

冲压模具设计中侧壁起皱的分析

F.-k. Chen and Y.-C. Liao

台湾 台北市国立台湾大学机械工程部门

在冲压过程中,起皱一般发生在有锥度的方形杯子和带有阶梯的矩形杯子成形时。这两种起皱类型的共同特征是起皱都发生在相对没有支撑的侧壁。在冲压一个有锥度的方形杯子时,当发生起皱时,比如冲模间隙和冲压毛坯的压力大小等参数的影响通过有限元模拟方法被检查到。模拟结果显示冲模间隙越大,起皱的就越明显,而且起皱不能通过增加冲压力来被抑制。在研究带有阶梯的矩形杯子冲压过程的起皱时,发现了一个有相似几何类型的实际部分。在侧壁被发现的起皱是因为介于冲头和阶梯边缘的金属板料不平衡伸展造成的。为减少起皱,一个最适宜的冲模设计方法就是利用有限元分析法。在无起皱产品中介于模拟结果和实测结果的好协议使有限元分析法生效,而且证实了利用有限元分析法去设计冲模的优势。

关键词:侧壁起皱;冲模;阶梯的矩形杯子;带有锥度的主形杯子

1. 介绍

起皱是在金属板料成形中主要的缺陷之一。由于性能和视察的原因,在产品中起皱往往不能被接受。在金属板料成形过程中,有三种形式的起皱频繁的发生:边缘起皱,侧壁起皱和由于残余的弹性压力引起的未变形区域的弹性弯曲。在冲压一个复杂形状零件的操作时,侧壁起皱意味着冲模腔中的起皱。由于侧壁区域的金属板料相对于其它区域的金属板料不被工具所保证质量,侧壁起皱的消除比边缘起皱的抑制更难。很明显,在未被加固的侧壁区域中的金属材料的额外拉伸可能防止起皱,而且在实际操作中也可以通过增加冲压力来防止起皱,但是过度的拉力会通过裂痕导致失败。因此,冲压力必须处于一个狭小的范围,一方面,要高于抑制起皱的力,另一方面,要低于产生破裂的力。冲压力的狭小范围很难计算。对于冲压一个复杂形状的零件,当起皱发生在中心区域时,有意义的冲压力范围甚至不存在。

为了检查起皱的形成结构,Yoshida et al.发明了一种测试,在这种测试里,一块薄板料不是均匀的沿着它的斜度被拉伸。他们也计划一个近似的理论模型,在这种模型里面,起皱的开始取决于在压力不均匀区域中有压缩的侧部力的弹性弯曲。Yu et al.从实验性和分析性上研究起皱问题,通过理论分析,他发现带有两个圆周波的起皱可能发生,然而,实验结果显示是四到六个。当通过一个有锥度的模具画出金属板料时,Narayanasamy 和 sowerby 用平底的冲头和半球状的冲头检查金属板料的起皱。他们也试图去把可以抑制起皱的道具分类。

那些努力都被聚中于和简单形状零件关联的起皱问题上,例如:一个圆形的杯子。在 90 年代早期,金属板料成形中三维动态软件和有限元方法的成功运用使得分析包括在冲压一个复杂形状零件的起皱问题成为可能。在当前的研究中,三维有限元分析法被用来分析在冲压一个带有阶梯的矩形部分的过程中,产生起皱的金属流动制造参数上。

一个带有阶梯的方形杯子,在杯子的每一边都有一个倾斜的侧壁,在带有锥度的杯子也相应的存在倾斜的侧壁。在冲压过程中,侧壁上的金属板料相对没被支撑,因此,这个部位更容易起皱。在当前的研究中,起皱过程中的各种不同的制造参数的影响都在被研究。在冲压一个带有阶梯的方形杯子时,就像图 1B 显示的一样,可以观测到另一种形式的起皱。为了评估分析的效力,在当前的研究中,一个确切阶梯几何形状的物体被检测。通过使用有限元分析法和用适宜的模具设计来减少起皱,起皱的原因被确定。在观测一个实际产品成形时,通过有限元分析法得到的模具设计方法得到证实。

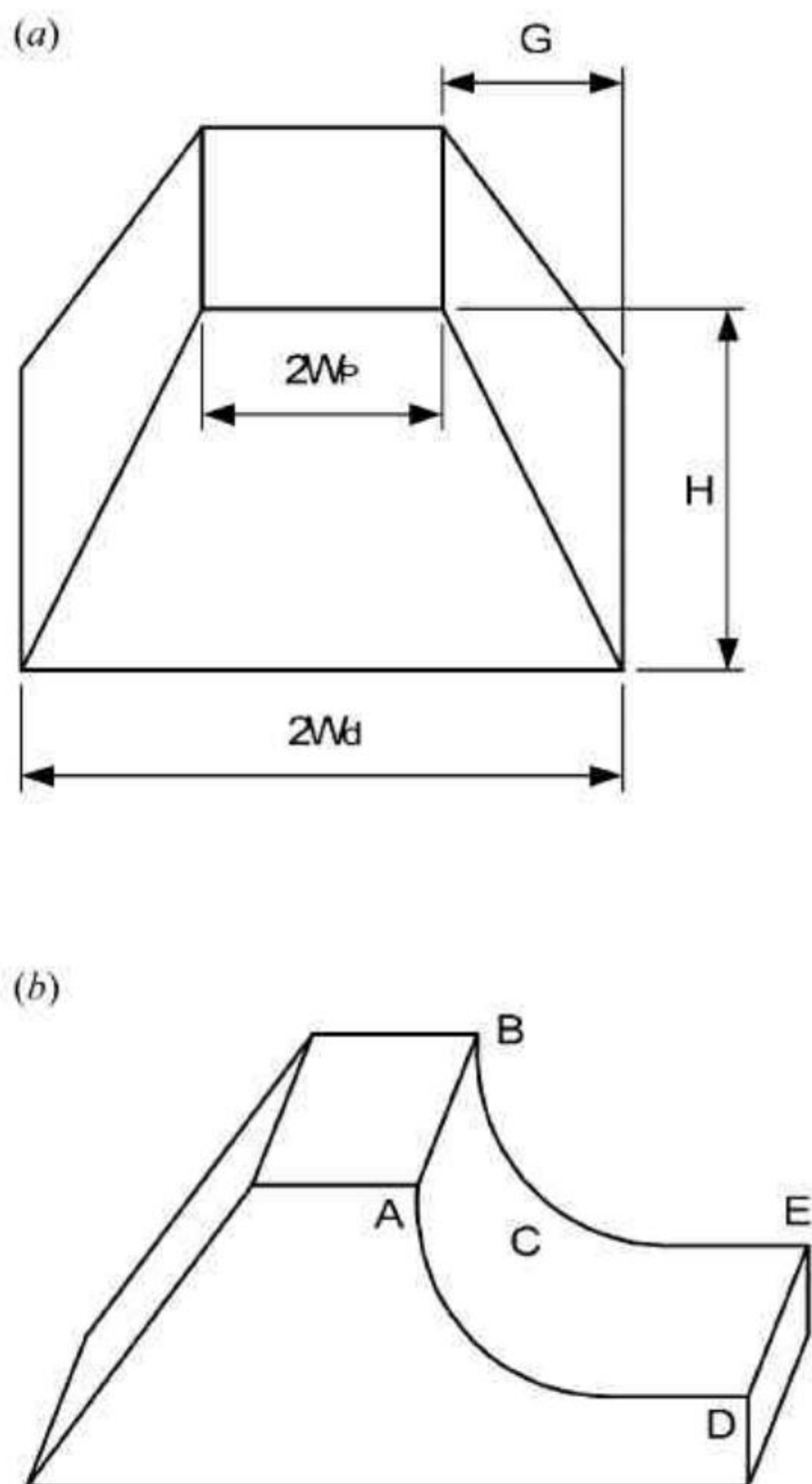


图 1 带有锥度方形杯子的拉伸 (a) 和带有阶梯的矩形杯子的拉伸 (b)

2 有限元模型

包括冲头、模具和毛坯固定器等工具几何学是用 CAD 或 PRO/E 软件来设计的。同样用 CAD 软件，三节点和四节点的外形元素被采用用来为以上工具生产网眼系统。对于有限元模拟来说，工具被认为是刚硬的，而且对应的网眼被用来定义工具几何学而不是压力分析。同样 CAD 软件使用四节点外形元素来为板形坯料构造网眼。图 2 显示工具的完整布置的网眼系统和用来冲压带有阶梯方形杯子的板形坯料。由于对称条件，方形杯子的四分之一被分析。在模拟中，板形坯料放在压力机上，冲模向下移动，逆着压力机夹紧板形坯料。然后冲模上升使得板形坯料按着模腔成形。

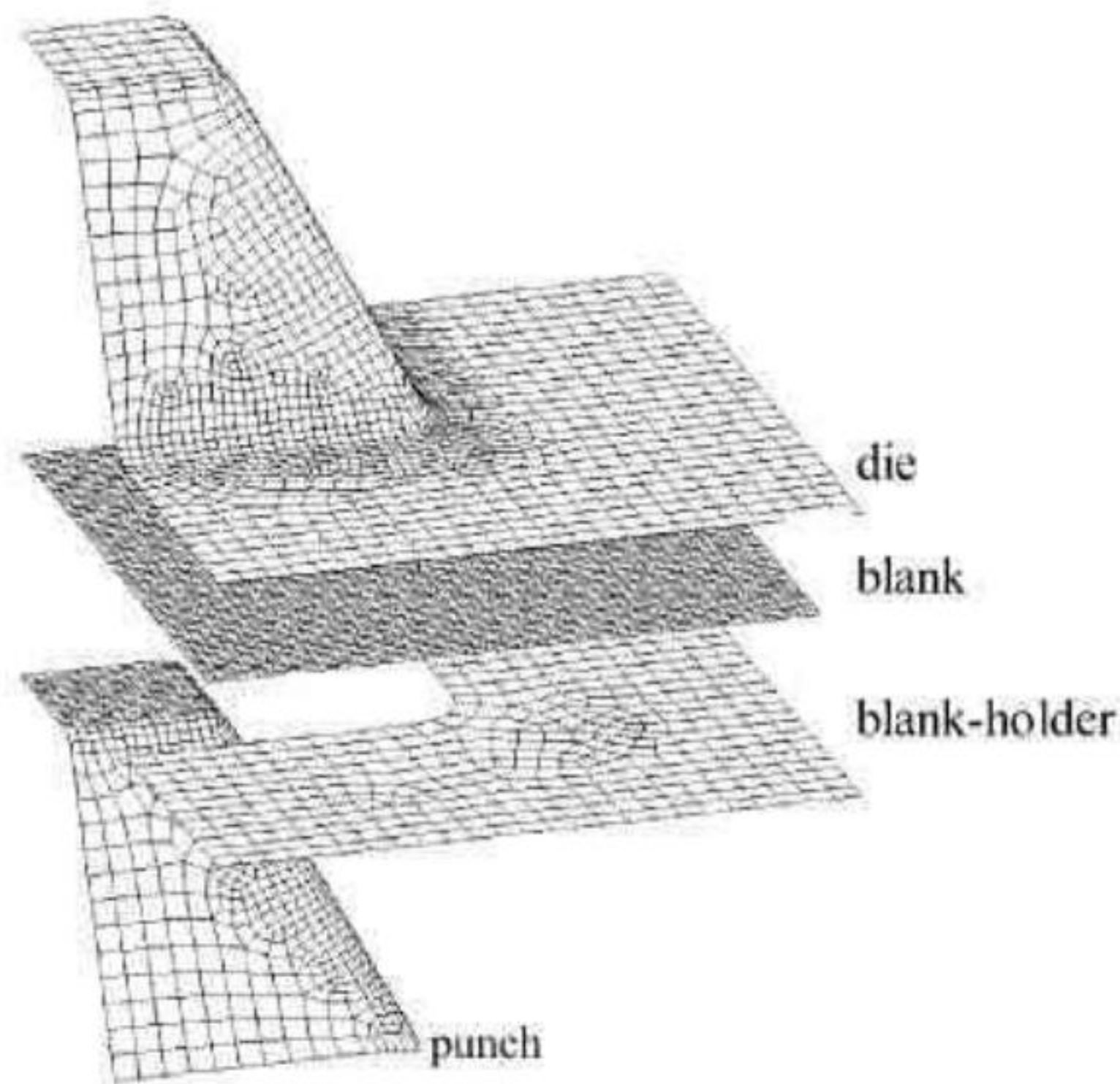


图2 有限元网眼

为了表演一个精确的有限元分析法,金属板料的真实应力应变曲线被要求是输入数据的一部分。在当前的研究中,拉深成形的金属板料也被用来模拟。为在飞机上切割下的样本测试被进行,它们依次从0度的旋转方向到45度的旋转方向,再到90度的旋转方向进行着。平均的流动力 σ , 计算方程为 $\sigma = (\sigma_0 + 2\sigma_{45} + \sigma_{90}) / 4$, 因为每一个方法真实应变通常用来模拟带锥度方形杯子和带阶梯矩形的冲压,就如图3显示的那样。

当前研究中所有的模拟利用有限元程序 PAM-STAMP 涉及 SGI Indigo2 工作站。为了完成模拟所需输入数据的设置,冲头的速度一般设置在 10m/s, 库仑摩擦系数设置在 0.1。

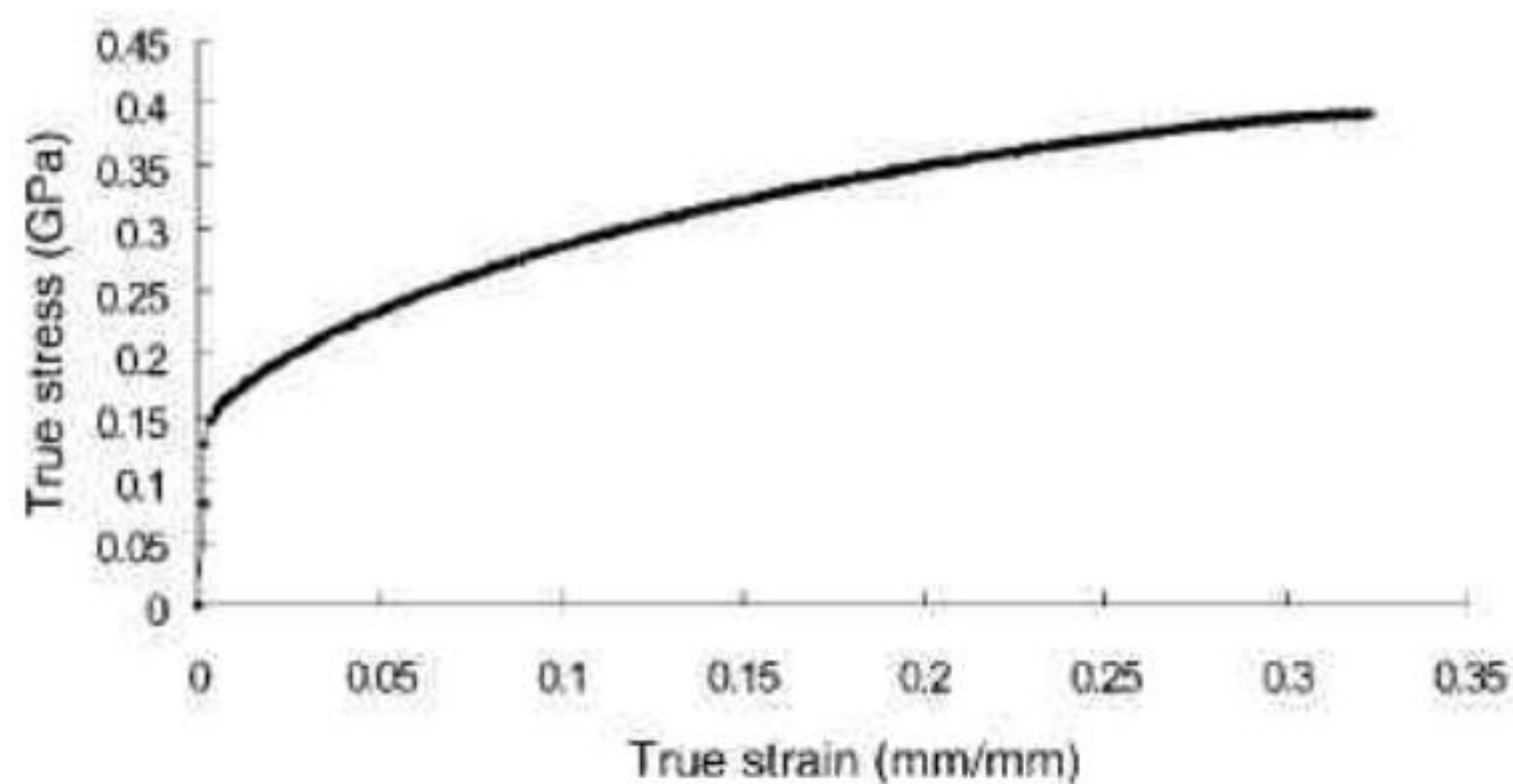


图3 金属板料的应力应变关系

3 锥度方形杯中的起皱

正像图 1a 显示的那样,草图暗示着一些有关锥度方形杯子的尺寸,方形冲头每一面的长度 ($2W_p$)、模腔的尺寸 ($2W_d$) 和高度(H)被认为是影响起皱的至关重要尺寸。在当前研究中,模腔尺寸和冲头尺寸的差距的一半称作冲模间隙(记作 G), $G = W_d - W_p$ 。

相关的在侧壁没被支撑的金属板料的宽度取决于冲模间隙，起皱假想通过增加冲压力来被抑制。相对于冲压一个锥度方形杯子，冲模间隙和冲压力两方面的影响在接下来的部分被研究。

3.1 冲模间隙的影响

为了检查冲模间隙对起皱的影响，在冲压一个锥度方形杯子时，分别用 20mm，30mm，50mm 大小的冲模间隙进行模拟冲压。在每次模拟冲压中，模腔的尺寸都是固定在 200mm，而且杯子拉深的高度都是 100mm。三次模拟中使用的金属板料都是 380X380 的方形尺寸，厚度也都是 0.7mm，金属的应力应变曲线如图 3 所示。

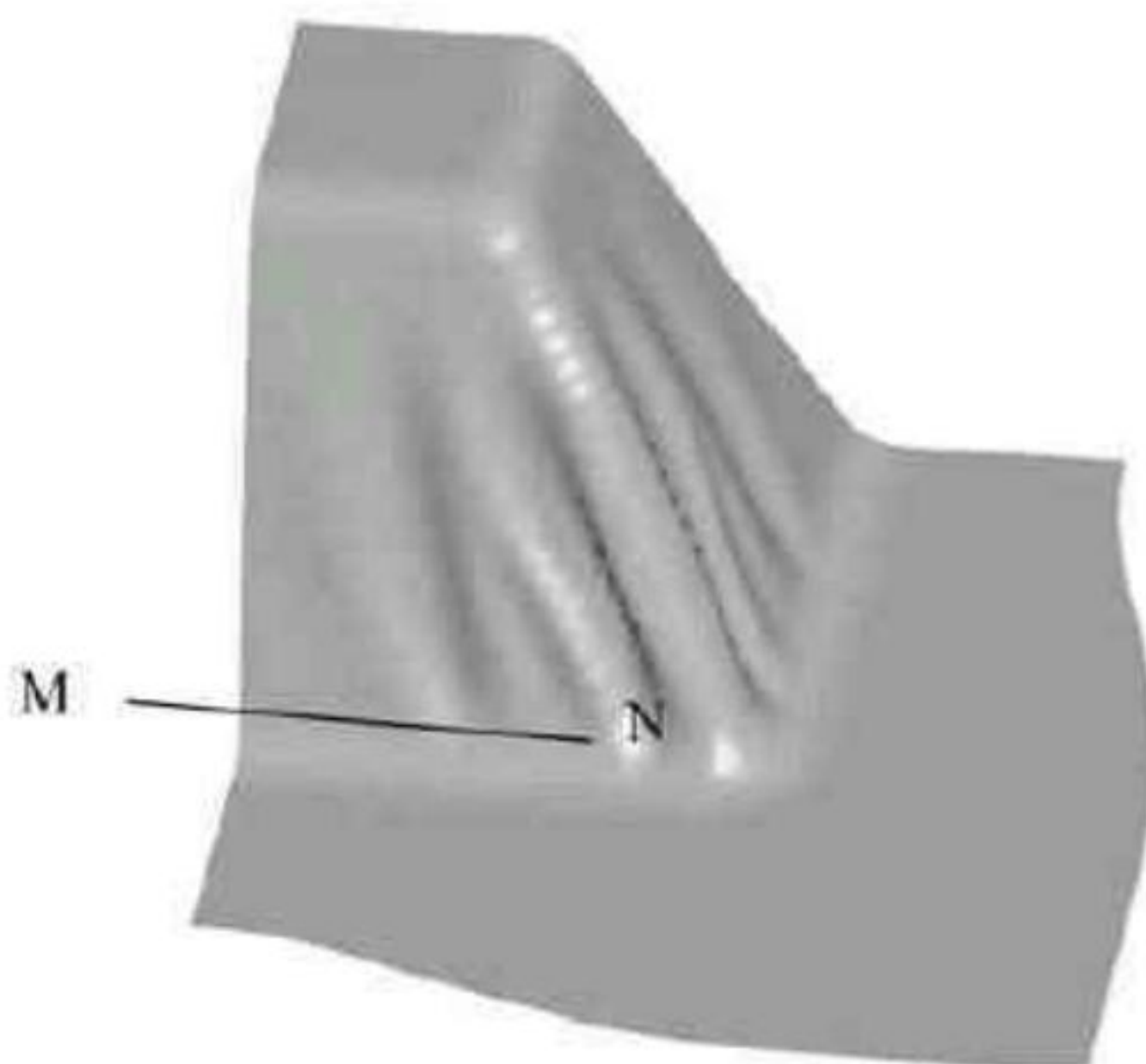


图 4 G=50mm 的带有锥度的方形杯子

模拟结果显示三次模拟中都发生起皱现象，冲模间隙为 50mm 冲压出来的杯子模拟形状如图 4。从图 4 中可以看出，起皱分布在侧壁，侧壁拐角尤其明显。这就说明在冲压过程中，起皱是由于在侧壁有大面积区域不被支撑，同样，由于冲模间隙不一样，冲头各边的长度和模腔尺寸也不一样。由于横向压力的存在，在冲头和模腔中拉深成形的金属板料越来越不牢固。在压缩下，侧壁金属板料不受限制的拉伸是起皱的主要原因。为了比较三种不同间隙冲压出来的产品，两个主要的应变比率 β 被介绍， $\beta = \epsilon_{\min} / \epsilon_{\max}$ ，这里的 $\epsilon_{\min}$ 和 $\epsilon_{\max}$ 分别是主要的和次要的应变。Hosford 和 Caddell 已经展示了 β 的实际值比 β 的评论值大，假设当起皱发生时， β 的实际值越大，起皱的可能性就越大。

在三个冲模间隙不同的冲压中，同一侧壁高度，沿着横截面 M-N 的 β 值在图 4 中标记出，在图 5 中画出。图 5 中说明严重的起皱一般发生在拐角处，而对三个冲模间隙不同的冲压，在侧壁中心很少发生起皱。还说明了冲模间隙越大， β 的实际值就越大。因此，增加冲模间隙将增加在锥度方形杯子侧壁处发生起皱的可能性。

3.2 冲压力的影响

众所周知，在冲压过程中，增加冲压力可以帮助排除起皱。为了研究增加冲压力的影响，冲模间隙为 50mm 与起皱是有关联的，用冲模间隙为 50mm 的模具冲压带有锥度方形杯子被用不同的冲压力来模拟了。冲压从 100KN 增加到 600KN，这两个力分别产生 0.33Mpa 和 1.98Mpa。在上述部分，剩下的模拟条件与给定的是一样的。处于中间的 300KN 也被用来模拟。

模拟结果显示冲压力的增加并没有帮助消除发生在侧壁的起皱。在图 4 中已标出沿着横截面 M-N 的 β 值与冲压力为 100KN 和 600KN 的 β 值作比较。模拟结果指出两种情况下，沿着横截面 M-N 的 β 值是一样的。为了检查两种不同冲压力的起皱形状，正如图 4 和图 6 标出的那样，侧壁上从底部向上有五处不同位置的横截面。从图 6 可以看出，两个外壳的波浪形横截面是相似的。这就说明在冲压带有锥度的方形杯子时，冲压力不影响起皱的发生，这是因为起皱的原因主要是由于在有横向压力存在的侧壁处有大面积区域不被支撑。冲压力对冲头和模腔之间材料不稳定的模式并没有影响。

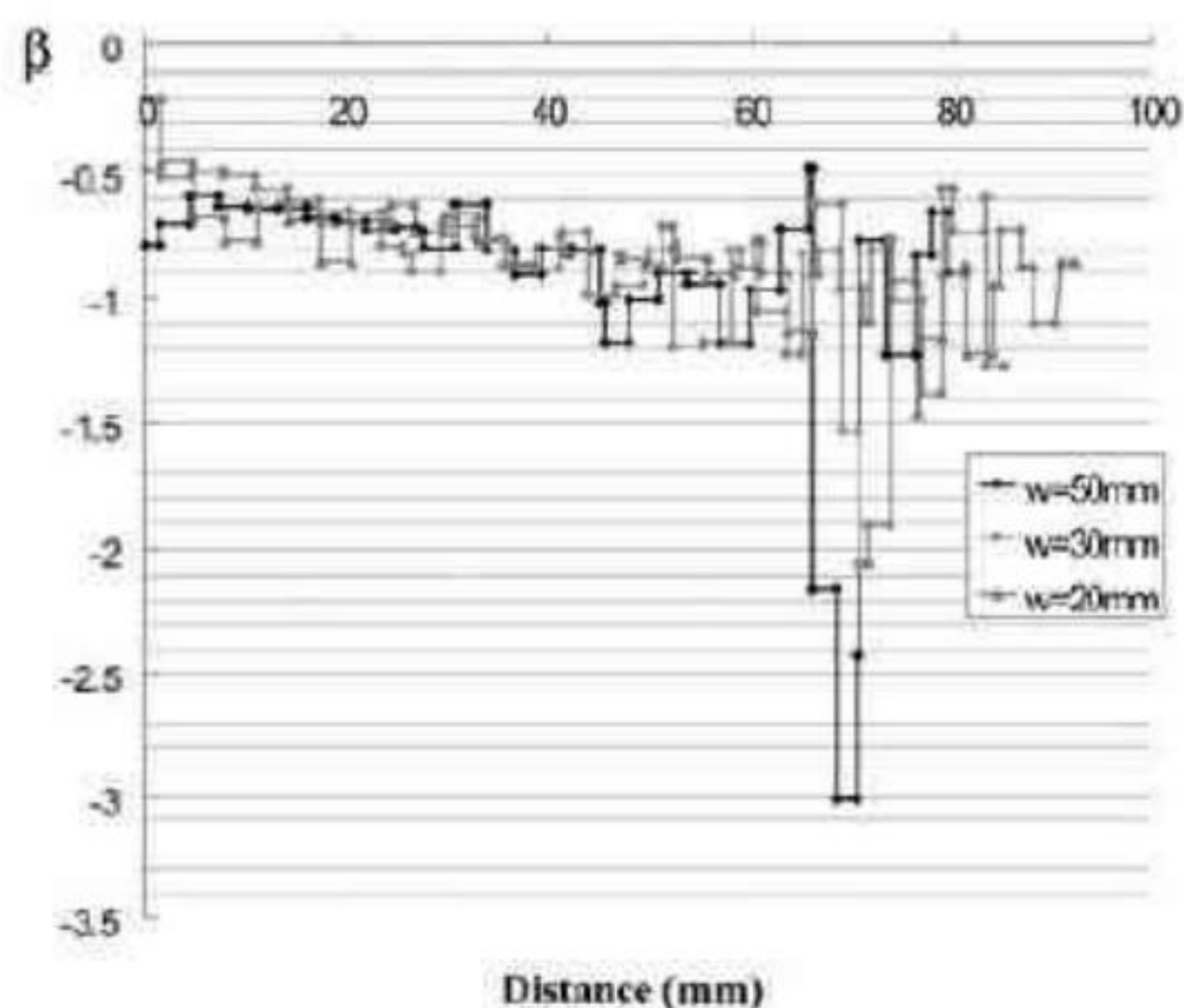


图 5 沿着横截面 M-N 不同冲模间隙的 β 值

4 阶梯矩形杯子

在冲压一个阶梯矩形杯子时，起皱发生在侧壁即使冲模间隙并不是那么重要。轮廓 1 显示冲压阶梯矩形杯子的冲头草图，在这张草图中，侧壁 C 沿台阶 D-E 而行。在近期的研究中，在一个实际的产品中检查到了这种几何形状。这种产品使用的原材料的厚度是 0.7mm，从拉力测试中获得的应力应变关系如图 3 所示。

这种冲压部分产品的程序包括通过清理焊缝的深拉。在这种深拉过程中，没有焊缝被用在冲模表面来帮助帮助金属的流动。但是，由于冲头拐角处的半径过小和其复杂的几何形状，如图 7 显示的那样，在冲头边缘上部经常发生拉裂，在真实产品的侧壁处经常发生起皱。从图 7 中可以看出，皱纹发分布在侧壁上，但是在阶梯边缘拐角处最为严重，就像图 1 (b) 中 A-D, B-E 显示的那样。在冲头的上部边缘，金属往往被拉裂，就像图 7 所示。

为了进一步的了解冲压过程中板料的变形，诞生了一种有限元的方法。这种有限元模拟方法被在最初的设计中。部分的模拟形状如图 8 所示。从图 8 中可以看出，零件上部边缘的网眼被拉深，皱纹分布在侧壁上，类似真实零件中的那样。

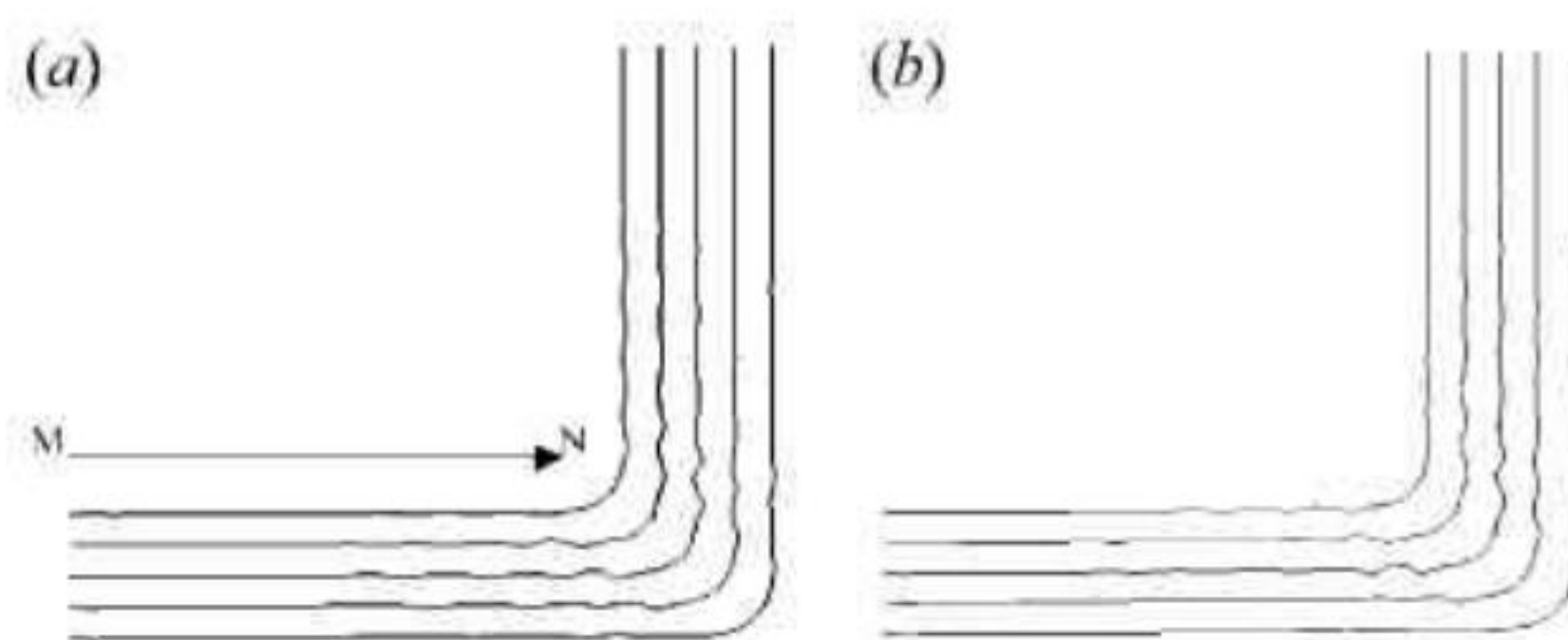


图 6 从图 a 的 100KN 到图 b 的 600KN 不同侧壁高度的横截面线条



图 7 产品零件中的拉裂和起皱

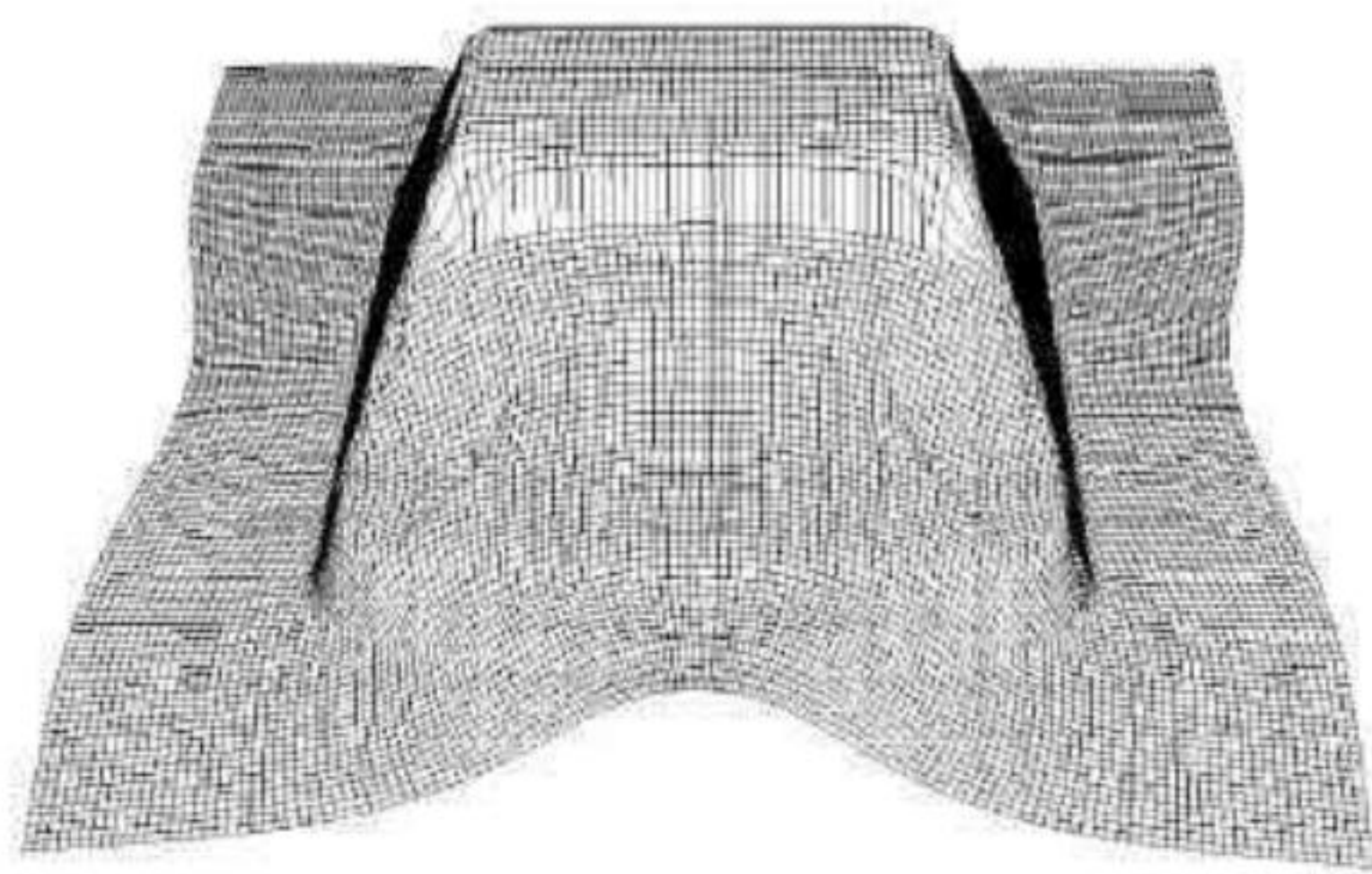


图 8 产品拉裂和起皱的模拟形状

如图 1 (b) 就像 A-B 边缘半径和冲孔拐角处 A 的半径一样，冲孔的半径也很小，这被认为是拉裂的最主要原因。但是，根据有限元分析的结果，拉裂可以通过增加以

半径来避免。这种理念在现实产品中通过增加半径得到证实。

个别的尝试也被用来消除起皱。第一，冲压力加到原来的 2 倍。但是，就像在拉深带有锥度的杯子中得到的结果一样，冲压力对消除起皱现象没有起有很大的效果。通过增加摩擦和毛坯尺寸也得到同样的结论。于是我们推测，这种起皱不能通过增加冲压力来得到抑制。

由于在金属屈服于过大压力的区域，往往会因为大量的金属流动而起皱，一种通过在起皱区域增加挂钩用于消除起皱的简单方法被用来吸收多余的材料。为了多余的金属能有效的被吸收，挂钩应该平衡的加在起皱位置。基于这种理念，两个挂钩被加在邻近在壁上吸收多余的材料，如图 9 如示。模拟结果显示，阶梯拐角处的起皱正如想象的那样被吸收，但是，一些起皱仍然没被吸收。这说明在侧壁处需要更多的挂钩来吸收所有过量的材料，但是这在模具设计中是不允许的。

利用有限元分析法分析冲压工序的一个优势是冲压过程中板料的变形形状可以被监测，而这在真实的产品冲压过程中是不可能的。对冲压过程中金属流动的精密监测显示板料最开始通过冲头的力按模腔的形状成形，直到板料接触到如图 1（b）阶梯 D-E 边缘才形成起皱。起皱的形状如

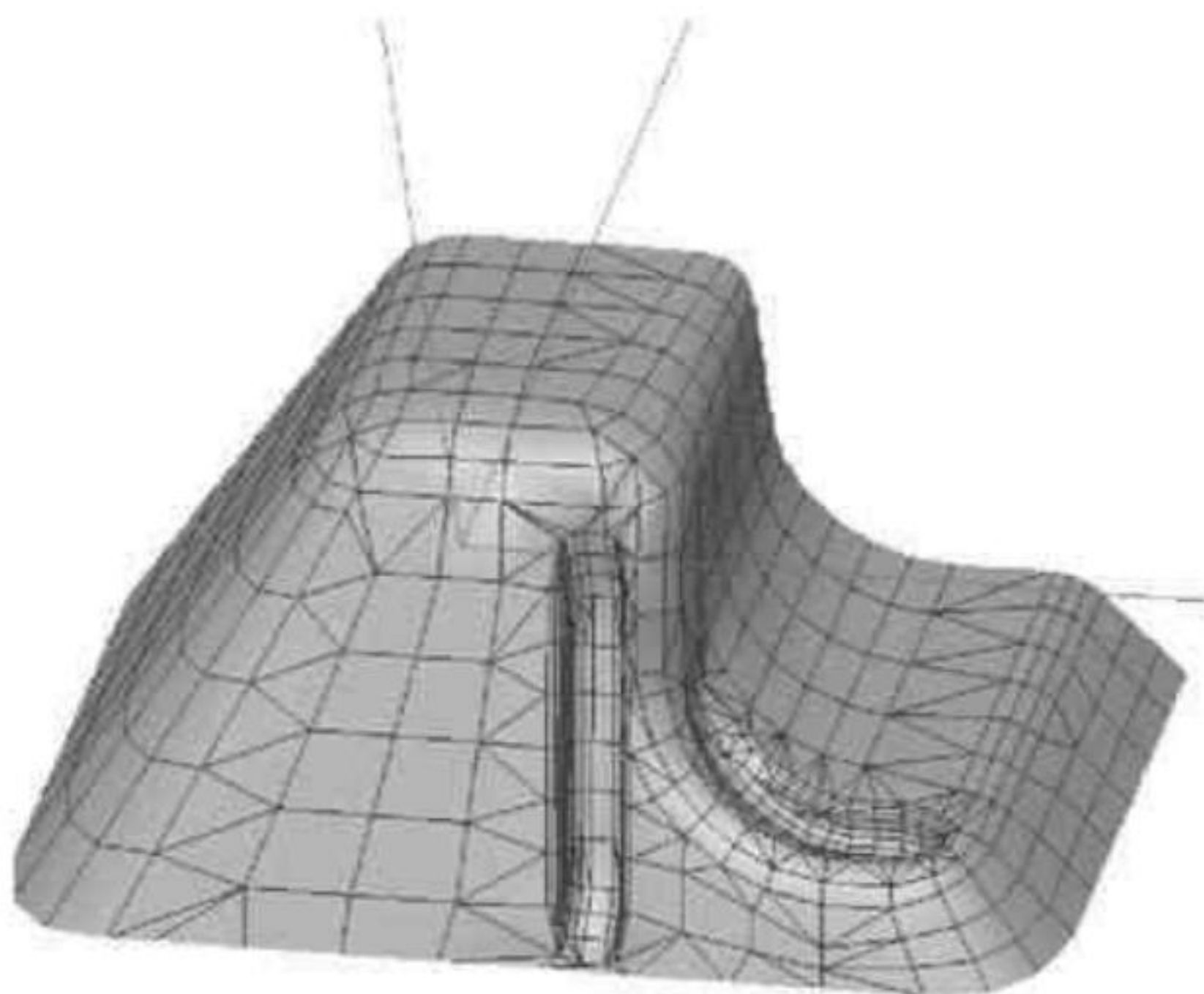


图 9 加到侧壁的起皱

图 10 显示的那样。这就为模具设计的改进提供了有价值的信息。



图 10 当板料接触台阶边缘的起皱形成

Draw-Wall Wrinkling in a Stamping Die Design

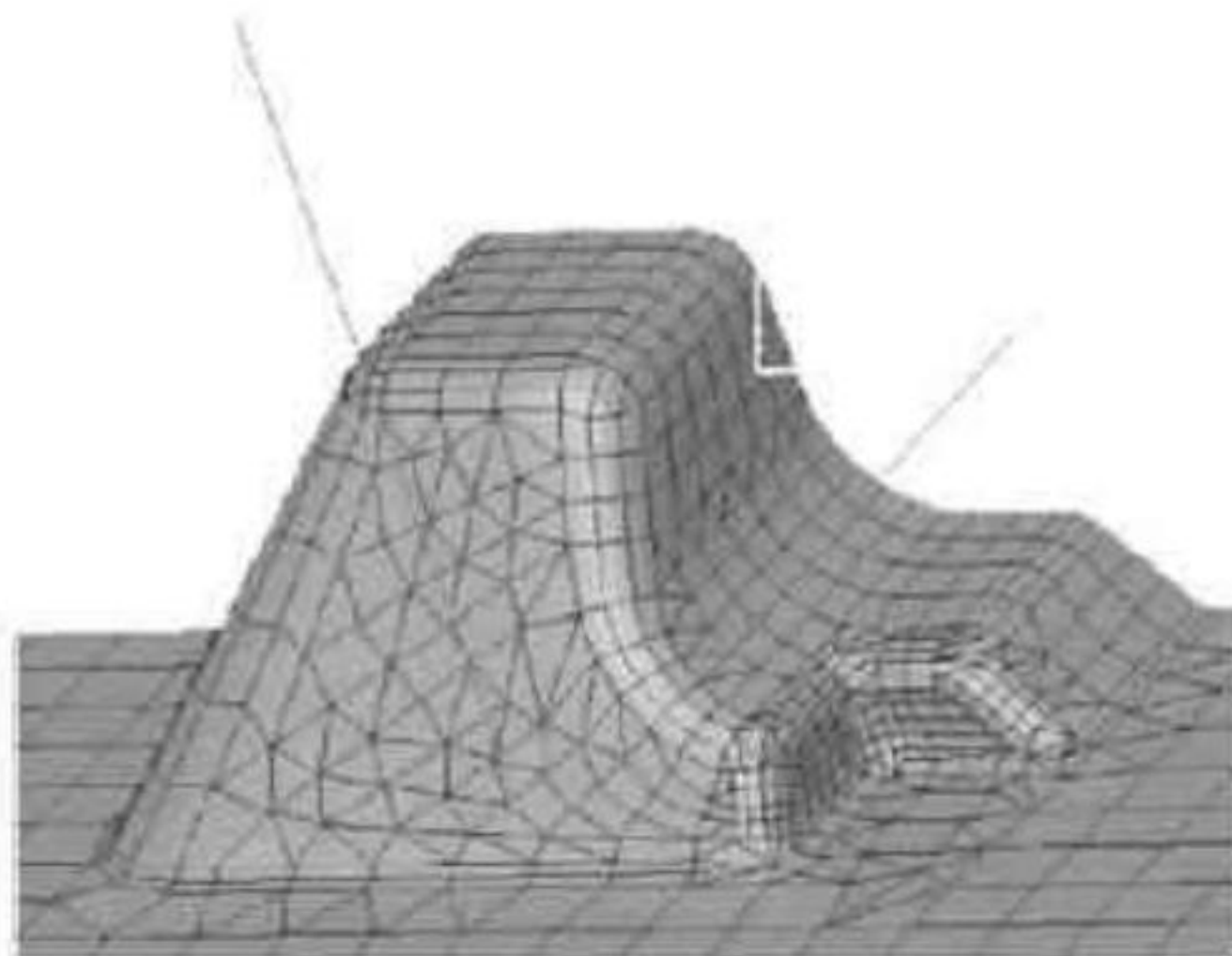


图 11 切除了的台阶拐角

对于起皱的发生,最初的一个猜想是冲头拐角处范围 A 和阶梯拐角处范围 D 之间的金属板料处于不平坦的拉深,就如图 1 (b) 所示。阶梯拐角处被切主要是为了改善拉深条件,这样就允许通过增加阶梯边缘有更多的拉伸被应用到如图 11 所示,从而使得模具设计的改进得到发展。但是,杯子侧壁处仍然有起皱,这就意味着起皱是因为整个冲头边缘和整个阶梯边缘的不平坦引起的,不仅仅是冲头拐角处和阶梯拐角处之间的不平坦。为了证实这种说法,两种改进过的模具设计被用来实验:为了描述想象中的形状用两种拉深操作,一种是切去整个阶梯,而另一种是增加更多的拉深操作。前一个方法的模拟形状所图 12 所示。自从更低的阶梯被切去后,拉深工序与图 12 中的矩形杯子拉深工序性很相似。从图 12 中可以看出起皱现象已被消除。

在这两种操作的拉深工序中,板料最初是被拉到很深的阶梯处,如图 13 (a) 所示,然后,较低的阶梯在第二步拉深操作中成形,同是,如图 13 (b) 所示的想象形状也得到了。从图 13 (b) 可以清晰的看出,通过两步拉深工序可以造出没有起皱的阶梯矩形杯子,同时也说明在两步拉深工序中,如果相应的顺序被应用,则更低一些的阶梯处的成形是伴随更深阶梯处成形和最深阶梯边缘处成形的最早成形,如图 1 (b) 中

的 A-B，因为金属不容易通过较低的阶梯进入模具型腔。



图 12 改善模具设计的模拟形状

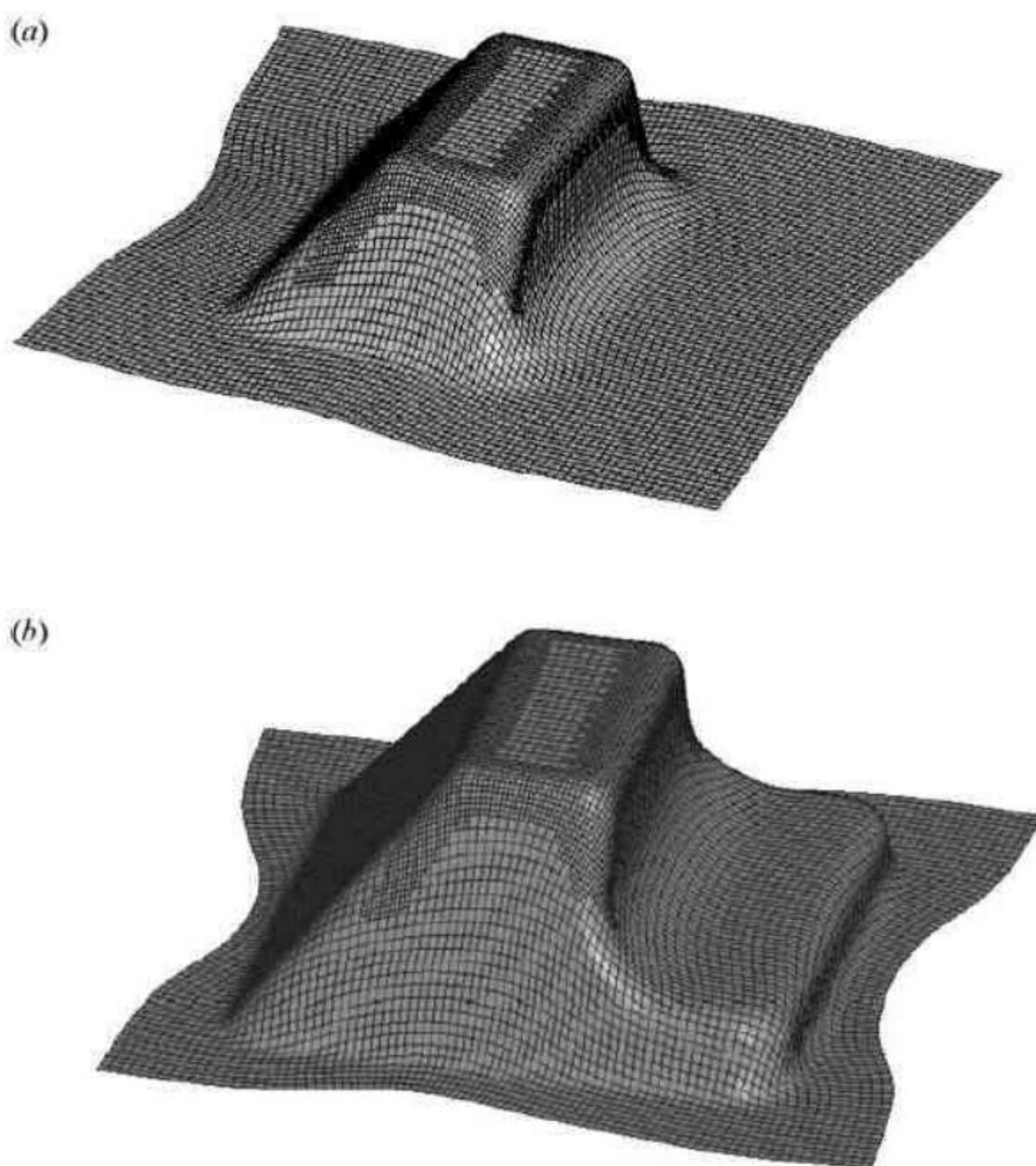


图 13 两个操作步骤中的 a 第一步操作 b 第二步操作
有限元分析法说明用简单的拉深操作来设计理想产品的冲压模具设计是很难完成

的。但是，由于额外的模具费用和操作费用，两个操作的制造费用是很高的。为了保持较低的制造费用，零件的设计师对形状做出了合适的改变，而且通过有限元模拟分析法结果去切除较低的台阶来改善模具设计，如图 12 所示。随着设计方法的改进，产品真实的冲压模具被制造出来，而且零件还没有起皱，如图 14 所示。通过有限元模拟分析法得到的零件也没有起皱。

为了进一步验证有限元模拟分析法的结果，有限元模拟分析法得到的沿横截面 G-H 的厚度分布如图 14 所示，这与产品的尺寸做了比较，比较的结果显示在图 15。从图 15 可以看出有限元模拟分析法得到的预想的厚度分布和产品得到的厚度分布是相符合的。这种吻合证实了有限元模拟分析法的效率。

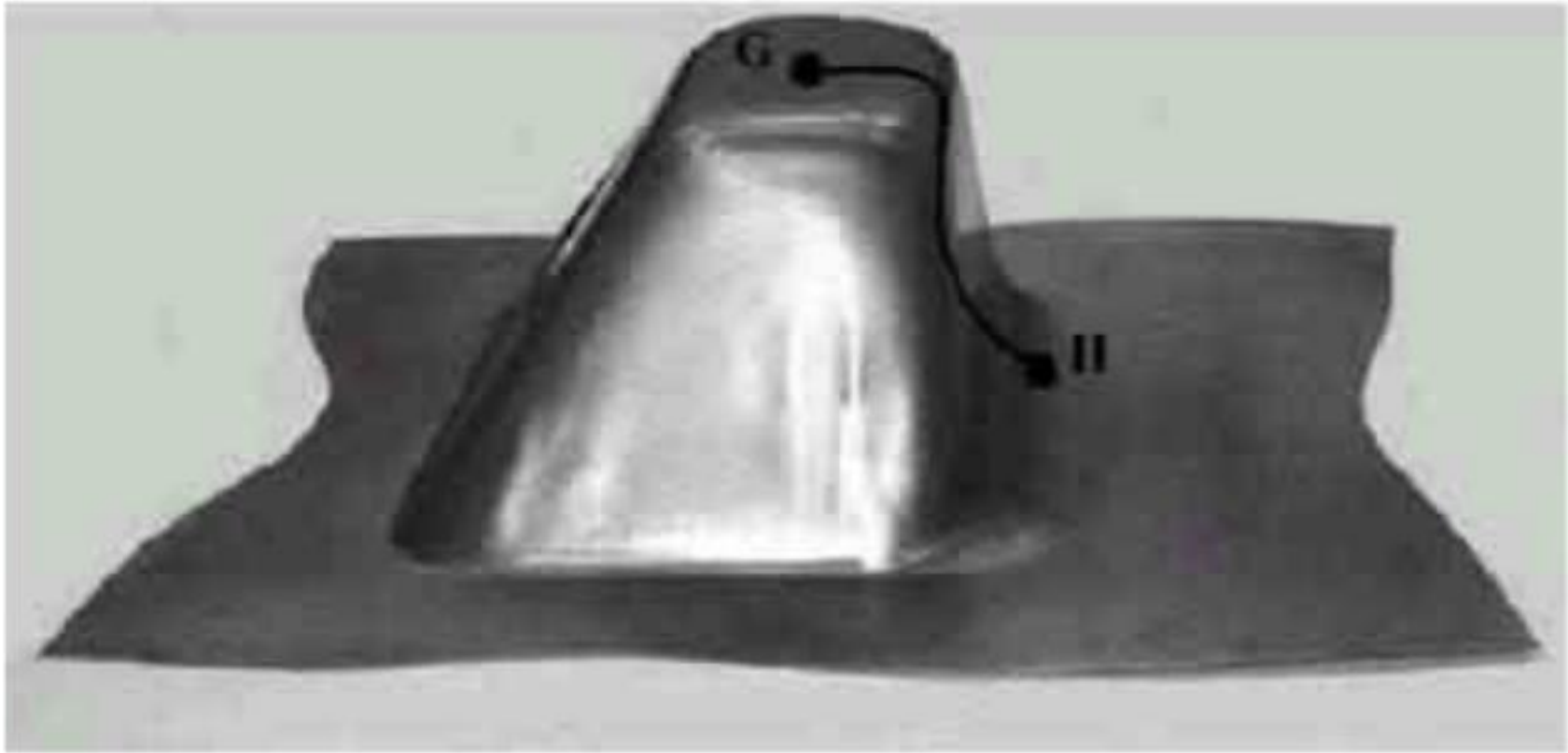


图 14 无缺陷产品零件

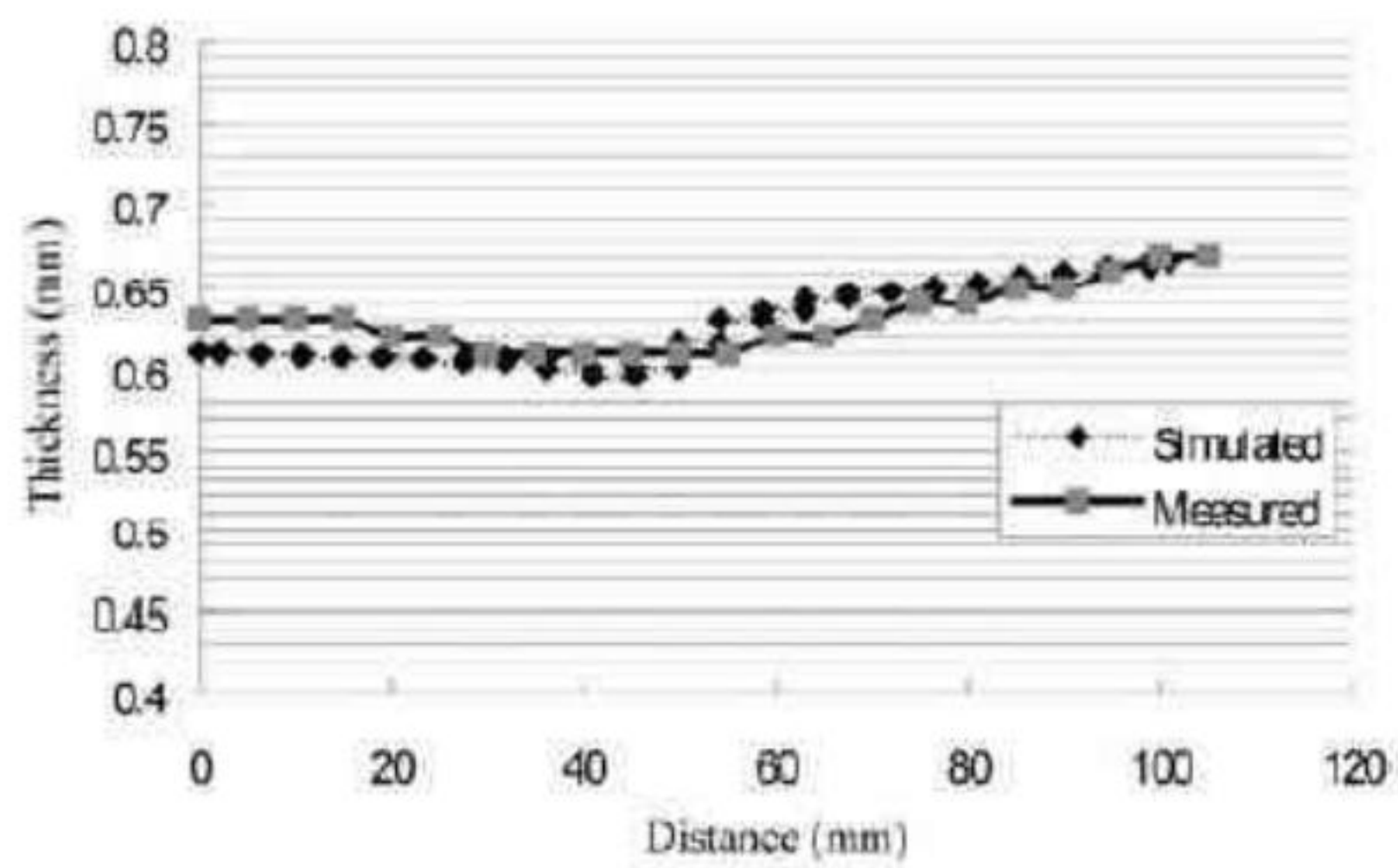


图 15 G-H 处模拟和测量厚度

5 概要和结束语

通过有限元模拟分析法研究了两种在冲压过程中的起皱，而且还检查了其起皱的原因和消除起皱的方法。

第一种形式的起皱发生在冲压带有锥度的方形杯子的侧壁上，这种起皱的原因是因为冲模间隙过大（冲模间隙就是模腔的尺寸和冲头的尺寸的差距）。当金属被拉至模腔中，在冲头和型腔中有一有害的拉深时，大的冲模间隙导致金属板料的大面积区域不被支撑，因此大面积区域不被支撑导致起皱。有限元模拟分析法显示这种起皱不能通过增加冲压压力的方法来得到抑制。

另一种形式的起皱发生在有阶梯矩形的几何形状物体冲压过程中。起皱往往发生在台阶以上的侧壁，甚至冲模的间隙不是足够的大。通过有限元模拟法得知，这种起皱主要是由于在冲头和台阶边缘存在不平坦的拉伸。在模具设计过程中，通过有限元模拟分析法单独的尝试被用来消除起皱，切除了台阶的模具被建立。通过无缺陷的零件证实了这种模具设计方法对消除起皱的作用。有限元模拟分析法得到的结果和真实产品中看到的结果相吻合说明了有限元模拟分析法的准确性，还证实了用有限元分析法代替真实的模具制造方法的效力。

感谢

作者希望感谢中华人民共和国民族科学委员会授于 NSC-86-2212-E002-028 编号才使得这个项目得到发展。他们也希望感谢 KYM 提供了产品零件。

参考文献

1. K. Yoshida, H. Hayashi, K. Miyauchi, Y. Yamato, K. Abe, M. Usuda, R. Ishida and Y. Oike, 在金属板料, 皱纹机械工具的效果取决于不均匀的拉深
2. T. X. Yu, W. Johnson 和 W. J. Stronge, “圆形碟子在半球形模具中的冲压成形”, 机械学杂志, 26, pp. 131-148, 1984
3. W. J. stronge, M. P. F. Sutcliffe 和 T. X. Yu, 在冲压期间, 圆形碟子的塑性起皱。实验的技巧, pp. 345-353, 1986.
4. R. Narayanasamy 和 R. Sowerby, “当用一种圆锥形的冲模成形时的金属板料起皱”, 材料处理技术杂志, 41, pp. 275-290, 1994.
5. W. F. Hosford 和 R. M. Caddell, 金属成形:机械和冶金, 1993 年第二季。