

钛合金网板多点成形起皱缺陷的数值模拟

谭富星, 李明哲, 蔡中义, 孙刚

(吉林大学无模成形技术开发中心, 130025, 长春)

摘要: 采用动态显式有限元软件, 针对不同厚度、不同曲率半径的带孔网板和无孔板球形面的无压边多点成形过程进行了数值模拟。模拟结果表明, 在相同的成形条件下, 带孔网板成形球形件时不易起皱, 成形效果较好。分析表明, 带孔网板成形时不易起皱的原因是网孔吸收了部分金属变形, 从而减小了网板起皱的趋势。通过模拟得到了带孔网板和无孔板成形球面件时不起皱成形极限与板厚的关系曲线。实验结果表明, 模拟结果与实验结果吻合良好, 且满足与不起皱成形极限图的对应关系。

关键词: 多点成形; 钛合金; 带孔网板; 起皱; 数值模拟

中图分类号: TG385.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)09-1026-05

Numerical Simulation of Wrinkling in Multi-Point Forming Process of Titanium Alloy Retiary Sheet

Tan Fuxing, Li Mingzhe, Cai Zhongyi, Sun Gang

(Dieless Forming Technology Center, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: The multi-point forming (MPF) processes of spherical surface parts of titanium alloy sheet and retiary sheet with different thickness and curvature radius are simulated via an explicit finite element software. The simulation results show that the spherical surface parts formed with retiary metal sheet is not prone to wrinkle under the same condition, and better quality parts can be acquired. The analysis indicates that the non-wrinkling effect of retiary metal sheet lies in the absorption of sheet deformation via its holes. A non-wrinkling limited graph for spherical surface parts of retiary metal sheet and metal sheet is obtained. A forming test is conducted, and the results coincide well with the simulations and conform to the non-wrinkling limited graph.

Keywords: multi-point forming; titanium alloy; retiary metal sheet; wrinkling; numerical simulation

在医学工程领域, 钛合金因其具有优良的生物相容性、优越的机械性能以及利于体内组织生长等特点, 被看作是理想的颅骨修复材料^[1-2]。现今利用钛合金网板成形得到的颅骨修复体在医学领域的需求量很大, 但是采用传统的简易模具或手工塑形得到的颅骨修复体很难与缺损区匹配, 这在客观上阻碍了网板的临床应用。多点成形技术的应用使这一难题得到了解决。多点成形是金属板材三维曲面成

形的新技术^[3], 原理是将传统的整体模具离散成一系列规则排列、高度可调的基本体, 各基本体的行程可分别调节, 改变这些基本体的位置就可以改变成形曲面。钛合金颅骨修复体成形就是充分利用多点成形时高度“柔性”的特点, 在很短的时间内就可以在多点成形压力机上将钛合金网板成形为“数字化”、“个性化”、高精度的颅骨修复体。

带孔网板与无孔板比较起来无论在物理性能还

是在机械性能方面都存在着很大的差别,所以研究包括钛合金网板在内的带孔网板成形时的普遍规律是一项非常有意义的课题.作者采用动态显式非线性有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA,对钛合金带孔网板和无孔板在无压边多点成形条件下成形球面件的过程进行仿真,预测成形过程中可能产生的缺陷,主要研究了板材厚度和曲率半径对起皱的影响,对比分析了产生起皱缺陷的原因,并进行了相关的实验验证.

1 钛合金网板的特点

目前,国内外医学界常用的外科植入用钛合金网板材料多为 Ti-6Al-4V,属于 $\alpha+\beta$ 型钛合金.这种材料在常温下的一般物理性能如表 1 所示.从表中可以看出:该合金的屈服比 σ_s/σ_b 大,同时伸长率低,说明允许的塑性变形区小,不易发生塑性变形而且容易断裂;硬化指数 n 很小,说明材料在成形过程中容易快速进入缩颈阶段,均匀变形能力差;厚度方向性系数 r 较大,说明材料在拉应力作用下不易变薄,但压缩时容易产生压缩失稳,产生皱纹.通过分析可知,钛合金网板的成形性比一般金属要差很多,且容易产生起皱缺陷.

表 1 Ti-6Al-4V 合金的一般物理性能

σ_s/MPa	σ_b/MPa	$\delta/\%$	n	r
830	965	14	0.1	1.8

材料的属性对成形性能有很大的影响,同时板材的形状和结构也将对最终成形产生较大的影响.本文采用的是尺寸为 $202\text{ mm}\times 202\text{ mm}$ 、含 40×40 个方孔的网板,方孔的尺寸为 $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}$,孔间距为 5 mm .

2 有限元模型的建立

本文采用动态显式非线性有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA,对钛合金带孔网板和无孔板在无压边多点成形条件下成形球面件的过程进行了数值模拟.

2.1 弹塑性本构关系

板材的成形过程相当复杂:既要考虑材料的非线性,又要考虑几何非线性;既有弹性变形,又有塑性变形,同时还要分析预测弯曲成形过程中可能出现的各种成形缺陷.计算时所采用的材料应力应变的增量关系式为

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl}^e d\epsilon_{kl} \quad (1)$$

式中: $d\sigma_{ij}$ 为应力增量; $d\epsilon_{kl}$ 为应变增量; $D_{ijkl}^e = D_{ijkl}^e - D_{ijkl}^p$,其中 D_{ijkl}^e 为弹性矩阵, D_{ijkl}^p 为塑性矩阵.

2.2 边界摩擦条件

为了抑制多点成形过程中压痕缺陷的产生^[4],在带孔网板和基本体群之间加入厚度为 10 mm 的弹性垫.假设带孔网板与弹性垫之间的摩擦力服从库仑摩擦定律.由于成形过程中带孔网板与弹性垫的接触状态是变化的,可能是黏着状态,也可能是相对滑动状态,或者是这两种状态的相互转化,因此如果采用理想的库仑摩擦定律,则摩擦力会出现阶跃,引起计算不稳定.为此,本文采用修正的库仑摩擦定律,使摩擦力成为相对滑动速度的连续函数^[5]

$$F_t = -\mu \|F_n\| \Phi(\Delta\dot{u}_t) \Delta\dot{u}_t / \|\Delta\dot{u}_t\| \quad (2)$$

式中: F_t 和 F_n 分别为接触点处的摩擦力和正压力; $\Delta\dot{u}_t$ 为带孔网板与弹性垫接触点的相对滑动速度; μ 为摩擦系数. $\Phi(\Delta\dot{u}_t)$ 可取如下形式:当 $\|\Delta\dot{u}_t\| < d$ 时, $\Phi(\Delta\dot{u}_t) = \tanh(4 \|\Delta\dot{u}_t\|/d)$;当 $\|\Delta\dot{u}_t\| \geq d$ 时, $\Phi(\Delta\dot{u}_t) = 1$,其中 d 为一个不大的正数.

2.3 模型的建立

带孔网板上布满规则排列的方孔,结构比较复杂.划分网格时采用 SHELL163(BWC)壳单元进行离散,共划分为 $6\,070$ 个三角形壳单元.上下基本体群定义为刚体,基本体尺寸为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,上下基本体点阵为 20×20 .为了节省 CPU 时间,仅对与工件接触的基本体球冠部分建模.每个基本体球冠沿边界线平均分为 16 份,划分为 32 个四边形壳单元;弹性垫选用线弹性材料模型,共划分为 $4\,332$ 个六面体单元.划分完网格之后再对其引入适当的边界条件、定义不同的属性等.

3 无压边成形时的不起皱成形极限

3.1 无孔板和带孔网板的不起皱成形极限

根据上述有限元模型,本文针对不同厚度、不同曲率半径的无孔板和带孔网板在成形球形件时的多点成形过程进行了数值模拟研究,板料厚度分别取 0.5 、 0.7 、 1.0 、 1.2 、 1.5 mm ,球面件曲率半径从 200 mm 增加到 $1\,300\text{ mm}$,间隔取 50 mm .当取无孔板厚度为 0.5 mm 时,通过数值模拟计算得到的结果是:当球形面曲率半径取 $1\,150$ 、 $1\,100$ 、 $1\,050\text{ mm}$ 时,成形件有起皱缺陷发生;当球形面曲率半径取大于等于 $1\,200\text{ mm}$ 时,成形件成形质量良好,无起皱缺陷发生.因此,我们取曲率半径 $1\,200\text{ mm}$ 作为 0.5 mm 厚 Ti-6Al-4V 无孔板成形球形件时的不起

皱成形极限点.按照这种方法,通过计算分别得到厚度为0.7、1.0、1.2、1.5 mm时的不起皱成形极限点,将这些极限点连接起来就得到了一条不起皱成形极限曲线.利用这条曲线可以为Ti-6Al-4V无孔板成形球面件时是否起皱提供判断依据,即位于曲线下方的区域属于起皱区,位于曲线上方的区域属于安全区.同样,通过计算也可以得到Ti-6Al-4V带孔网板成形球面件时的不起皱成形极限曲线.图1给出了无孔板和带孔网板球面成形件的不起皱成形极限对比,可以看出无孔板的起皱临界区位于带孔网板的上面,这表明在同样厚度、同样变形程度的情况下,无孔板更易起皱.

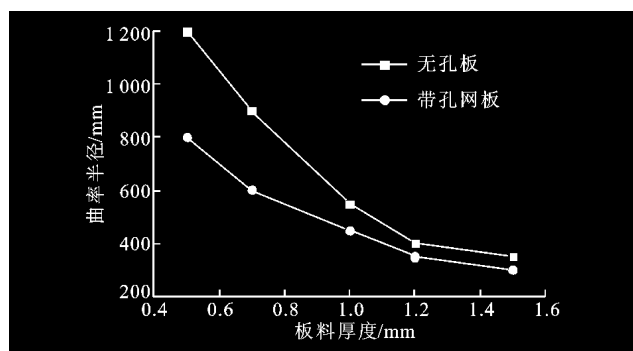
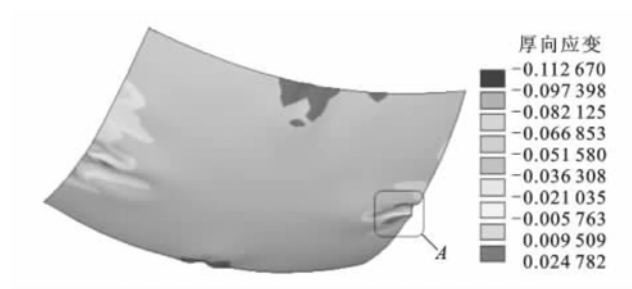


图1 无孔板和带孔网板不起皱成形极限对比

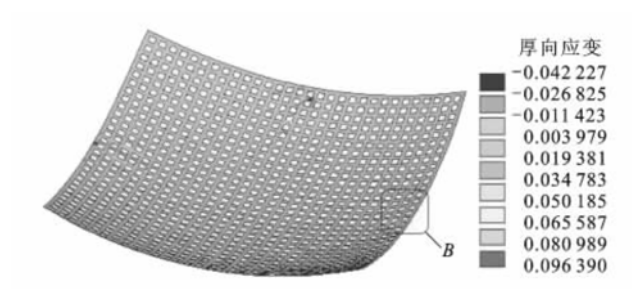
3.2 带孔网板不易起皱原因分析

为了探究带孔网板较无孔板不易起皱的原因,现对板料厚度为1 mm、曲率半径为500 mm条件下模拟得到的无孔板和带孔网板成形结果进行分析,图2为无孔板和带孔网板球面件的厚向应变分布对比图.从图2a可以看出:无孔板在4条边缘的中部出现了明显的起皱缺陷,主要原因是由于成形过程中切向压应力的值达到一定程度后,材料发生失稳导致面外变形,从而产生起皱现象^[6-7];皱纹处的最大应变值为-0.11,发生在图中A区域,板料因皱纹过大有发生折叠的趋势,减薄趋势明显.从图2b可以看出,在同样的成形条件下,由带孔网板成形得到的球面件表面光滑,应变分布均匀,成形结果良好.分别从无孔板成形件和网板成形件的边界提取节点的厚向应变值,获得了两种板料的厚向应变对比图(见图3),可以看出网板成形件的厚向应变分布比较均匀,最大减薄量约为4%,而无孔板成形件的最大厚向应变值达到近10%,减薄量大,不利于板料的均匀变形.

选取与无孔板起皱剧烈的A区域对应的带孔网板B区域的变形情况进行研究.图4是利用图2b中B区域内9个网孔边界节点坐标值绘制的网板



(a)无孔板的厚向应变



(b)带孔网板的厚向应变

图2 两种板料的厚向应变图

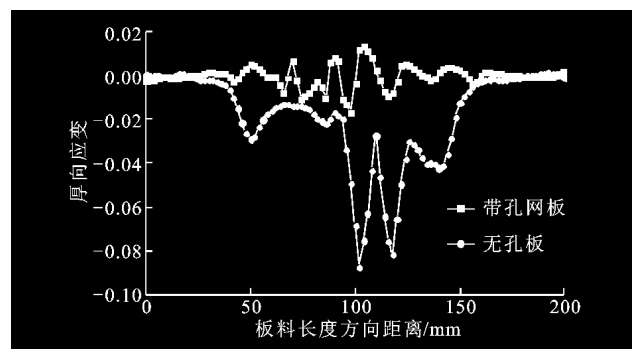
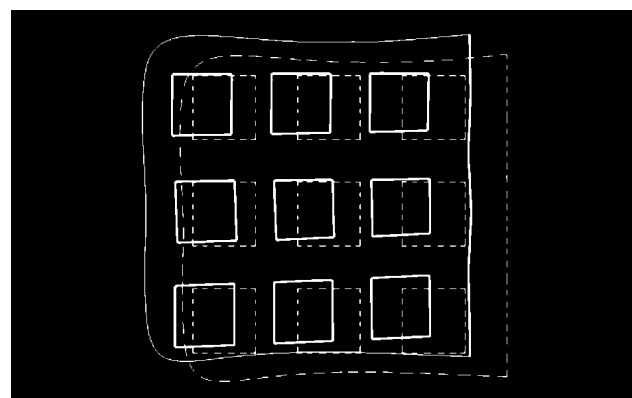


图3 两种板料的厚向应变对比图

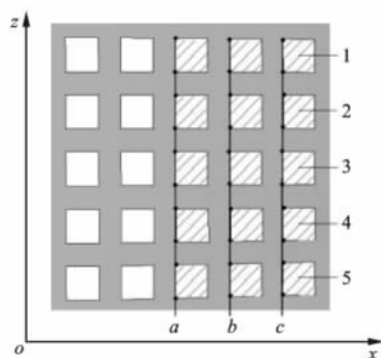


--- 成形前 — 成形后

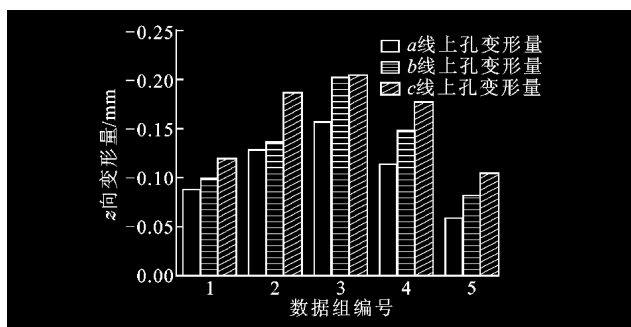
图4 B区域成形前、后孔边界轮廓偏移示意图

变形前、后的形状变化示意图,从中可以看到,网板成形后的方孔形状已经变得不规则,同时板料发生了明显的滑动.

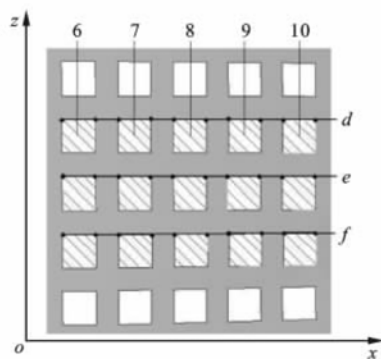
图5为带孔网板变形后网孔变形量的对比图.图5a是图2b中B区域的放大图,提取图中a线上的10个节点坐标值,然后与变形前的对应网孔节点



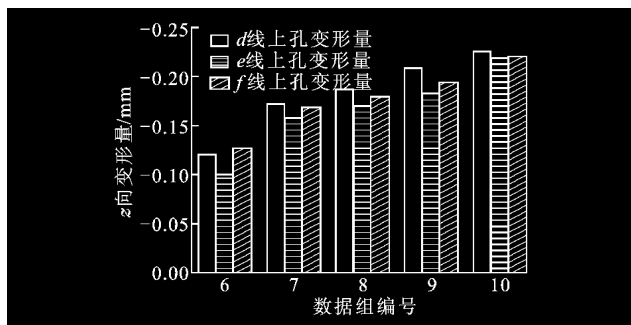
(a) B区域放大图(a、b、c线上)



(b) z向变形量对比图



(c) B区域放大图(d、e、f线上)



(d) x向变形量对比图

图5 网板成形件网孔变形量对比图

坐标值相减,得到每个网孔在 z 向的变形量.取 a 、 b 、 c 3条线上的15个网孔,每3个网孔分为一组,共得到5组数据,见图5b.可以看出,15个孔在 z 向的尺寸均不同程度地变小,其中第3组的3个孔 z 向变形量最大,最大值达到0.202 mm.比较这5组数据可以看出,第2组和第4组的尺寸减小量稍小,第1组和第5组的尺寸减小量最小,且这5组数据中 c 线上的5个孔尺寸减小量最大, b 线上的孔尺寸减小量次之, a 线上的孔尺寸减小量最小.同样道理,提取图5c中 d 、 e 、 f 3条线上的15个网孔,也可得到5组数据,用来考察网孔在 x 向的变形量,图5d为这15个网孔在 x 向的变形量对比图.可以看出,这15个孔的尺寸也均不同程度地变小,且靠近板料边缘的第10组中的3个孔尺寸减小量最大.这5组数据反映出的网孔尺寸减小量由外向内呈递减趋势.

结合无孔板的起皱现象和从图5得到的数据,就可以分析在相同的成形条件下网板成形件不易起皱的原因.在无孔板成形过程中,板料因塑性失稳而发生面外变形,出现起皱缺陷.带孔网板因为含有均匀分布的方孔,在成形过程中金属的流动可以移动到网孔位置,变形只需在面内就可以完成,没有发生面外变形,因而减小了板料起皱的趋势,虽然网孔尺寸发生了变化,但这种变形不影响网板的整体成形效果.通过上述模拟结果和分析可以看出,在相同的成形条件下,带孔网板成形球面件时不易起皱,成形效果较好.

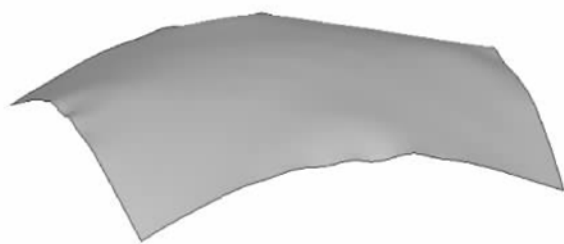
4 实验验证

本文根据现有的实验条件,对尺寸为202 mm×202 mm×1 mm的钛合金无孔板和带孔网板成形曲率半径为500 mm的球形件,分别进行了数值模拟和实验验证.图6为无孔板成形件的模拟光照图和实物照片,可以看出工件上有波浪形皱纹出现.图7为带孔网板成形件的模拟光照图和实物照片,可以看出工件表面光滑,成形质量良好.图6和图7表明,成形件的模拟情况与实验结果吻合很好,而且也符合本文前面得到的不起皱成形极限图.

5 结论

(1)在相同的成形条件下,带孔网板成形球形件时不易起皱,成形效果明显优于无孔板.

(2)通过数值模拟得到了无孔板和带孔网板两种板料球面成形件的不起皱成形极限对比图,同时

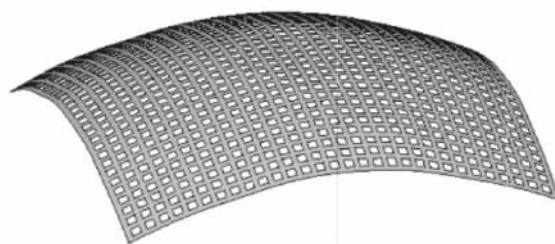


(a)成形件模拟光照图

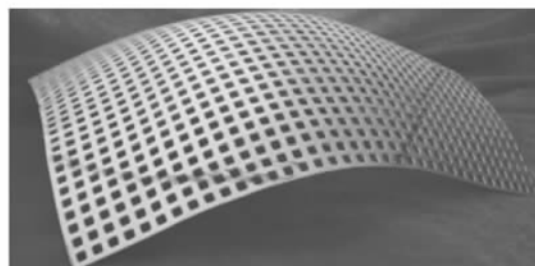


(b)实物照片

图6 无孔板模拟与实验结果对比图



(a)成形件模拟光照图



(b)实物照片

图7 带孔网板模拟与实验结果对比图

进行了相关的实验验证,模拟结果和实验结果吻合良好。

参考文献:

- [1] 陈伟强,杨应明. 颅骨缺损修复的展望[J]. 汕头大学医学院学报, 2001, 14(2): 154-156.
Chen Weiqiang, Yang Yingming. Expectations for mending absent crania [J]. Journal of Shantou University Medical College, 2001, 14(2): 154-156.
- [2] 谭富星,李明哲,钱直睿. 钛合金颅骨修复体的多点成形数值模拟[J]. 吉林大学学报(工学版), 2006, 36(6): 851-855.
Tan Fuxing, Li Mingzhe, Qian Zhirui. Numerical simulation on the process of multi-point forming for titanium alloy cranial prosthesis [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2006, 36(6): 851-855.
- [3] Li M Z, Cai Z Y, Sui Z, et al. Multi-point forming technology for sheet metal parts [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1/3): 333-338.
- [4] 蔡中义,李明哲,付文智. 板材多点成形中压痕缺陷的分析与控制[J]. 锻压技术, 2003, 28(1): 16-19.
Cai Zhongyi, Li Mingzhe, Fu Wenzhi. Analysis and control of dimpling in multi-point forming for sheet

metal [J]. Forging & Stamping Technology, 2003, 28(1): 16-19.

- [5] 吴勇国,李尚健,董湘怀. 薄壳单元有限元方程及其在板料成形中的应用[J]. 华中理工大学学报, 1994, 22(2): 124-127.
Wu Yongguo, Li Shangjian, Dong Xianghuai. A finite element equation with Kirchhoff shell element and its application in sheet metal forming [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1994, 22(2): 124-127.
- [6] 李明哲,李淑慧,柳泽,等. 板材多点成形过程起皱现象数值模拟研究[J]. 中国机械工程, 1998, 9(10): 34-38.
Li Mingzhe, Li Shuhui, Liu Ze, et al. Numerical simulation of wrinkles and studying in multi-point forming of sheet metal [J]. China Mechanical Engineering, 1998, 9(10): 34-38.
- [7] 陈喜娣,蔡中义,李明哲,等. 板材无压边多点成形中起皱数值模拟[J]. 农业机械学报, 2005, 36(4): 330-333.
Chen Xidi, Cai Zhongyi, Li Mingzhe, et al. Numerical simulation of wrinkling in multi-point forming for sheet metal without blank holder [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(4): 330-333.

(编辑 葛赵青)