基于 FEM 的车桥本体内高压成形工艺研究

合肥工业大学材料科学与工程学院 （安徽 230009） 张宾宾 李 萍 薛克敏 唐 勇

【摘要】 对汽车桥壳本体内高压成形工艺进行有限元模拟研究，基于弹塑性有限元法建立了数学模型，并进行了动力显式有限元分析求解，对成形工艺进行分析，研究了内压和轴向进给等主要工艺参数对成形质量的影响。

汽车桥壳整体内高压成形是近年来发展起来的新工艺，它不仅可以满足汽车结构轻量化和一体化的要求，而且与传统的铸造、冲压和焊接成形工艺相比，具有成本低、柔性高、成形产品强度高，以及对环境危害小等优点，符合汽车工业发展的减重、节能、环保的趋势。

整体液压成形属于先进制造技术，目前，日本、德国已经用液压成形技术试制出轻型汽车桥壳。国内的车桥整体液压成形工艺研究尚处于起步阶段。当前，国内外有关汽车桥壳整体液压成形的研究偏重于试验研究，关于成形理论方面的研究比较缺乏。

有限元方法的出现为内高压成形工艺的设计及参数的优化提供了便利。运用有限元模拟可以方便地观察成形过程中坯料几何形状的变化、材料流动规律、预报成性缺陷等，大幅降低了产品开发周期。因此，本研究基于动力显式有限元模拟软件 ABAQUS，以汽车桥壳本体内高压成形过程为例，针对制件轴向长度大、最大胀形量大等工艺中的重点和难点，确定合理工艺方案，研究不同加载条件对成形质量的影响规律。此研究有利于桥壳整体内高压成形工艺的研究，补充国内相关领域理论研究上的欠缺，取代传统制造工艺，为提高我国汽车制造业的核心竞争力奠定基础。

1. 内高压成形工艺原理

内高压成形的基本原理是通过内部加压和轴向加力补料把管坯压入到模具型腔，使其成形为所需的工件，见图 1。

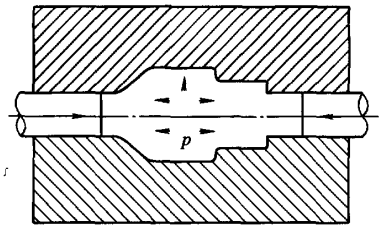


图 1 内高压成形工艺原理

2. 参数设定以及物理模型离散化

（1）零件以及模具几何尺寸 零件形状见图 2，两端直壁部分的管径为 110mm，中间最大胀形尺寸为 ϕ348mm，成形件总长为 1160mm。圆弧过渡区圆角半径为 200mm，确定管坯的初始直径为 160mm，壁厚为 8mm，长度为 1420mm。

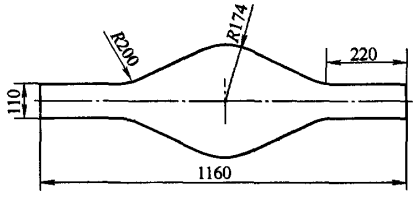


图 2 零件尺寸

根据成形零件形状尺寸，本研究采用管坯推压缩径成形和内高压成形相结合的成形工艺。前期进行了初始管坯推压缩径工艺的模拟和试验。缩径试验结果如图 3 所示。

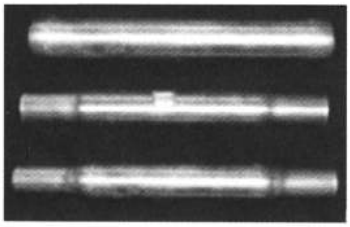


图3 初始管坯缩径试验结果

另外，一次成形的胀形系数 $K=2.175 \geqslant K_{max}$（$K_{max}$ 为最大许用胀形系数，在此 K_{max} 取 2.05）。为防止因一次成形而产生破裂，本次内高压成形拟采用两个工步的成形工艺：第一工步，在中间部分加装控制约束，使此区域第一次胀形系数不超过最大许用胀形系数，其他部分在第一阶段贴模成形；第二工步，撤除胀形约束后材料完全贴模成形。

（2）数值模拟分析模型 利用动态显示有限元分析软件 ABAQUS 进行仿真分析。因成形件结构和载荷的对称性，我们只建立模型的 1/2 进行模拟，模拟网格划分见图 4。管坯划分 C3D8R 六面体实体单元，模具和冲头则划分为刚性壳体，管坯材料为各向同性刚塑性模型，符合 Mises 屈服准则，采用 Penalty 摩擦系数。模型共有 10 836 个节点和 5372 个单元。两个阶段总成形时间为 0.02s，第一阶段中在最大胀形处上下两端施加约束，以控制其胀形量，在第二阶段移除约束，使材料最终贴模成形。

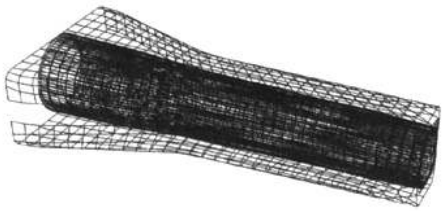
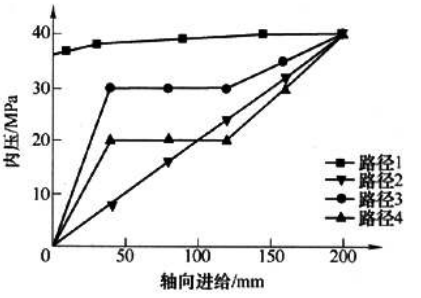


图4 数值模拟分析模型

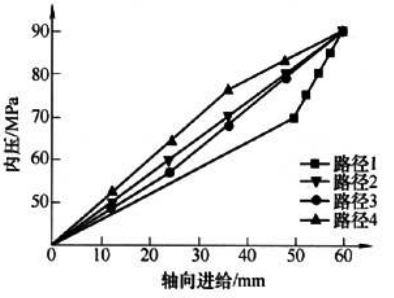
管坯材料拟采用 20 钢，材料屈服极限是 245MPa，极限强度是 410MPa，均匀伸长率为 25%，密度为 7.85g/cm^3，弹性模量为 210GPa，泊松比为 0.28。

（3）加载条件 根据体积不变条件可估算出此桥壳所需的轴向进给量。假设变形前后管坯的体积不变，轴向进给量还取决于管坯的总长、摩擦条件等很多因素。在初始加载路径的设定中，假设左右冲头轴向进给量相同为 260mm。

根据零件的实际要求，既要有合理的壁厚分布，又要有较大的胀形量及最佳的工艺参数匹配。一般来说，内压随冲头位移的变化分为单线性、双线性和曲线路径（如图 5 所示）。



（a）第一阶段加载路径



（b）第二阶段加载路径

图5 内压和轴向进给加载路径

在内高压成形过程中，因为有效进给量（流入大胀形量区的材料）的不同，相同的进给量会产生不同的结果。随着材料贴模量的增大，贴模区材料与模具之间摩擦力增大，导致材料流动困难。因此大部分的轴向补料应分配在第一阶段，第二阶段只需少量进给量，若轴向补料过多只会使管坯端部壁厚增大。

加载过程参数变化复杂、不易找到最佳工艺参数，对于初始管坯来说，在未贴模之前其极限胀形压力是一定的，内压力过大会造成破裂，过小会导致胀形不完全。

3. 参数变化对材料流动的影响

有限元模拟为我们提供了一个方便地观察整个变形过程与材料流动的工具。通过对成形过程的分析发现，在成形初期，管坯材料主要沿周向流动，端部首先贴模成形。随着轴向进给量的增加，在内压的作用下，管坯中间部分逐渐贴模成形，贴模量随加载路径的不同呈不同的变化趋势（如图 6 所示）。可见，路径 1 条件下管坯中部贴模成形区域最大，受约束区域外的材料基本上

都贴模成形，最大胀出部分直径为302mm，胀形系数 k 为1.47。图6b、6c和6d中间部分都存在胀形量不够、部分区域没有充分贴模成形，最大胀出部分直径和胀形系数均小于路径1。其中图6b、6d中截面的圆弧区域出现了轻微的失稳起皱。分析其原因，虽然第一阶段最终的成形内压都为40MPa，但路径1的初始内压为36MPa，内压加载在成形过程中保持平稳的变化，与初始内压为零的加载路径相比，更有利于中间部分的成形。另外，在加载的初始阶段，由于内压相对增加不足，轴向补料为材料变形的主导因素。而圆弧区域材料流动阻力增大，若内压较小时，材料在此处向前流动困难，导致结束时中间部分贴模量不够。轴向补料的进一步增多也会使此处出现失稳起皱。通过分析比较，路径1是第一阶段内高压成形中较为合理的加载路径。

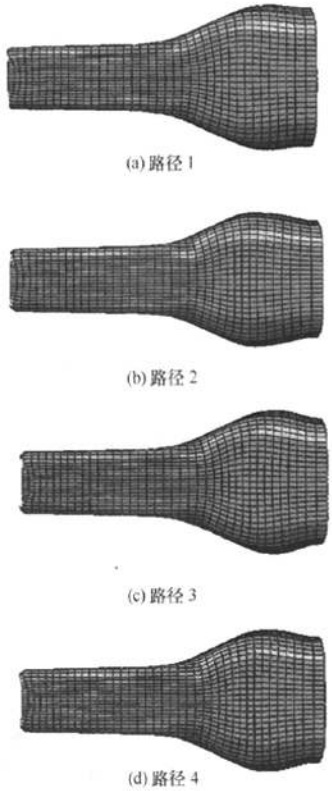


图6 内高压成形第一阶段管坯材料的流动变形

在第二阶段轴向补料量相同的情况下，第一阶段结束时材料贴模成形的好坏对最终的成形结果有较大的影响。因此我们通过分析中间最大胀形处成形情况来研究两阶段成形之间的承接联系。图7为最终胀形件中间最大尺寸处的截面形状。从图7a中可以看出，路径1条件下材料最终完全贴模成形，截面形状为规则的矩形，圆角半径为20mm，符合零件图样要求。其他加载条件下的成形件都出现材料没有完全贴模的情况。通过对成形过程的模拟发现，第一阶段受抑制区域外材料贴模成形量越大，第二阶段中轴向补料就越多地流入受抑制区域，不仅有利于材料完全贴模成形，而且可以改善壁厚均匀度。

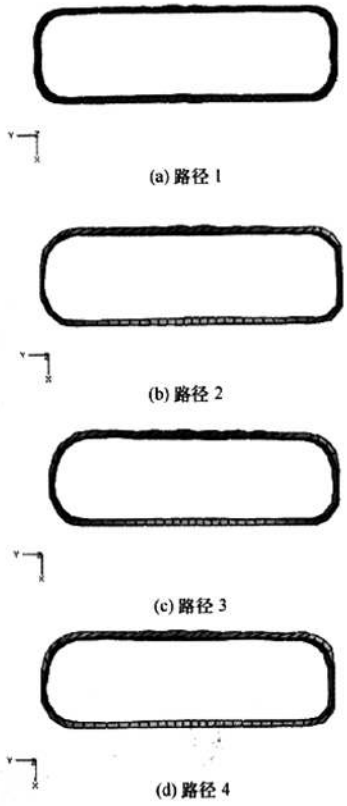


图7 成形件中间处截面形状

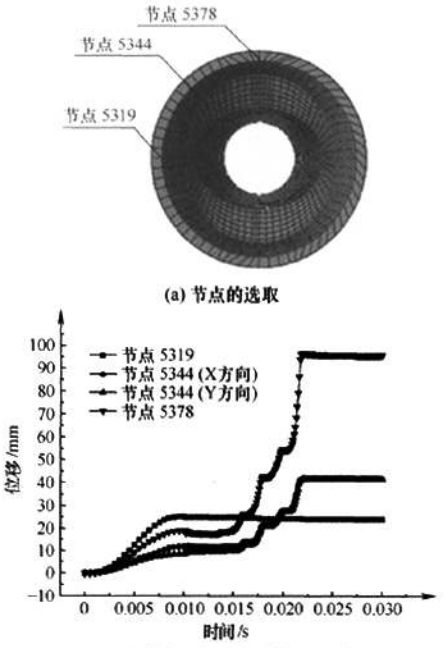
4. 材料流动对壁厚分布的影响

在内高压成形过程中，内压和轴向进给不是简单的线性匹配关系，在变形过程中材料流动情况复杂，通过研究变形过程中壁厚变化趋势，可以方便地寻找最优化工艺控制参数。

ABAQUS的可视化模块可以提供内高压成形过程中不同节点处材料在某一方向上的位移随时间的变化曲线。通过这些曲线，我们可以得出成形结束时不同节点处材料壁厚相对于初始壁厚的变化量，为我们研究其壁厚分布、减薄率提供依据。

为准确测定截面上不同部分壁厚分布情况和减薄

率，在胀形前的中间截面上选取三个节点，通过分析节点处材料在变形过程中随时间的位移曲线，可以得到相应位置的壁厚分布和减薄率。节点的选取与节点处材料的位移随时间变化曲线见图8。



(b) 不同节点在成形过程中随时间的位移曲线

图 8

成形过程分为三个阶段，第一阶段是合模阶段，第二阶段是中间部分受约束的胀形阶段，第三阶段是撤销约束后的贴模成形阶段。根据各节点在胀形过程中的实际位移量与理想状态下（壁厚不减薄）的位移量差值来计算减薄率。计算公式如下：

$$\phi = \frac{S_0 - S_1}{d}$$

式中 S_0——理想位移量，mm；

S_1——实际位移量，mm；

d——初始壁厚，mm。

由图8可知，节点5319在合模结束后，此处材料基本上不再流动，此处材料相对于理想状态下的位移量25mm来说，成形结束时实际位移量为24.18mm，相应的减薄率为10.3%。节点5344在成形结束时材料在X方向和Y方向上的位移量相同，其理想位移量为40mm，实际位移量为41.6462mm，其减薄率稍大为20%。同样的，节点5378的理想位移量为95mm，成形结束时的实际位移量为96.12mm，减薄率为14%。壁厚减薄情况与观察到的模拟结果一致。

用同样方法，我们在零件沿母线方向上选取32个节点，分别以1、2…32来表示各个节点，根据沿母线上各节点处材料的流动情况，可以得到成形件壁厚沿母线方向的分布趋势（如图9所示）。

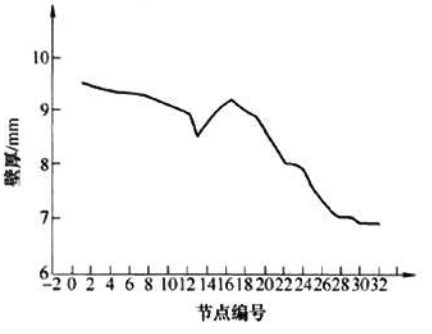


图9 成形件壁厚沿母线分布趋势

沿母线方向上的壁厚分布整体上呈由端部向中间递减的趋势，端部最厚处为9.4mm，增厚率为17.5%。由于在圆弧过渡区材料流动阻力大，材料流动困难，一部分材料在此处滞留导致此区域壁厚呈上升趋势（见图9）。研究表明，由桥壳本体的受力及其形状可知，两端大、中间小的壁厚分布趋势是较为合理的。

以上结果说明，有限元分析手段可以很好地应用在桥壳整体液压成形中，并能很好地反映材料流动、变化趋势，以及壁厚分布规律。

5. 结语

（1）有限元仿真技术能准确地反映车桥本体液压成形过程中管坯的形状变化、金属流动情况，为整体液压成形工艺方案的制定和工艺参数优化提供强有力的支持。运用有限元模拟方法研究汽车桥壳本体液压成形工艺，分析成形件壁厚分布，实施观测和预防成形缺陷，以及寻找最佳加载路径匹配等，可以达到预期效果，且结果较为理想。

（2）在车桥本体液压成形过程中，通过合理制定工艺方案，优化内压和轴向进给加载路径，可以有效控制材料流动，改善中间最大胀形处的贴模性和壁厚分布，防止表面缺陷，最大程度地发挥材料的塑性性能。模拟结果表明胀形过程分两个阶段，在加载路径1条件下的内压和轴向进给的加载方式，成形效果较理想，沿母线方向壁厚分布合理，中间最大截面处最大减薄率为17.5%，无起皱和破裂缺陷。**MW** （20101001）