

汽车转向臂成形工艺模拟优化（下）

肖来斌，陶善虎，陈国强，陈文琳

5. 转向臂制坯辊锻模具设计

辊锻变形的实质就是坯料的延伸变形过程，较锤上拔长具有明显优势，辊锻制坯的任务是采用辊锻工艺锻制供模锻用毛坯。采用辊锻工艺对坯料进行各部分金属重新分配比锤上锻造生产效率要高，劳动条件好，节材效果明显，具有良好的经济效益。

(1) 辊锻道次的确定 首先根据辊锻件图计算出总延伸系数 λ_z ，即

$$\lambda_z = A_0 / A_n$$

式中 A_0 ——原始坯料截面积；

A_n ——辊锻后坯料截面积。

辊锻道次按下式计算

$$n = \lg(\lambda_z) / \lg(\lambda_p)$$

式中 λ_p ——平均延伸系数，通常选取 $\lambda_p = 1.4 \sim 1.6$ 。

经计算本文所优化的转向臂总延伸系数 λ_p 为1.92。按 $\lambda_p = 1.4$ 选取，则 $n = 1.938$ ，故确定辊锻道次为2道次。

(2) 各道次辊锻件图设计 在逐道次进行型槽计算时，都是按相应矩形法计算相应矩形变形（如果是圆形截面则转化为同面积矩形截面来计算）和求出各道次辊锻后的相应变形。按型槽计

算的顺序可以分为两种方法：正算法和逆算法，本文采用逆算法。所谓逆算法就是根据要求最后辊锻出的毛坯截面尺寸，逆辊锻顺序由后往前逐道进行计算。

按照图11最终辊锻毛坯特征，根据型槽相应区段体积相等的原则进行金属体积分配，保证制坯后毛坯在进入下一道次辊锻时，有较好的对中性 and 辊锻稳定性；对于相邻两区段的过渡区间，是变形较为复杂的部位，在满足体积分配的原则上，应简化制坯型槽。按照上面确定的型槽特征，设计出第一道辊锻件图，如图12所示。

(3) 辊锻模具设计 确定各工步槽系后，在辊锻模具设计中需要考虑前滑值对零件的影响。前滑值的理论计算复杂，设计中可根据经验选取。对于等截面区段一般取4%~6%；在过渡区段前滑值与辊锻的类型有关，在增压下辊锻时，前滑值较大，一般取6%~12%；在减压下辊锻时一般取2%~4%。各个道次辊锻型槽具体参数和尺寸设计是根据文献中有关圆—椭圆—圆型槽系的两道次辊锻的型槽设计计算公式计算出来的。最后计算出模具圆弧长，并换算成相应中心角后，最终设计出来的第一、第二道的

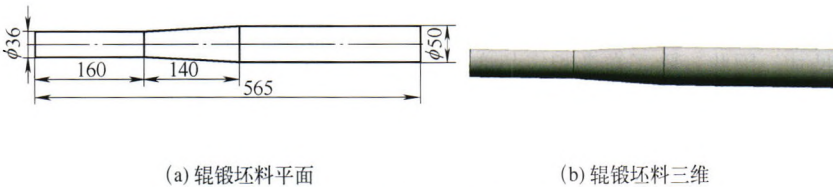


图11 辊锻毛坯

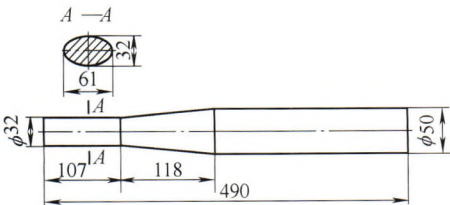


图12 第一道次各截面

辊锻模具，如图13、图14所示。

(4) 模具材料选择 辊锻时，模具要承受着较大压力，同时又是在反复加热和冷却条件下工作，模具受热温度可达300~500℃。模具内部存在着交变应力作用，易形成热疲劳裂纹、龟裂等，故要求模具钢硬度较高，否则模块会产生压塌变形，型槽表面具有较高硬度和耐磨性，辊锻出的坯达不到辊锻件要求，模具寿命也会降低。本模具材料采用5CrNiMo合金模具钢，热处理硬度为44~48HRC。根据以上方案设计出第二道次辊锻模，如图15所示，现已应用于生产上。

(5) 辊锻过程存在问题 其一是辊锻中坯料长度波动问题。辊锻技术是一项高效精确的制坯技术，但由于辊锻时金属可以沿两个方向自由流动，其流动行为有不确定性，坯料长度较长时，控制其长度方向的误差有很大难度。同时由于在辊锻工艺中存在前滑的影响，前滑值对锻件长度尺寸有着直接的影响，而目前还不能准确地计算出前滑值，前滑值上下波动影响着辊锻件的纵向尺寸。因此，除了在各相应长度尺寸进行补偿外，更主要的还是在试验中不断调整，从而得到理想的模具型槽长度。

其二是合理分配道次延伸系数问题。由于本文中坯料在辊锻之后还要进行弯曲变形，然后才是终锻成形，因此要求辊锻制得坯料圆滑过渡，不可以出现哪怕很小的飞边，如果出现飞边，则在终锻成形时会产生折叠缺陷。因此，文中对辊锻各道次的延伸系数分配及每道次模具过渡部分

型槽形状都要求设计合理。

其三是辊距调整问题。调整辊距除了保证坯料最终尺寸外，还要保证辊锻各道次延伸系数，辊模间隙同样会影响着前滑值大小。本文是在不断对工艺进行生产试验的基础上得到辊锻模之间的最佳间隙为4mm。

6. 模锻成形数值模拟

转向臂挤压成形过程属于塑性成形中大变形问题。变形过程中，毛坯形状变化较大，相应其有限元网格也要不断变化，准确描述毛坯在变形各阶段的几何形状，使模拟计算能保证一定精度并顺利进行。

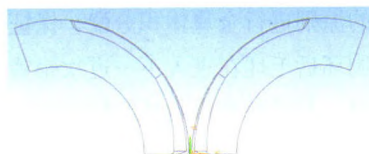


图13 第一道次辊锻模具

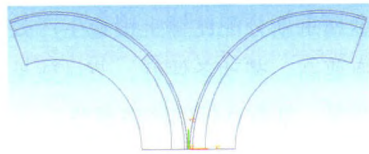


图14 第二道次辊锻模具



图15 辊锻模具

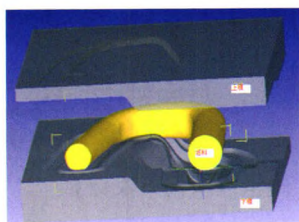
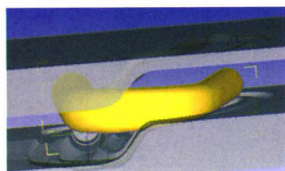
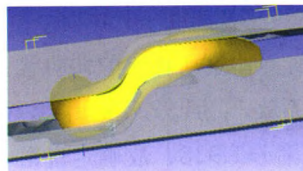


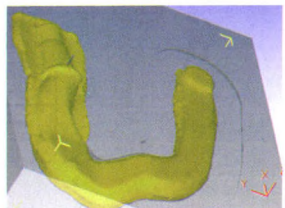
图16 终锻模



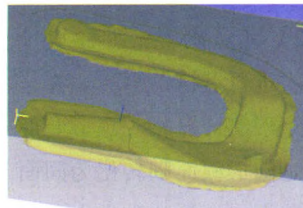
(a) 变形开始



(b) 弯曲变形



(c) 两端成形



(d) 模具闭合

图17 转向臂锻造成形过程

同时本文通过模拟还发现在上模下行过程中，坯料发生错移，导致坯料向外侧有少量偏移。经生产实际证明，由于在用摩擦压力机模锻过程中上模下行速度较大，短时间内坯料偏移量较小，并不会影响锻件成形质量。

(2) 锻件应力场、应变场分析 图18、图19分别为最终成形得到的转向臂件上应变应力分布。从图20中可以看出锻件飞边部分应变值较大，分布较均匀。图上锻件右半段应变值较左段大，是因为坯料锻造过程中弯曲变形主要发生在直径较小的右端，锻件左端弯曲程度则较小。从图19应力分布上可看出，坯料上与锻模飞边桥部接触部分应力最大，这是飞边桥在锻造变形过程中阻碍金属向外流动的结果，结合应变场可发现，该部分金属变形量也非常大。

(3) 终锻温度场分析 锻造成形过程中，一方面随着上模压下量增加，金属不断进入型腔，变形金属与模具间接触面积逐渐增大，由于坯料与模具间存在着温度差，坯料部分温度沿与模具接触面传递给模具，使得坯料温度降低。另一方面，坯料在外力作用下发生塑性变形同时产生塑性功，这部分能量90%以热量的形式被金属吸收，从而使得坯料温度升高。所以，在整个锻造过程中，坯料会发生温度的热力耦合效应。

图20是锻造完毕锻件温度分布。可以看出，坯料与模具相接触部位由于热扩散时间长，温度降低较多。在飞边部分由于飞边金属较薄，且变形量较大，变形

功转化温度较多，温度相对于初始加热温度变化较小，甚至略有上升。锻件心部温度也较高，虽然心部金属变形较少，但是由于心部金属热量散失需要先传递到工件表面，再与模具之间进行换热，所以其热量散失较少，温度变化不大。

(4) 转向臂成形工艺改进前后模拟结果比较 针对转向臂成形工艺改进前后的工艺过程进

行了数值模拟，比较发现其在成形载荷、锻件飞边体积等方面存在着差异。图21为转向臂成形工艺改进前后的载荷—行程曲线，比较发现工艺改进后锻件成形载荷大幅降低，不仅节约了设备成本，且可以有效提高模具的寿命。图22中a、b两图分别为工艺改进前后得到锻件，可看出采用原工艺方式模拟出的锻件飞边较宽，而工艺改进后模锻得到锻件

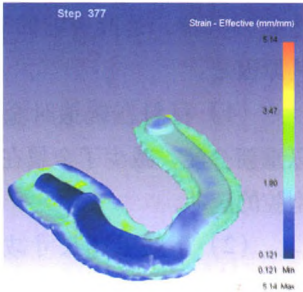


图18 应变分布

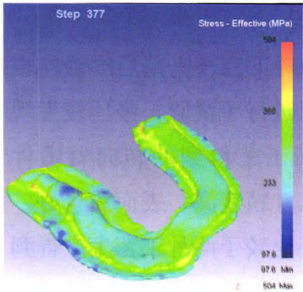


图19 应力分布

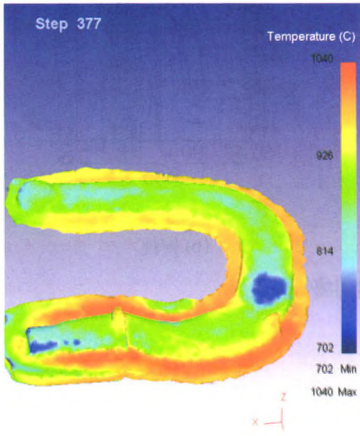
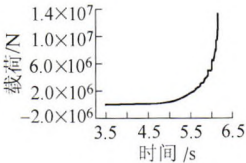
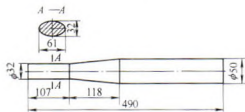


图20 终锻温度场分布

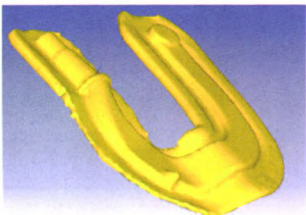


(a) 工艺改进前

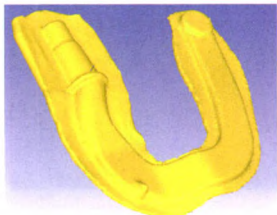


(b) 工艺改进后

图21 锻造成形过程载荷-行程曲线



(a) 工艺改进前



(b) 工艺改进后

图22 最终成形锻件

飞边则非常小，而成形质量则跟原工艺一样，表明采用辊锻—模锻新工艺能够更好利用原材料，提高经济效益。

7. 验证

数值模拟为实际生产提供了良好的指导作用，但仍需采用实际生产试验来验证模拟结果的可靠性。本文生产是在合肥汽车锻件有限责任公司进行的。根据锻件图和现有工艺设计的模具如图23所示。

针对工艺改进前后终锻件成形情况进行了试验，经比较发现采用新工艺得到的转向臂锻件产品尺寸精度高，表面质量好。同时还比较了两种工艺生产得到

的锻件飞边状况，改进前后终锻模相同，两种方法形成的飞边，如图24所示。改进前飞边分布不均匀，飞边大、厚，改进后飞边明显减小，下料毛坯由原来 $\phi 50\text{mm} \times 475\text{mm}$ 减小为 $\phi 50\text{mm} \times 454\text{mm}$ ，最后减小到 $\phi 50\text{mm} \times 445\text{mm}$ ，材料利用率提高到82%。

经生产实际验证，改进后同样模具结构，同样的模具材料和热处理工艺，每副模具平均寿命达到5960件，是改进前的3倍。其原因是：

(1) 材料在辊锻时金属得以重新分配，减少了金属在终锻型腔的流动。

(2) 下料毛坯尺寸减小，

在终锻时形成飞边小，减少了金属向飞边流动。按照塑性成形规律，金属在流向飞边时温度低，飞边桥部厚度小，流动阻力急剧增大，此时是模具产生磨损的主要时段，最终造成模具寿命低。

(3) 终锻时形成飞边小，成形力小，模具承受打击力小，模具寿命提高。

另外，工艺改进还带来了附加效益，一方面，由于坯料下料长度减小，缩短了中频感应加热时间，提高了生产效率，节约了电能；另一方面，设备吨位减小，也降低了能耗，实现了节能减排的社会效益。

8. 结论与展望

(1) 坯料设计时考虑到转向臂大截面端充填所需金属较多，因此设计该部分坯料直径较大，从模拟结果可看出该部分飞边较大，可通过进一步的坯料优化及修改终锻模具来改善。

(2) 辊锻模由于不断升温、降温，内部存在着交变应力的作用，易形成热疲劳裂纹、龟裂等缺陷；而转向臂终锻成形过程中载荷大，成形温度高，终锻模具损耗也较大，因此有必要对辊锻及终锻模具寿命进行分析，并研究应对策略。目前，我们对终锻模具采用新的焊接材料和工艺，在延长模具寿命方面取得了较好效果。（全文完）

作者简介：肖来斌、陶善虎，合肥汽车锻件有限公司；陈国强、陈文琳，合肥工业大学材料科学与工程学院。

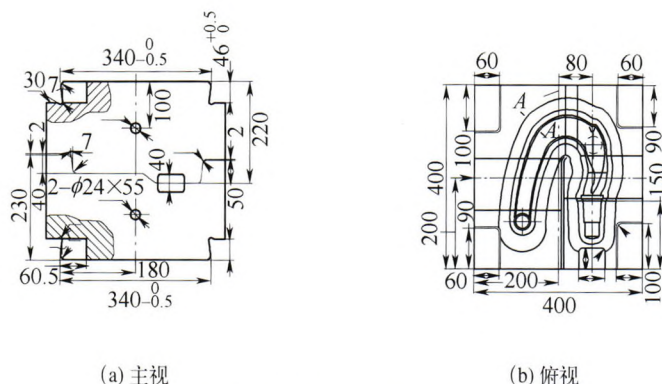


图23 汽车转向臂的终锻模具

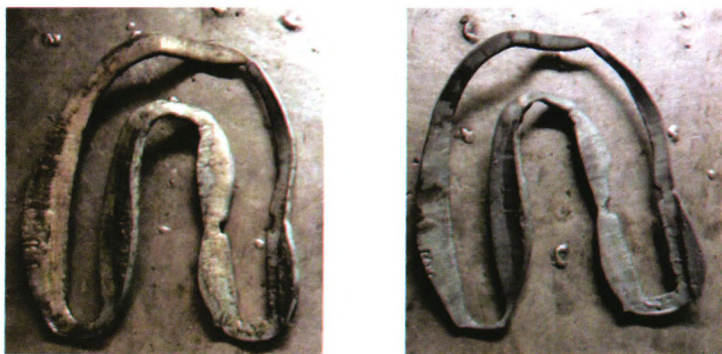


图24 改进前后飞边对比