

综述

## 伺服成形技术及其若干发展动向

孙友松, 章争荣

(广东工业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 伺服压力机是近年来塑性成形领域最重大的创新之一, 将伺服压力机以及基于伺服压力机的成形工艺统称为伺服成形技术。简要介绍了伺服成形技术的特点和目前的应用情况, 重点论述了该技术当前的若干发展新动向, 包括伺服压力机设计方法的研究、新型功能部件和储能技术开发、滑块运动路径设计与优化、伺服成形机理及成形过程的数值模拟、智能制造中的伺服成形等。要实现成形加工的自主创新, 我国锻压装备制造制造商应尽快实现由单纯的设备制造厂向成形加工全面解决方案供应商的转变, 大力开展关键核心部件的研发和伺服成形数值模拟技术以及成形新工艺的开发。

**关键词:** 伺服压力机; 伺服成形技术; 装备技术; 数值模拟; 智能制造

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.01.001

**中图分类号:** TG306

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 01-0001-16

## Servo forming technology and its several developing trends

Sun Yousong, Zhang Zhengrong

(Material and Energy Science and Technology School, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Servo press is one of the most important innovations in the field of plastic forming in recent years, and the servo press and forming process based on it can be collectively referred to as servo forming technology. Therefore, the characteristics and current applications of the servo forming technology were introduced briefly, and several new developing trends of the servo forming technology were discussed emphatically, including study of design method for servo press, development of new functional components and energy storage technology, design and optimization of slide motion path, servo forming mechanism and numerical simulation of forming process, servo forming in intelligent manufacturing, etc. In order to realize innovation in the forming process, the transformation from a simple equipment manufacturer to a provider of comprehensive solutions for forming process should be realized by forging equipment manufacturers as soon as possible in china, and the research and development of key core components and the development of servo forming numerical simulation technology and new forming processes should be vigorously developed.

**Key words:** servo press; servo forming technology; equipment technology; numerical simulation; intelligent manufacturing

20 世纪末期, 随着电力电子技术的发展, 特别是大规模集成电路和计算机控制技术的出现, 产生了高性能交流调速系统。它克服了直流调速系统的缺点, 达到直流调速系统同样的性能, 且在价格和工作可靠性方面大大优于直流调速系统。交流调速系统的迅速发展, 彻底打破了长期以来形成的“直流调速、交流不调速”的格局, 取代了直流调速系

统, 成为电气传动的主要发展方向<sup>[1]</sup>。

交流调速技术的飞速发展, 引发了机械传动领域的一场深刻革命, 以大功率交流伺服电机为核心的伺服直驱技术被迅速应用到机械传动的各个领域, 不仅遍及传统的电气驱动装备, 如运输机械、金属切削机床、塑料成形机床、锻压机床; 而且进入到了几乎所有其他机械传动领域, 如电动汽车<sup>[2]</sup>、火车<sup>[3]</sup>、船舶<sup>[4]</sup>, 甚至飞机<sup>[5]</sup>。

伺服直驱技术在锻压装备中也得到了广泛应用, 其中影响最大的是机械压力机。伺服压力机的正式产品虽然在世纪之交才问世, 仅有 20 年左右的历史, 但发展十分迅猛, 日本、德国等世界主要锻压装备制造厂家均把伺服压力机作为主要发展方向, 并已制定了相应的行业标准。据估计, 21 世纪最初

收稿日期: 2021-01-11; 修订日期: 2021-04-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52175294); 广东省科技计划项目 (2020B1212070005)

作者简介: 孙友松 (1944-), 男, 硕士, 教授

E-mail: ys1944@139.com

通信作者: 章争荣 (1969-), 男, 博士, 教授

E-mail: zzr@gdut.edu.cn

十年,全球已经有数千台伺服机械压力机投入生产<sup>[6]</sup>。日本最早将伺服压力机推向市场并得到迅猛发展,据统计,2003 年伺服压力机仅占全部锻压机械的 4%,而 2016 年已超过 30%<sup>[7]</sup>。

新型伺服机械压力机以重载交流伺服电机取代传统的感应电机,去除了飞轮、离合器、制动器等传动控制部件。其简化了结构,方便安装、减少维修、降低能耗、减轻重量,而且最具有革命性的创新在于其克服了传统机械压力机工作特性不可调的缺点,使机械驱动的成形装备具有了柔性化、智能化的特点,工作性能和工艺适应性大大提高。因此,新型伺服机械压力机对于推动成形装备的更新换代具有重要的影响。

伺服压力机的出现,不仅仅是一种装备技术的创新,它对成形工艺、材料、模具、环境、成形加工的自动化、智能化均产生了深远的影响。新型智能化的成形装备促进了成形新工艺的开发,随着伺服压力机的推广应用,一些高效的成形新工艺不断涌现,新装备和新工艺相结合形成了新的技术。日本学者中原洋一<sup>[8]</sup>将伺服压力机以及基于伺服压力机的冲压加工技术统称为“伺服冲压”。若将此概念推广到整个基于伺服压力机的成形加工,不妨称之为“伺服成形”。近年来,伺服成形不仅在锻造、

冲压等塑性加工的传统领域得到了广泛的应用,甚至延展到了复合材料成形、焊接等新的领域<sup>[9-10]</sup>。伺服压力机具有自感知、自决策、自执行等智能装备的特质,配以适当的软、硬件,伺服成形将在智能制造中展现出其特有的潜力。

本文简述伺服成形的特点、应用及近年来伺服成形技术的若干发展动向。

## 1 伺服成形的特点及应用

### 1.1 压力机滑块的运动模式可编程控制

由于伺服压力机的驱动电机为伺服电机,以及传动链中去除了飞轮、离合器等部件,使得滑块的运动特性可以任意调节,即具有了“柔性”,称之为 Free Motion<sup>[11]</sup>,这是伺服压力机与传统压力机的最大区别。理论上讲,伺服压力机的滑块可以输出任意的运动模式,以适应成形工艺的需要。压力机的这一特点,对成形加工过程产生了革命性的影响,这也是伺服压力机最显著的优势。

图 1 为一款日本小松伺服压力机工艺库中的 4 种运动模式,分别为:常规模式、压印模式、阶梯模式和脉动模式<sup>[7]</sup>。除选择工艺库中现成的模式外,操作者也可根据实际加工需要,自行设计任意

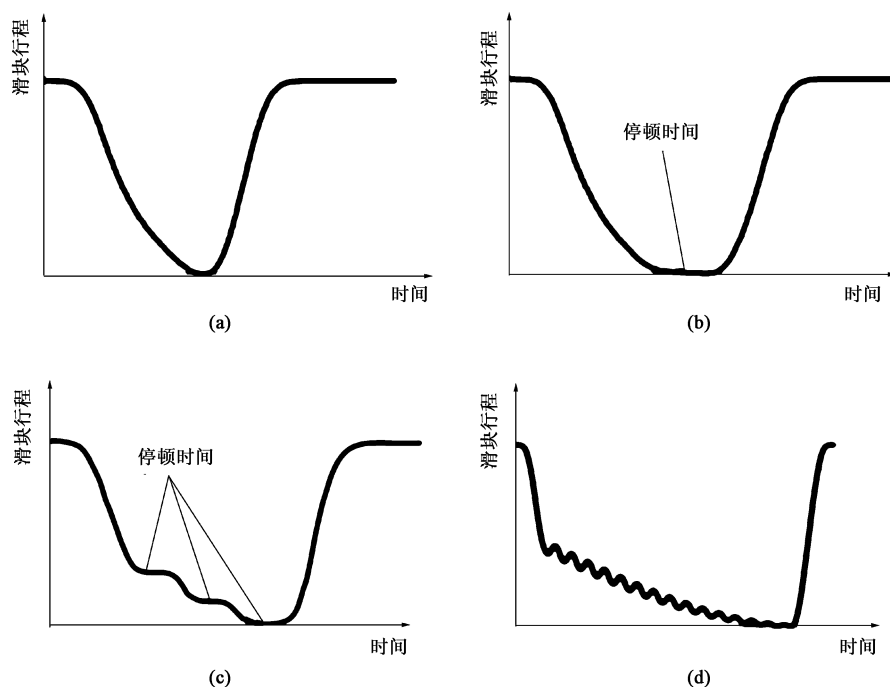


图 1 滑块运动模式举例

(a) 常规 (连杆) (b) 压印 (c) 阶梯 (d) 脉动

Fig. 1 Examples of slide motion types

(a) Normal (Link) (b) Coining (c) Step (d) Pulsing

的运动模式。目前,国内外已经开发出大量的基于伺服压力机的新工艺,并将其应用于实际生产。归纳起来,大致集中在以下几个方面。

(1) 控制成形速度,提高材料成形极限,减少工序,提高产品质量

对于大多数金属材料而言,成形极限会随着应变速率的降低而提高。在普通压力机中,应变速率的降低会影响生产率,因而不能降得过低。只有在一些特殊情况下,如等温锻造、超塑性成形中,才采用特别低的成形速率。然而在伺服成形中,可以采用所谓“快-慢-快”的成形模式,即滑块“空程快速下行接近工件,慢速成形,快速回程”,达到在不降低生产率的情况下降低应变速率的效果。

日本小松公司在伺服压力机和普通机械压力机上进行了薄钢板的冲裁和拉深的对比试验<sup>[7]</sup>,伺服压力机采用了“快-慢-快”的成形模式。试验结果表明,与普通机械压力机相比,伺服压力机冲裁的生产率和模具寿命均提高了1倍,而拉深时的生产率不变,模具寿命提高了16倍以上。其他文献报道了类似的试验结果,除模具寿命得到提高外,成形极限也得到了显著提高,工序数量因之大大减少<sup>[6,12]</sup>。特别是对于镁合金等一类脆性材料,可以大大提高其塑性成形性能,在体积成形<sup>[13-14]</sup>和板料成形<sup>[15]</sup>中均得到了证明,为这些材料的塑性加工开辟了新的途径。

(2) 兼具液压机和机械压力机的特点,产生新型工作模式

在伺服机械压力机上可以采用有别于传统机械压力机和液压机的工作模式,既有液压机在任意位置停留、全吨位压力控制的优点,又有机械压力机快速敏捷、高生产率的优点。小松公司利用伺服压力机实现了镁合金行程-压力多模式控制反挤压成形,这就是一个典型的例子<sup>[11]</sup>。

高强度钢板热冲压成形工艺中,由于工件需要在模具中成形并淬火,需保压数秒,传统的生产线均采用高性能液压机成形。近年来国内外均开始用伺服机械压力机取代液压机,不但可以达到同样的效果,而且开、合模的时间和能耗均大大减少。国内华中科技大学、江苏省徐州锻压机床厂集团有限公司、协易机械工业股份有限公司等多家单位均开发了此类生产线。协易机械工业股份有限公司声称,采用伺服机械压力机后,热冲压生产效率可提高20%~30%<sup>[16]</sup>。

(3) 采用脉动模式加压,改善界面摩擦情况,

降低成形阻力,提高制件质量,改变材料应力、应变状态,提高成形极限

传统压力机很难实现脉动下压的加载模式,伺服压力机的行程可编程的特点,为这一新型的加载模式提供了可能。在塑性加工中引入脉动加载,取得了许多意想不到的效果。

塑性加工过程中,尤其是体积成形,工件-模具界面可产生高达GPa级的压力,而导致巨大的摩擦力,影响金属流动,增加了成形阻力。虽然采用磷化处理等方法可以有效地改善高压下界面的润滑效果,但对深孔类工件的效果有限,且由于需要进行化学处理,将造成环境污染。

在脉动模式下,界面的摩擦和润滑状况发生了巨大变化,润滑剂在脉动过程中可以重新进入界面,强化润滑效果。日本学者在伺服压力机上采用滑块的脉动模式,成功地实现了无表面处理的体积成形,包括不锈钢平板冷锻<sup>[17]</sup>、深孔冷挤压<sup>[18]</sup>、低碳钢圆杯件反挤压<sup>[19]</sup>、内花键反挤压<sup>[20]</sup>等。通过脉动挤压生产铝合金汽车LED灯反光镜,由于界面流动得到改善,直接获得了镜面工件,表面粗糙度小于0.03  $\mu\text{m}$ ,省去了电镀工序<sup>[21]</sup>。在板料拉深成形时,采用脉动模式,可以改善法兰部位界面的润滑效果,降低压边力、减少起皱现象,提高变形程度<sup>[12]</sup>。除此之外,日本学者发现,在脉动加载模式下,由于应力松弛的产生,材料的成形极限会增加<sup>[21]</sup>。

(4) 改变工件应力、应变分布,提高成形性能

众所周知,在板料成形加工过程中,由于应力、应变的不均匀分布,常常会导致工件产生局部变薄、回弹变形甚至开裂的缺陷,伺服成形技术为解决这些板材成形中的热点问题开辟了新的途径。

拉深工艺中最普遍的缺陷是底部圆角处的变薄和拉裂。产生的原因为:在成形过程中,此处的应变小,缺乏加工硬化,而此处受的拉应力最大。针对这一情况,文献[22]提出了一种基于伺服成形的“局部硬化拉深”法。其核心思想为:在拉深过程中,通过对圆角部位上、下反复变形来增加该处的应变,从而通过加工硬化来提高此处的强度,达到减少变薄和裂纹缺陷的目的,因而也称之为“双向拉深”。所采用的设备为伺服压力机和液压拉深垫。图2为滑块运动曲线,图3为工件对比照片,工件为轴对称盒形件,厚度为1 mm,不锈钢(牌号为1.4301)。传统拉深时,拉深高度不到50 mm即会产生裂纹,而采用新方法时拉深高度达60 mm时,仍然没有明显的减薄和裂纹缺陷产生,改善效

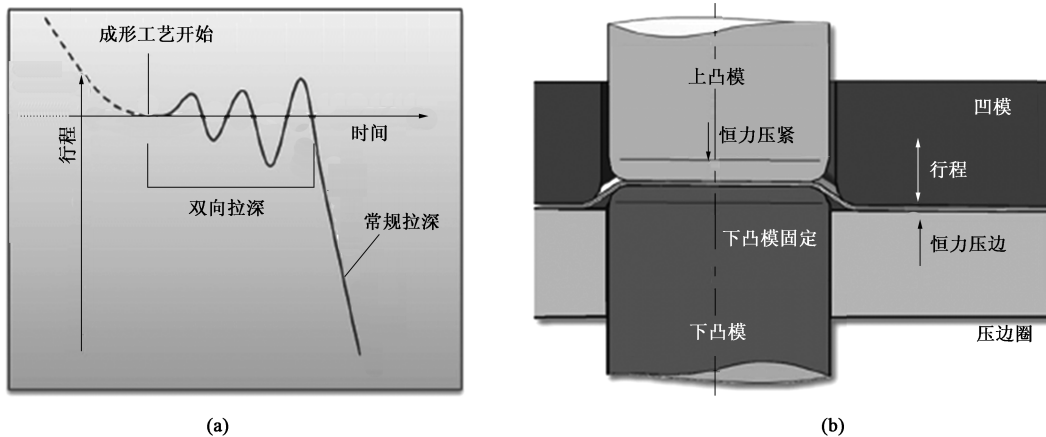


图 2 双向拉深示意图

(a) 行程-时间曲线 (b) 模具

Fig. 2 Schematic diagrams of bi-directional deep drawing

(a) Stroke-time curve (b) Die

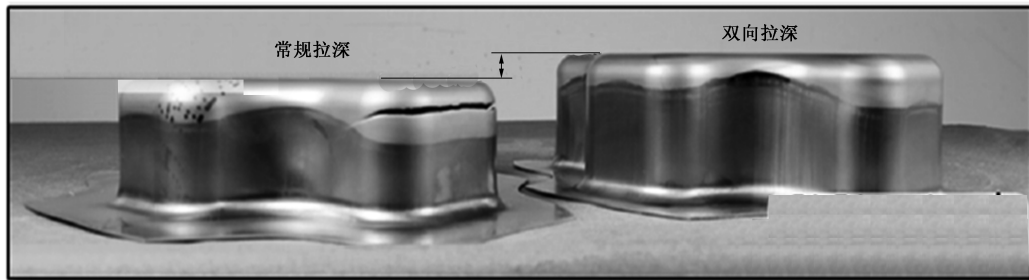


图 3 常规拉深和双向拉深工件对比

Fig. 3 Comparison of parts between normal deep drawing and bi-directional deep drawing

果十分显著。

减少板料弯曲和拉深时的回弹一直是冲压加工中的热门课题。近些年来, 由于汽车轻量化的需要, 高强度钢板和铝合金板的使用越来越普遍, 这些材料的回弹现象更为严重。传统的解决方法多采用模具补偿法和试错法, 成本高、费时多。伺服压力机可精确控制载荷大小、滑块位移和运动模式, 为解决回弹问题提供了新的途径。通过伺服机械压力机控制弯曲载荷、连续折弯次数、滑块的压下量和停留时间, 改变材料应力状态, 可以有效地减少工件弯曲的回弹<sup>[12]</sup>。文献 [23] 提出了一种基于伺服压力机的后拉伸 (Post Stretching) 法, 减少了拉深工件的回弹。具体方法为: 采用变压边力进行深拉深, 初始阶段, 压边力较小, 随着拉深的进行, 压边力逐步加大, 即在拉深的后期, 对筒壁施加了较大的拉伸应力。后拉伸作用力的施加, 使工件内部的压应力转变为拉应力, 弯曲应力状态转变为单纯的拉伸应力状态, 减少了回弹。工件内部总体残余应力减少, 除了减少壁部变形和回弹外, 还有助于提高

工件的承载能力和抗疲劳性能。

(5) 利用滑块速度来控制工件和模具温度分布, 提高成形精度

用冷挤压工艺生产精密零件时, 挤压过程中模具温度的变化会导致工件尺寸沿轴向变化而产生误差。日本学者冷挤压螺旋齿轮时, 由于挤出过程中模具温度变化, 导致工件截面尺寸沿轴向变化。在伺服压力机上采用变速挤压, 成功地解决了这一问题<sup>[13]</sup>。

(6) 控制滑块运动, 减少振动和噪音, 提高模具寿命, 改善环境

降低冲压的振动和噪音, 是改善锻压生产环境、实现绿色制造的重要任务。控制滑块运动, 降低模具接触工件时的速度, 是减少振动和噪音的有效途径, 对于所有的成形工艺均适用。

冲裁是所有成形工艺中产生振动和噪音最大的工序之一, 冲裁减振也一直受到特别的关注。在伺服压力机上可以实现“静音冲裁”。其基本原理为: 冲头快速向下, 在接近工件前减速进入板料, 冲头

在板料完全断裂前停止运动, 并保持少许时间, 再以一定速度继续冲透工件, 然后返程。由于机身变形所储存的弹性变形能在材料完全断裂之前已基本释放完毕, 因而能大大减少振动。实测结果表明, 伺服压力机采用静音冲裁模式, 可降低冲裁噪声 20 dB 以上, 模具寿命相应也得到了提高<sup>[24]</sup>。

## 1.2 节能

伺服压力机节能的主要原因在于: (1) 永磁同步电机的功率因素和效率均比感应电机高; (2) 伺服压力机传动链中去掉了飞轮、离合器-制动器等耗能环节; (3) 减速采用电磁制动, 能量可回收利用; (4) 可采用电机断电待机, 没有飞轮空转, 大大节约了能耗; (5) 可根据实际需要调节滑块行程和工作频率。文献[25]实测了普通机械压力机和伺服机械压力机加工一种汽车覆盖件的能耗情况, 见表1。不同的工况下, 伺服压力机节能 8%~75%。

表1 两种压力机的电力消耗对比

Table 1 Power consumption comparison of two presses

工况	普通机械压力机/ kW	伺服机械压力机/ kW	减少比例/ %
加工前门	150	138	8
加工车身侧板	285	143	50
待机	93	23	75

## 1.3 封闭高度精确控制

传统曲柄压力机封闭高度的调节依靠连杆小头末端的调节电机, 通过蜗轮-蜗杆-螺旋传动, 实现静态调节。日本小松公司在伺服压力机中将调节电机换为伺服电机, 与滑块的位移传感器配合, 可以实现封闭高度的实时调节。实测效果表明, 普通机械压力机长期运转下死点的漂移超过 40  $\mu\text{m}$ , 而采用了下死点调节的飘移可以控制在 10  $\mu\text{m}$  以内。这对于提高产品精度、稳定工作负荷、保护模具具有十分重要的意义<sup>[25]</sup>。

# 2 伺服成形技术当前的若干发展动向

## 2.1 伺服成形装备技术

### 2.1.1 伺服压力机工作机构设计方法研究

机械压力机设计的核心问题是传动系统。传统机械压力机传动系统设计的原理为能量法, 即飞轮在一个周期通过一定量的降速所释放的能量等于压力机工作耗能<sup>[26]</sup>。而伺服压力机则不同, 其设计的主要原则是在工作行程内电机扭矩应能克服成形阻

力, 其原理为扭矩法<sup>[27-28]</sup>。

工作机构是传动系统中的重要部件, 它决定了滑块的运动学和动力学性能。目前, 伺服压力机的工作机构基本沿用了普通机械压力机中所用的各种机构, 如: 曲柄-连杆、肘杆以及多连杆机构等<sup>[29-32]</sup>。近年来, 根据伺服压力机的工作要求, 针对这些机构的建模、仿真、优化, 开展了大量的研究工作。

对普通机械压力机而言, 工作机构的设计通常追求运动学方面的指标, 即在工作行程中具有适宜而平稳的速度, 满足成形加工要求, 以及高的生产效率。虽然部分文献在机构的优化设计中也考虑到了机械利益, 例如 Hwang W M 等<sup>[31]</sup>在以拉杆式机械压力机工作机构的设计中, 将平均机械利益也列为 7 个目标函数之一, 但其权重仅为 50, 而速度平稳性的权重则为 1000。周艳华等<sup>[32]</sup>研究了冲床主传动机构优化问题, 提出了采用目标函数法和性能图谱法来进行伺服压力机传动机构的优化设计, 指出机械伺服数控转塔冲床的多连杆式主传动机构一般具有较强的非线性, 对于高度非线性的(单)多目标优化设计问题, 目前常用的优化算法多为启发式算法, 如遗传算法、模拟退火算法等, 但很难找到全局最优解。

常规机械压力机传动系统的设计, 多是通过复杂结构的多连杆来获得适宜的滑块运动。但对于伺服压力机而言, 依靠控制伺服电机的运动则很容易达到这一目的。设计具有高机械利益的工作机构、降低输入扭矩、减少电机容量, 则往往是传动系统设计的首要任务。孙友松等<sup>[27]</sup>提出了一种分解分析和错峰设计的初步设计方法, 将一个复杂的多连杆机构分解为若干个串联的基本单元, 机构的机械利益为各基本单元机械利益之积。在初步设计时, 使各基本单元的机械利益的峰值错开, 机构可在工作行程内获得大而稳定的机械利益。由于机械利益和滑块速度之间的反比关系, 滑块也可获得低而平稳的速度。机构确定初步结构后, 再进行优化, 可以提高设计效率。

针对伺服机械压力机的传动系统, 德国汉诺威的莱布利兹大学 (Leibniz Universit. t Hannover) 开发了一个专门的 CAD 设计软件, 用于伺服机械压力机传动系统的初步设计。它主要包括两个部分: 基于 ANSYS 的电机的参数化模型以及基于 MATLAB 的驱动系统的运动学模型, 并能将两个系统协同仿真。图形化用户接口 GUI 将两部分的结果组合在一

起。但该软件目前仅包括两种工作机构（偏心和肘杆）的参数化模型<sup>[33]</sup>。

2.1.2 传动系统轻量化

为了使滑块的运动具有灵活自如的柔性，除了伺服电机性能的可控之外，还必须减少传动系统的质量和运动惯量，以减少调速的能量损失和响应时间。适当提高传动比可减少电机容量，因而大部分伺服压力机均有减速系统。伺服压力机的减速机构必须考虑轻量化的问题，减少传动系统的体积和转动惯量。文献[34]通过实例计算表明，与外啮合齿轮传动相比，若使用行星齿轮，转动惯量减少了82.36%，质量减少了42.55%，最大截面尺寸减少了41.34%。

滑块通常均比较笨重，其轻量化的途径除了选用轻质材料外，还有采用轻量化的几何结构并进行优化设计<sup>[35-37]</sup>。文献[36]认为镂空结构滑块和桁架结构均可减重，但桁架结构会有更大的空间。文献[37]提出了一种基于分层结构的滑块轻量化设计方法。滑块上半部分起连接和支撑的作用，在保证功能

约束的前提下，采用拓扑优化实现其材料的最大化切除；对参数结构较为明确的滑块下半部分展开参数优化，优化隔板的厚度以及布局。以某款产品为示例，优化后滑块质量减少了8.24%，刚度还略有提高。

2.1.3 新型功能部件开发

不少伺服机械压力机均采用螺旋副作为传动部件，由于滑动螺旋副的传动效率低，目前大多数厂商采用滚珠丝杠，虽然效率高、动态性能好，但存在承载能力低、刚性差、价格贵的缺点，仅适于中小型压力机。为了解决这一问题，广东工业大学开发了一种“钢背/复合材料衬层”新型传动螺母。螺母基体为钢，螺纹表面为一层碳织物增强自润滑复合材料，见图4。它兼有高的承载能力和低的摩擦因数，且具有良好的动态性能。在开发的基于新型螺母的630 kN 伺服精压机上进行测试，结果表明与青铜螺母（ZCuSn10Pb1）相比，在重载条件下，其摩擦因数降低了21.2%，传动效率提高了10.6%<sup>[38]</sup>。

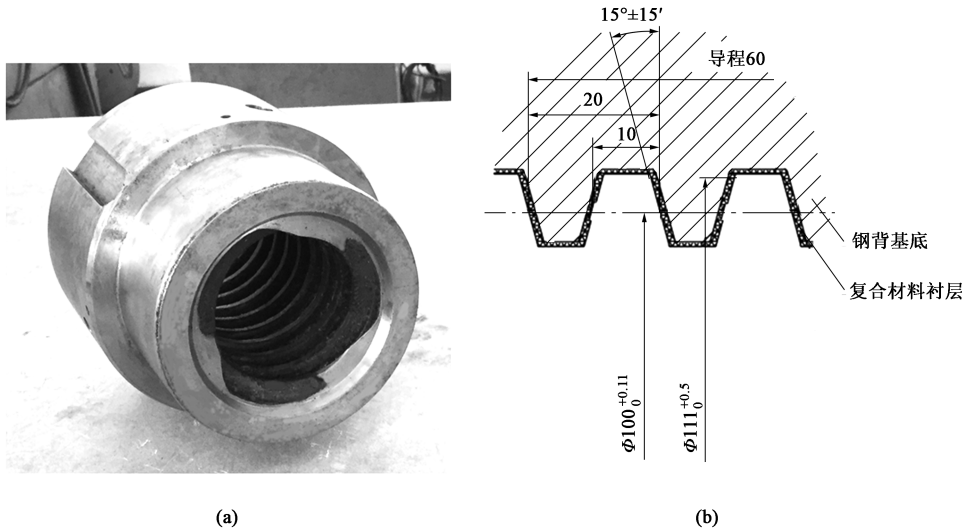


图4 钢背/复合材料衬层螺母  
(a) 实物图 (b) 结构简图  
Fig.4 Steel backing CF/EP composite liner nut  
(a) Physical map (b) Schematic diagram of structure

2.1.4 能量储放

伺服压力机由于去除了飞轮，若尖峰负荷的能量全部依靠外来电源，除必须配备大容量的配电设施外，还可能将造成电网电压波动。储放能量、平衡负载的能量管理是伺服压力机，尤其是大吨位伺服压力机必须考虑的问题。目前主要有电容和飞轮电池两种储能方式。

电容储能的能量密度较低，但动态响应快、控制简单。电容器作为储能元件是最为简单的办法，

但由于价格、体积和寿命方面的问题，目前只能用于小吨位压力机。

飞轮电池是20世纪末出现的新型储能设备，它具有能量存储密度高、过充电/放电危害小、功率大、效率高、寿命长、无污染的特点，在电网、电动汽车、船舶等领域得到了广泛的应用。其工作原理如图5所示，系统多余的电能通过电机（电动机）对飞轮加速，将输入的电能转化为机械能储存；释放时，飞轮带动电机（发电机）旋转发电，

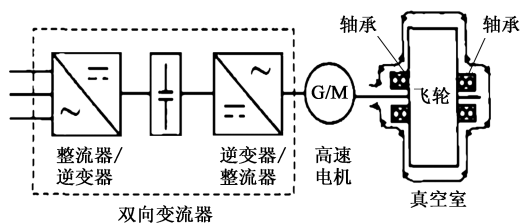


图5 高速飞轮储能系统

Fig. 5 High-speed fly wheel storage system

储存的机械能以电能输出。所控制的能量以电能输入、输出，其功能等同于一个蓄电池。飞轮转速可达每分钟数万转以上，储存的能量与转速的平方成正比，可在较短的时间内储存很大的能量。由于飞轮在真空或惰性气体中旋转，又采用了磁悬浮轴承，损耗极小，总效率可达90%以上<sup>[39]</sup>。

目前，对于大吨位的伺服压力机，通常采用混合方式使能量管理系统达到更好的效果。利用飞轮储能与电容储能各自的优点，以飞轮储能为能量交换和存储的主要部分，同时，增加小部分电容储能来提高动态响应，降低母线电压的瞬间波动。文献[40]以2500 t机械伺服压力机为例，说明了能量管理系统的应用效果。其主传动为3台额定功率为817 kW的伺服电机，总功率为2400 kW，过载尖峰功率为4000 kW，平均功率为500~600 kW。若无能量管理系统，需要容量为2500 kVA的变压器以及相配套的输配电保护器件。配备了能量管理系统（电机+电容）后，整流单元功率仅为630 kW，与有飞轮的普通机械压力机相当。

得益于复合材料、磁悬浮、电力电子技术的发展以及电动汽车的需求，飞轮电池技术成为了当前的一个研究开发热点。但也许是出于商业方面的考虑，关于其在伺服压力机上的应用的文献却是凤毛麟角。开发伺服压力机适用高效高速飞轮电池，尚有很大的发展空间。此外，近年来超级电容技术也得到长足发展，在电动汽车、轨道交通等领域已经开始应用<sup>[41]</sup>。相信不久的将来，伺服压力机的能量储放技术将会有更大的发展。

### 2.1.5 多源驱动

一般的中小型伺服压力机只有一个电机驱动，即仅有一个动力源。出于降低成本、降低单台电机容量以及其他多种考虑，不少人提出了多源驱动的方案。

#### (1) 多源并行同步驱动

对于大吨位伺服压力机，由于大扭矩电机造价太高，常常采用多电机并行同步驱动，以减小单个电机的容量。这种方案在各种大中型伺服机械压力

机中得到了广泛应用。采用多电机同步驱动，对电机的驱动控制提出了更高的要求。

日本AMINO公司、Komatsu公司、德国舒勒公司的伺服压力机产品普遍采用了多电机同步驱动，上海交通大学和齐齐哈尔二机床（集团）有限责任公司合作开发的H2S200型伺服压力机也采用类似的传动方式<sup>[42]</sup>。

#### (2) 多源非同步驱动

感应电机+伺服电机混合驱动。早在伺服压力机开发的初期，为了降低压力机造价，就有人提出了采用一台感应电机和一台伺服电机串联的伺服压力机混合非同步驱动方案<sup>[43~44]</sup>。文献[44]提供了1000 t混合驱动压力机的实际测试结果，驱动功率仅略大于普通机械压力机，但性能可提高10%~30%。这类压力机虽然可以降低造价，但它仍保留飞轮，其柔性决定于辅助伺服电机和主电机功率之比<sup>[45]</sup>。伺服压力机的有些功能很难实现，如定点停留、脉动压制等，其发展空间有限。

多伺服电机驱动。出于进一步提高传动系统柔性的考虑，文献[43]提出了多伺服电机串联的驱动方案，见图6，其中 $v$ 为滑块的运动速度， $\omega$ 为曲柄的转速。主伺服电机驱动曲柄转动，而辅助伺服电机通过滚珠丝杠驱动滑台左右移动，滑块在两个电机的联合驱动下获得所需要的运动。该方案的优点在于：①进一步提高了伺服压力机的柔性，滑块

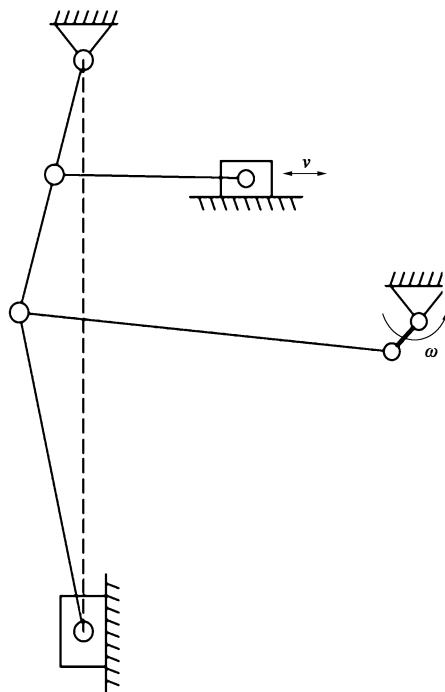


图6 双伺服输入压力机传动示意图

Fig. 6 Schematic diagram of transmission for double servo inputs press

运动的自由度进一步扩大；②克服了肘杆机构行程小的缺点，压力机的行程可以大大增加；③可以方便地实现下死点位置的调整和补偿；④可以实现电机负荷的合理分配。

### (3) 多输入、多输出

采用多台伺服电机驱动，可以实现全伺服的双动、三动压力机。据报道，日本已经开发了此类伺服机械压力机生产伞齿轮，与传统液压机相比，模具寿命提高了 3 倍，能耗降低一半<sup>[6]</sup>。

在伺服压力机上配以电动伺服垫，就成为了一台全伺服的双动压力机，见图 7。与传统的液压伺服垫相比，动态响应好、精度控制程度更高<sup>[25]</sup>。

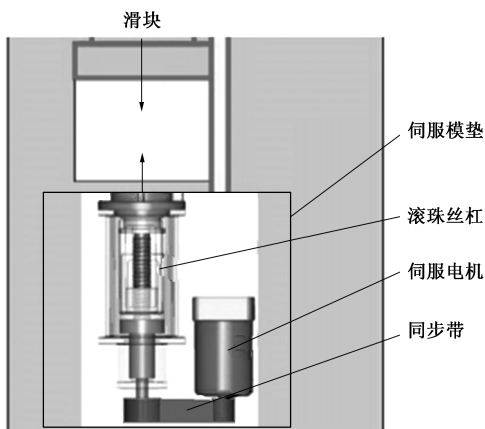


图 7 电动伺服模垫

Fig. 7 Electric servo die cushion

## 2.2 滑块运动路径设计与优化

伺服机械压力机最主要的优点就是滑块运动可编程控制，但是，如何规划滑块运动和加载路径和编程是利用伺服压力机开发成形新工艺的核心所在。

目前的规划方法多限于滑块运动。先确定若干控制点的运动学参数以及边界条件，再用一条尽可能连续、光滑的曲线拟合，一般要求曲线四阶连续，即位移、速度、加速度和加加速度（Jerk）均为连续函数。使滑块运动尽量柔性，减少冲击和振动<sup>[46-48]</sup>。

路径优化的目标大多是考虑在限定的条件下，具有最高的生产率，即滑块运动周期时间最短。Song Q Y 等<sup>[48]</sup>指出，对于大吨位伺服压力机而言，在运动规划中，还必须注意最大速度、最大加速度、扭矩、伺服电机的发热等边界条件。进而提出一种柔性加减速控制算法，采用了两段三角函数来构造电机的加/减速度曲线，低速时采用大的加速度，而高速时则采用小的加速度，有利于平衡使用电机的能力<sup>[48]</sup>。文献 [46] 还介绍了采用软件 TwinCAT © Cam Design Tool 进行运动的规划和优化的方法。对于多轴压力机和多目标的运动规划和优化则要困难得多。文献 [49] 介绍了在双动伺服压力机上进行铝合金精密挤压加工路径的优化设计，图 8 为工件图。除了规划滑块的运动外，还要规划顶料凸模的加载路径；在优化目标中，除了追求高的生产率，还要控制工件底部的厚度精度。由于在模拟模型中，将模具定义为刚体，忽略了模具回弹对尺寸精度的影响，无法直接准确算出厚度偏差。转而将底部材料的应变变量作为优化变量，并将其均匀性作为目标函数。因为应变变量影响加工硬化，从而影响厚度变化。试验证实了模拟结果的可行性。

舒勒公司以 Deimia 为平台，开发了伺服压力机冲压生产线运动曲线生成系统软件 V5PLS，作为配套软件，装备于该公司所生产的伺服压力机冲压生产线。该软件的主界面包含 6 台压力机和 7 台送料机

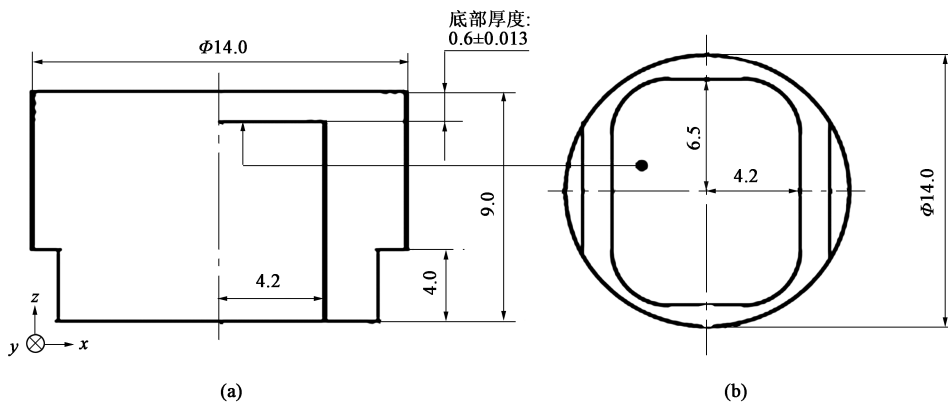


图 8 挤压工件

(a) 正视图 (b) 仰视图

Fig. 8 Extrusion workpiece

(a) Front view (b) Bottom view



构, 压力机界面则有 7 个控制点的设定。通过数据输入后, 可以进行路径固化和优化, 自动生成整个冲压线的运动曲线, 最大生产节拍可达  $22 \text{ 次} \cdot \text{min}^{-1}$  [50]。

### 2.3 伺服成形机理和数值模拟方法研究

迄今为止, 伺服成形新工艺的开发大多还依赖试错法, 经反复试验, 才能找到一个有效的工艺。因此, 亟需建立一套适合于变参数的塑形成形数值模拟方法, 以便有效地进行伺服成形新工艺的开发。

伺服成形是一种工艺参数实时变化的成形方式, 其成形机理和工艺规律较常规成形有显著的不同。变参数模式下材料变形、硬化、界面摩擦和润滑等机理的研究成为塑形成形领域目前的研究热点。

目前, 使用的数值模拟方法和材料属性数据库主要是针对常规成形工艺条件而建立的, 不能完全适用工艺参数变化的情况。为此, 相关研究者在基于变参数的伺服成形机理和工艺过程的数值模拟方法方面进行了许多探索。

#### 2.3.1 变参数模式下的材料形变机理研究

Yamashita H 等 [51] 研究了脉动载荷条件下的塑性变形。发现金属拉伸试验中暂停加载、保持变形时, 试样会出现应力松弛现象。此时应变产生均匀化、应力得到释放、均匀伸长得以增加。其机理在于发生弹塑性应变的转换, 变形传递至其他区域导致应力得到分散, 增加了材料微观薄弱区的位错密度, 屈服强度得到提高, 故伸长率增加。研究中还发现, 步进运动还可以抑制材料的局部变形。

Sebastian Kriechenbauer 等 [22] 对不同材料, 包括低碳钢、TRIP 高强钢、DP 高强钢等进行了步进拉深试验, 采用步进拉深可以使变形量增加, 见图 9。对低碳钢而言, 应力松弛导致的均匀伸长与应变量成正比; 对 TRIP 钢而言, 均匀伸长较低碳钢更大。

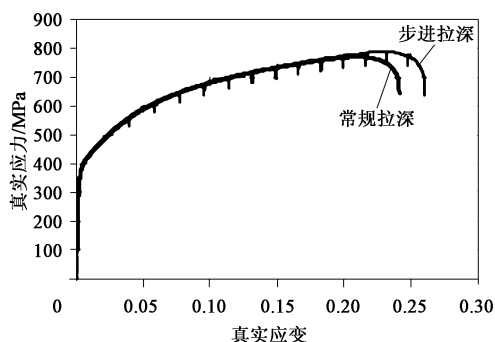


图9 常规拉伸和步进拉伸的真实应力-真实应变曲线

Fig. 9 True stress-true strain curves of conventional drawing and step-by-step drawing

付秀娟等 [52] 对变速成形条件下 B340/590DP 高

强度钢板的拉深变形进行了数值模拟和试验研究。研究表明, 流动应力减小, 可使侧壁的轴向拉应力减小, 板材成形性能提高; 应变速率减小, 可使得弹塑性应变功率显著减小, 成形性能提高; 板料和模具间的摩擦因数降低及合理的压边力均可提高材料成形性能。在试验研究中, 采用了恒速 ( $30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 和变速 ( $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  (行程为  $0 \sim 20 \text{ mm}$ ) /  $40 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  (行程为  $20 \sim 42 \text{ mm}$ )) 两种拉深变形模式。结果表明, 变速模式下材料的单位内变形功更小, 即筒壁的拉应力更小, 拉裂的可能性降低。试验测量结果显示, 在恒速模式下工件的凸模圆角处的厚度要比变速模式的更薄。

Kim S Y 等 [53] 以滑轮镢粗和直齿圆柱齿轮的精锻为研究对象, 采用试验研究结合数值模拟的方法研究了不同成形速度对工件锻造过程的影响。研究表明, 成形载荷随着行程和速度的变化而变化。

Shinomiyama N 等 [54] 研究了铝坯料 (A1070) 杯状工件的伺服成形, 研究表明: 成形速度影响工件温度, 从而影响工件的尺寸精度。进行了恒速模式和变速模式的对比试验, 结果表明坯料温度与冲头速度正相关, 在同一条件下, 速度越快, 温度越高; 在速度减少或冲头停顿后, 坯料的温度明显下降。通过对成形工件的尺寸测量发现, 在恒速成形下, 由于材料的热收缩作用, 杯状工件的直径向底部减小; 在成形过程中适当地降低成形速度, 可以抑制坯料温度的升高, 提高工件的尺寸精度。

#### 2.3.2 变参数模式下的界面摩擦和润滑机理研究

塑性成形中的界面摩擦是一个十分复杂的行为。针对不同工艺条件下的金属变形, 已建立了各种类型的摩擦模型, 如常用的库伦摩擦模型、常摩擦模型和最大摩擦模型等。这些摩擦模型一般只考虑其平均效果, 而非摩擦行为的动态表征。在伺服成形中, 由于成形速度、压力等参数存在较大的变化, 为提高分析和数值模拟的精度, 必须改进现有摩擦模型或建立新的摩擦模型。

日本学者在变参数成形过程的摩擦问题方面作了不少工作。利用应变相关性结构模型 (Strain Rate Dependency Constitutive) 或常温蠕变模型 (Creep Deformation) 建立摩擦模型, 用于脉动状态的有限元模拟 [21]。

文献 [23] 在研究伺服拉深 (变压边力) 时发现, 压边力对摩擦因数有较大的影响, 为了准确地预报拉深回弹, 虽然仍然采用库伦模型, 但需要在不同的压边力时, 选取不同的摩擦因数。

Tamai Y 等<sup>[55]</sup>建立了可用于有限元成形分析的非线性摩擦因数模型,如式(1)所示,该模型考虑了接触压力、滑动速度以及滑动长度对摩擦因数的影响。

$$\mu(p, V, L) = a \times \ln V + b \times \ln\left(\frac{p}{R_{eL}} \times 10^3\right) + c + d \times L \quad (1)$$

式中:  $\mu$  为摩擦因数;  $p$ 、 $V$ 、 $L$  分别为接触压力、滑动速度以及滑动长度;  $R_{eL}$  为材料的屈服强度;  $a$  为干摩擦区域长度;  $b$  为混合摩擦区域长度;  $c$  为摩擦因数的修正系数;  $d$  为摩擦块的长度系数。各系数的取值通过摩擦实验获得。

在该模型中,摩擦因数主要受滑动长度的影响,随着滑动长度的增加,摩擦因数增大。将该模型运用于圆筒件拉深的有限元分析,图10为脉动拉深与常规拉深得到的载荷-行程曲线,伺服拉深时的载荷在冲头30 mm行程后将有所降低,降低幅度约为10%。在较大滑动长度时,可通过上述摩擦模型计算出理论的摩擦因数,在伺服成形过程中,当滑块回程运动时,滑动长度  $L$  阶段性地重置为零,而增加的摩擦因数也重置为零,可以模拟模具与板料分离时发生的再润滑效应。将该非线性摩擦因数模型应用于有限元分析,可以定性地预测伺服压力机控制下脉动式成形的可成形性。

Tomoyoshi Maeno 等<sup>[56]</sup>采用脉动模式进行了低碳钢圆杯形件反挤压的研究,所用凸模底部带微坑可形成润滑油腔。在后退行程中,由于真空作用,润滑油进入凸模底部坑内;向下行程时,油被强制从坑内挤出,进入到界面,形成润滑膜,从而形成

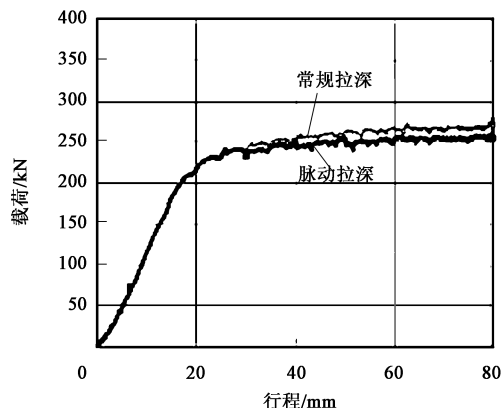


图10 脉动拉深和常规拉深的载荷-行程曲线

Fig. 10 Load-stroke curves for pulsing drawing and conventional drawing

了界面的“自动再润滑”机制。图11为试验装置,图12为工件内表面光滑油膜面积比。试验结果表明,脉动模式可有效防止粘模,工件表面精度和表面质量大幅提高。凸模在顶点适当停留,可以增强再润滑效果。这种“再润滑”机制,不妨称之为脉动成形下的“油泵效应”。

### 2.3.3 伺服成形数值模拟方法研究

在伺服成形的数值模拟研究的文献中,大多还是采用现有的各种 CAE 软件平台,如 DEFORM、Dynaform、AutoForm 等。为了使模拟结果更加适合变参数条件,在应力-应变曲线、摩擦等方面采取了相应的措施。

Fallahiareszoodar A 等<sup>[23]</sup>在研究动态变压边力条件下拉深工件回弹的数值模拟时,对摩擦因数、杨氏模量、加工硬化等因数均进行了修正。在硬化模

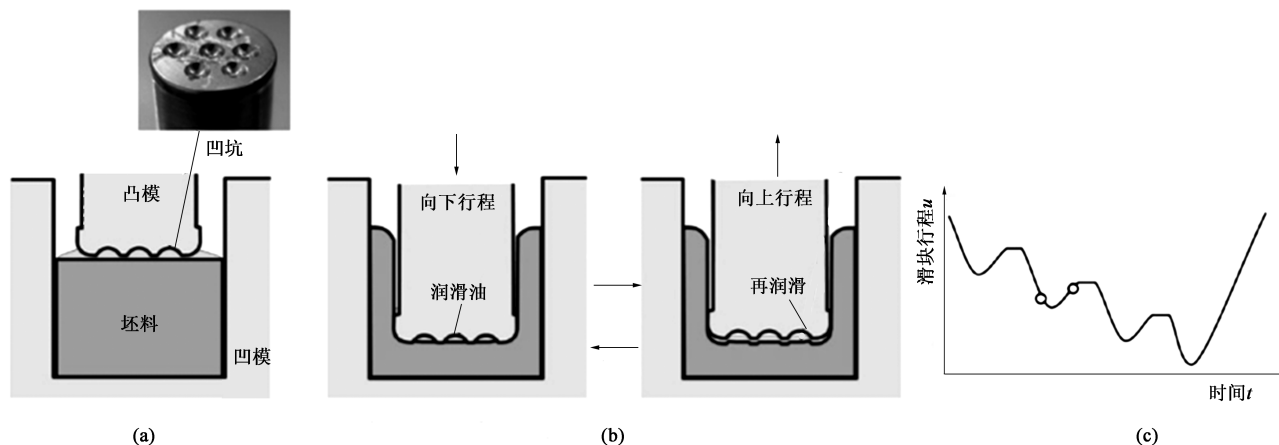


图11 脉动模式及底部带坑凸模圆杯形件反挤压的自动再润滑

(a) 模具 (b) 挤压过程 (c) 滑块行程曲线

Fig. 11 Pulsating motion and automatic re-lubrication in backward extrusion of cylindrical cup with punch having dimples at bottom

(a) Die (b) Extrusion process (c) Stroke curve of slide

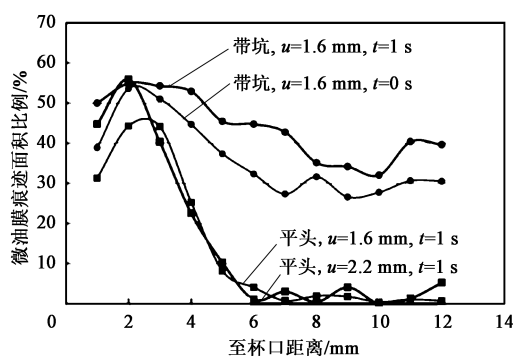


图 12 平头和带坑凸模脉动模式下挤压工件内腔微油膜痕面积比

Fig. 12 Area ratios of micro-pits formed by trapped lubricant on inner cavity of extrusion workpiece under pulsating motion of punches with flat head and dimples

型中引入了两个参数: 瞬时软化率  $k$  (Transient Softening Rate) 和停滞率  $\xi$  (Stagnation Ratio), 采用 Autoform 模拟软件, 5000 系列铝的默认值为  $k = 0.005$ ,  $\xi = 0.28$ 。在杨氏模量中则引用了平均模量或名义模量  $E_{avg}$ , 最后通过试验确定具体参数。采用此方法, 对厚度为 1.2 mm 的高强度铝板 Al5182-O 的拉深回弹进行了数值模拟, 取得了满意的结果。

在分析材料成形速度对伺服成形工艺的影响时, 方伍梅<sup>[57]</sup>借助 Dynaform 有限元软件研究了不同成形速度对不同应变速率敏感材料成形性能的影响, 通过改变成形速度来反映板料应变速率的变化。采用试验获得多次加载-卸载后的材料应力-应变曲线, 将其应用到模拟计算中, 可以更加准确地对伺服成形工艺进行模拟研究分析, 使得模拟结果更加贴合试验结果。但 Dynaform 动力显示算法模拟一般采用的是虚拟凸模速度, 因此, 通过 Dynaform 数值模拟精确分析应变速率对成形过程的影响还需要更加深入研究。

喻建军<sup>[58]</sup>在研究伺服压力机不同冲压速度对方盒形件拉深时板料成形性的影响时, 采用实际冲压速度对板料成形过程进行分析。计算机模拟中, 采用过应力本构模型和 Hill48 各向异性屈服准则, 对不同冲压速度曲线的拉深过程进行模拟, 研究表明, 凹二次函数的冲压速度曲线能提高板料的成形性能。

刘红武等<sup>[59]</sup>针对伺服冲压成形数值模拟的关键问题, 提出了以 JSTAMP/NV 软件为基础的数值模拟解决方案, 并从材料模型、滑块行程-时间曲线设定、摩擦因数、压边力这 4 个方面进行了分析。伺服成形时, 由于冲压速度的变化, 材料会多次承受拉深-压缩的循环载荷, 使用 JSTAMP 软件时建议

采用考虑随塑性应变变化和包申格效应的吉田-上森材料模型 (YU 模型), 摩擦模型则建议采用 Ma N X 等<sup>[60]</sup>提出的非线性摩擦模型, 其摩擦因数与滑动距离的函数关系如图 13 所示, 在压力机的回程运动中, 滑动距离被重新设置为零, 摩擦因数也被重新设置为初始值, 其中,  $\mu_0$  为初始摩擦因数。

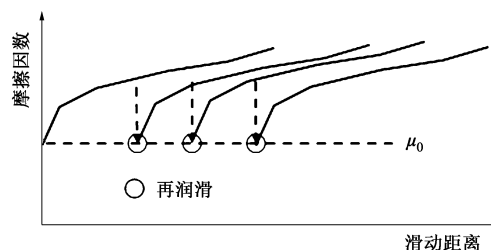


图 13 摩擦因数、滑动距离与再润滑的关系

Fig. 13 Relationships of friction coefficient, moving distance and re-lubrication

## 2.4 伺服成形与智能制造

智能制造是当前制造技术的发展大方向。智能制造中的智能机器有 3 大基本要素: 信息深度自感知、智慧优化自决策、精准控制自执行<sup>[61]</sup>。与传统机械压力机相比, 伺服压力机由于其本身的数字化特征, 更加适合于智能制造。文献 [21] 认为, 随着伺服压力机的出现, 塑形加工工艺“已经由模拟进化为数字化的加工系统”。近年来, 围绕以伺服压力机的智能制造的相关技术正稳步向前迈进。

### 2.4.1 成形过程的传感技术

数值模拟能够预报工艺过程, 是实现智能制造的重要条件, 但其准确性需经实践检验、修正方可完善。若能实时检测工艺参数, 不但可以监测工艺过程, 而且对于验证数值模拟的准确性有重要作用。成形加工过程的检测技术是实现智能成形的不可或缺的条件。由于成形过程中界面的高压, 工作情况复杂, 使这一问题更具有挑战性。近年来, 一些适应这种恶劣工况的传感器陆续问世。

Hagino N 等<sup>[62]</sup>运用超声波来检测工件及模具之间的接触状态, 分别以铝合金 (A5052-JIS) 和不锈钢 (SUS304-JIS) 材料为研究对象, 对收集的反射波和透射波数据用有限差分域法对测得的数据进行分析, 结果显示, 透射波的检测效果较好。Yang M 等<sup>[63]</sup>提出了一种使用数个多声发射 (AE) 传感器的摩擦源检测系统, 可以对金属成形过程中摩擦所产生的声发射进行检测, 通过对检测结果进行融合处理, 可以确定摩擦源的位置。

Groche P 等<sup>[64]</sup>设计了一种传感器紧固件,可以对制造过程进行监视,将传感紧固件置于螺栓中,可监测连接时的预紧力和操作载荷,如图 14 中的结构所示,左半部分为中空承载结构,右半部分为传感器主体,可识别轴向力和弯曲扭矩,且包含的温度传感器可监测内部的温度。另外, Kim S Y 等<sup>[65]</sup>还设

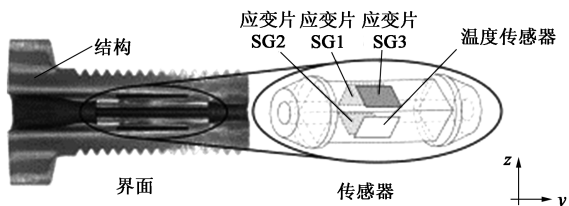


图 14 内嵌螺栓式传感器示意图

Fig. 14 Schematic diagram of die-embedded sensor

计了一种螺栓式压电传感器,可用于闭式模锻中模具和工件的状态检测和数据采集。

#### 2.4.2 工艺过程的智能管理系统

华中科技大学与企业合作,建立了一套基于伺服机械压力机的高强度钢热冲压智能管理系统,如图 15 所示<sup>[66]</sup>。该系统由 3 条基于伺服机械压力机的热冲压生产线构成,分别位于江西和广东。每条生产线配有一台工业计算机,作为边沿计算节点;一个 4G 路由器作为数据通讯端。生产数据的存储和分析由公共云的服务器和数据库完成,公共云的利用大大减少了服务器的维护工作。管理系统的主要功能为监控热冲压工艺参数、分析生产效率和能耗、分析设备运行可靠性等。

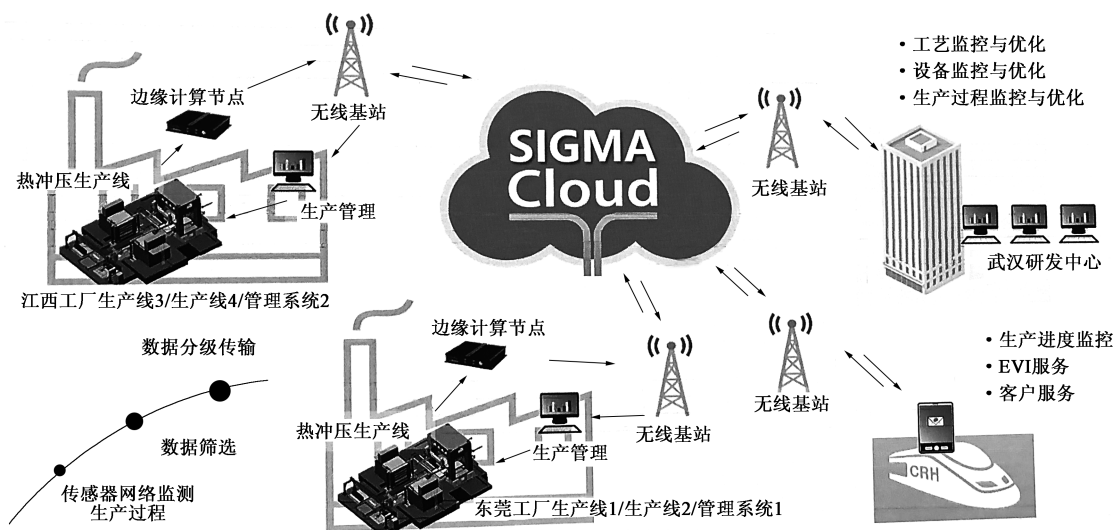


图 15 基于云计算的热冲压生产线智能管理系统

Fig. 15 CPS of hot stamping production line based on cloud computing

文献 [21] 介绍了一个采用过程监测/控制及集成数据管理系统的摆线齿轮精密锻造自动生产线,如图 16 所示,该生产线的核心设备为一台 4000 kN 伺服压力机。全部工艺过程均为在线管理。上游的信息(原材料)用于精锻,而精锻的信息用于下游的精整,通过控制单个工件精度来实现全部信息的归一和可视化。他们对于工艺过程的管理、质量控制,尤其是对产品追踪十分有用。在数据库中积累了大量的专家经验,即使是一个伺服压力机的新手,也可以为每个工艺制定出优化的运动模式。

### 3 结语

交流伺服压力机的出现,是近年来成形加工装

备领域中最重大的变革之一,它最大的特点是滑块运动模式可编程控制,以满足不同的工艺要求,可实现由模拟成形向数字化成形的转变。此外,尚有节能、可靠、紧凑等其他优点。

伺服压力机的出现,不仅引发了成形装备领域里的一场深刻革命,而且对成形工艺、模具技术、成形模拟等诸方面均产生了巨大的影响。伺服压力机和基于伺服压力机的成形加工可以被通称为伺服成形技术。

我国诸多锻压装备制造厂商,紧跟塑性成形技术的新潮流,开发出了多种伺服压力机,并投放市场。但目前国产伺服压力机的一些核心关键部件,如大扭矩交流伺服电机及其驱动控制装置、飞轮电池等,不少仍依赖进口。必须迅速改变这一局面,才能实现伺服成形技术的健康、持续发展。

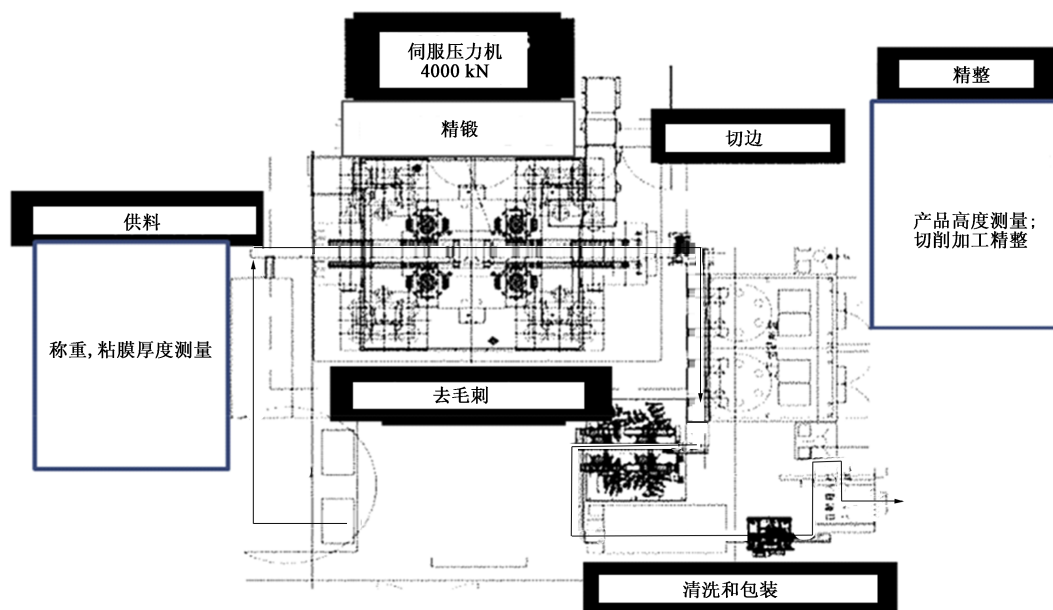


图16 齿轮成形加工生产线检测/控制和数据集成管理系统

Fig. 16 Process sensing/control and integrate date management system for gear manyfacturing production line

伺服成形技术顺应了智能制造的发展方向,必将在智能成形加工中发挥重要作用。为实现成形加工的智能制造,必须加强动态成形过程的数值模拟研究,开发适于伺服成形的数值模拟技术,为伺服成形新工艺的开发提供有力工具。此外,还必须重视伺服成形的配套技术的研究和开发,如伺服成形工艺库、成形过程的监测控制、成形加工专家系统、成形加工过程的物联网技术等。

国际锻压装备制造的顶级厂商,均十分关注成形加工的工艺问题,重视成形新工艺的开发研究。在此基础上,开发新装备,形成成套的新技术。他们不单纯是一个设备制造厂,而是一个成形加工全面解决方案的供应商。近些年,成形加工领域中大的创新,如液压成形、高强度钢热冲压成形等大多是这样产生的。

要实现制造大国向制造强国的转变,必须早日建立起自主科技创新的体制。企业是科技创新的主体,锻压装备制造企业,尤其国家装备制造的龙头企业,应当提倡“工艺与装备并举”,在搞好成形新装备技术研发的同时,大力开展成形加工应用基础研究和新工艺的开发,早日实现由单纯的锻压设备制造厂向成形加工全面问题解决方案供应商的转变。否则,将会陷入“落后-引进-仿制-再落后-再引进”的死循环之中。

#### 参考文献:

[1] 陈伯时,陈敏逊. 交流调速系统 [M]. 第3版. 北京:机械

工业出版社, 2013.

Chen B S, Chen M X. AC Velocity Adjustment System [M]. The 3<sup>rd</sup> Edition. Beijing: China Machine Press, 2013.

[2] 马建, 刘晓东, 陈轶嵩, 等. 中国新能源汽车产业与科技发展现状及对策 [J]. 中国公路学报, 2018, 31 (8): 1-19.

Ma J, Liu X D, Chen Y S, et al. Current status and countermeasures for China's new energy automobile industry and technology development [J]. China J. Highw. Transp., 2018, 31 (8): 1-19.

[3] 张大勇. 我国机车电传动技术的发展 [J]. 机车电传动, 2007, (3): 1-4.

Zhang D Y. The development of electric drive technology for locomotive [J]. Electric Drive for Locomotives, 2007, (3): 1-4.

[4] 马伟明. 舰船电气化与信息化复合发展之思考 [J]. 海军工程大学学报, 2010, 22 (5): 1-4.

Ma W M. On comprehensive development of electrization and informationization in naval ships [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2010, 22 (5): 1-4.

[5] 查尔斯 布雷姆纳. 全电动飞机首获安全认证 [N]. 参考消息, 2020-06-14 (7).

Charles Bremner. Fully electric driving airplane gets its safety certification [N]. Reference News, 2020-06-14 (7).

[6] Osakada K, Mori K, Altan T, et al. Mechanical servo press technology for metal forming [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60 (2): 651-672.

[7] Kiichiro Kawamotoa, Hiroyuki Andob, Ken Yamamichia. Application of servo presses to metal forming processes [A]. 17<sup>th</sup> International Conference on Metal Forming [C]. Toyohashi, 2018.

[8] 中原洋一. 冲压加工的变革——现代冲压技术生产要点 [M]. 卢险峰, 译. 北京: 中国锻压协会, 2008.

Yoichi Nakahara. Revolution in Stamping: Key Points in Modern

- Stamping Production [M]. Translated by Lu X F. Beijing: Confederation of Chinese Metal Forming Industry, 2008.
- [9] Isogawa S, Enomoto Y, Kobayashi H, et al. High cycle deep drawing of PA6 matrix carbon fiber reinforced thermoplastics by servo-driven screw press [J]. *Procedia Manufacturing*, 2018, 15: 1722–1729.
- [10] Yamagishi Hideki, Kakiuchi Shigeki, Sato Masaru. High-productivity forge welding of AZ80 magnesium alloy to A2024 aluminum alloy using an AC servo press [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 2018, 49 (10): 4659–4668.
- [11] Miyoshi K. Current trends in free motion presses [A]. *Proceedings of 3-rd International Conference on Precision Forging [C]*. Ngoya, 2004.
- [12] 孙友松, 程永奇, 胡建国, 等. 交流伺服机械压力机在金属塑性成形加工中的应用 (I) 一板料成形 [J]. *锻压技术*, 2018, 43 (10): 1–12.
- Sun Y S, Cheng Y Q, Hu J G, et al. Applications of AC servo mechanical press in metal plastic forming (I) –Sheet metal forming [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2018, 43 (10): 1–12.
- [13] 孙友松, 程永奇, 胡建国, 等. 交流伺服机械压力机在金属塑性成形加工中的应用 (II) 一体积成形 [J]. *锻压技术*, 2018, 43 (11): 1–12.
- Sun Y S, Cheng Y Q, Hu J G, et al. Applications of AC servo mechanical press in metal plastic forming (II) –Metal volume forming [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2018, 43 (11): 1–12.
- [14] Shiraishi M, Nikawa M. Forging of magnesium alloy covers with ribs and flanges from thin plate using servo press [J]. *Steel Res. Int.*, 2010, 81: 1275–1278.
- [15] 蔡志仁, 郭光辉, 白国勋. 伺服冲床应用于镁合金温热成形, 冲压技术 [J]. *锻造与冲压*, 2013, (18): 18–24.
- Cai Z R, Guo G H, Bai G X. Application of magnesium alloy on warm hot forming by servo press machine [J]. *Forging & Metalforming*, 2013, (18): 18–24.
- [16] 刘明星, 王思杰, 李建. 协易机械: 推动伺服热成形发展 [J], *金属板材成形*, 2020, (3): 46–52.
- Liu M X, Wang S J, Li J. Xieyi Machine: Promote the development of hot servo forming [J]. *Metal Sheet Forming*, 2020, (3): 46–52.
- [17] 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.
- [18] Matsumoto R, Jeon J Y, Utsunomiya H. Shape accuracy in the forming of deep holes with retreat and advance pulse ram motion on a servo press [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213 (5): 770–778.
- [19] Tomoyoshi Maeno, Hiroki Homma, Ryohei Ikeda, et al. Automatic re-lubrication by pulsating motion with punch having dimple bottom in backward extrusion of cylindrical cup [J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 50: 231–235.
- [20] Maeno T, Mori K I, Ichikawa Y, et al. Prevention of seizure in inner spline backward extrusion by low-cycle oscillation using servo press [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 81: 1860–1865.
- [21] Yang M. Smart metal forming with digital process and IoT [J]. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2018, (1): 207–214.
- [22] Sebastian Kriechenbauer, Reinhard Mauermann, Dirk Landgrebe. Deep drawing with local hardening on digital multi-axis servo press [J]. *Acta Metall. Sin.: Engl. Lett.*, 2015, 28 (12): 1490–1495.
- [23] Fallahiazrood A, Gupta T, Goertemiller C, et al. Residual stresses and springback reduction in U-channel drawing of Al5182-O by using a servo press and a servo hydraulic cushion [J]. *Production Engineering*, 2019, 13: 219–226.
- [24] 孙友松, 黎勉, 史国亮. 1100 kN 伺服曲柄压力机的开发与研究 [J]. *锻造与冲压*, 2011, (3): 50–53.
- Sun Y S, Li M, Shi G L. Research & development of 1100 kN servo crank press [J]. *Forging & Metalforming*, 2011, (3): 50–53.
- [25] Kiichiro Kawamoto, Hiroyuki Andob, Ken Yamamichia. Application of servo presses to metal forming processes [A]. *17<sup>th</sup> International Conference on Metal Forming [C]*. Toyohashi, 2018.
- [26] 何德誉, 曲柄压力机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- He D Y. *Crank Presses [M]*. Beijing: China Machine Press, 1981.
- [27] 孙友松, 胡建国, 程永奇. 伺服机械压力机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- Sun Y S, Hu J G, Cheng Y Q. *Servo Mechanical Press [M]*. Beijing: China Machine Press, 2019.
- [28] Konrad Wegener. Forming Presses (Hydraulic, Mechanical, Servo) [M]. Berlin: CIRP Encyclopedia of Production Engineering, 2015.
- [29] Schuler. *Metal Forming Handbook [M]*. Springer-verlag, Berlin Heidelberg, 1998.
- [30] Halicioğlu R, Dulger L C, Bozdana A T. Mechanisms, classifications, and applications of servo presses: A review with comparisons [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2016, 230 (7): 1177–1194.
- [31] Hwang W M, Hwang Y C, Chiou S T. A drag-link drive of mechanical presses for precision drawing [J]. *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 1995, 35 (10): 1425–1433.
- [32] 周艳华, 谢福贵, 刘辛军. 伺服冲床主传动机构构型及运动学优化设计 [J]. *机械工程学报*, 2015, 51 (11): 1–7.
- Zhou Y H, Xie F G, Liu X J. Type synthesis and optimization of main driving mechanism for servo-punch press [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51 (11): 1–7.
- [33] André Höber, Bernd-Arno Behrens, Richard Krimm. Development of a design tool for servo-powertrains in forming presses [EB/OL]. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-60417-5\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-662-60417-5_9), 93–101.
- [34] 杜威, 赵升吨, 范淑琴, 等. 交流伺服式机械压力机用齿轮

- 减速的合理方式探讨 [J]. 锻压装备与制造技术, 2018, 53 (6): 8-12.
- Du W, Zhao S D, Fan S Q, et al. Discussion on reasonable ways of gear reduction for AC servo mechanical press [J]. Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology, 2018, 53 (6): 8-12.
- [35] 殷文齐, 李建, 宋清玉. 伺服压力机滑块轻量化设计方法 [J]. 一重技术, 2014, (6): 1-5.
- Yin W Q, Li J, Song Q Y. Light-weight design of slider of servo press [J]. CFHI Technology, 2014, (6): 1-5.
- [36] 叶华伟, 莫健华. 伺服压力机滑块结构的轻量化设计探索 [J]. 锻压技术, 2016, 41 (2): 103-108.
- Ye H W, Mo J H. Research on lightweight design of servo press slider [J]. Forging & Stamping Technology, 2016, 41 (2): 103-108.
- [37] 彭发忠, 王传英, 柴恒辉, 等. 基于分层结构的伺服压力机滑块轻量化设计 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2020, 60 (12): 1016-1022.
- Peng F Z, Wang C Y, Chai H H, et al. Lightweight slider design for a servo press based on its layered structure [J]. J. Tsinghua University: Sci. & Technol., 2020, 60 (12): 1016-1022.
- [38] 孙友松, 程永奇, 张鹏, 等. 新型高效钢背/自润滑复合材料衬层结构传动螺母 [J]. 机械工程学报, 2017, 53 (13): 150-158.
- Sun Y S, Cheng Y Q, Zhang P, et al. A novel type of transmission screw nuts with structure of steel backing/self-lubricant composite lining [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53 (13): 150-158.
- [39] 王江波, 赵国亮, 蒋晓春, 等. 飞轮储能技术在电网中的应用综述 [J]. 电力电子技术, 2013, 47 (7): 28-30.
- Wang J B, Zhao G L, Jiang X C, et al. Overview on application of flywheel storage technology in power grid [J]. Power Electronics, 2013, 47 (7): 28-30.
- [40] 周晓东, 郭为忠. 伺服压力机能量管理系统的研究 [J]. 传动技术, 2018, 32 (4): 31-36.
- Zhou X D, Guo W Z. Research on energy management system of servo presses [J]. Drive System Technique, 2018, 32 (4): 31-36.
- [41] 陈宽, 阮殿波, 傅冠生. 轨道交通用超级电容器研发概述 [J]. 电池, 2018, 32 (4): 31-36.
- Chen K, Ruan D B, Fu G S. Research and development summary of supercapacitor used in rail transit [J]. Battery, 2018, 32 (4): 31-36.
- [42] 胡建国, 伺服压力机双肘节多连杆工作机构研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
- Hu J G. Study on Multi-linkage Working Mechanisms with Two Joints for Servo Presses [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016.
- [43] Meng C F, Zhang C, Lu Y H, et al. Optimal design and control of a novel press with an extra motor [J]. Mechanism and Machine Theory, 2004, 39: 811-818.
- [44] Bosga S G, Segura M. Design and tests of a hybrid servo drive system for a 1000 T mechanical press [J]. Power Electronics Specialists Conference, 2008, 15-19: 424-429.
- [45] Konrad Wegener. Forming presses (Hydraulic, mechanical, servo) [EB/OL]. CIRP Encyclopedia of Production Engineering, CIRP. <http://www.cirp.net/mainmenu-publications/other-publications/encyclopedia.html>.
- [46] Recep Halicioglu, Lale Canan Dulger, Ali Tolga Bozdana. Improvement of metal forming quality by motion design [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 51: 112-120.
- [47] 李补生, 李建, 殷文齐, 等. 新型伺服压力机热成形工艺曲线规划 [J]. 一重科技, 2016, (2): 9-14.
- Li B S, Li J, Yin W Q, et al. Hot forming process curve plan of new servo press [J]. CFHI Technology, 2016, (2): 9-14.
- [48] Song Q Y, Guo B F, Li J. Drawing motion profile planning and optimizing for heavy servo press [J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2013, 69: 2819-2831.
- [49] Satoshi K, Tsubasa H, Akio K. Determination of back-pressure profile and slide motion of servo press in cold forging using sequential approximate optimization [J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, 2020, 14 (4): 1-9.
- [50] 殷强, 刘冬, 汪建余. 基于伺服压力机生产线的曲线模拟工作研究 [J]. 锻造与冲压, 2020, 22: 20-22.
- Yin Q, Liu D, Wang J Y. Research on curve simulation of servo press production line [J]. Forging and Metalforming, 2020, 22: 20-22.
- [51] Yamashita H, Ueno H, Nakai H, et al. Technology to enhance deep-drawability by strain dispersion using stress relaxation phenomenon [A]. SAE World Congress and Exhibition [C]. Detroit, 2015.
- [52] 付秀娟, 周振, 余月红, 等. 变速拉深影响 B340/590DP 板料成形性能的机理分析 [J]. 锻压技术, 2018, 43 (4): 131-137.
- Fu X J, Zhou Z, Yu Y H, et al. Mechanism analysis on influence of variable speed deep drawing on formability of B340/590DP sheet metal [J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43 (4): 131-137.
- [53] Kim S Y, Tsuruoka K, Yamamoto T. Effect of forming speed in precision forging process evaluated using CAE technology and high performance servo-press machine [A]. 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP [C]. Nagoya, 2014.
- [54] Shinomiya N, Shirakawa N. Experimental and analytical studies on impact extrusion of A1070 by servo press [J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A, 2013, 79 (804): 1107-1111.
- [55] Tamai Y, Inazumi T, Manabe K I. FE forming analysis with nonlinear friction coefficient model considering contact pressure sliding velocity and sliding length [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 227: 161-168.
- [56] Tomoyoshi Maeno, Hiroki Hommaa, Ryohei Ikeda, et al. Automatic re-lubrication by pulsating motion with punch having dimple bottom in backward extrusion of cylindrical cup [J]. Procedia Manufacturing, 2020, 50: 231-235.



- [57] 方伍梅. 伺服工艺对板料成形性影响的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.  
Fang W M. Study on the Effect of Servo Process on Sheet Formability [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [58] 喻建军. 基于伺服压力机冲压速度对板料成形性的影响 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.  
Yu J J. Study of Influence of Punch Speed on Sheet Metal Forming Based on Servo Press [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [59] 刘红武, 李彦波. 伺服冲压成型数值模拟解决方案研究 [J]. 内燃机与配件, 2019, (15): 119-121.  
Liu H W, Li Y B. Research on solution schemes of numerical simulation for servo forming [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2019, (15): 119-121.
- [60] Ma N X, Sugitomo N, Kyuno T, et al. Nonlinear friction model for servo press simulation [A]. The 9th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes; Part A Benchmark Problems and Results and Part B General Papers [C]. 2013.
- [61] 赵升吨, 张鹏, 范淑琴, 等. 智能锻压设备及其实施途径的探讨 [J]. 锻压技术, 2018, 43 (7): 32-48.  
Zhao S D, Zhang P, Fan S Q, et al. Discussion on intelligent forging equipment and approaches of its implementation [J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43 (7): 32-48.
- [62] Hagino N, Endou J, Ishihama M, et al. Propagation behavior of ultrasonic wave around boundary surfaces of workpieces and dies [J]. Proc. Eng., 2014, 81: 1073-1078.
- [63] Yang M, Manabe K, Hayashi K, et al. Data fusion of distributed AE sensors for detection of friction source during press forming [J]. J. Mater. Process. Technol., 2003, 139: 368-372.
- [64] Groche P, Brenneis M. Manufacturing and use of novel sensoric fasteners for monitoring forming processes [J]. Measurement, 2014, 53: 136-144.
- [65] Kim S Y, Kubota S, Okuda M. Detection of abnormal behavior in manufacturing processes using bolt type Piezo-Sensor [A]. Proceedings of the 68th Japanese Joint Conference for the Technology of Plasticity [C]. Fukui, 2017.
- [66] Wang L, Zhu B, Liu Y, et al. Design and application of CPS for hot stamping based on cloud computing [A]. Advanced High Strength Steel and Press Hardening, Proc. of the 5<sup>th</sup> International Conference (ICHSU2020) [C]. Shanghai, 2020.

## “2022 上海锻压技术与装备展” 将于 2022 年 6 月 15-18 日在上海虹桥国家会展中心盛大开幕

由中国机械工程学会塑性工程分会、北京机电研究所有限公司精心筹备的“2022 上海锻压技术与装备展” 将于 2022 年 6 月 15-18 日在上海虹桥国家会展中心盛大开幕。现热忱邀请国内外锻压技术与装备供应商参展, 展示新产品、新技术、新形象; 同时, 邀请国内外同行和朋友届时光临, 共谋行业发展大计!

同期举办: 塑性加工行业智能制造发展论坛、锻压新技术 & 新装备发展论坛、第 22 届中国国际模具技术和设备展览会、2022 上海热处理装备与技术展览会。

“2022 上海锻压技术与装备展” 致力于打造锻压行业一站式展览平台, 不仅涵盖下料、加热、设备、模具、检测、新技术、产品、模拟等锻造生产全产业链, 而且聚焦推动锻压领域产学研进程, 为国内科研机构、团体提供集中展示科研成果、技术推广、人才培养等成果的便利平台, 通过 24×365×360° 式全方位宣传, 为企业开拓市场、扩大贸易往来搭建更畅通的合作桥梁, 同时促进锻压领域的产学研用学术交流与合作, 实现优势互补、互惠共赢。“2022 上海锻压技术与装备展” 期待您的到来! 2022, 相约上海, 见证发展!

**展品范围:** (1) **成形零部件:** 锻件、挤压件、轧制件及特种成形件 (旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧、楔横轧、充液成形、增量成形及各种新技术等); (2) **锻压设备及附件:** 锻造、旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧设备, 锻造生产用工业炉、窑和节能技术, 自动化控制, 锻压辅助设备, 锻压防护产品等; (3) **锻压智能制造技术及装备:** 自动化生产线、智能工厂、工业机器人、智能机床、智能物流管理、增材制造、机器视觉技术、工业物联网及系统集成、自动化生产解决方案及各种软件等; (4) **锻压检测设备及仪器仪表;** (5) **工艺设计和 CAD、CAM, 材料成形模拟软件等。**

**展位分类:** (1) **标准展台:** 3 m×3 m, 3 m×4 m, 3 m×6 m。注: 每个标准展位包括: 三面隔板、帽板、地毯、一张展桌、两把椅子、两支照明灯、一个 220 V/5 A 电源插座。(2) **光地展区:** 36 平方米起租。(3) **“科创中国” 新技术、新成果集中展示区:** 宣传板 (单张宣传板标准尺寸约 3 m×2 m); 宣传板由主办方统一制作和布展。

**参观者:** 来自国外及全国各地的专业人士前来参观和洽谈, 其他相关行业的参观者有机械、模具、热处理、工业炉、航空航天、石油、兵器、家电、电子、纺织机械等。

**联系方式:**

**地 址:** 北京市海淀区学清路 18 号中国机械工程学会塑性工程分会秘书处 **网 址:** <http://www.cstp-cmes.org.cn>

**联系人:** 林玉彤、秦思晓、周 林 **联系电话:** 010-62920652 **E-mail:** fst\_linyutong@163.com; duanya@cmes.org