

成形加工

轻结构高强度材料的成形加工

全球不断增长的对消费品的需求，对其生产时的环境保护问题提出了挑战，为了保证在高劳动力成本国家和地区也同样具有高竞争力，能够高效地生产高品质的消费品，生产过程的集成是具有决定性意义的。

文 | Marus Stierner, Alexander Brosius 和 Erman A. Tekkaya

在成形加工领域中避免更换模具，可以有效缩短加工时间、降低生产成本。而工艺过程的集成也可以推动传统模具行业的发展，使其达到新的水平和高度。从被加工零件质量的角度出发，对现代化的成形加工技术提出了完全不同于过去的要求：一方面，成形加工零件形状复杂程度的提高，要求人们能够采用轻结构加工技术；另一方面，经济性好的轻结构加工材料，如铝合金或镁合金，延展性比钢材低，从而增加了成形加工的难度。

变形曲线表示 成形加工的性能

还有一个就是不断提高的安全性要求，例如在汽车和航空航天领域，这些要求突出的表现就是要使用高强度材料。而这些高强度材料与传统材料相比有着较低的延展性和成形加工性能。怎样才能真正满足高复杂性、不易流动材料的高效加工要求呢？

单从传统成形加工技术的角度来考虑，例如从深冲压或者从内高压成形加工等技术的角度来考虑，实现上述要求，有时甚至是一些相互对立的要求是不可能的。准静态成形加工过程的变形



高质量产品的生产要求采用新的高效技术，这里涉及到现代化的成形加工技术

极限已经研究的非常透彻，没有更多大的空间可以再利用了。成形工艺的变形能力可以用变形能力曲线表示。图 1 所示的就是这样一种曲线：ENAW5083 H111 材料的圆形铝合金板材深冲压成形的变形能力曲线。首先，在需成形的铝合金板材上刻蚀出方形网格。根据成形过程前后网格节点位置的变化可以测定出第一次和第二次主应变的大小。数学表达式可以（根据大小）表示出板材平面对数变形的两次特征值。图 1b 表示的是成形加工零件。由于在两个图中用相同的颜色表示了第一次成形加工时的主应变，因此可以得知在哪些地方出现了临界应变。图 1a 中的黑色曲线是成形极限曲线。它是能够在一次成



图 2 管材收缩、膨胀和板材成形使用的典型线圈

形加工过程中实现的、不损伤零件的应力状态（曲线下方）和不能实现的、会出现材料失效的应力状态（曲线上方）的分界线。

这样，就可以利用多级深冲压成形加工技术、根据应力状态实现成形极限曲线上的变形，突破传统的成形加工中材料失效的界

限。在这种多级深冲压成形加工中，每一次冲压都需要有合适的模具。这种成形加工工艺方案有着很长的工艺过程、成形加工时间以及很高的生产成本。

它的替代解决办法就是所谓的快速成形技术，例如电磁成形加工工艺。在这种高速成形加工工艺或者脉冲成形加工工艺中，成形加工时的加速度很高。这样就可以充分利用加速质量的惯性突破传统的成形极限。电磁成形工艺的作用原理是洛伦兹力：工件中交变涡电流激起的脉冲式磁场所产生的力。这种磁通密度可高达几个特斯拉的磁场是由模具线圈中电容器组在工件装夹后放电而产生的。这一模具线圈在大约 $10\mu\text{s}$ 的时间里能够释放出 $30\,000\text{A}$ 的峰值电流。而在 $100\mu\text{s}$ 的时间内即可完成加工。可以实现的应变率高达 1000s^{-1} (图 2)。

组合获得理想结果

尽管这种技术有着更短的生产时间和更大的成形能力等优点，但还不可能彻底放弃传统的成形加工技术。虽然已经在金属管材的成形加工中成功使用了电磁成形加工工艺，但在大批量生产时却因这一高动态性能成形过程难以调节而失败。因此，只有在快

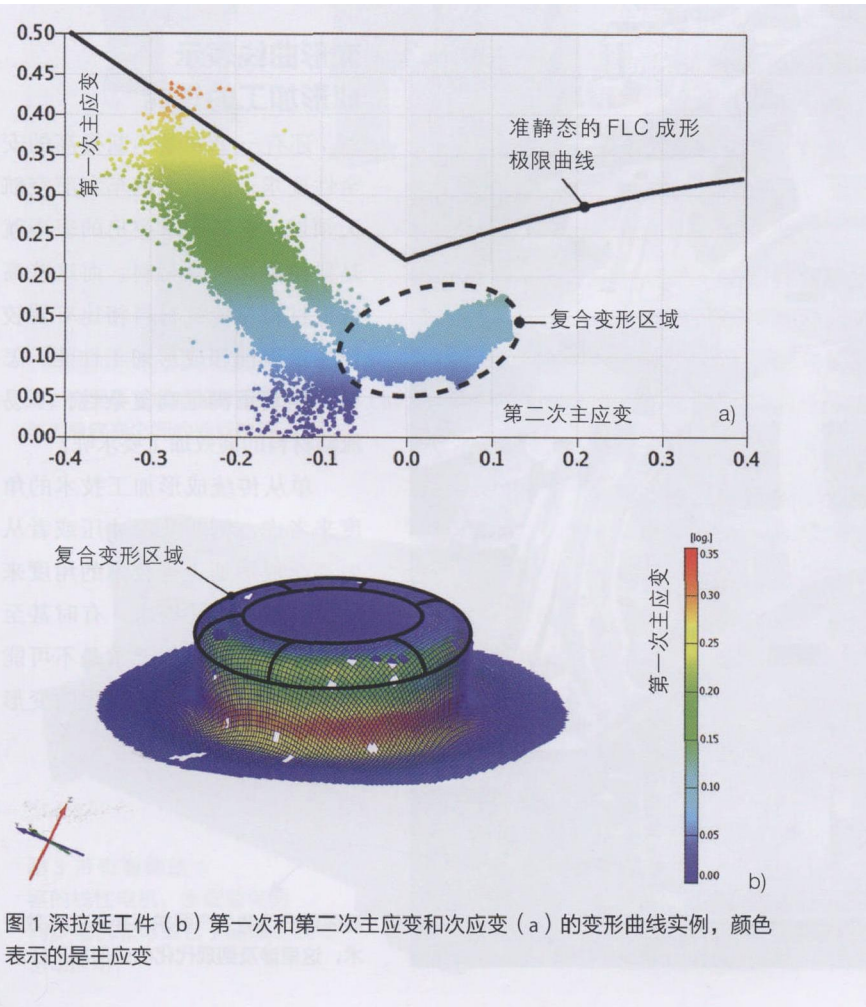


图 1 深拉延工件 (b) 第一次和第二次主应变和次应变 (a) 的变形曲线实例，颜色表示的是主应变

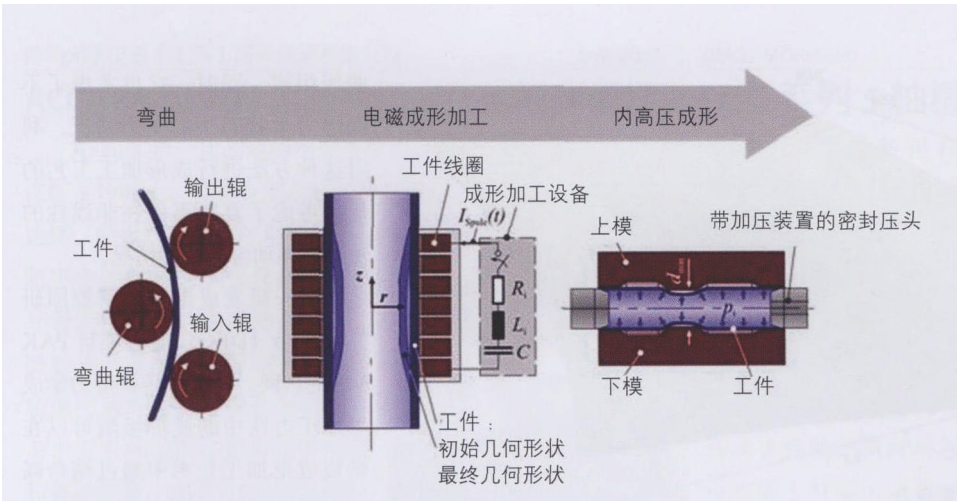


图 3 电磁成形加工工艺与内高压成形加工工艺相结合的可能性

速的局部成形，以及与传统机械相结合的成形加工工艺中使用。例如，电磁成形与内高压成形技术结合就获得了很大的成功。传统钢材内高压成形加工时对管材施加的负载只能使管材向外“膨胀变形”。若要使管材在成形加工时“向内收缩”，则必须采用其他的成形加工技术和方案。此时，电磁成形加工工艺就是很好的选择：它能够实现管材向内、外两个方向的变形。图 3 所示就是这样的成形过程。

可扩展传统成形工艺的成形极限

电磁成形加工技术的另一个应用实例就是深冲压工件的电磁校准：利用设备中安装的深冲压冲头中的电磁线圈进行快速局部成形加工。

在深冲压之后以及在深冲压过程中，采用电磁成形工艺可以得到更好的形状精度，例如精确的半径，或者实现一些小的辅助形状结构。通过图 1 与图 4 的比较可以清楚的看出：把准静态和动态过程结合在一起，能够扩展成形极限。而这种工艺过程相互结合的最大优点是：能够把两种成形加工工艺集成在一套模具中

完成。这就省略了单独的一个成形加工步骤，节约了时间和费用。

但上述工艺过程的集成也是有一定难度的：尽管在工艺过程集成的框架内，电磁成形技术对经济地突破成形极限有着积极的作用和影响，但电磁成形加工的实现主要还是取决于成形加工的模具和工作参数。例如所使用电容器组的功率和容量、线圈的圈数、使用的润滑剂、压紧力和其他参数等。

只有优化才能提高生产能力

通过实验确定参数是非常耗费时间和资金的。因此，在过去

几年里最常使用的是模拟方法进行实验。实验过程都尽可能最准确的进行模拟；工程师们根据模拟得出的数据分析出相应的参数。在分析计算时，他们可以根据静态实验的结果和专业知识得出结论。在德国研究联合会(DFG)促进项目的 PAK 343 框架内，开发出了性能更好、能够自动按照数学标准选择最佳参数的方法：将数学运算的结果与按照理论值模拟的结果进行比较，根据比较的差异得出新的参数；并根据这些新的参数再进行一次模拟。作为理论数据，可以是 CAD 模型中理想工件的几何参数。模拟计算是基于整个成形加工过程中有限元法模拟基础之上的。

原则上有多种数学优化算法可以自动确定最佳参数。在全局法中对所有的变量参数都进行了测定；而在局部法中则能够通过模拟结果与理论值之间的差异确定更加接近实际的参数。通过模拟试验的深入，最终达到差异为负的情况。在数学优化中，差异最小的值被称为“目标值”。也有一些局部优化的算法能够以较少的模拟计算步骤来接近目标数据，

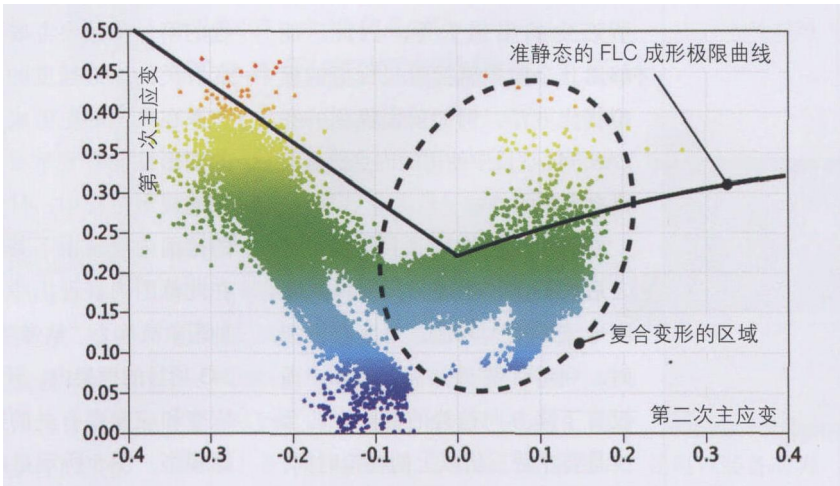


图 4 深冲压和电磁校正技术相结合的变形极限曲线，图中颜色与图 1 中表示的相同，都是第一次主应力的情况

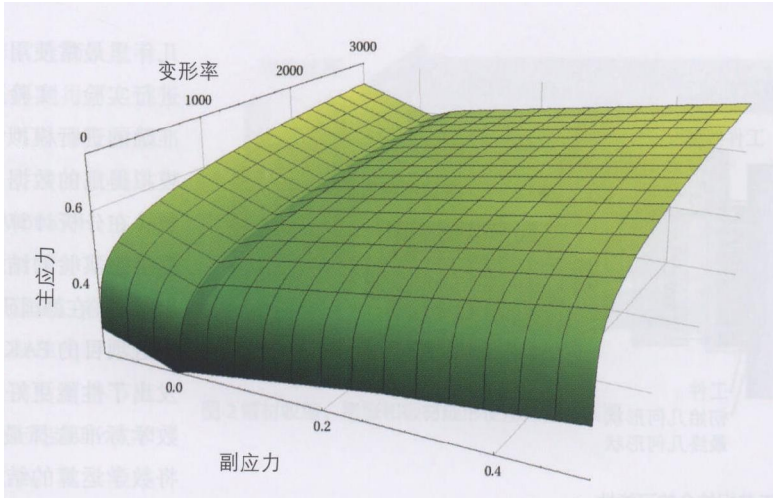


图 5 极限变形面积表示了考虑静力学应力和材料的应变率相关性后的变形能力

确定出最好的参数。通过模拟结果数据的下降方向就可以实现这一点，内点法就是这样的一种方法。

要求进行大量的运算

通过计算机进行的过程模拟存在的问题是：接近目标时的运算量和判断参数的工作量太大。每一次判断都要完成多级成形过程的所有模拟。尤其是电磁成形工艺步骤的模拟运算量更大；因为此时进行的不仅是机械参数的模拟运算，还包括了多个机械与电磁的耦合数据的计算，例如洛伦茨力、工件的流动、钢材发热所产生的电损失等。因此，能够用几个模拟就接近目标值的模拟优化方法，例如前面提到的在PAK 343项目中使用的内点法是非常有意义的。

例如，它在 14 次目标值评估之后就得出电磁校正时所需线圈电流的最大峰值。每一次模拟时，利用计算机只需 20 min。而没有下降方向趋势的优化方法至少是要花费三倍以上的模拟时间，也就是要耗费 27 h 才能达到同样的精度效果。

考虑零件复杂的成形过程

一个重要的问题是：算法是如何考虑成形极限的。在优化方法的算法中，是用辅助条件（常数）的形式来考虑材料的成形极限。在内点法中，是利用限制函数对目标函数的修改来实现的。从而避免了在接近目标函数时因优化计算而超越目标函数，使计算结果变得更糟。在确定限制函数时，需要根据所掌握的科学知识确定不损害材料变形能力的、与材料成形极限平行的最大间距。图 1 所示的成形极限还不足以确定这样的限制函数；因为它通过静力学标准方法确定的，在成形过程的第一步还要考虑与应力和应变有关的成形速度的关系；这一关系在典型的电磁成形中对材料的变形性能有着重要的影响。在快速成形过程中，材料在更广泛的范围内展现出了其延展性，也在此范围内表现出冷作硬化。这种现象被称为“粘弹性”。在 PAK 343 项目的框架内，开发了考虑预应变和应变率有关的数学优化计算模型。图 5 所示的是的极限变形面积。它由一簇在电磁校正时测得的有着不同应变率的变形极限

曲线组成。同时，它也考虑了不同静力学状态下的受力情况。利用这种方法进行成形加工工艺的优化考虑了复杂零件在非线性的负载方向动态变化的情况。

这一研发成果得到了德国研究联合会（DFG）促进项目 PAK 343 的认同，认可了传统静力学成形加工方法中的成形极限可以在常规成形加工技术中通过结合高速成形加工技术而得到扩展。这也就使该技术能够成为复杂结构连接成形加工的基本技术。由轻结构设计带来的几何结构形状更加复杂的零件可以通过传统的成形加工工艺与电磁成形加工工艺相结合而顺利地加工。在深冲压加工工艺中结合电磁成形加工技术，可以明显减少复杂零件深冲压加工的次数。由于电磁成形加工的加工时间一般都在微秒级的范围内，因此，各深冲压步骤因电磁成形加工延长的加工时间可以忽略不计。而且这一技术的应用也缩短了成形加工的总时间，节约了成形加工的生产成本。

利用计算机模拟优化

在成形加工模具设计和工艺流程设计时，计算机支持的优化模拟有着非常大的帮助。这里所说的优化模拟是数学优化方法的应用：超出了传统的、以对话为主导的虚拟设计方法；工程师们对已经掌握的模拟结果进行适当的处理，逐步接近直到得出理想的结果为止。在使用了数学优化方法之后，整个优化过程更加客观和高效。以最快速度完成最合适的成形加工工艺设计是提高企业在激烈地市场竞争中实现新工艺、新技术和提高竞争力的有力保障。[MM]