数值仿真在标准椭圆形封头拉深成形中的应用

杭州中能汽轮动力有限公司 （浙江 310018） 王 珂 钱小东 裘小裕 俞志俊

摘要：利用有限元技术可以模拟冲压过程、预测封头的变形量，而后通过应变与马氏体相变之间的关系即可了解马氏体的分布情况，对于预防封头失效具有一定意义，但过程复杂。本文通过VB编制程序，可以根据封头冲压基本参数自动生成ANSYS LS-DYNA可识别的APDL语言，编译模拟冲压过程所需的命令流，大幅提高工作效率。

冷冲压成形具有材料利用率高、尺寸稳定性好及生产效率高等优点，是应用最为广泛的加工方式之一。而奥氏体不锈钢由于其良好的加工性能，被广泛应用于封头的冲压成形。但是，奥氏体不锈钢封头失效的案例屡有发生，其使用安全也逐渐被人们所关注。

封头冲压属于拉深成形，加工过程中伴随大变形，类似S30408等亚稳态奥氏体不锈钢材料，会随应变增大诱发马氏体相变。有研究指出，马氏体相变是造成封头应力腐蚀开裂的主要原因之一。GB150等国内外标准对封头冷冲压应变量做出了相应规定。下面介绍在标准椭圆形封头拉深成形中应用数值仿真的方法。

1. 封头拉深工艺

首先需要对板料进行复验，与相关标准对照合格后，利用剪圆机等设备将其加工成所需规格并进行冲压，封头成形后，需要对直边段以及坡口进行加工，最后验收入库。

封头冷冲压设备由4部分主要部件组成，即凸模、凹模、压边圈以及支撑架。冲压的具体步骤如下：①将板料对中定位后，安放在凹模上。②对压边圈施加载荷，提供压紧力。③使凸模向下移动完成拉深过程。④松开压边圈，使凸模向上移动，利用支撑架抬起封头。⑤为保证封头形状完整，所用板料尺寸会略大于实际所需直径，故冲压完成时封头直边段高度会略大于标准值，需要进行切边。⑥在封头与筒体焊接处开坡口。⑦对成品进行无损检测、表面酸洗以及抛光等工序。

2. 建模方法

封头拉深过程中伴随着大变形、几何非线性以及材料非线性等，且具有多种应力状态，包括双向受拉以及一向受拉、一向受压，板料不同位置的应力三轴度也不同，故封头成形是一个复杂的非线性问题。ANSYS LS-DYNA是非线性动力分析软件，对材料非线性、几何非线性等具有完善的求解能力。为准确地分析冲压过程对封头造成的影响，采用ANSYS LS-DYNA对整个过程进行数值仿真。

（1）几何模型：封头冲压设备如图1所示，冲压过程中，主要通过凸模、凹模对板料施加载荷，使其变形至规定形状。当板料直径与封头公称直径之差大于45倍封头厚度时，还需要增加

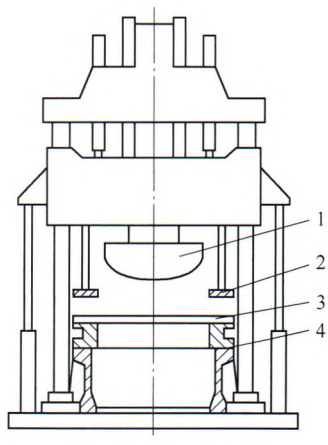


图1 冲压设备示意图

1.凸模 2.压边圈 3.板料 4.凹模

压边圈，以防板料出现皱褶。因此，可将封头冲压简化为凸模、凹模、板料以及压边圈四个部分相互作用的过程，需在有限元模型中建立起对应部件。

冲压设备以及板料均为中心对称结构，而板料在冲压过程中受到的载荷与约束也均对称，故建立1/4模降低计算量。采用实体单元对模具、压边圈以及板料构建三维模型，如图2所示。

（2）材料模型：由于成形过程中，模具以及压边圈变形量极小，可将其视做刚体处理。冲压过程中，凹模保持固定不动，需限制其所有方向的自由度。凸模在垂直方向上位移对板料进行冲压，故约束除*Y*方向外的所有自由度。压边圈则是通过施加载荷的方式防止褶皱的产生，在*Y*轴方向上并不固定，可与凸模做相同处理。

板料采用双线性等向强化模型，需要输入材料的密度、杨氏模量、屈服强度、切向模量以及泊松比。

（3）网格划分：采用8节点的Solid 164单元对模型进行离散，通过扫略的方式划出规整的六面体网格，如图3所示。由于将模具与压边圈视作刚体，其网格敏感性较低，可采用较为稀疏的网格进行划分。板料则是分析的重点，网格较之模具应该更为细密，沿厚度方向需要划分多重网格，以准确反映板料厚度的变化情况。研究表明，封头直边段附近的等效塑性变形最高，需对直边段附近的网格做加密处理，如图4所示。

（4）接触设置及边界条件：成形过程中，板料分别与凸模、凹模及压边圈接触，需要建立相应的三对接触。板料与模具之间具有摩擦力，根据库伦摩擦模型，当材料表面所承受的力超过临界剪切应力时，材料会发生切向运动，因此，需在模型中定义摩擦系数。实际成形过程中，板料会涂抹润滑液以减小摩擦，在润滑区域，可取摩擦系数为0.13。

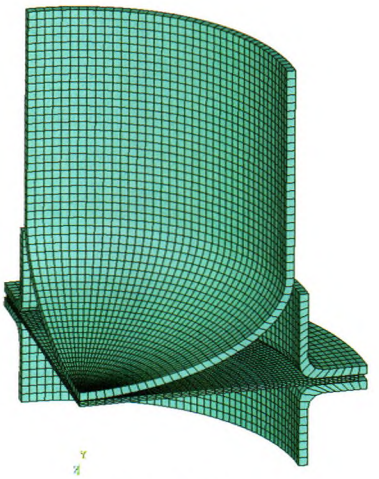


图3　网格划分

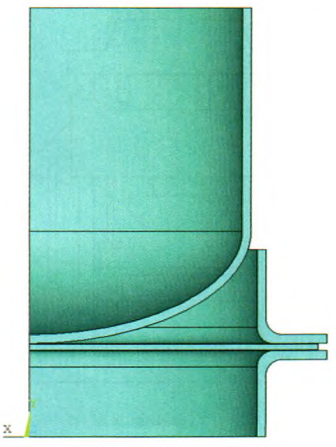


图2 封头几何模型

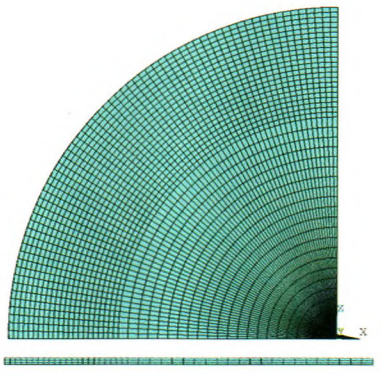


图4 板料的网格

由于采用了1/4模型，板料两个对称面上需要施加对称约束。压边圈受到*Y*轴负方向的载荷作用，从而防止褶皱的产生，需在质心处施加合适大小的压边力。凸模则需定义其随时间的位移，通过控制位移来完成冲压过程。步长以及步数的控制要适当，冲压速度不宜过快。

3. 命令生成程序

（1）设计思路：有限元预测结果虽然可以较为准确地反映真实的冲压过程，但是根据封头规格不同，所用材料不同以及冲压条件不同等，每次都需建立新的有限元模型，较为繁琐。利用APDL语言可以对建模过程进行参数化，即通过定义冲压关键参数，完成模型从建立几何体到选择求解器求解的过程。

通过VB编制可视化人机交互界面则可进一步简化操作、提高工作效率。操作者本身无需精通有限元，可通过输入封头规格、材料性能以及冲压条件等规定参数，得到用于封头冲压成形数值仿真的命令流，如图5所示。而后，将编译完成的内容输入有限

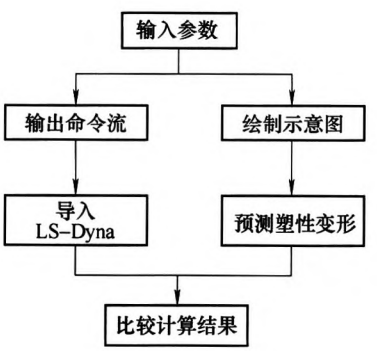


图5 程序设计思路

元即可进行运算。

（2）界面开发：程序主界面较为简洁，分为设置参数、绘制示意图、预测塑性变形以及显示命令流四部分，如图6所示。当输入参数并点击确认后，示意图上会标明主要的冲压参数，塑性变形预测区则会依据公式计算预测值，命令流显示区域则会显示最终的编译结果。

界面中提供了中国GB150标准、美国ASME标准以及相关文献中对于封头成形塑性变形的计算公式，由于三种公式代表的物理意义不同，其计算结果可能会有较大差别。中国公式表示封头经线方向的平均纤维伸长率，而欧美公式则表示板料边缘环向瞬时压缩塑性变形的平均值，第三个公式代表封头在成形过程中累积的等效塑性变形，与封头加载历史有关。

点击“另存为”菜单可输出命令流到指定路径，将其导入LS-DYNA即可进行冲压过程的数值仿真。

（3）计算结果：图7所示为封头冲压数值仿真的实例，左侧为冲压模型，右侧为模拟结果。可以看到，封头从顶点到直边段等效塑性变形不断增大。而板料边缘的塑性变形明显大于其他区域，是因为该区域存在增厚等现象，该区域将在封头后续加工中切除，对于封头质量并没有影响。

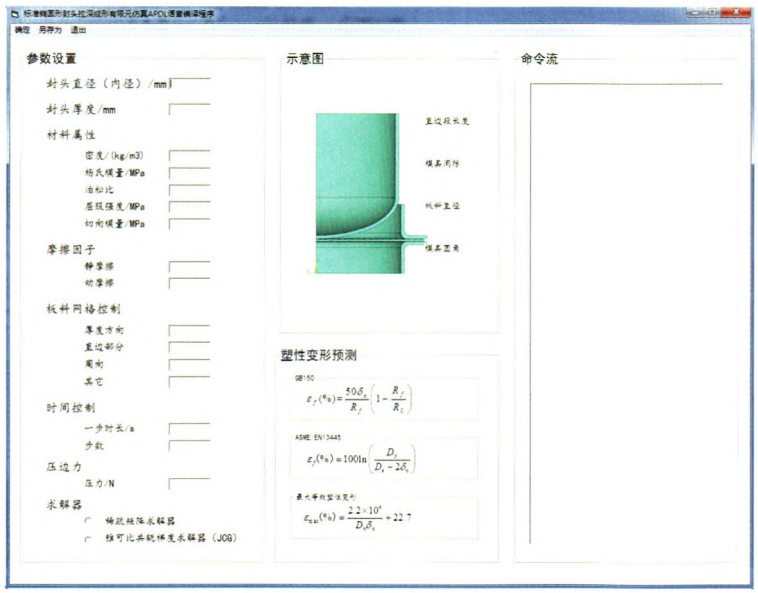
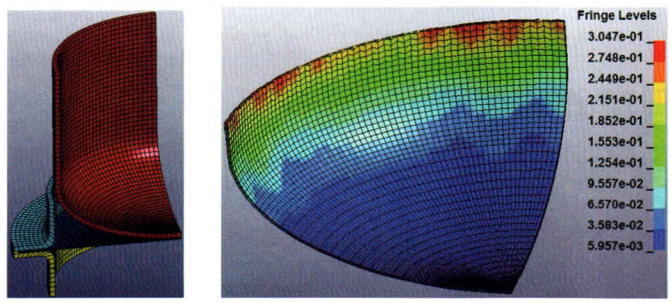


图6　程序主界面



(a)　　(b)

图7　封头计算示例

4. 结语

通过有限元数值仿真可以大幅降低改进冲压工艺的时间与成本。而通过编制程序，可在输入参数后快速编译APDL语言命令流，简化了繁琐的建模过程，极大程度地提高设计人员的工作效率，且对于不同规格、材料以及冲压条件的封头也具有良好的适应性。另外，程序提供了不同标准及研究中对于封头塑性变形的预测，可与仿真结果进行比较、对照。

参考文献：

[1] 刘建超. 冷冲压与塑料成形加工原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1996.

[2] 张廷凯，康洗范，陆世英. 不锈钢[M]. 北京: 原子能出版社, 1998.

[3] 金光熙，朴美善. 304不锈钢封头应力腐蚀开裂失效分析[J]. 热加工工艺，2011（23）：226-228.

[4] 翟金辉，鲍彬彬，徐敏霞，等. 压力容器用304不锈钢封头直边段开裂失效分析[J]. 压力容器，2011（12）：54-58.

MW（收稿日期：20161103）

欢迎关注微信公众号：机工刀具世界

扫描二维码即可关注！