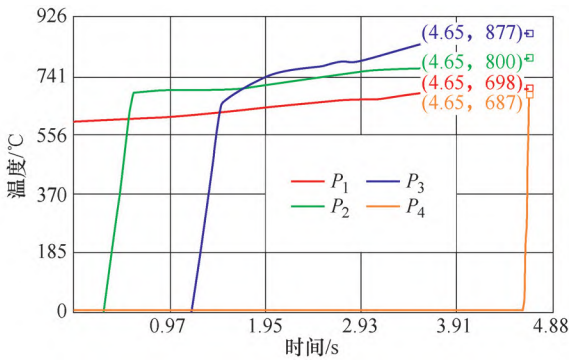
a）传统挤压



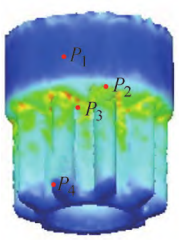
b）超声波挤压

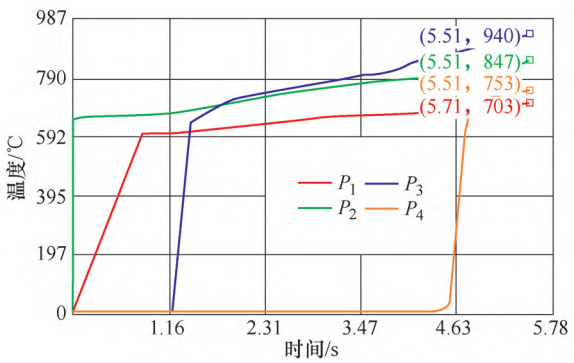
图10 温度场云图





a）传统挤压





b）超声波挤压

图11 温度场变化过程

4 结束语

通过分析传统挤压和超声波挤压成形过程中载荷、应力场、应变场和温度场的变化规律，得出如下结论。

1）与传统挤压相比，在超声波辅助挤压作用下峰值载荷降低了4.7%，平均载荷降低了7.5%；最大等效应力降低了9.13%，平均等效应力降低了9.8%，因此降低了工模具的工作应力和载荷，对服役寿命延长具有潜在的意义。

2）在超声波辅助挤压作用下，等效应变和成形温度分别提高了9.3%和5%，材料在超声波作用下产生软化效应，应变增加，变形更加充分，流动性提高，有利于模具充型。

参考文献：

[1] 吝雨晨，师现云，易永根，等. 超声振动辅助塑性变形技术的应用与发展[J]. 焊管，2022，45（6）：19-26.

[2] LANGE K，KAMMERER M，PÖHLANDT K，等. 挤压技术金属精密件的经济制造工艺[M]. 杜国辉，赵震，译. 北京：机械工业出版社，2014.

[3] 韩光超，胡济涛，万炜强，等. 超声振动辅助塑性成形及形性预测研究进展[J]. 精密成形工程，2023，15（7）：48-62.

[4] SIEGERT K，UIMER J. Influencing the friction in metal forming processes by superimposing ultrasonic waves[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology，2001，50（1）：195-200.

[5] 查长礼，陈炜， 徐庆. 超声振动辅助微成形工艺及现状分析[J]. 热加工工艺，2017，46（9）：18-22，27.

[6] 石昌帅，王澳，陈觉. 螺杆钻具双等壁厚金属定子外高压成形方法研究[J]. 机床与液压，2023，51（16）：8-18.

[7] 张海栋，邓磊，王新云，等. 振动辅助塑性成形机理及应用研究进展[J]. 航空制造技术，2020，63（16）： 22-31.

[8] 项春花，王光宇，林凌，等. GH4141大锥度喷嘴内支撑环锻造工艺研究[J]. 金属加工（热加工），2024（3）：124-127.

[9] 徐斯诺，冯英豪，王春晖，等. 超声振动辅助塑性成形声致效应理论及应用研究进展[J]. 塑性工程学报， 2023，30（6）：67-87.

[10] 王广春. 金属体积成形工艺及数值模拟技术[M]. 北京：机械工业出版社，2010.

[11] 王金彦，董万鹏，龚红英. 有限元法与塑形成形数值模拟技术[M]. 北京：化学工业出版社，2015.

[12] 杨荣敏. 振动频率与振幅对A356铝合金组织和性能的影响[J]. 热加工工艺，2020，49（5）：77-79.

[13] 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 Tech.，2018，258：144-154.

[14] 刘艳雄，王宇尘. 超声波加载方式对等径角挤压工艺的影响规律[J]. 塑性工程学报，2020，27（10）：1-6.

[15] 雷玉兰，韩光超，彭卓，等. 基于不同振动模式的超声波辅助塑性成形工艺概述[J]. 电加工与模具，2018（6）：48-52.

[16] 冯文杰，钟江涛，陈莹莹，等. 花键过渡套浮动式芯棒冷挤压成形方法研究[J]. 机械设计与制造，2017（2）：73-75，79.

[17] 伍贤洪，闫焱. 基于数值模拟的汽车差速器壳锻造工艺分析及实验研究[J]. 锻压技术，2024，49（9）：18-26.

[18] 张培彦. ZGMn13Cr2钢热变形行为及热加工图[J]. 锻压技术，2024，49（9）：27-34，67.

[19] 杨李杰，陈兴，孙宝寿. TC4 钛合金管振动辅助成形规律的仿真分析[J]. 热加工工艺，2023，52（5）：102-107.

[20] 郭世勇，金骏豪，张帆，等. 纯钛薄壁管端法兰扩口-镦粗复合成形工艺[J]. 锻压技术，2024，49（10）：30-34.

[21] 王晶，宋健民. 基于数值模拟的车用螺纹管件冷镦缺陷优化与试验验证[J]. 锻压技术，2024，49（6）：26-33.

（收稿日期：20241208）