

温锻精密成形技术及其有限元模拟^{*}

上海交通大学模具 CAD/CAM 国家工程研究中心 (200030) 肖红生^{**} 林新波 张质良
上海汽车公司锻造总厂 吴希林

摘要 温锻精密成形技术是新近发展起来的一种金属塑性加工技术, 由于该工艺在技术、经济效益上的优越性, 当前在制造业特别是汽车工业中得到了广泛应用, 但其成形机理还有待进一步深入研究。本文总结了温锻精密成形技术的研究和应用情况, 分析了建立该成形过程的三维塑性有限元模型的必要性和可行性, 探讨了利用实验研究和数值模拟方法研究这一成形过程的方向和途径, 并运用三维有限元分析了极爪零件的温锻成形工步, 模拟结果可指导该零件的成形工艺和模具设计。

关键词 温锻精密成形 三维有限元法 数值模拟

Warm-forging and its numerical simulation

Shanghai Jiaotong University Xiao Hongsheng Lin Xinbo Zhang Zhiliang
Forging Company of Shanghai Automotive Corporation Wu Xilin

Abstract Warm-forging is a new process used for manufacturing complex high-quality components. It has been used widely in automotive industry for its efficiency and precision, but the mechanism of this process has not been intensively studied. In this paper, the key technologies of the process is discussed, a FEM model of the process is established based on DEFORM-3D, and a typical warm-forging process is analyzed with 3-D FEM. The result of the simulation is instructive to the process parameters' selection and the die design.

Keywords Warm-forging 3-D FEM Numerical simulation

一、温锻精密成形及其在汽车工业中的应用

1. 温锻精密成形

温锻成形是近年来在冷塑性成形基础上迅速发展起来的一种塑性成形新工艺。它的变形温度通常认为是在室温以上、完全再结晶温度以下的温度范围内^[1]。该工艺成形的零件质量好、精度高, 且能成形形状复杂的零件, 近年来已获得广泛应用。

和热模锻相比, 温锻成形件表面不会发生强烈氧化作用, 表面质量好, 尺寸公差小, 甚至可直接成形零件的工作表面, 完全省去后续机加工, 且没有飞边, 节省原材料。冷锻成形虽然可以获得更高的表面质量和尺寸精度, 但冷锻成形对变形材料及零件形状的要求

比较苛刻。对于常用的合金结构钢, 只有在其含碳量低于 0.45% 时才能采用冷锻成形, 且只限于成形形状简单的零件。在多工步冷锻成形中, 各工步之间通常要加入热处理工步, 以消除冷作硬化, 此外合金结构钢在冷成形时变形抗力大, 对压力机吨位及模具材料要求高, 这样势必降低生产效率, 增加生产成本。温锻成形的温度范围介于冷锻和热锻之间, 对于常用的合金结构钢, 其温锻时的屈服应力约为冷锻时的 1/3, 材料的变形能力和室温下相比可提高 2~3 倍^[2], 这样可以减少成形工步, 节约设备投资; 而所成形零件的尺寸精度和表面质量与冷锻成形相当, 若最后增加一个冷整形工步, 则可获得冷锻成形相同的尺寸精度和表面质量。因此温锻成形既突破了冷锻成形中变形材料、零件形状、需增加中间热处理工步及变形抗力的局限性, 又克服了热锻中因强烈氧化作用而引起的表面质量及尺寸精度问题, 具有显著的优越性。

2. 温锻精密成形在汽车工业中的应用

目前世界各国汽车工业之间的竞争日趋激烈, 生产厂家在激烈的市场竞争中, 获胜的前提条件是利用低生

^{*} 上海汽车工业总公司科学发展基金资助项目

^{**} 男, 28岁, 博士研究生

收稿日期: 1999-04-25

产成本生产出高质量的产品,这样对汽车工业中的塑性加工生产提出了更高的要求。厂家必须根据零件的批量及设计要求选择合适的工艺,以降低生产成本。

如前所述,温锻精密成形技术具有显著的优越性,但该工艺需要高精度的专用设备,且对模具结构、模具材料的要求较高,所以只适宜于大批量生产。汽车工业中存在大量形状较复杂的轴对称或旋转对称零件,包括轴径、内星轮、外套、齿轮、极爪、联轴器等。这些锻件受零件材料或零件形状的限制,用单纯的冷锻工艺难以成形;若采用热锻工艺,则原材料及能源的消耗量大,后续机加工量大,由于型面形状复杂,机加工难度高,势必增加生产成本,且切削加工会破坏零件的金属流线结构,降低零件的机械性能。这些锻件的生产批量大,如采用温锻工艺或“温锻+冷锻”综合工艺来生产,则可以充分发挥温锻精密成形的优越性,降低成本,提高质量。因此,温锻精密成形技术近年来在美国、日本、德国等发达国家得到愈来愈广泛的应用,并有逐步取代热锻工艺的趋势。

中国汽车工业经过 40 多年的创业到发展,已经逐步成为中国国民经济带动整个经济增长和结构升级的支柱产业之一。和发达国家相比,我国汽车工业中的温锻精密成形技术还比较落后,对于发达国家一些比较成熟的温锻工艺,也还未能完全消化吸收。为了提高我国汽车工业的温锻技术水平,缩小和发达国家之间的差距,我国金属塑性加工领域的研究人员必须顺应该领域的发展潮流,温锻成形理论和工艺两个方面都亟待展开深入研究。

二、温锻精密成形的关键技术

温锻成形的温度范围介于冷锻和热锻温度范围之间,因而其成形特性方面有区别于冷锻成形和热锻成形的特殊性。为了能更好地掌握这一先进的成形技术的变形机理,充分发挥其优越性,需对这些特殊性进行研究。

1. 变形温度及变形量控制

温锻成形具有优越性的根本原因在于它不同于冷锻和热锻的成形温度,因此,对于各种变形材料,要发挥温锻成形的优势,必须选择最合适的温锻温度,既能充分发挥材料的变形能力,省去中间热处理工步,又能保证零件的尺寸精度,良好的内部组织结构及机械性能。对于汽车工业中常用的碳钢和合金钢,温锻温度大致范围为 650~900℃,其最优变形温度根据材料的含碳量及合金种类确定。

对于高强度低合金钢或合金钢温锻,可以控制材料的变形温度和变形分布,使温锻件的微观结构和机械性能达到预定要求,还可以省去热处理工艺。因此,掌握温锻成形参数对温锻件的微观结构和机械性能的影响关系具有重要意义。在此基础上可建立各参数对微观结构和机械性能的影响模型,指导生产实践。首先通过实验建立变形体的温度分布、冷却速率、应变、应力、应变速率等各参数对成形件的微观结构及机械性能的影响关系,然后建立各种成形条件下的有限元模型,用热、力耦合有限元模拟成形件的变形及冷却过程,利用有限元模拟结果和前述实验得出的影响关系可以预测成形件的微观结构及机械性能,从而可以帮助工艺设计人员选择合适的成形及冷却参数,优化温锻工艺。

2. 润滑技术和润滑剂

润滑是温锻成形中的一个关键技术,良好的润滑系统对工艺的成败起着决定性作用,目前常用的润滑方法可以归为 4 类:(1) 坯料不加润滑剂涂层,工作模具采用油—石墨乳化液润滑或水、油—石墨的混合液润滑;(2) 坯料采用石墨涂层,模具工作表面采用油—石墨乳化液润滑或水、油—石墨的混合液润滑;(3) 坯料采用石墨涂层,模具工作表面采用水—石墨悬浮液或不含石墨的润滑剂润滑;(4) 坯料采用其它涂层(不含石墨),模具工作表面采用不含油—石墨的润滑剂润滑。模具工作部分的材料通常采用耐热工具钢或高速钢。选择模具材料时,考虑的主要因素不是成形温度,而是润滑剂的种类。用水基润滑剂时,不宜采用高速钢,因为高速钢对热应力较敏感且其热传导率太低。出于经济效益和环保两方面考虑,采用无油白色润滑剂是温锻技术的发展趋势,因此耐热工具钢将逐步成为首选温锻模具材料。

3. 模具的受力分析及模具寿命

温锻模具在材料的变形过程中,要经受高的变形抗力及热应力的综合作用,最大变形压力可达 200~250MPa,连续生产时模具温度可达 300~500℃或更高。因此在进行温锻工艺设计时,必须充分考虑模具的受力条件和温度条件,保证模具的强度、硬度和韧性达到生产要求,避免因模具的早期失效而造成的经济损失。

为确定温锻模具工作时的受力情况,可利用有限元法耦合模具的弹性变形及变形体、模具之间的传热过程对温锻过程进行模拟,得出模具的温度及应力分布,从而为选择合适的模具材料、设计合理的模具结构(包括润滑和冷却系统)及尺寸提供依据。

4. 温锻成形缺陷及其消除

塑性裂纹（包括内部开裂和表面开裂）及折叠是限制温锻成形过程的两类主要成形缺陷。金属塑性成形中的塑性断裂是一个复杂的过程，塑性裂纹的出现是变形区的应力、应变、应变速率、温度等场量以及变形材料抵抗塑性断裂的能力共同作用的结果。要研究温锻成形的断裂缺陷，需采用以下基本方法：

一是要选择一个合适的塑性损伤断裂准则用以计量损伤值和判断成形失效（出现裂纹）；二是需要求出塑性损伤断裂准则中所要用到的变形区的应力、应变、应变速率、温度等场量，根据所选用塑性损伤断裂准则中计量塑性损伤值的模型求出损伤值，并和相应材料的塑性损伤门槛值（由实验确定）进行对比，找出变形区内可能出现塑性裂纹的位置，判断是否会出现裂纹。塑性有限元方法很容易求出损伤准则中需要用到场量，且其求解方法是在每一个时间增量步上迭代求解，容易计算损伤积累值，因此，有限元法已成为预测塑性断裂缺陷的有力工具。

对于塑性断裂问题，很多学者进行了这方面的研究工作。该问题的研究目前还处于探索阶段，各研究者采用的塑性损伤断裂理论和实验手段各不相同，得出了不同的结论。Clift 等学者认为只有基于变形体单位体积内的塑性变形功的塑性损伤断裂准则是与实验结果相符且较为通用的塑性损伤准则，而 Sowerby 等认为最大剪应力塑性损伤准则更为合理^[8]。变形体内某一部位的塑性损伤是该部位的材料在变形过程各个阶段的应变速率及各个阶段的应力状态累加的结果。变形材料在变形过程各个阶段的应力状态对材料的塑性损伤起着重要的作用，对于相同的应变值，不同的应力状态对材料的塑性损伤程度不一样。基于变形体单位体积内的塑性变形功的塑性损伤断裂准则没有体现变形过程应力状态的积累；而仅考虑变形体内的应力状态的塑性损伤准则没有计入应变对损伤的作用。要准确地预测变形体内的塑性裂纹，需建立这样一种塑性损伤模型，既要体现应变的积累对塑性损伤值的作用，又要包含应力状态的积累对损伤值的作用，即具有式（1）基本形式：

$$D = \int f(\bar{\sigma}, \sigma_{\max}, \sigma_H, \bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}) d\bar{\epsilon} = C$$

式中 σ_{\max} ——变形质点的最大拉应力
 σ_H ——静水压力

把这样一种模型引入有限元模拟过程，可望能预测不同成形条件下的塑性断裂缺陷，且预测结果和实际成形情况相符。

塑性有限元的模拟结果能直观地体现温锻变形过程各时刻变形体速度场分布及模具型腔的填充情况，因而易于预测折叠缺陷，并可根据模拟结果改进模具参数，消除折叠缺陷。

三、温锻精密成形过程的研究技术路线

上海交通大学塑性成形工程系和上海汽车公司锻造总厂合作承担了上海汽车总公司科学发展基金资助的“汽车零件冷、温锻精密成形工艺与模具研究”项目。在该项目中，将对汽车工业中的典型零件（如图 1 所示）冷、温锻成形过程进行研究，从理论和实践中总结出切合实际生产流程的工艺方案及模具设计最佳方案，并将逐步投入实际生产。

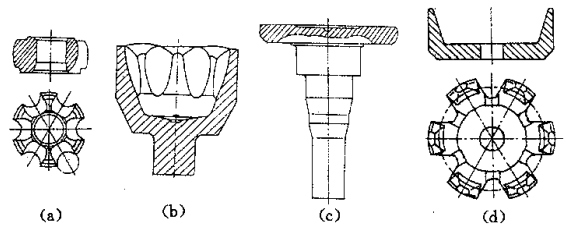


图 1 汽车工业中的典型温锻件

(a) 内星轮 (b) 外套 (c) 轴径 (d) 极爪

本课题组采用试验研究和有限元模拟技术相结合

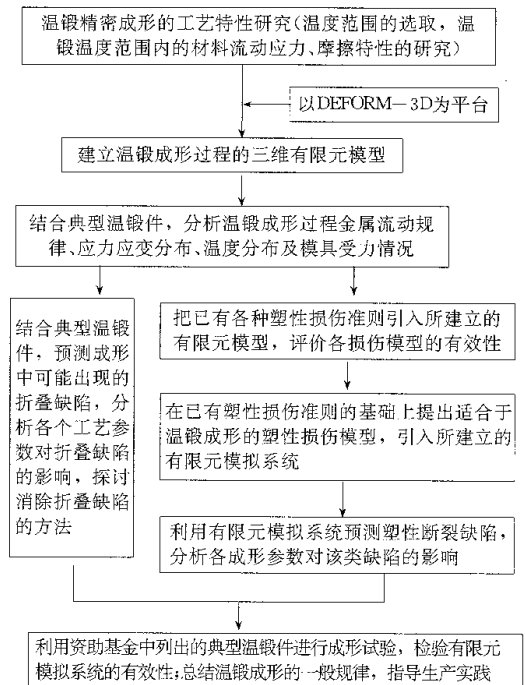


图 2 温锻精密成形过程的研究技术路线

合的方法,对温锻精密成形技术的变形理论进行系统研究,由于塑性有限元理论本身已比较成熟,本课题重点探索温锻温度范围内有别于冷锻和热锻工艺的金属变形规律,研究温锻成形中可能出现的成形缺陷种类及预测和消除缺陷的方法,并利用前述基金项目下列出的几类典型温锻精密成形零件验证温锻成形理论。本研究采用图 2 所示的技术路线。

四、典型汽车零件温锻精密成形过程的有限元模拟

以汽车中的极爪零件(材料为 08F 钢)为例,用三维有限元模拟其温锻成形工步,得出了变形过程中材料的流动情况、变形载荷及模具的受力分布,模拟结果可以为模具结构及其尺寸的选择提供依据。

成形极爪零件的爪部展开零件是生产该零件的关键工步,图 3 给出了两种不同温锻工艺方案(径向挤压和墩挤)的变形网格图,图 4 给出了这两种工艺方案的载荷—行程曲线,从图中曲线可以看出,径向挤压时的最大载荷约为墩挤时的 1/2。本研究中改变这两种工艺的模具结构参数对温锻过程进行模拟,分析得出了两种方案各自的优越性及限制条件,选择了较合适的模具结构参数。模拟结果很好地指导了该零件的物理模拟试验。研究结果提高了该零件实际生产时工艺选择和模具设计的可靠程度。

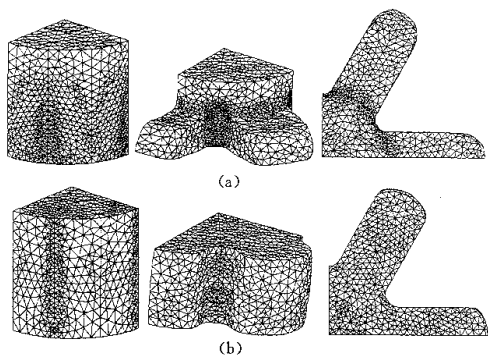


图 3 极爪零件温锻成形工步的有限元网格
(a) 径向挤压 (b) 墩挤

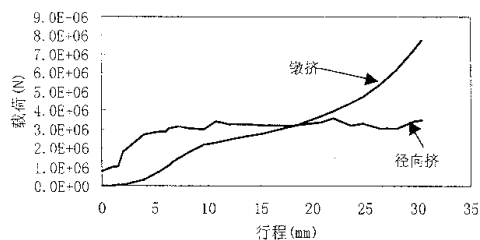


图 4 极爪零件不同温锻工艺的载荷—行程曲线

本研究中耦合了模具的弹性变形进行分析,得出了模具工作部分及凹模预应力圈的受力情况,选择了合适的凸模、凹模及预应力圈材料,并确定了合适的预应力圈层数、尺寸及预紧量。

五、结束语

与热锻及单纯的冷锻成形相比,温锻成形在技术和经济效益上具有显著的优越性。采用温锻或“温锻+冷锻”精密成形工艺生产汽车中大量使用的轴径、内星轮、外套、齿轮、极爪、联轴器零件是汽车工业发展的必然趋势。基于 DEFORM-3D 的温锻精密成形三维塑性有限元模拟系统可以直观地分析坯料的变形和模具的受力情况,是优化温锻成形工艺及模具设计的强有力工具。

参考文献

- 1 张质良. 温塑性成形技术. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1986.
- 2 Ekkehard Korner, et al. Possibilities of warm extrusion in combination with cold extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*, 1992, 35: 451~465
- 3 Shinichiro Fujikawa, et al. Cold-and Warm-forging applications in the Automotive Industry. *Journal of Materials Processing Technology*, 1992, 35: 317~342
- 4 Rajiv Shivpuri. Recent Advances in Cold and Warm Forging Processing modeling Techniques; Selected Examples. *Journal of Materials Processing Technology*, 1994, 46: 253~274
- 5 S Sheljaskov. Current Level of Development of Warm Forging Technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 1994, 46: 3~18
- 6 S Sheljaskov. Warm Forging Technology for manufacturing of Precision Components. In: *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 1. —5th ICTP, Oct. 7~10, 1996, Columbus, Ohio, USA.
- 7 Taylan Altan. Numerical Process Simulation for Tool and Process Design in Bulk Metal Forming. *Annals of the CIRP*, 1996, 45: 599
- 8 S E Clift et al. Fracture Prediction in Plastic Deformation Processes, *Int. J. Mech. Sci.*, 1990, 32 (1): 1~17

更正

2000 年本刊第 1 期封面西安博大有限公司广告右下角西南片区经理: 陈明手机: (029) 901563 应为: 西南片区经理: 陈明手机: (029)9015634, 特此更正。