飞壳内棘齿冷挤压工艺数值模拟研究

河海大学（江苏常州 213022） 苏冬云 朱灯林 马 骏 吕 蕊

飞壳是自行车传动系统中的重要部件，常用热挤压和温挤压进行成形。采用冷挤压成形的飞壳精度高，可以提高原材料利用率和生产率，降低能耗。但通常制定冷挤压工艺时主要根据经验和试验方法来确定最终的工艺方案、中间毛坯尺寸和模具设计，存在试验时间长、效率低、费用高、在实验过程中得到的工艺信息少等缺陷，使冷挤压成形工艺难以得到广泛的应用。针对这个问题，本文采用计算机模拟技术对自行车飞壳内棘齿的挤压成形工艺方案、毛坯尺寸的确定、模具结构设计等进行了研究，分析了冷挤压成形过程的应力应变分布和金属的流动，获得飞壳内棘齿成形的冷挤压工艺方案以及合理的毛坯尺寸和模具结构参数。采用计算机模拟技术可以在计算机构造的虚拟环境中对各种工艺条件下的成形过程进行分析和仿真，成形的工艺条件根据需要可以进行及时的调整，而不需要进行坯料和模具的加工。模拟结果不仅能直观地反映冷挤压的整个成形过程和最终结果，而且可以得到成形过程中的应力应变的分布、金属的流动曲线等大量信息。

1. 自行车飞壳的结构分析

自行车飞壳冷挤压件图如图 1a 所示，图 1a 中圆圈内的棘齿形状和尺寸见图 1b，图 1c 为飞壳毛坯图。飞壳的内棘齿共有 16 个齿，呈不对称分布。齿部局部成形时的变形条件较为恶劣，坯料的润滑层极易受到破坏而失去润滑作用；在成形时齿形顶部充填不满，齿形两端易出现塌角。为了使飞壳内棘齿在冷挤压成形后不需进一步精加工，必须采用合理的工艺方案、选用合适的毛坯尺寸与模具结构和参数。

2. 有限元模拟方案的拟定

（1）工艺方案的拟定 为保证飞壳内棘齿的齿顶和齿形端部充填饱满，无塌角缺陷，制定两种仿真实验方案如下：①如图 2a 所示，在齿部成形区的下方放置一垫圈，增加挤压过程中金属向下流动的阻力，以迫使其向飞壳的齿部流动。②如图 2b 所示，在齿部成形区的下方不放垫圈，通过调整毛坯的尺寸来得到无缺陷的成形零件。

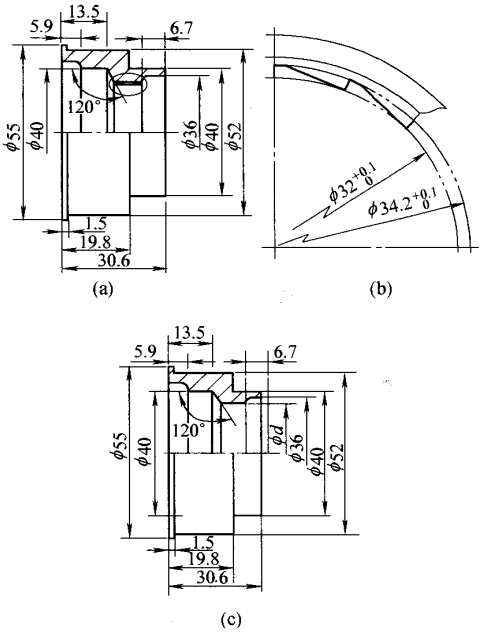


图 1 自行车飞壳冷挤压件图及毛坯图

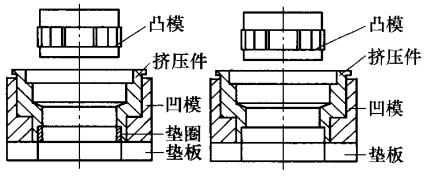


图 2 飞壳的内棘齿成形方案示意图

模拟过程中的凸模结构如图 3 所示。为了对成形部位下部的金属加以约束，使可能产生的材料径向堆积现象减小到最低，在凸模的前端设置导向杆，导引部分的尺寸和齿根一致。为防止导引部分将坯料内表面拉伤，导引前端圆角半径为 $r1$mm。凸模工作刃带的前端倒角为 30°。齿形面工作刃带的宽度为 7mm。

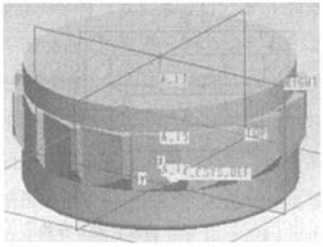


图3 飞壳的内棘齿冷挤压凸模

(2) 模拟参数选择 模拟的挤压件形状及毛坯尺寸如图1，根据等体积设计原则，计算得到齿部成形区的坯料内径为 $d=33.2$mm。为了模拟尺寸 d 对齿部充填的影响，分别取 $d=33.2$mm、32.6mm 对成形过程进行模拟。飞壳的冷挤压毛坯由温挤成形得到后，通过退火，使齿坯充分软化，在磷化、皂化润滑后，再用油质二硫化钼进行一次补充润滑。在成形模拟中，取材料为10钢，材料塑性变形极限为 $\sigma_s=206$MPa。其他模拟参数详见下表。

表 模拟参数表

名 称	数值
齿数	16
齿全高/mm	8.7
挤压温度/℃	20
摩擦系数	0.05（服从剪切摩擦）
挤压速度/mm·s^{-1}	0.5
每步行程/mm	0.05
单元类型	四面体单元
齿部成形区坯料内径/mm	33.2～32.6
细分网格密度	0.4

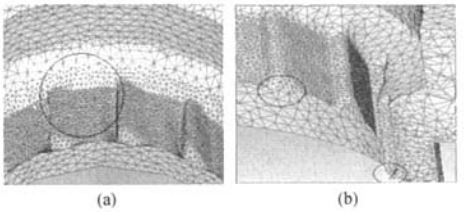
(3) 网格划分 由于内棘齿的几何形状的非对称性，必须取整个零件进行三维有限元模拟。为了兼顾计算精度和效率，对坯料采用四面体单元进行划分，并对齿部成形区域进行网格局部细分（如图4所示），局部细分的最小网格为0.4mm，共划分单元136 385个，节点31 725个。

3. 模拟结果分析

在以上初始条件的基础上，采用三维有限元数值模拟软件 Deform－3D 对以上两种方案的塑性成形过程进行了数值模拟。

(1) 应力应变及金属流动分析 图5是毛坯内径分别为33.2mm和32.6mm时方案A的模拟结果。从图5a看出，当采用成形方案A、内径 $d=33.2$mm 时，齿的端部明显塌角，齿顶圆角较大，由于缺料充填不饱满，齿形不完整。当 $d=32.6$mm 时，齿顶的成形得到了明显改善，在齿成形区中间部位，齿形成形饱满，效果较好，但是在齿的上端部具有明显的塌角，下端部有叠折，如图5b所示。

图4 坯料有限元网格划分

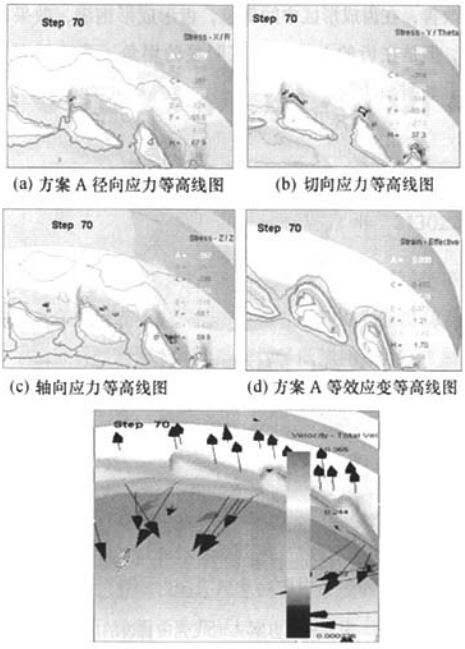


(a) (b)

图5 采用成形方案A时飞壳内棘齿的成形

图6a～6e为方案A、$d=32.6$mm 时挤压过程中step70的应力等高线图。从图中可看出，在齿的顶部径向应力较大，变化密度也比较大，金属比较易于径向流动，飞壳的齿部容易充满。但在齿的顶部也有一定的拉应力，把已变形的少量金属往下拉，最终形成棘齿顶部的圆角。在成形区下部，坯料内部表面径向应力和切向应力较大，金属往中心流动，这也是造成棘齿下部折叠的原因。对照图6d的等效应变等高线图和图6e的金属流动速度矢量图也可以发现同样的金属流动特点。由图6e的金属流动速度矢量可知，在模具接触部分，金属向径向流动和向上流动，在变形区下部，金属径向流动为主，并最终形成折叠。从以上分析可以看出，尽管方案A通过加垫圈可以使金属向齿部流动，但同时也会使模具下部的金属易于径向流动，从而形成齿形下部折叠。

图7是毛坯直径分别为33.2mm和32.6mm时方案B的模拟结果。从图7a可以看出，当采用成形方案B、内径 $d=33.2$mm 时，齿的端部塌角更明显，齿顶充填不满，齿形明显不完整（见图中黑色圆圈中的齿成形部分）。当 $d=32.6$mm，齿顶的成形较好，齿根塌角较小，图7b是工艺方案B挤压终了时的齿成形网格效果图。从图中可看出整个齿形饱满平滑，无折叠缺陷。经测量，沿轴向齿顶齿根的高度分布如图8b所示，基本满足了挤压件的精度要求。图8a是棘齿成形后的简图。

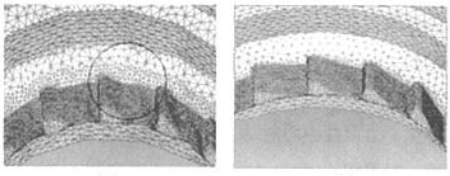


(a) 方案 A 径向应力等高线图　(b) 切向应力等高线图

(c) 轴向应力等高线图　(d) 方案 A 等效应变等高线图

(c) 方案 A 金属流动速度矢量图

图 6　采用成形方案 A 时飞壳内棘齿成形的应力、应变分布



(a)　(b)

图 7　采用成形方案 B 时飞壳内棘齿的成形

从图 8b 可看出，齿顶直径尺寸比较均匀，满足尺寸 $32^{+0.1}_{0}$mm；齿根直径尺寸除了在下端部有一点变小外（为 33.8mm），其他部位的尺寸也都满足尺寸 $34.2^{+0.1}_{0}$mm，半径分布曲线如图 8b 所示。

图 9a ~ 9e 为方案 B、d = 32.6mm 时挤压过程中 step70 的应力等高线图。从图中可看出，金属变形区域处于三向压应力状态，并且由变形区的外圈向中心部分压应力逐渐变大。在和模具接触部分，在齿的顶部径向应力较大，变化密度也比较大，金属比较易于径向流动，飞壳的齿部容易充满。和方案 A 相比发现，在成形区轴向应力明显增大，金属在径向流动的同时也会向下流动，从而减轻了坯料成形区下部内表面的径向应力，避免了成形区下部折叠的产生。对照图 9d 的等效应变

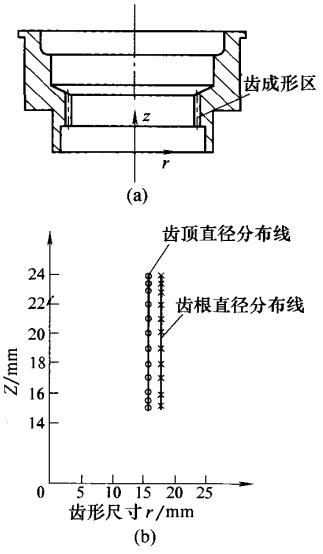
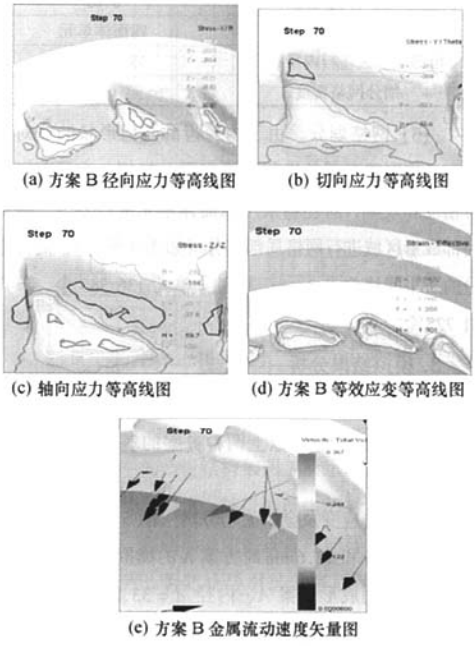


图 8　沿轴向齿顶的高度分布

等高线图和图 9e 方案 B 金属流动速度矢量图也可以发现在成形过程中金属主要向径向流动，同时一部分向下流动。从以上分析可以看出，尽管方案 B 在齿部成形区的下方不加垫圈，由于模具结构和尺寸以及坯料尺寸比较合理，也可以使金属向齿部流动，齿顶成形饱满，齿根塌角小，成形效果较好。



(a) 方案 B 径向应力等高线图　(b) 切向应力等高线图

(c) 轴向应力等高线图　(d) 方案 B 等效应变等高线图

(c) 方案 B 金属流动速度矢量图

图 9　采用成形方案 B 时飞壳内齿成形的应力、应变分布

(2) 挤压力分析　我们来分析方案 A 和方案 B 成形过程中 $d = 32.6$mm 的载荷—行程曲线图（图 10）。从图中可看出，凸模挤压力随时间的变化大致分为两个阶段：第一阶段为急剧上升阶段，这一阶段毛坯在凸模压力下逐渐屈服，变形区越来越大；第二阶段是挤压一段时间后，挤压力趋于稳定的阶段，达到稳定塑性流动阶段。对于方案 A，载荷在整个毛坯变形过程中一直处于最大值约 13kN，而方案 B，随着凸模下行，载荷不断减小，呈下降趋势，其载荷峰值也较小，约为 10kN；因此，总的来看，方案 A 模具承受的载荷要大于方案 B。

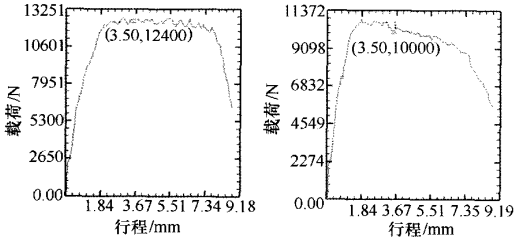


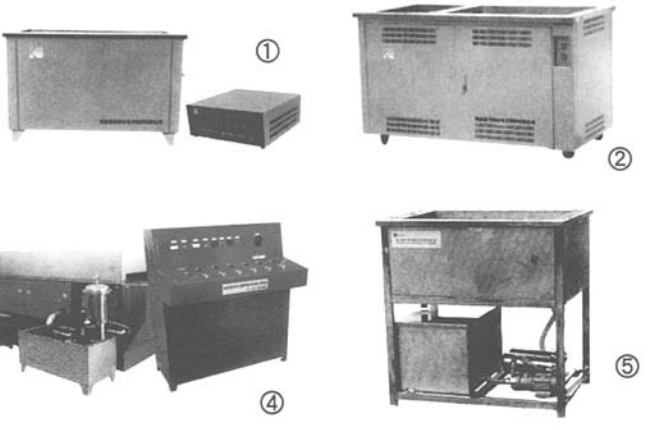
图 10　$d = 32.6$mm 时，载荷—行程曲线

综上所述，尽管方案 A 加了垫圈使得齿部易于成形，但在成形区下部易产生折叠，从模具设计角度来看，结构复杂，模具承受载荷大，降低了模具的使用寿命。而方案 B 在 $d = 32.6$mm 时齿部成形饱满，效果好，齿的端部塌角较小，基本满足了挤压件的精度要求，模具结构相对比较简单，模具承受载荷小，模具寿命长，是一个比较好的方案。

4. 结语

本文针对自行车飞壳内棘齿的冷挤压成形，采用 DEFORM－3D 软件对两种成形方案和毛坯参数进行了数值模拟分析。经分析比较确定在 $d = 32.6$mm 时方案 B 能保证飞壳内棘齿顶部成形饱满，在端部塌角较小，能基本满足挤压件的精度要求，模具结构相对比较简单，模具承受载荷小，寿命长。采用计算机模拟研究冷挤压内斜齿的成形，减少了模具试制和工艺调试、缩短产品设计周期、提前预测了折叠及未充满等缺陷，为工艺参数的选择和模具设计提供了详细的技术信息，为该产品的实际生产提供了一定的理论基础。

（收稿日期：20060620）

科尔超声
专业品质来自执着敬业　客户信赖来自品质服务
张家港市科尔超声电子有限公司
KEER
①普通型超声波清洗机
②KE—C系列二工位清洗机
③KE—8060B手动多槽式清洗机
④KE—B系列多功能轴承和机械零部件清洗系统
⑤轴承清洗机（带过滤）

本公司产品利用超声波发生器产生的高频超声震荡信号，通过换能器转换成机械震荡进而传播到介质清洗溶液中（水剂、油剂、溶剂）产生空化效应，使介质中正负压区产生数以万计的细胞循环“爆破”。正是这种“爆破”力冲击工件，令工件表面、缝隙、孔洞的污垢迅速剥离而达到清洁目的。利用超声波清洗产品质量稳定、速度快、品质高，且完全不损伤产品表面，对于人工难以处理的，甚至带有各形状小孔、弯孔和盲孔的，效果尤为理想！
现这一技术正日益渗透到各行各业。公司以“质量是生命、服务靠信誉、用户是上帝”的经营宗旨，一如既往地以优良的产品，快捷周到的售后服务，合理的价格，诚挚忠实地与新老客户合作。
地　址：张家港市欧洲工业园区　邮编：215618　销售热线：0512-58598880　电话：0512-58160663
传　真：0512-58161680　网址：//www.zjgkeer.com　E-mail：zjgkeer@yahoo.com.cn
◆广告查询编号：8032