

基于 Autoform 和 Dynaform 软件的超高强钢零件 仿真对比

牛超^{1,2}, 陈新平^{1,2}, 崔振祥^{1,2}

(1. 宝山钢铁股份有限公司中央研究院, 上海 2019002;
2. 汽车用钢开发与应用技术国家重点实验室(宝钢), 上海 201900)

摘要: **目的** 研究商用软件 Autoform 和 Dynaform 对超高强钢零件的回弹预测精度。**方法** 以某车型前围板中间横梁零件冲压成形过程为例, 分别基于 Autoform 和 Dynaform 软件建立冲压有限元模型模拟冲压成形和回弹过程, 对两种软件成形性和回弹计算结果进行比较和讨论分析。**结果** Dynaform 和 Autoform 两种软件在成形性计算时结果比较一致, 相同位置 Autoform 计算减薄率为 16%, Dynaform 为 16.2%; Dynaform 计算的最大减薄率为 18%, 比 Autoform 的 16.2%略大; 两种软件基本在相同位置预测出了起皱和开裂现象; 比较修边后回弹仿真值与实测值, Dynaform 计算的偏差满足设定阈值的占 51.4%, 高出 Autoform 约 20%。**结论** Dynaform 计算的最大减薄率更大一些, 对应量产时较高的安全裕度; 同时其回弹计算结果与实测回弹值更为接近, 回弹预测精度更高。

关键词: Autoform; Dynaform; 超高强钢; 回弹; 成形性

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.06.011

中图分类号: TG386 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)06-0053-04

Comparison of Forming Simulation For UHSS Part Based on Autoform and Dynaform

NIU Chao^{1,2}, CHEN Xin-ping^{1,2}, CUI Zhen-xiang^{1,2}

(1. Central Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 2019002, China;
2. State Key Laboratory of Development and Application Technology of Automotive Steels (Baosteel), Shanghai 201900, China)

ABSTRACT: This paper aims to study the prediction accuracy of springback based on commercial software Autoform and Dynaform. Parts for intermediate transverse girder in front wall panel of certain model was taken as example to establish a finite element model to simulate the punching, forming and springback based on Autoform and Dynaform, and then compare and discuss the forming property and calculation results of springback based on the two kinds of software. The forming results of Dynaform and Autoform were nearly consistent. The reduction based on Autoform and Dynaform in the same position was 16% and 16.2% respectively. The maximum reduction calculated through Dynaform was 18% which was slightly higher than 16.2% calculated through Autoform. Both kinds of software predicted wrinkling and crack in the same place. The simulated value after trimming was compared with the measured value. The calculation deviation of Dynaform was 51% of the threshold value set, which was about 20% higher than that of Autoform. The maximum reduction calculated through Dynaform is higher, thus can get a higher safety margin in the volume production. Meanwhile, the calculation result of springback is closer to the measured value and its prediction accuracy is higher.

KEY WORDS: autoform; Dynaform; ultra-high strength steel; springback; forming property

近年来,随着汽车工业对汽车安全性能以及节能环保要求的提高,在开展车身轻量化工作的同时,还

要兼顾汽车车身强度,超高强度钢板由于其具有重量较轻和安全性能较高的双重优势,越来越受到汽车企业的青睐,应用日益广泛^[1-2]。超高强钢由于其强度明显提高,成形性能下降,零件冲压过程中出现的开裂和回弹问题是超高强钢材料推广应用中的亟待解决的一大难题^[3]。目前,随着计算机技术的发展,有限元模拟技术在冲压成形领域得到了广泛应用,可以对冲压过程的复杂变形进行监测,预测并优化冲压工艺,已成为解决传统强度钢板冲压过程开裂及控制回弹的重要手段^[4-5]。

作为冲压成形仿真领域的专业软件,Autoform 被广泛应用于汽车、模具等行业,指导模具开发、维护现场稳定生产等,其在传统低强度材料的成形和回弹方面有着较为准确的预测能力^[6]。随着一些超高强钢材料的出现,材料的成分、工艺、强化机理等发生了较大变化,最终影响了板料成形过程的变形机理,Autoform 软件还能否有效预测成形结果需要验证。Dynaform 软件通常被认为成形、回弹预测精度较高^[6],对超高强钢仍否适用,为验证这一问题,文中以典型超高强钢零件汽车前围板中间横梁为例,基于两种软件,建立成形和回弹过程的有限元模型,并对计算结果进行对比分析,了解两种软件计算结果的差异以及对超高强钢成形仿真的适用性。

1 有限元模型

1.1 冲压工艺

文中选取的前围板中间横梁零件见图 1,该零件横向安装在前围板上,在车身发生正向碰撞时,承受来自前方的冲击,以减少前围板侵入量,避免或减少对前排乘员的伤害,因此该零件通常使用高强度钢材且厚度较大,文中零件材料为宝钢 DP980,厚度为 2 mm。

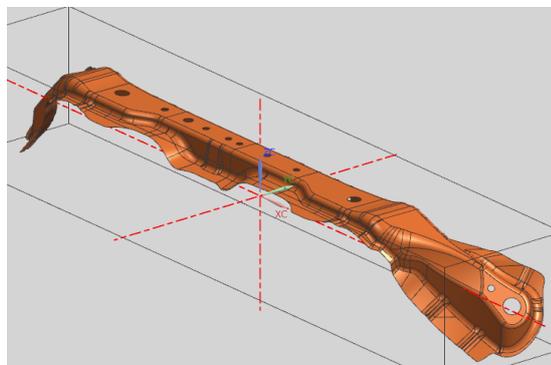


图 1 前围板中间横梁零件

Fig.1 Part for intermediate transverse girder of front wall panel

考虑零件沿轴向存在高度差且截面形式不断变

化,不宜直接采用成形工艺,应考虑拉延成形;由于两端部局部法兰边需要侧修,中间位置采用正修,故安排两序修边;为保证孔的精度,在冲孔之前先完成法兰边整形;另外,孔位置主要集中在顶面和侧壁,正、侧孔不存在干涉,可一序完成所有孔的加工,因此综合考虑,设置冲压工艺方案为:OP10 拉延、OP20 修边、OP30 修边+侧修边、OP40 翻边整形、OP50 冲孔侧冲孔。

1.2 基于 Autoform 有限元模型的建立

基于 Autoform 有限元模型的建立见图 2,将在 UG 里设计好的拉延凸、凹、压边圈模面导入 Autoform 软件中,按照原工艺方案进行工序的创建并完成各工具体义,其中凸凹模偏置 1 倍料厚。拉延过程由模具闭合和成形两个过程组成,闭合时压边圈抬起一个压边行程为 48 mm,并保持该位置不动,凹模下移将板料压在压边圈上;成形时,压边圈施加一定的压边力 400 kN,然后凹模和压边圈一起向下运动 48 mm,完成成形过程。闭合时凹模运行速度为 2000 mm/s,成形时凹模运行速度为 5000 mm/s。修边冲孔后设置回弹,并为自由回弹方式。板料的轧制方向与坯料的长度方向垂直,坯料单元类型为壳单元,厚向积分点为 11 个。设置初始单元最大尺寸为 40 mm,单元细化等级为 7,设定摩擦因数为 0.15。

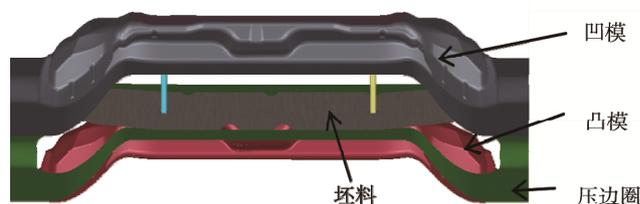


图 2 基于 Autoform 建立的有限元模型
Fig.2 Finite element model built based on Autoform

1.3 基于 Dynaform 有限元模型的建立

同样将拉延凸、凹、压边圈模面导入 Dynaform 软件中,并依次建立重力、成形、修边冲孔和回弹分析步。各成形过程和工艺参数的设置与 Autoform 相同,设定单元类型为全积分 16 号单元,厚度方向积分点为 7 个,初始板料尺寸为 6 mm,网格最大细化层级为 4。设置回弹的约束方式为三点约束,所选三点应是回弹比较小的位置。建立的有限元模型见图 3。

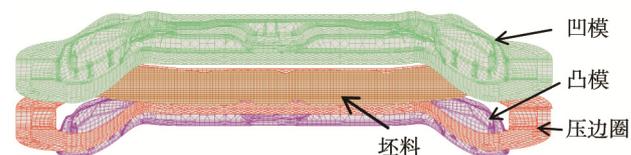


图 3 基于 Dynaform 建立的有限元模型
Fig.3 Finite element model built based on Dynaform

1.4 材料模型

该前围板中间横梁零件用材为宝钢生产超高强钢 DP980，厚度为 2 mm。通过对与轧制方向成 0°、45°和 90°方向开展单向拉伸试验，获得材料的基本力学性能。从应力应变曲线来看，DP980 材料属于非饱和型硬化方式，采用 Swift 型硬化模型进行描述^[7-8]，Swift 方程见式(1)。

$$\sigma = K \cdot (\varepsilon_p + \varepsilon_0)^n \quad (1)$$

式中： K 为强化系数； n 为硬化指数； ε_p 为塑性应变； ε_0 称为屈服应变，即材料屈服时对应的塑性应变； K, n 可通过最小二乘拟合得到。

针对先进高强钢材料，Barlat89 屈服准则能够较好地描述材料的屈服各向异性^[9-10]，该屈服准则的函数形式见式(2)。 K_1, K_2 的计算见式(3)。

$$f = \left\{ \frac{1}{2} [a|K_1 + K_2|^m + a|K_1 - K_2|^m + c|2K_2|^m] \right\}^{\frac{1}{m}} = \sigma_e \quad (2)$$

$$K_1 = \frac{\sigma_{11} + h\sigma_{22}}{2}, \quad K_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - h\sigma_{22}}{2} \right)^2 + p^2 \sigma_{12}^2} \quad (3)$$

式中： a, c, h, p 为表征材料各项异性的参数，且 $a+c=2$ ； σ_e 为等效应力； $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12}$ 分别为主次应力和剪应力； m 为反映材料晶体结构的系数，对钢 $m=6$ 。

各参数的数值可以根据 3 个方向单向拉伸试验获得的各向异性系数 R_0, R_{45} 和 R_{90} 转换得到。在强化模型中， $K=1328, n=0.088, \varepsilon_0=0.007$ ；在屈服模型中， $R_0=0.82, R_{45}=1, R_{90}=0.75, m=6$ 。

2 结果分析与讨论

2.1 拉延成形性对比分析

评价零件的成形性借助于成形极限图，依靠成形极限曲线将零件上不同位置应变分成开裂区、风险区、安全区、起皱区等 7 个区域，Dynaform 和 Autoform

的成形性计算结果比较见图 4，所用成形极限曲线均采用试验获得，不同之处在于 Autoform 中的临界 FLC 曲线是偏移测量 FLC 曲线的 20%，平面应变处成形极限约 16%；而 Dynaform 中临界 FLC 曲线即黄色线是将测量 FLC 曲线向下平移 10%，平面应变处成形极限约 11%左右，因此，由于评价标准的差异，Dynaform 计算结果开裂点相对较多。

两种软件对零件不同位置成形性的预测都比较接近，均预测到了起皱位置、变形量较大处，同时在缺口位置和顶部拐角处均预测到了开裂。分析零件的减薄率，在零件的主型面上，Dynaform 计算的最大减薄率位置在顶面的 4 个圆角位置，最大为 18.1%；Autoform 在相同位置计算的减薄率为 15%，而减薄率最大位置在图 4b 红圈位置，为 16.2%，与 Dynaform 计算的该位置减薄率 16%基本一致，因此，综合来看，两种软件计算的成形性和减薄率基本接近，Dynaform 计算的最大减薄率更大，即计算的零件成形安全程度更高。

2.2 修边后回弹对比分析

将两种软件回弹计算后的产品外表层的网格进行导出，然后在计算机辅助测量软件 Geomagic 中，分别与产品几何模型进行对齐，对齐的方式为控制三点下的最佳拟合，并沿 z 向偏置 3 mm，保证两种软件回弹计算结果和实测结果对齐基准一致。为了定量评价不同软件回弹计算的精度，沿零件周向顺序等间距取相同位置点进行回弹数值的比较。由于该零件回弹主要发生在 z 向，这里重点比较各点 z 向回弹，将回弹仿真和实冲测量回弹数值在坐标图上进行表示，同时分别描绘出两种软件计算结果与实测结果相对偏差曲线，见图 5。定义一个回弹精度的阈值为 30%，认为偏差在 30%以内为可接受精度。分析可知，满足该条件的 Dynaform 计算点共有 18 个，约占 51.4%，Autoform 共 11 个，约占 31.4%，即 Dynaform 仿真精度比 Autoform 高出 20%，更接近实测结果。

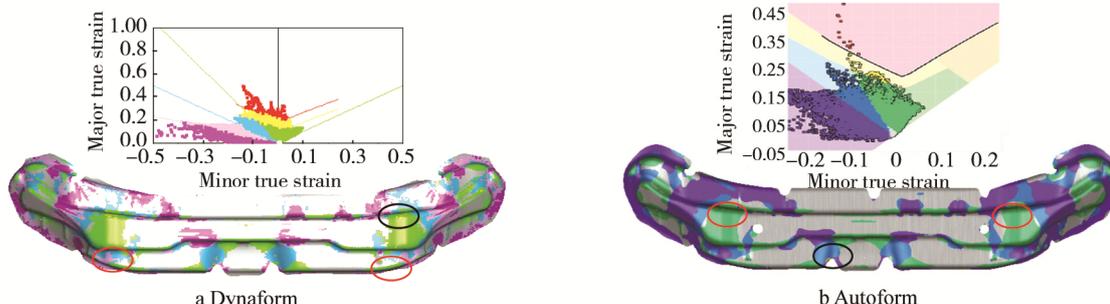


图 4 Dynaform 和 Autoform 的成形性计算结果比较
Fig.4 Comparison of formability results of Dynaform and Autoform

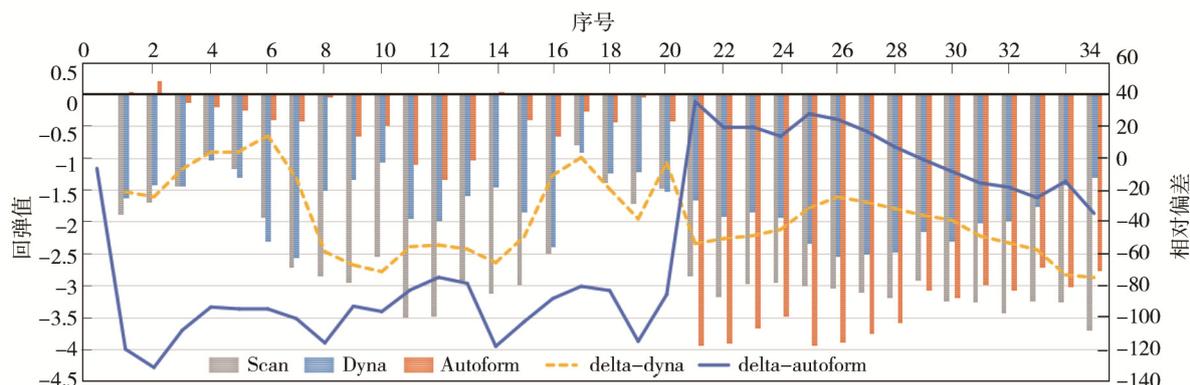


图5 不同软件回弹计算精度比较

Fig.5 Comparison of springback accuracy calculated based on different software

3 结论

1) 基于 Dynaform 和 Autoform 建立了某车型超高强度钢前围板中间横梁零件冲压全工序仿真有限元模型, 并对其成形性和回弹进行分析。

2) 两种软件的成形性计算结果比较接近, 预测出的开裂和起皱位置比较一致, Dynaform 计算的最大减薄率比 Autoform 要大, 得出的安全裕度更高。

3) 对比两种软件回弹计算结果, 通过分析比较周向 35 个点的仿真和实测回弹数值, 得出 Dynaform 计算的回弹值更加接近于实测结果, 回弹仿真精度更高。

4) 针对超高强度钢类零件, 成形过程的分析均可以参考两种软件计算结果, 但对于回弹, 有必要在 Autoform 仿真计算的基础上, 再使用 Dynaform 进行回弹的精确计算, 以便更好指导现场生产。

参考文献:

- [1] 钟茂莲. 高强度汽车钢板冲压成型的主要问题及模具对策[J]. 精密成形工程, 2014, 6(3): 20—24.
- [2] 朱久发. 高强度钢板在汽车车身上的应用及问题对策[J]. 武钢技术, 2007, 45(2): 43—46.
- [3] 张旭, 周杰. 高强度钢后保险杠成形工艺优化及回弹控制[J]. 金属铸锻焊技术, 2010, 39(5): 102—105.
- [4] 马晓春, 沈卫兵. 有限元数值模拟技术在汽车冲压件成形中的应用[J]. 浙江工业大学学报, 2007, 35(1): 100—104.
- [5] 江煜煌. 板料冲压成形及回弹有限元数值模拟分析研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [6] 牛超, 陈新平, 崔振祥. 基于 AUTOFORM 软件的超高强度钢前围板中间横梁零件工艺优化[J]. 锻压技术, 2017, 42(2): 34—37.
- [7] 臧顺来. 薄板弹塑性本构模型及冲压回弹研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2007.
- [8] 谭海林, 郭照宇, 孟少明. 基于 Dynaform 的高强度钢板冲压回弹补偿分析[J]. 锻压装备与制造技术, 2014, 49(4): 65—67.
- [9] 葛德龙. 超高强度钢冷弯特性和回弹的实验研究与数值仿真[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [10] 张璐. 高强度钢回弹预测中材料模型的适用性研究及回弹补偿的自动实现[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.