

# 聚变堆用难变形 CLAM 钢三通 成形模拟及试验研究

郭训忠<sup>1</sup>, 陶杰<sup>1</sup>, 刘红兵<sup>1</sup>, 李鸣<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 江苏 南京 210016;

2. 江苏华阳金属管件有限公司, 江苏 镇江 212400)

**摘要:**利用有限元软件对聚变堆用 CLAM 钢三通管件的內高压整体成形工艺进行了数值模拟,研究了压力加载路径及摩擦条件关键工艺参数对支管高度以及壁厚分布的影响,从而确定了 CLAM 钢三通管件內高压成形的优化工艺参数组合。使用满足优化摩擦系数的表面涂层对 CLAM 钢管坯进行润滑处理,并根据优化结果对 CLAM 钢管材进行了內高压成形试验。实际成形的三通管件在几何尺寸及厚度分布方面,实验结果和模拟结果吻合。研究结果表明,通过有限元数值模拟可准确预测难变形材料 CLAM 钢三通的复杂冷成形,并确定工艺参数;通过确定的工艺参数可制备出几何尺寸及厚度分布均满足要求的高质量聚变堆用三通管件。

**关键词:**CLAM 钢;三通;內高压成形;数值模拟

**中图分类号:**TG386.43

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-6931(2010)10-1217-06

## Numerical Simulation and Experimental Study of CLAM T-Shapes for Fusion Applications by Hydroforming

GUO Xun-zhong<sup>1</sup>, TAO Jie<sup>1</sup>, LIU Hong-bing<sup>1</sup>, LI Ming<sup>2</sup>

(1. College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Jiangsu Huayang Metal Pipes Co., Ltd., Zhenjiang 212400, China)

**Abstract:** The integral hydroforming process to prepare CLAM T-shapes for fusion applications was evaluated by means of numerical simulation. The paper firstly investigated the effect of different paths on the protrusion height and distribution of thickness thinning rate of T-shapes. Then, it discussed that the friction coefficient between die and tube blank played an important role in manufacturing high quality T-shapes. Subsequently, the practical hydroforming was performed based on the simulation results with the aid of special lubrication coatings with friction coefficient 0.07. It is obviously indicated that the simulation results agree well with the experimental ones in geometry size and wall thickness distribution. The results indicate that the numerical simulation

收稿日期:2009-09-23;修回日期:2009-11-19

基金项目:江苏省重大成果转化专项基金资助项目(BA2006067);江苏省博士生创新基金资助项目(CX09B\_077Z)

作者简介:郭训忠(1981—),男,江苏徐州人,博士研究生,从事材料成形数值模拟与加工研究

guides the practical hydroforming of CLAM tube effectively and determines the actual cold forming process parameters rapidly. The sound CLAM T-shapes with proper geometry size and thickness distribution can be obtained by the optimal hydroforming process.

**Key words:** CLAM steel; T-shapes; hydroforming; numerical simulation

聚变能是一种“永久性”能源,是解决人类能源危机的最终途径,而材料问题是关系到聚变能最终能否实现商业应用的“瓶颈问题”之一。低活化铁素体/马氏体钢(RAFM 钢)被普遍认为是未来聚变示范堆和聚变电站的首选结构材料<sup>[1]</sup>。目前,欧洲、日本、美国均在研发聚变堆工程所需的结构材料。与此同时,我国中国科学院等离子体物理研究所 FDS 团队成功研发了具有自主知识产权的低活化马氏体钢——CLAM 钢。经测试表征,材料的物理性能、机械性能、辐照性能、与液态锂铅相容性及焊接性能等均较突出<sup>[2-4]</sup>。但文献[2]同时指出,CLAM 钢在很多方面须作进一步深入研究,其中试验包层模块的加工制造是一重要方面。由此可知,试验包层模块的加工制备必然涉及到材料的成形性能。但由于马氏体钢中板条马氏体的存在,决定了材料硬度高,冷变形困难,这将关系到未来的聚变堆包层及管路系统最终能否被成功制造。所以,研究 CLAM 钢管材的冷成形性能,采用整体成形工艺制备形状复杂且高性能的各类管件,对于总结 CLAM 钢的冷成形规律,进而指导其他复杂管件或包层模块零部件的冷加工提供有益的借鉴,促使 CLAM 钢尽早走向实际应用。

三通作为核电管路系统中一类重要的管件,在蒸汽发生器、热交换器、冷凝水供水管路、沸水堆多路强迫循环回路的管道等方面,有着广泛的应用,对于提高核电管路系统的柔性、稳定性和安全性具有重要意义。采用冲压焊接或机械加工工艺已不能满足核电工程对三通管件高精度、高性能和低成本的要求。而采用内高压成形工艺制备三通管件优势明显:整体成形,流线连续分布<sup>[5-7]</sup>;组织致密;强度高且质量轻,综合力学性能优越;成本低,易实现自动化生产等<sup>[8-10]</sup>。但内高压整体成形工艺实施难度较大,对工艺参数的匹配关系要求较高。

对于难变形材料的塑性成形,有限元方法在成形效果的预测以及工艺参数的优化方面,起着不可替代的作用。本工作采用有限元方法对 CLAM 钢三通内高压成形过程进行数值模拟,通过优化关键工艺参数达到提高难变形材料 CLAM 钢成形性能的目的。最后根据优化的模拟结果,制备高质量的 CLAM 三通管件。

## 1 冷成形数值模拟

### 1.1 计算模型

在对三通模具型面的曲面建模过程中,采用了主管与支管相贯后扫描剪切的方式建模,可使主管外侧产生曲边三角形平面(图 1)。该曲边三角形平面使 CLAM 钢在塑性变形过程中流动容易,有利于提高 CLAM 钢管件的成形性能;CLAM 钢管坯壁厚为 5.05 mm,轴向长度为 220 mm,外径为 48.3 mm,几何建模时抽取管坯的中性面;冲头的几何模型为圆轴形式,尺寸为  $\phi 49 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 。将几何模型导入有限元模拟软件中,划分网格。管材用薄壳单元进行离散,单元公式采用 BELYTSCHKO-TSAY。管坯材料室温塑性变形本构为  $\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n$ <sup>[11]</sup>,其它性能数据为: $E = 218 \text{ GPa}$ ,  $\gamma = 0.33$ ,  $K = 0.88 \text{ GPa}$ ,  $\sigma_s = 514 \text{ MPa}$ ,  $n = 0.09$ ,  $\epsilon_0 = 0.02$ 。模具型面采用充分体现几何特征的 Tool mesh 划分,分网后的有限元模型

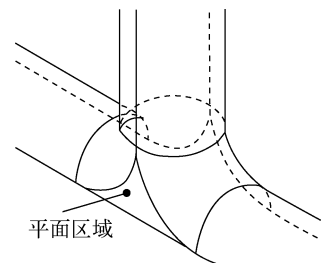


图 1 模具型面的平面特征

Fig. 1 Planar features of die surface

示于图2。在 CLAM 三通的成形模拟中,管坯与模具初始摩擦系数设置为 0.125。

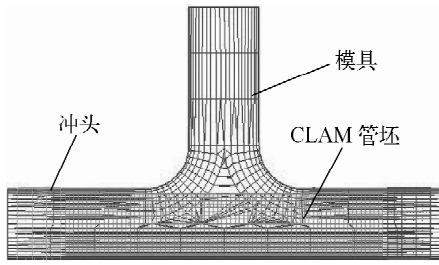


图2 三通内高压成形有限元模型

Fig. 2 Finite element model of hydroforming process

## 1.2 计算结果

### 1) 加载路径对成形效果的影响

三通成形过程中内压力是决定成形与否的关键性因素。内压力作用在管坯的内表面,使支管产生隆起,同时使管坯金属紧贴凹模而不发生向内弯曲或折叠等失稳。在成形过程中,若成形内压不足,金属的径向压力不足而轴向压力过大,出现失稳,管坯向内凹陷;若成形内压过大,金属在较强的拉应力作用下变形,壁厚变薄严重。本文研究了如图3所示的5条加载曲线(图示的加载曲线为三通管件成形常用的加载形式,因压力随时间皆呈线性变化,易于实现实际的压力控制)下 CLAM 三通管件的成形效果。

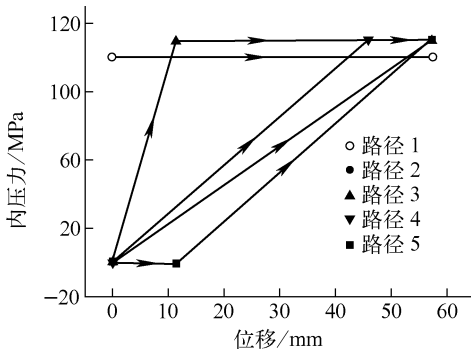


图3 CLAM 钢三通管件压力加载路径

Fig. 3 Different loading paths for hydroforming

图4示出 CLAM 三通截面的厚度分布情况。在任一加载路径下成形,其截面壁厚的总体变化趋势为先增大后逐渐减小。其中,在 A 区域即距离主管端部 6 mm 左右的区域产生了

最大增厚,在 B 区即靠近圆角位置也产生了增厚现象。A 处增厚是由于在成形过程中,与冲头接触的主管端部承受非常大的压应力,随成形时间的增加,主管长度不断减小。减少部分的材料转移分为两部分,一部分向支管流动,另一部分则逐渐积聚在与冲头接触位置,所以,造成了局部增厚现象。然而此处局部增厚,不会影响三通管件整体成形质量,在后续处理工艺中,很容易对增厚部分实施机械切削,从而保证整体壁厚的均匀性。另外,在支管顶部位置(C 区)发生了严重减薄现象,不同的压力加载路径对应的最大减薄率不同(表1)。从表1可知,压力加载路径5的最大减薄率约为 17.92%。而路径5的加载特征为当冲头进给距离为 10 mm 时,压力才开始加载。这说明 CLAM 管坯在内压力作用前已在轴向承受了压缩变形。管坯的壁厚在初始一段时间内已出现了增厚;另外,压力加载相对平缓,模具和坯料间的摩擦力相对较小,对金属的流动影响较小,所以并不造成严重减薄。与路径5明显不同的是加载路径3。加载路径3的特征为,在冲头进给的同时内压力同时加载,且其升压速度迅速,在冲头进给 10 mm 的距离内,内压已由初始值 0 上升为 130 MPa,且一直保持 130 MPa 高压至成形结束。因成形压力加大,CLAM 管壁与模具间的剪切摩擦力也较大,影响了材料的流动。所以,在支管顶部即 C 区发生了相对较大的减薄。但从表1也可知,当选择加载路径3时,支管高度达到了 83.82 mm,为最大值;而加载路径5对应的支管高度为 74.52 mm,为最小值。从表1中的加载路径与

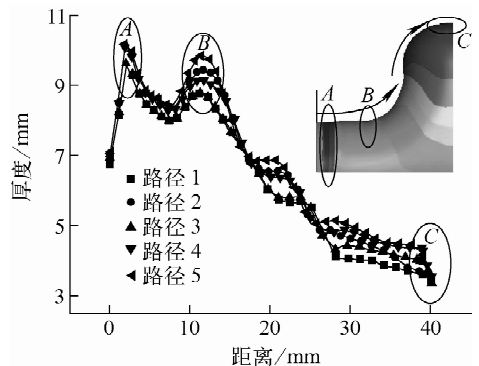


图4 CLAM 三通截面的厚度分布

Fig. 4 Wall thickness distribution of section line

对应的支管高度及最大减薄率的关系可看出,随着平均压力的增大,支管高度增加,但减薄率亦增大。虽然较小的成形压力对应着较小的壁厚减薄率,但支管高度不能满足要求。同时追求最大的支管高度和最小的壁厚减薄率,单纯通过调节加载路径是难以实现的。所以,在支管高度最大的情况下,通过调整其他工艺参数(如通过选择摩擦系数较小的润滑剂改善成形过程中的润滑环境)来满足 CLAM 三通的最大壁厚减薄,最终选择加载路径 3 为加载方式。

表 1 不同压力加载路径成形 CLAM 三通支管高度与壁厚最大减薄率

Table 1 Loading path vs. protrusion height and wall thickness thinning rate

加载路径	支管高度/mm	最大减薄率/%	加载路径	支管高度/mm	最大减薄率/%
路径 1	83.76	21.37	路径 4	78.00	19.36
路径 2	76.54	18.65	路径 5	74.52	17.92
路径 3	83.82	22.69			

## 2) 摩擦系数对成形效果的影响

加载路径 3 被选择后,为了改善 CLAM 钢三通管件壁厚不均问题,需对摩擦系数对成形效果的影响进行研究。摩擦的影响可分为 4 方面:(1) 影响支管胀形区管料的流动,造成壁厚减小;(2) 影响支管整体上升,造成凹模圆角处材料堆积、增厚;(3) 影响主管顺利补料,造成主管端部失稳、支管高度不足;(4) 过大摩擦会使管坯的表面出现划痕,影响其表面质量。本文通过改变摩擦系数分析摩擦力对 CLAM 三通管件内高压成形效果的影响。改变摩擦系数分别为 0.07、0.1 及 0.125(0.125 是冷成形过程中管件与钢模常见的摩擦系数;通过常规润滑处理,摩擦系数可调整至 0.08~0.1 之间),其对应支管高度分别为 86.33、84.60 及 83.32 mm。可看出,随着摩擦系数的增大,CLAM 三通支管高度逐渐降低。这是因为在支管向上形成的过程中,摩擦力的作用方向与内压力的作用方向相反,即阻止主管金属顺利流向支管。摩擦系数的增大,材料流动阻力增大,导致支管高度较小。

摩擦系数对于主要截面的厚度分布影响示于图 5。从图 5 可看出,不论摩擦系数取值大

小,其厚度均出现了明显的分布特征,即在靠近主管端部与靠近模具圆角处形成材料堆积造成增厚;在支管顶部形成相对较大的减薄。但不同的摩擦系数对于整体壁厚分布情况的影响较大。当摩擦系数取值为 0.07、0.1 及 0.125 时,对应的最大壁厚差分别为 4.38、5.2 及 6.26 mm。这说明,较小的摩擦系数使材料的流动阻力小,材料分布均匀;较大的摩擦系数使材料在主管端部及靠近圆角处严重堆积,导致材料不能及时向主管方向补充,造成了主管处的严重减薄。当摩擦系数取值 0.07 时,CLAM 三通管件在支管高度处最大减薄率为 11.7%。

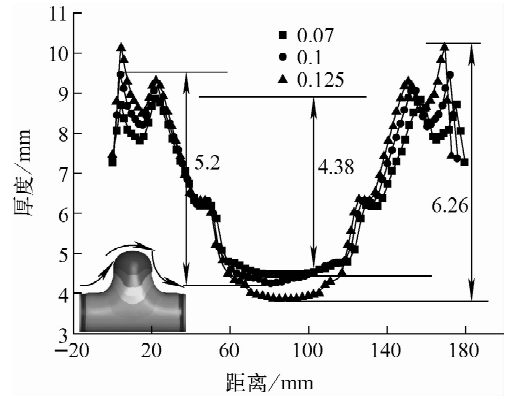


图 5 摩擦系数对壁厚分布的影响

Fig. 5 Friction coefficient vs. wall thickness

## 3) CLAM 钢材料变形特征

在有限元计算过程中,采用了自适应网格技术,在 CLAM 三通管件内高压成形过程中,变形量较大的部位,网格进行自动加密。成形终了时,加密位置显示了材料明显的变形特征。图 6a 示出平面区域的网格变形情况,从图中可看出,变形较大位置处对称分布,且其分布方向是沿着材料流动的方向,即此区域材料流动剧烈。若此处润滑条件较差,则极易形成表面划伤。另外,此区域材料流动方向分布不一,部分材料由主管两端沿着与主管轴线成一定夹角方向流向支管,部分材料由主管底部沿垂直于主管轴线方向流动。流动方向的不一致易导致在此处形成微观裂纹,在随后的整形过程中极易使裂纹进一步扩展(图 6b),从而导致 CLAM 管件成形失败。所以,此平面区域是成形过程应重点控制的部位,可采用薄膜包覆进一步改

善此处的润滑条件。发生大变形的部位还有如图 7a 所示的主管端部,材料易在此处堆积,甚至出现端部压塌现象,可通过使用阶梯轴形式冲头予以消除。另外,图 7b 所示的支管端部靠近圆角一侧将会出现一大变形区。这是由于内高压成形过程中,圆角处的材料流动滞后,而内压沿着支管轴向方向拉伸支管,所以,材料在此大变形区受到拉应力。

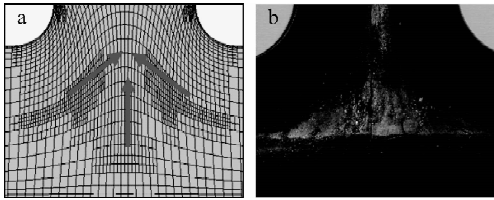


图 6 CLAM 三通管件大变形平面区域

Fig. 6 Planar area of large deformation

a——有限元模型;b——实际成形管件平面区域裂纹

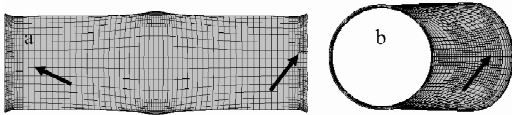


图 7 CLAM 三通管件大变形区域

Fig. 7 Area of large deformation

a——主管端部;b——支管侧部

## 2 内高压成形试验

CLAM 钢三通实际成形工艺路线如下:将 CLAM 钢管通过锯床下料得到 220 mm 的管坯;选择专用的表面涂层作为润滑剂,涂刷于管坯的内外表面。表面涂层由粒度不小于 300 目的  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、机械油、润滑脂 3 种组分按质量比为 1 : (3~10) : (0.1~0.8) 混合而成,冷成形过程中的摩擦系数约为 0.07;将管坯放入模具型腔后合模;按有限元模拟的工艺参数设定工艺值;向管坯内输送高压油的同时,冲头对管坯进行轴向压缩。当支管高度达到要求后,可将成形后的三通管件取出。图 8 示出 CLAM 三通管件的试验结果和模拟结果。从图 8 可知,根据优化模拟工艺制备的三通管件在支管高度、主管长度方面与模拟计算值接近。图 9 示出 48.3 mm×48.3 mm 等径三通标准尺寸。由图 9 可知,在厚度分布方面,试验值和模拟值基本吻

合。另外,实际成形的 CLAM 三通管件支管高度与主管长度均能满足 ASME B16.9—2007 标准的尺寸要求(图 10)。

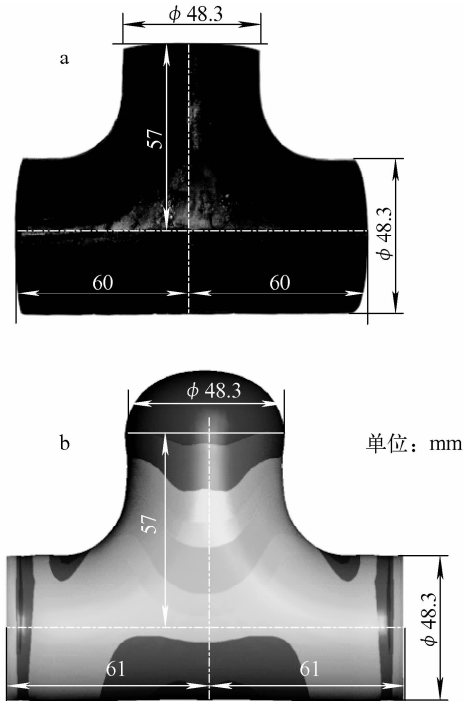


图 8 CLAM 三通管件

Fig. 8 CLAM T-shapes

a——试验结果;b——模拟结果

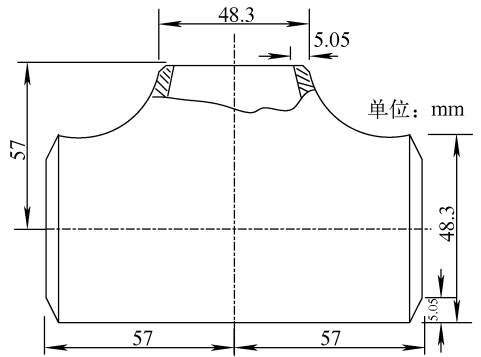


图 9 48.3 mm×48.3 mm 等径三通标准尺寸

Fig. 9 Standard size of 48.3 mm×48.3 mm T-shapes

## 3 结论

1) 在 CLAM 三通内高压成形的数值模拟中,在距离主管端部 6 mm 左右的区域与靠近圆角位置产生增厚,在支管顶部位置发生严重减薄。随着平均压力的增大,支管高度增加,减薄率亦增大。较小的成形压力对应着较小的壁

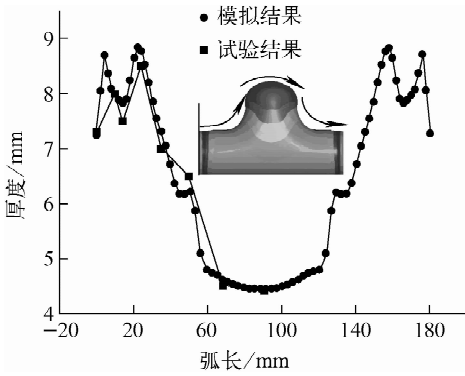


图 10 试验结果和模拟结果

Fig. 10 Experimental and simulation results

厚减薄率,但其支管高度不能满足要求。

2) 数值模拟中,随着摩擦系数的增大,CLAM 三通支管高度逐渐降低。不同的摩擦系数对于整体壁厚分布情况的影响较大。较小的摩擦系数使材料的流动阻力小,材料分布均匀;较大的摩擦系数造成主管处的严重减薄。当摩擦系数取值 0.07 时,CLAM 三通管件在支管高度处最大减薄率为 11.7%。

3) CLAM 三通管件内高压成形过程中,具备明显的变形特征。平面区域材料流动剧烈,是成形过程应重点控制的部位。主管端部及支管端部靠近圆角亦是大变形区。

4) CLAM 三通管件在支管高度、主管长度方面及厚度分布方面,试验结果和模拟结果吻合。实际成形的 CLAM 三通管件支管高度与主管长度均能满足 ASME B16.9—2007 标准的尺寸要求。

感谢中国科学院等离子体物理研究所 FDS 团队为本研究提供原始态 CLAM 钢管材。

#### 参考文献:

[1] 黄群英,郁金南,万发荣,等. 聚变堆低活化马氏体钢发展[J]. 核科学与工程,2004,24(1):56-64.  
HUANG Qunying, YU Jinnan, WAN Farong, et al. The development of low activation martensitic steels for fusion reactor[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2004, 24

(1): 56-64 (in Chinese).

- [2] 黄群英,李春京,李艳芬,等. 中国低活化马氏体钢 CLAM 研究进展[J]. 核科学与工程,2007,27(1):41-50.  
HUANG Qunying, LI Chunjing, LI Yanfen, et al. R&D status of China low activation martensitic steel[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2007, 27(1): 41-50 (in Chinese).
- [3] HUANG Q Y, WU Y C, LI J G, et al. Status and strategy of fusion materials development in China[J]. Journal of Nuclear Materials, 2009, 386-388; 400-404.
- [4] HUANG Q, LI C, LI Y, et al. Progress in development of China low activation martensitic steel for fusion application[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 367-370: 1 410-1 415.
- [5] CHENG D M, TENG B G, GUO B, et al. Deformation and defects in hydroforming of Y-shaped tubes[J]. Journal of Harbin Institute of Technology: New Series, 2008, 15: 206-210.
- [6] CHENG D M, TENG B G, GUO B, et al. Thickness distribution of a hydroformed Y-shape tube[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 499: 36-39.
- [7] HWANG Y M, LIN T C, CHANG W C. Experiments on T-shape hydroforming with counter punch[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192-193: 243-248.
- [8] DOHMANN F, HARTL C. Hydroforming: A method to manufacture light-weight parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 60: 669-676.
- [9] DOHMANN F, HARTL C. Tube hydroforming-research and practical application[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 71: 174-186.
- [10] AHMETOGLU M, ALTAN T. Tube hydroforming: State-of-the-art and future trend[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 98: 25-33.
- [11] LS-DYNA theory manuals, version 971[R]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2006.