# 不同压边工况下汽车用高强度钢板拉深性能研究*

刘瑞军[1]　褚亚旭[1]　闫康康[2]

（1.北华大学交通建筑工程学院，吉林 132013；2.中国第一汽车集团公司技术中心，长春 130011）

【摘要】 基于圆柱杯拉深标准试验，设计了用于研究高强度钢板拉深性能的圆筒拉深试验方案，在70 kN和10 kN两种压边力工况下，分别对1.2 mm厚高强度钢板SPCN440W－NS进行拉深，并采用DYNAFORM软件对拉深过程进行有限元仿真。试验和仿真结果表明，试验高强度钢板减薄较为均匀，具有较好的深冲性能；压边力对高强度钢板拉深性能影响很大，高压边力工况下拉深制件表面质量较好，低压边力工况下拉深制件压料区域容易起皱；DYNAFORM软件对高压边力拉深工况仿真精度高于低压边力工况。

**关键词**：高强度钢　拉深　压边力　起皱　金属流动

**中图分类号**：U465　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2011)10-0230-05

# Deep Drawability of High Strength Steel Sheet under Different Blank Holder Force Conditions

Liu Ruijun[1]　Chu Yaxu[1]　Yan Kangkang[2]

(1. *College of Transportation and Civil Engineering*, *Beihua University*, *Jilin* 132013, *China*

2. *R & D Center*, *China FAW Group Corporation*, *Changchun* 130011, *China*)

**Abstract**

Based on benchmark cylindrical cup deep drawing scheme, a cylinder deep drawing scheme was designed to study deep drawability of the high strength steel (HSS) sheet. HSS sheet SPCN440W－NS (1.2 mm) was drawn respectively under 70 kN and 10 kN blank holder force (BHF) conditions, and drawing process was simulated by DYNAFORM software. The test and simulation results showed that HSS sheet SPCN440W－NS had better deep drawability. BHF had great influence on deep drawability of the HSS sheet. Workpiece had better surface quality under 70 kN BHF condition, and was easily wrinkled in its flange region under 10 kN BHF condition. The simulation accuracy of the DYNAFORM software under 70 kN BHF condition was higher than 10 kN BHF condition.

**Key words**　High strength steel, Deep draw, Blank holder force, Wrinkle, Metal flow

## 引言

随着能源与环境问题日益突出，低能耗、低污染已成为汽车设计的主要目标之一[1]。汽车轻量化是降低燃油消耗和减少排放污染的重要途径，大量研究表明：汽车质量每下降10%，油耗可下降8%，尾气排放可下降4%[2~3]。汽车轻量化的同时应保证汽车的强度、刚度、安全、防撞、耐久等使用性能不受影响，目前，以高强度钢为代表的轻量化材料正在逐渐应用于汽车制造[4]，不但实现了汽车轻量化，还很好地满足了汽车使用性能要求。

相对于普通低碳钢板，高强度钢板具有抗拉强度高、延伸率低的特点，使得高强度钢板冲压制造汽车零部件时存在成形性能较差、回弹量不易控制、冲压设备要求高等问题。目前，高强度钢板主要用于制造保险杠、纵梁、门槛、立柱、防撞杆、各种支架等成形难度较小的结构件和底盘件[5~7]，制造方法也仅限于弯曲、成形、浅拉延等工艺。对于像内外覆盖

收稿日期：2010－09－15　修回日期：2010－10－20

* 国家杰出青年科学基金资助项目(10125208)

**作者简介**：刘瑞军，副教授，主要从事覆盖件成型及模面工程研究，E-mail：tjuliuruijun@163.com

**通讯作者**：褚亚旭，教授，主要从事汽车零部件设计与制造研究，E-mail：cyx_1964@sina.com

件等各种成形难度大、表面质量要求高的拉延和深冲件，其制造工艺尚不成熟[8]，不能应用于工业生产，因此对高强度钢板的拉深性能和工艺的研究具有重要实际意义。基于 NUMISHEET 2002 提出的圆柱杯拉深标准试验，本文设计高强度钢圆筒拉深试验，在两种不同压边力工况下对 SPCN440W－NS 高强度钢板进行拉深，并采用 DYNAFORM 软件对拉深成形过程进行有限元仿真，通过试验和仿真研究不同压边力工况下高强度钢板的拉深性能、坯料减薄情况和金属流动规律，以及低压边力下高强度钢圆筒法兰面的起皱失稳趋势。

## 1　高强度钢圆筒拉深试验

### 1.1　试验方法

圆柱杯拉深标准试验，主要用于研究板料的拉深性能、高压边力下的各向异性行为以及低压边力下起皱失稳情况的标准试验[9~10]。基于该标准试验，设计了高强度钢圆筒拉深试验模具，模具截面结构如图 1 所示，模具及板料几何尺寸如表 1 所示。

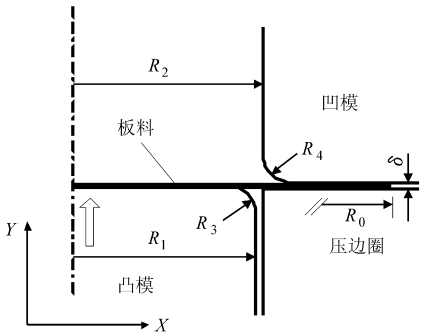


图 1　高强度钢板拉深模具结构

Fig. 1　Tool structureof high strength steel sheet drawing

**表 1　模具和板料几何尺寸**

**Tab. 1　Geometric dimension of tool and blank**　mm

| $R_0$ | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | $R_4$ |
|---|---|---|---|---|
| 105.00 | 50.00 | 51.25 | 9.50 | 7.00 |

试验采用闭式四点单动液压压力机（图 2），所有工具（凹模、凸模、压边圈）由冷作硬质工具钢 Cr12MoV 制造，模具表面进行热处理以提高模具寿命和表面硬度，对模具表面进行精加工，使得表面粗糙度 $R_a$ 小于 5 μm。试验液压机冲头速度为 20 mm/s，拉深深度为 40 mm，板料涂抹拉延油以减小摩擦。

### 1.2　试验材料

试验板料采用日本新日制铁公司（Nippon Steel）生产的厚度 $\delta$ 为 1.2 mm 的高强度钢板 SPCN440W－NS，用激光切割成直径 105.0 mm 的圆形坯料，拉伸试验测出高强度钢板力学性能参数如表 2 所示。

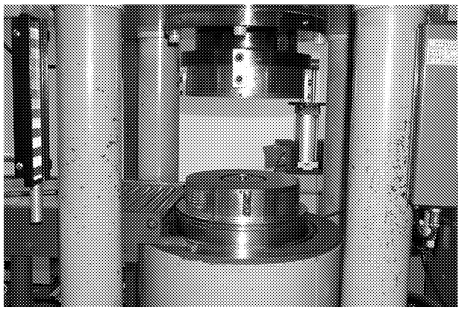

图 2　模具及试验压机

Fig. 2　Tool and testing press machine

**表 2　试验高强度钢板力学性能参数**

**Tab. 2　Property parameters of high strength steel mechanical**

| 屈服应力 $\sigma_s$/MPa | 弹性模量 $E$/GPa | 泊松比 $\mu$ | 硬化指数 $n$ | 强化系数 $K$/MPa | 各向异性系数 $r$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 282.250 | 196.750 | 0.320 | 0.185 | 780.150 | 0.960 |

### 1.3　试验方案

分两组进行试验，压边圈压边力分别取 70 kN 和 10 kN，每组完成 3 个试样，测量数据取平均值进行试验结果统计。

## 2　有限元仿真方案

应用板材成形专用仿真软件 DYNAFORM 对高强度钢板拉深过程进行模拟。以三重非线性显示有限元分析程序 LS－DYNA 为求解器，能够准确模拟金属板材成形过程。

### 2.1　仿真有限元模型

按照试验模具和板料尺寸建立仿真几何模型，把模型导入 DYNAFORM 软件进行有限元网格剖分，检查网格质量和法线方向，参照实际工具和板料位置定位网格，生成仿真有限元模型（图 3）。工具共划分 3 146 个单元，板料 3 276 个单元。

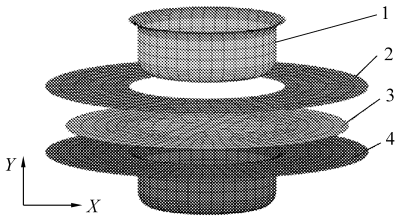


图 3　仿真有限元模型

Fig. 3　Simulation finite element model

1. 凸模　2. 压边圈　3. 板料　4. 凹模

### 2.2　仿真参数

仿真拉延类型选用单动拉深模式，计算采用基于经典薄壳理论的四节点四边形 Belytschko－Tsay 非线性薄壳单元，板料材料选用 36 号具有各向异性

性质的三参数 Barlat－Lian 材料模型。接触类型为描述了位移和速度边界条件的 Forming_One_Way_Surface_To_Surface 算法模型，接触点采用全局搜索。板料厚向积分点 5 个，计算中板料网格自适应加密 2 级。

仿真材料力学性能参数与拉深试验坯料一致。工具与板料间静摩擦因数取 0.125，动摩擦因数取 0.100。为提高仿真计算效率，通常使模具加速运行，模具虚拟速度取 4 000 mm/s，行程 40 mm。压边力分别取 70 kN 和 10 kN 两种工况进行仿真。

## 3 试验与仿真结果分析

在坯料表面印制半径 2 mm 圆形网格进行试验，拉深制件如图 4 所示。左图为压边力 70 kN 时试验制件，右图为压边力 10 kN 时试验制件。采用双核 PentiumⅣ 3.4 GHz 微机进行仿真计算，压边力 70 kN 工况耗时 1 231 s，消耗内存 120.4 MB，压边力 10 kN 工况耗时 1 132 s，消耗内存 96.1 MB，仿真结果如图 5 所示。

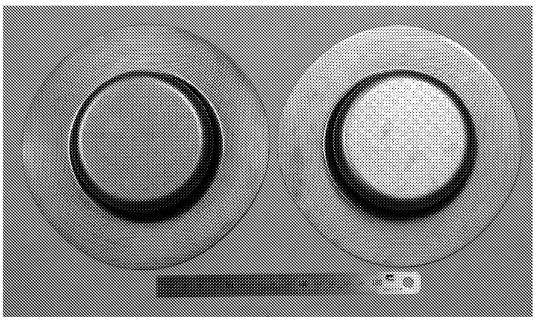

图 4 拉深试验制件

Fig. 4 Deep drawing workpiece

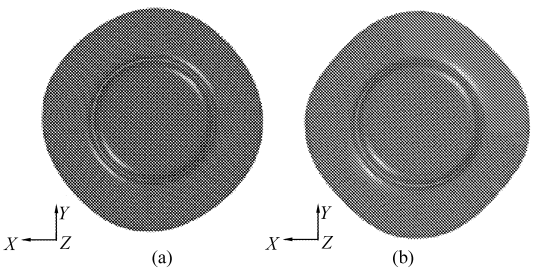


图 5 拉深仿真结果

Fig. 5 Simulation results of deep drawing

(a) 70 kN (b) 10 kN

从图 4 和图 5 比较可以看出压边力 70 kN 工况试验和模拟结果吻合较好，而压边力 10 kN 工况仿真结果略微表现出各项异性，致使试验和仿真制件沿 45°对角方向金属流动量有所不同。

为了更直接地比较不同压边力工况下高强度钢板拉深性能的差异，对拉深制件减薄情况、金属流动规律以及法兰面起皱趋势 3 个方面进行比较分析。

### 3.1 减薄率及厚度分布

过度减薄将极大降低冲压件的使用寿命，在冲压生产中必须避免，通常以减薄量来评价冲压制件质量。从仿真制件减薄率分布云图（图 6）可见，压边力 70 kN 工况制件凸模圆角处减薄最为严重（图 6a），减薄率达到 20.8%，沿圆柱法兰面由于压缩变形出现大范围增厚，最大增厚 10.4%；压边力 10 kN 工况制件从凸模圆角到凹模圆角中间的立壁部分出现较为均匀的连续减薄（图 6b），减薄并不严重，最大减薄率 13.6%，沿圆柱法兰面普遍增厚，最大增厚出现在沿 45°交叉对角位置，最大增厚 15.2%。

由于低压边力工况金属流动阻力减小，金属容易向模腔内流动，导致凸模圆角区域拉深减薄较小，而法兰面上由于压边约束小，板料切向变形较为容易，造成金属堆积，从而使得法兰面增厚严重。

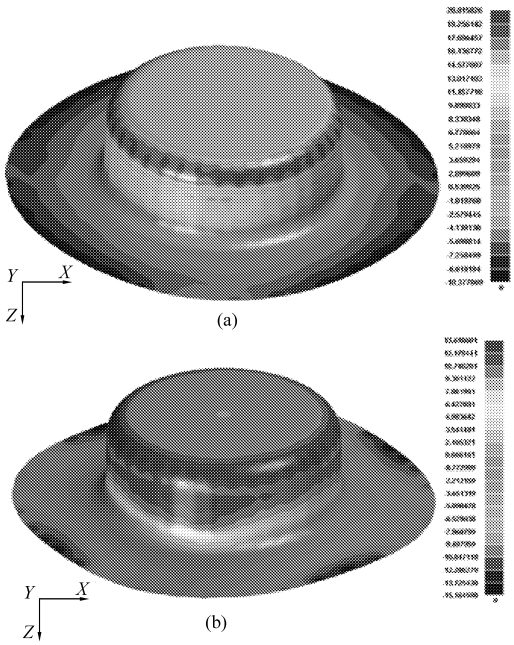


图 6 仿真减薄率分布云图

Fig. 6 Thinning distribution by simulation

(a) 70 kN (b) 10 kN

为准确评估高强度钢板 SPCN440W－NS 的拉深性能，取从圆筒中心沿径向到法兰面边缘截面的厚度分布来验证仿真结果的精度。测量出仿真和试验制件截面厚度，绘制圆筒的厚度分布曲线，如图 7、8 所示。

从图 7、8 可看出，仿真与试验结果吻合较好，圆筒厚度从中心到边缘递增，在凸凹模圆角处有明显减薄，压边力 70 kN 工况比 10 kN 工况减薄严重。

### 3.2 金属流动及流动方向

压边力 70 kN 工况金属流动如图 9 所示，试验制件最大金属流动为 10.6 mm，仿真最大金属流动

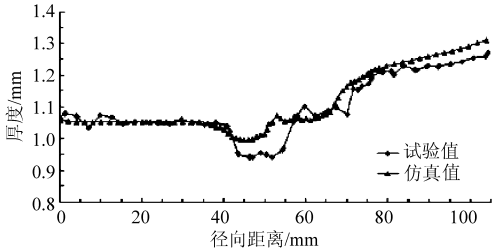


图 7　压边力 70 kN 工况从圆筒中心到边缘截面厚度分布

Fig. 7　Thickness distribution when blank holder force is 70 kN

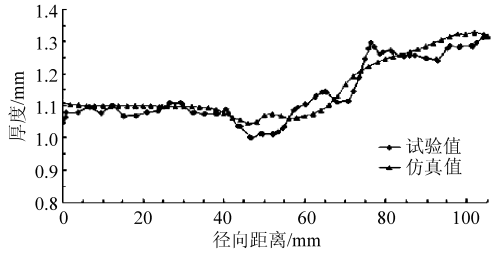


图 8　压边力 10 kN 工况从圆筒中心到边缘截面厚度分布

Fig. 8　Thickness distribution when blank holder force is 10 kN

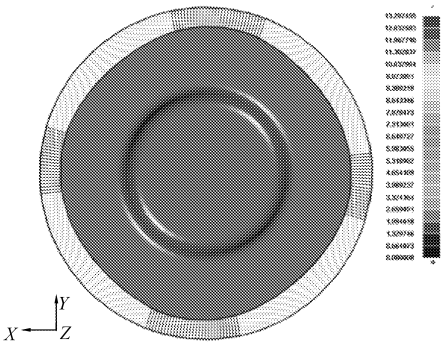

图 9　压边力 70 kN 工况金属流动

Fig. 9　Metal flow quantity when blank holder force is 70 kN

约为 13.3 mm，最大金属流动均发生在法兰面水平与竖直顶点位置。

压边力 10 kN 工况金属流动如图 10 所示，最大金属流动约为 18.5 mm，最大流动发生在法兰面 45° 对角区域。由于材料各向异性原因，法兰面金属流动并不均匀，通过分析图 9 和图 10 的最大金属流动出现的位置可知，在不同压边力工况下，法兰面金属向模具内部的流动方向也不相同。根据仿真结果，固定压边力情况下可以在金属流动大位置适当设置拉延筋，通过拉延筋的调整功能实现高强度钢板拉深成形均匀减薄的目的。

### 3.3　法兰面起皱趋势

在拉深过程中，由于毛坯法兰变形区在切向压

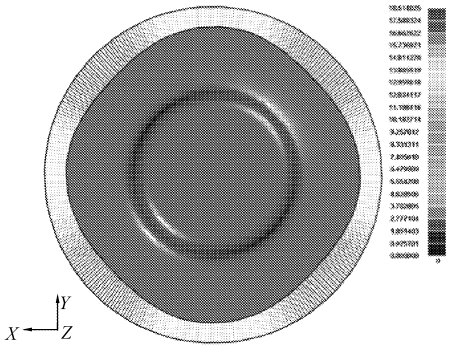

图 10　压边力 10 kN 工况金属流动

Fig. 10　Metal flow quantity when blank holder force is 10 kN

应力作用下产生压缩变形，导致失稳起皱，严重影响零件表面质量。为研究压边力对起皱的影响程度，对仿真结果进行表面斑马纹反射线检查。设置光源宽度 5 mm，间距 10 mm，检查结果如图 11 所示。

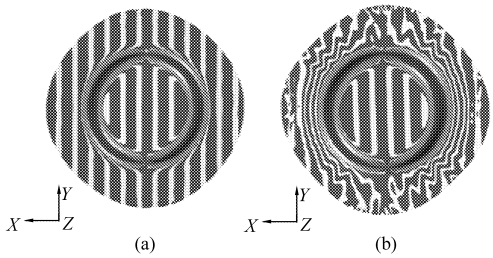


图 11　表面斑马纹反射线检查

Fig. 11　Checking results of face reflection lines

(a) 70 kN　(b) 10 kN

从图 11a 可看出，圆筒底面和法兰面等表面平整的区域，光带分布较为平直和均匀，而在图 11b 中，法兰面区域光带发生扭曲，分布不均匀。这说明 70 kN 工况法兰面非常平整，10 kN 工况法兰面出现微小起皱，零件上有表面缺陷。

## 4　结论

(1) 高强度钢板 SPCN440W－NS 拉深减薄较为均匀，在凸、凹模圆角区域也未出现过度减薄，具有较好的拉深性能，能够用于制造复杂深拉延冲压件。

(2) 压边力对高强度钢板 SPCN440W－NS 拉深性能影响很大。高压边力工况下拉深制件表面质量较好，低压边力工况拉深制件压料区域容易起皱，模腔内坯料容易产生堆积。

(3) DYNAFORM 软件对高压边力拉深工况模拟较为准确，而低压边力拉深工况下模拟精度略低。

## 参　考　文　献

1　Benedyk J C. Lightmetals in automotive applications[J]. Light Metal Age, 2000, 10(1):34～35.

2　闫康康，胡平，郭威. 铝合金板冲压成形 Benchmark 试验与有限元仿真[J]. 农业机械学报，2009, 40(11):232～235.
Yan Kangkang, Hu Ping, Guo Wei. Benchmark test and FEM simulation of aluminum alloy sheet forming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11):232～235. (in Chinese)

3 敖炳秋. 轻量化汽车材料技术的最新动态[J]. 汽车工艺与材料, 2002,16(增刊):1 ~ 22.
Ao Bingqiu. Latest development of lightweighting automotive materials[J]. Automobile Technology & Material, 2002, 16(Supp.):1 ~ 22. (in Chinese)

4 Hisashi Hayashi, Takeo Nakagaw. Recent trends in sheet metals and their formability in manufacturing automotive panels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1994, 46(3 ~ 4):455 ~ 487.

5 Stuart P K. Application and forming of higher strength steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1994, 46(3 ~ 4): 443 ~ 454.

6 Khan S H, Ahmed M S, Ali F, et al. Investigation of high strength steel bending[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(1):128 ~ 135.

7 Takahiro K, Shunichi H, Youichi M. 780 N/mm$^2$ grade hot-rolled high-strength steel sheet for automotive suspension system [J]. JSAE Review, 2003, 24(1):81 ~ 86.

8 闫康康, 郭威, 胡平. 基于冲压 CAE 软件 KMAS 的板料冲压成形回弹预示及控制、补偿技术[J]. 吉林大学学报:工学版, 2005,35(4):409 ~ 414.
Yan Kangkang, Guo Wei, Hu Ping. Springback prediction and control, compensation technique in sheet metal forming based on stamping CAE software KMAS[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition,2005,35(4): 409 ~ 414. (in Chinese)

9 Edward J, Rapacki Jr. Plasticity of a high strength steel alloy[J]. International Journal of Plasticity, 1985, 1(3):233 ~ 242.

10 王金武, 胡平, 付争春, 等. 汽车覆盖件破裂试验及基于广义成形技术仿真[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 227 ~ 231.
Wang Jinwu, Hu Ping, Fu Zhengchun, et al. Experiment of auto panel surface fracture and simulation base on universal formability technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009, 40(11):227 ~ 231. (in Chinese)

(上接第 191 页)

14 王耀南. 基于单层 Adaline 网络的自适应控制[J]. 自动化与仪器仪表,1997,72(4):12 ~ 15.
Wang Yaonan. Single adaline network based adaptive control[J]. Automation and Instrumentation, 1997,72(4):12 ~ 15. (in Chinese)

15 蔡忠法,周箭,陈隆道. 增强型 Adaline 神经网络谐波分析方法研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2009,43(1):166 ~ 171.
Cai Zhongfa, Zhou Jian, Chen Longdao. Harmonic analysis approach using enhanced Adaline neural network[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science,2009,43(1): 166 ~ 171. (in Chinese)

16 赵大勇,柴天佑,自适应内模控制方法在磨矿过程中的应用[J]. 控制工程,2009,16(4):426 ~ 431.
Zhao Dayong, Chai Tianyou. Adaptive internal model control method and its application to grinding process[J]. Control Engineering of China, 2009,16(4):426 ~ 431. (in Chinese)

17 牛瑞燕,赵曜. 智能二自由度内模控制[J]. 控制理论与应用,2001,18(4):624 ~ 628.
Niu Ruiyan, Zhao Yao. Two degree of freedom intelligent internal model control[J]. Control Theory & Applications, 2001, 18(4):624 ~ 628. (in Chinese)

18 王伟,甘艳珍,刘桂香,等. MFA 与 PID 控制器的实验比较研究[J]. 自动化仪表,2008,29(5):27 ~ 29.
Wang Wei, Gan Yanzhen,Liu Guixiang, et al. Experimental inter-comparison between MFA and PID control[J]. Process Automation Instrumentation, 2008,29(5):27 ~ 29. (in Chinese)