

# 车用 DP780 高强钢板热冲压成形数值模拟及模具磨损

张清郁

(河南工业贸易职业学院 汽车工程学院, 河南 郑州 451191)

**摘要:** 以车用 DP780 高强钢板为研究对象, 借助 Deform-3D 仿真系统, 建立了热冲压仿真模型, 分析了 DP780 高强钢板的变形过程以及成形效果。以热冲压磨损理论为支撑, 以 DP780 高强钢板的成形质量为先决条件, 对冲压模具的磨损状况进行了研究与改进。运用正交试验, 建立了关于钢板温度、模具间隙、冲压速度及摩擦因数的 4 因素 3 水平的模拟方案, 并通过灰色关联法将凸、凹模磨损的双目标优化问题简化为关于关联度的单目标优化问题, 最后采用极差分析法确定了各变量在区间内的最优解。模拟结果表明, 优化后, 凸模磨损减小了 31.61%, 凹模磨损减小了 24.98%。根据实际冲压结果可知, DP780 高强钢板成形良好、质量佳、无缺陷, 冲模寿命与预测结果接近。有限元模拟可参考性较高, 该优化手段对实际生产具有一定的指导性。

**关键词:** 高强钢板; 热冲压; 模具磨损; 模具寿命; 正交试验

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.08.006

**中图分类号:** V216.5<sup>+</sup>3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 08-0035-06

## Numerical simulation of hot stamping and mold wear of DP780 high strength steel plate for automobile

Zhang Qingyu

(College of Automotive Engineering, Henan Industry and Trade Vocational College, Zhengzhou 451191, China)

**Abstract:** For DP780 high strength steel plate for automobile, with the help of Deform-3D simulation system, the hot stamping simulation model was established, and the deformation process and forming effect of DP780 high strength steel plate were analyzed. Based on the hot stamping wear theory, and taking the forming quality of DP780 high strength steel plate as the prerequisite, the wear condition of stamping mold was studied and improved. By using orthogonal test, a four factors and three levels simulation scheme about steel plate temperature, mold clearance, stamping speed and friction coefficient was established. The double objective optimization problem of punch and die wear was simplified to a single objective optimization problem about correlation degree by grey correlation method. Finally, the optimal solution of each variable in the interval was determined by range analysis method. The simulation results show that after optimization, the punch wear is reduced by 31.61% and the die wear is reduced by 24.98%. According to the actual stamping results, DP780 high strength steel plate has good forming effect, good quality and no defects, and the stamping mold life is close to the predicted results. The reference value of the finite element simulation is high, and the optimization method has certain guidance to the actual production.

**Key words:** high strength steel plate; hot stamping; mold wear; mold life; orthogonal test

汽车作为最主要的代步工具, 对人们生活的影响是巨大的, 在如此庞大的需求量下, 随之而来的即能源紧缺和环境污染的问题<sup>[1]</sup>。为了提升自身品牌的竞争力, 节能减排工作成为各大汽车制造商必须关注的课题, 由于汽车自身重量与汽车能耗及排放息息相关, 因此, 汽车轻量化研究<sup>[2-4]</sup>是实现节能减排最直接、最有效的途径。而汽车轻量化的一

条关键路线就是新型材料的使用, 诸多研究表明, 高强度钢不仅强度高, 能够保证结构的安全性, 而且与普通钢材相比, 重量较轻, 在一些场合完全能够实现替代, 因此, 近年来不少科研人员致力于高强钢板成形性能的研究。李奇涵等<sup>[5]</sup>研究了 22MnB5 高强钢在不同温度下的成形情况, 发现当钢材温度为 700 ℃ 时, 拉深性能更好, 获得更大的成形量, 不易冲裂; 陈明<sup>[6]</sup>比较了 DP780 高强钢的冷冲压性能和液压成形性能, 发现同等条件下, 液压成形工艺下的零件减薄量更小, 同时最大减薄率受压边力变化的影响更小, 压边力可设置的范围更

**收稿日期:** 2021-07-20; **修订日期:** 2021-10-25

**基金项目:** 河南省高新技术领域科技攻关项目 (182102210097)

**作者简介:** 张清郁 (1981-), 男, 硕士, 副教授

**E-mail:** rongrong1015@yeah.net

大,更易控制;孔政等<sup>[7]</sup>以 DP780 高强钢为对象,研究了不同摩擦因数下的拉深极限,对 DP 钢破裂失效的预测有一定的指导作用;刘建辉等<sup>[8]</sup>对高强钢的回弹特性进行了探讨,并分析了不同材料参数对回弹的影响规律;付泽民等<sup>[9]</sup>采用 Abaqus 研究了不同参数、不同水平下 BR1500HS 高强钢板的组织演变过程,根据模拟结果确定了最优方案。

通过以上研究可知,对于高强钢板模具方面的研究工作较少,而模具成本同样为企业关注的问题,因此,本文以车用 DP780 高强钢板作为研究对象,借助 Deform-3D 仿真系统,对 DP780 高强钢板的冲模磨损进行有限元分析,以保证冲压件的质量为前提,联合正交法、灰色关联法、极差分析法,使凸、凹模的磨损最小。

1 DP780 高强钢板热冲压模型建立

1.1 几何建模

DP780 高强钢板经下料、热冲压、切边成形最终零件,其中冲压前后模具的二维结构简图如图 1 所示(模具间隙分别取为  $1.05t$ 、 $1.10t$ 、 $1.15t$ ),DP780

高强钢板的厚度  $t$  为 1.6 mm,作为参考依据,利用 UG 进行装配建模,并导入 Deform-3D 模拟系统中。由于软件材料库中不存在 DP780 高强钢材料,参考文献 [1] 和文献 [7] 所做的拉伸试验,获得的材料特性如表 1 所示,以之为借鉴,在软件库中新建材料模型,将材料赋予高强钢板,并设置为塑性体,由文献 [10] 可知,DP780 高强钢在 400~600 ℃ 之间的成形效果较好,可塑性较强,伸长率较大。冲模材料选择 H13 热作模具钢,为加快仿真计算速度,将模具设置为刚体<sup>[11]</sup>,模具温度设置为 265 ℃,忽略微小变形的影响。对压边圈设置 240 kN 的压边力,方向指向凹模,压紧 DP780 高强钢板。选择凸模为主模,运动方向指向凹模,凸模速度依据生产经验确定取值范围在  $10\sim30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  之间,凹模固定不动。采用绝对网格划分,将钢板及模具划分为四面体小单元,最小单元边长设为 1.5 mm,即模拟步长为 0.5 mm<sup>[12]</sup>。DP780 高强钢板与模具之间的接触摩擦定义为剪切摩擦,根据润滑条件差异,热摩擦因数为 0.25~0.35。仿真模式采用热力耦合模式,考虑冲压过程中热传递的影响。

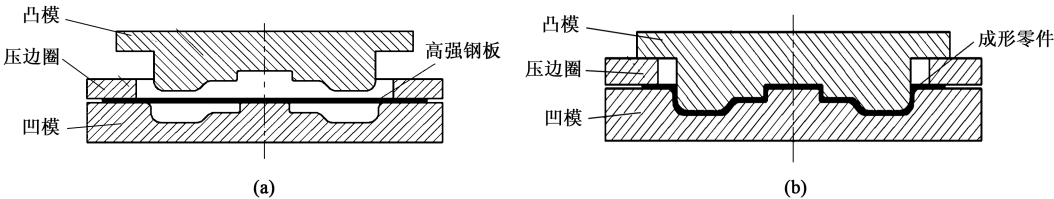


图 1 冲压模具结构简图  
(a) 冲压前 (b) 冲压后  
Fig. 1 Structure schematic diagrams of stamping mold  
(a) Before stamping (b) After stamping

表 1 DP780 高强钢板的材料特性

Table 1 Material properties of DP780 high strength steel plate

参数	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	伸长率/%	硬化指数	各向异性系数		
							$r_0$	$r_{45}$	$r_{90}$
数值	856	497	189	0.3	19	0.19	0.74	0.82	0.98

1.2 热冲压磨损理论

大量研究证明,Archard 磨损模型可有效地用于量化冲压成形中冲模的磨损深度<sup>[13]</sup>,其常规公式为:

$$dW = K \frac{dP \cdot dl}{H} \tag{1}$$

式中:  $W$  为模具的磨损深度;  $K$  为板料的磨损系数;  $P$  为板件与冲模间的接触压力;  $l$  为板件与冲模间的

相对位移,  $l=v\theta$ ;  $v$  为材料相对流速;  $\theta$  为时间;  $H$  为冲模的表面硬度。

在冷冲压工艺中,由于温度效应不明显,因此通常默认  $K$ 、 $H$  为定值;而热冲压工艺中,由于板料的加热温度较高,同时模具需要预热,因此,热冲压过程中温度变化复杂,使得板料的磨损系数  $K$  也会随之变化,冲模表面硬度  $H$  与温度呈负相关。Lee R S 等<sup>[14]</sup>在 Archard 磨损模型的基础上进行了改进,将定值  $K$ 、 $H$  转化为关于温度  $T$  的函数,经积分后其修正后的公式如式 (2) 所示。

$$W(T) = \int K(T) \frac{Pv}{H(T)} d\theta \tag{2}$$

因此,在冲压过程中冲模任一部位  $i$  在任一时间段  $j$  的磨损  $W_{ij}$  可由式 (3) 计算获得。

$$\Delta W_{ij}(T) = K_{ij}(T) \frac{P_{ij} v_{ij}}{H_{ij}(T)} \Delta \theta \tag{3}$$

式中： $\Delta$  为变量的增量； $K_{ij}$  为板料任一部位  $i$  在任一时间段  $j$  的磨损系数； $P_{ij}$  为板料与冲模任一部位  $i$  在任一时间段  $j$  的接触压力； $v_{ij}$  为冲模任一部位  $i$  在任一时间段  $j$  的材料相对流速； $H_{ij}$  为冲模任一部位  $i$  在任一时间段  $j$  的表面硬度。

## 2 正交试验设计及灰色关联分析

### 2.1 试验方案及模拟结果

根据 1.1 节分析可知，将钢板温度、模具间隙、冲压速度以及摩擦因数作为模拟变量设计正交试验，在取值区间内各取 3 个水平建立 9 组方案，并利用 Deform-3D 仿真系统分别进行热冲压数值分析，从而获得冲模的最大磨损深度。正交试验设计方案及冲模最大磨损深度如表 2 所示。

表 2 正交试验设计方案及冲模最大磨损深度  
Table 2 Design scheme of orthogonal test and maximum wear depth of stamping mold

方案	钢板温度/ ℃	模具间隙/ mm	冲压速度/ (mm · s <sup>-1</sup> )	摩擦 因数	凸模最大 磨损深度/ (×10 <sup>-6</sup> mm)	凹模最大 磨损深度/ (×10 <sup>-6</sup> mm)
1	400	1.68 (1.05 <i>t</i> )	10	0.25	13.45	10.37
2	400	1.76 (1.10 <i>t</i> )	20	0.3	12.78	11.68
3	400	1.84 (1.15 <i>t</i> )	30	0.35	15.12	13.99
4	500	1.68 (1.05 <i>t</i> )	20	0.35	18.44	17.91
5	500	1.76 (1.10 <i>t</i> )	30	0.25	15.83	15.44
6	500	1.84 (1.15 <i>t</i> )	10	0.3	16.72	17.62
7	600	1.68 (1.05 <i>t</i> )	30	0.3	21.65	18.23
8	600	1.76 (1.10 <i>t</i> )	10	0.35	17.59	20.18
9	600	1.84 (1.15 <i>t</i> )	20	0.25	19.86	18.79

### 2.2 灰色关联分析

灰色关联分析法能够有效地解决多目标的优化问题<sup>[15-16]</sup>，其基本原理为：将各优化目标（本文为凸模最大磨损深度、凹模最大磨损深度）转化为关联系数，然后根据各优化目标的重要性进行权重分配，通过计算获得关联度，从而将多目标优化问题简化为关于关联度的单目标优化问题。

本文要求冲模磨损深度越小越好，因此通过式 (4) 望小模型对冲模磨损数据进行处理。

$$x_{\varphi}(n) = \frac{\max x_{\varphi}^0(n) - x_{\varphi}^0(n)}{\max x_{\varphi}^0(n) - \min x_{\varphi}^0(n)} \tag{4}$$

式中： $x_{\varphi}(n)$  为最大磨损深度处理后的数据； $x_{\varphi}^0(n)$  为最大磨损深度的原始数据； $\max x_{\varphi}^0(n)$  和  $\min x_{\varphi}^0(n)$  分别为  $x_{\varphi}^0(n)$  的最大值和最小值； $\varphi$  为两个优化目标，即凸模最大磨损深度和凹模最大磨损深度， $\varphi=1, 2$ ； $n$  为试验方案序号， $n=1, 2, \dots, 9$ 。

将处理后的冲模磨损数据代入式 (5) 和式 (6)，可计算获得各方案凸、凹模最大磨损深度对应的关联系数以及最终的关联度。具体数据计算结果见表 3。其中， $x_1(n)$  和  $x_2(n)$  分别为凸模和凹模最大磨损深度处理后的数据， $\varepsilon_1(n)$  和  $\varepsilon_2(n)$  分别为凸模和凹模最大磨损深度对应的关联系数， $\varepsilon_{\text{关}}$  为关联度。

$$\varepsilon_{\varphi}(n) = \frac{\min |x_{\varphi}(n) - x_0(n)| + \lambda \max |x_{\varphi}(n) - x_0(n)|}{|x_{\varphi}(n) - x_0(n)| + \lambda \max |x_{\varphi}(n) - x_0(n)|} \tag{5}$$

$$\varepsilon_{\text{关}} = 1/2 \sum_{\varphi=1}^2 \varepsilon_{\varphi}(n) \tag{6}$$

式中： $\varepsilon_{\varphi}(n)$  为关联系数； $x_0(n)$  为参考值，通常取 1； $\lambda$  为分辨系数，一般取 0.5。

具体磨损数据计算结果如表 3 所示。

表 3 关联系数及关联度计算结果  
Table 3 Calculation results of correlation coefficient and correlation degree

方案	$x_1(n)$	$x_2(n)$	$\varepsilon_1(n)$	$\varepsilon_2(n)$	$\varepsilon_{\text{关}}$
1	0.924	1.000	0.868	1.000	0.933
2	1.000	0.866	1.000	0.789	0.895
3	0.736	0.631	0.654	0.575	0.615
4	0.362	0.231	0.439	0.394	0.417
5	0.656	0.483	0.592	0.492	0.542
6	0.556	0.261	0.530	0.404	0.467
7	0.000	0.199	0.333	0.384	0.359
8	0.458	0.000	0.480	0.333	0.407
9	0.202	0.142	0.385	0.368	0.377

对各方案的关联度进行极差分析，计算结果如表 4 所示，各变量对应的关联度极差值大小顺序为：钢板温度>摩擦因数>模具间隙>冲压速度，表明钢板温度对冲模磨损的影响最大，若选择不当，是造成模具寿命短的最主要原因，摩擦因数和模具间隙的影响其次，因此，在实际生产中对于润滑方式的选择非常关键，而冲压速度的影响最小。通过表 4 中变量各水平对应的平均关联度大小可获得最优参数水平，平均关联度越大，表示该水平下的参数值更有利于目标结果，即更利于降低冲模的最大磨损深度，因此可知最优方案为：钢板温度为 400 ℃、

表 4 关联度极差分析结果

Table 4 Range analysis results of correlation degree

试验变量	钢板温度/℃	模具间隙/ mm	冲压速度/ (mm·s <sup>-1</sup> )	摩擦因数
均值 1	0.814	0.570	0.602	0.617
均值 2	0.475	0.615	0.563	0.574
均值 3	0.381	0.486	0.505	0.480
极差	0.433	0.129	0.097	0.137

模具间隙为 1.76 mm、冲压速度为 10 mm·s<sup>-1</sup>、摩擦因数为 0.25。

2.3 优化结果分析与验证

按筛选出的最优方案继续进行有限元分析计算，获得的 DP780 高强钢板成形零件如图 2 所示，整体外观成形较好。从图 2a 所示温度分布云图可知，成形后 DP780 高强钢板的内部温度较边缘温度高，这是因为：DP780 高强钢板边缘自始至终与压边圈及

凹模接触，散热较快，其次 DP780 高强钢板边缘变形较小，与压边圈及凹模接触摩擦产生的热量较少，因此温度较低；而 DP780 高强钢板内部受凸模冲击仅与凸模接触，成形后与凹模接触，散热较慢，同时 DP780 高强钢板内部变形量较大，产生的变形热较多，因此温度较高，这符合 DP780 高强钢板的成形规律。另外，成形后 DP780 高强钢板的最高温度为 444 ℃，最低温度为 353 ℃，温度差处于正常范围，冷却后 DP780 高强钢板出现变形的风险较小。从图 2b 所示厚度分布云图可知，直线引出部位为 DP780 高强钢板的最大减薄区域，其中最小厚度为 1.29 mm，通过计算可得 DP780 高强钢板成形后的最大减薄率为 19.375%，小于要求的 25%，因此 DP780 高强钢板出现冲裂的风险极小。综上分析可知，最优方案下 DP780 高强钢板的成形质量较好，符合工艺设计要求。

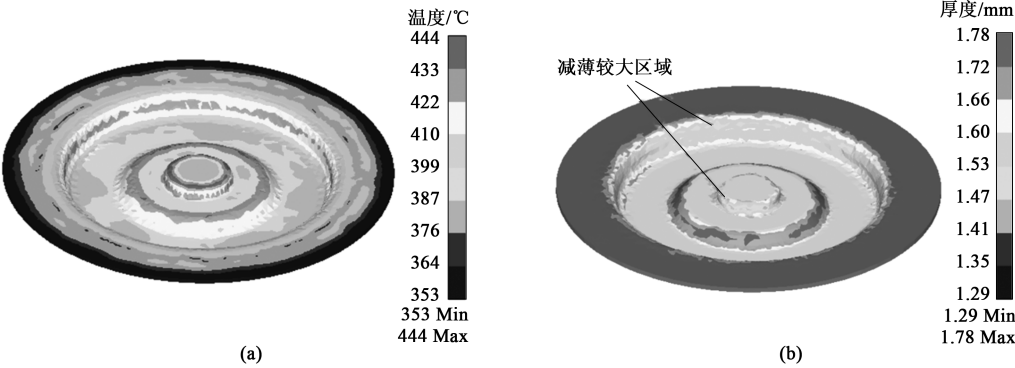


图 2 DP780 高强钢板最终成形零件

(a) 温度分布云图 (b) 厚度分布云图

Fig. 2 Final forming parts of DP780 high strength steel plate

(a) Distribution nephogram of temperature (b) Distribution nephogram of thickness

图 3 为最优方案下的冲模单次冲压后的磨损深度分布图。图 3 显示凸、凹模磨损较严重的区域均集中在一些圆角部位，这是因为这些部位与材料接触多，材料流动较大，摩擦较多。由图 3 知，凸模的最大磨损深度为  $8.74 \times 10^{-6}$  mm，凹模的最大磨损深度为  $7.78 \times 10^{-6}$  mm。而表 2 中，综合各方案可知，凸模的最大磨损深度的最小值为  $12.78 \times 10^{-6}$  mm，凹模的最大磨损深度的最小值为  $10.37 \times 10^{-6}$  mm，经计算可知，优化后凸模的最大磨损深度减小了 31.61%，凹模的最大磨损值减小了 24.98%，优化效果显著。

3 DP780 高强钢板冲压试验

采用获得的最优冲压方案指导 DP780 高强钢板

的热冲压试验，冲压设备采用液压机，试制的 DP780 高强钢板件如图 4 所示，制件成形良好，表面均匀无褶皱，各圆角部位均成形完整，图 2b 显示的最大减薄区域未出现破裂，尺寸符合要求，能够满足使用。图 5 为冲压试验的凸、凹模，经最终统计，凸模在进行 12362 次冲压后达到失效点，凹模在进行 13545 次冲压后达到失效点，按照该产品的尺寸公差要求，当冲模任一部位的磨损深度超过 100 μm 时，经过冲压获得的产品的尺寸会超出允许的尺寸范围，成为报废品，因此，基于该原则可粗略计算出实际冲压中凸模单次最大磨损深度为  $8.089 \times 10^{-6}$  mm，凹模单次最大磨损深度为  $7.383 \times 10^{-6}$  mm，与模拟结果相比（图 3），相对误差分别为 7.45%、5.10%，均在合理范围内，验证了最优方案工艺参数的有效性。



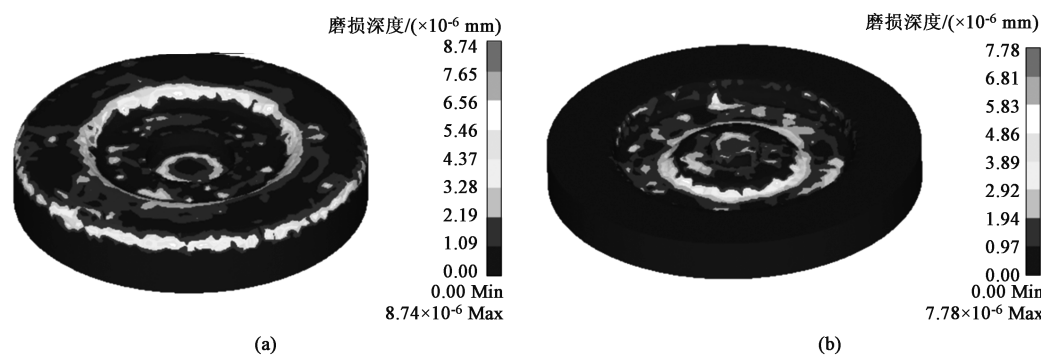


图 3 最优方案下冲模磨损深度分布图  
(a) 凸模 (b) 凹模  
Fig. 3 Wear depth distribution diagrams of stamping mold under optimal scheme  
(a) Punch (b) Die



图 4 DP780 高强钢板制件  
(a) 正面 (b) 反面  
Fig. 4 DP780 high strength steel plate part  
(a) Positive (b) Negative

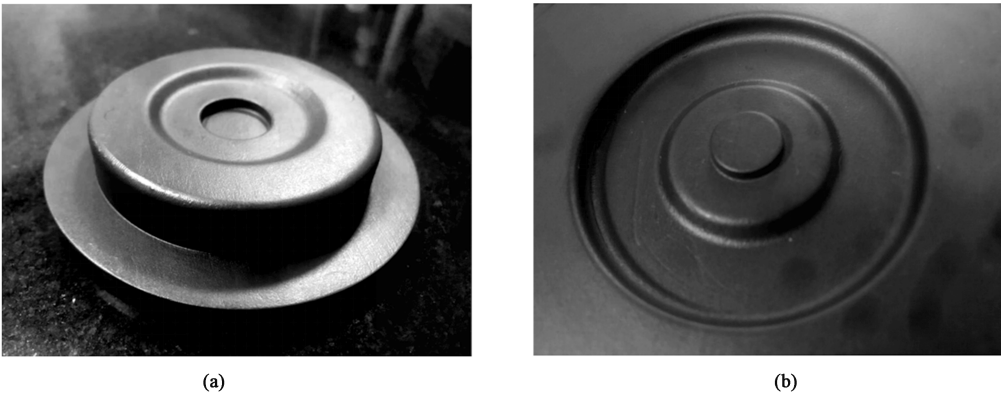


图 5 冲压试验模具  
(a) 凸模 (b) 凹模  
Fig. 5 Mold of stamping test  
(a) Punch (b) Die

4 结论

- (1) 本文以 DP780 高强钢板为研究对象，对高
- 强钢板的冲模磨损过程进行了热冲压数值分析，建立了热冲压仿真模型，分析了高强钢板的变形过程以及成形效果。
- (2) 以热冲压磨损理论为支撑，以冲模磨损深度

最小为优化目标,联合正交试验法、灰色关联法、极差分析法,获得了最优方案:钢板温度为 400 ℃、模具间隙为 1.76 mm、冲压速度为 10 mm·s<sup>-1</sup>、摩擦因数为 0.25。

(3) 优化后的方案使得凸模最大磨损深度减小了 31.61%,凹模最大磨损深度减小了 24.98%,并经实际冲压试验进行了验证,模拟结果与实际冲模磨损结果极为接近,表明有限元模拟结果的可参考性高,优化手段合理。

#### 参考文献:

- [1] 冷杨松,李迪,曹凡,等. 双相钢车身板 DP780 的温热成形本构模型 [J]. 济南大学学报: 自然科学版, 2019, 33 (4): 301-307.  
Leng Y S, Li D, Cao F, et al. Constitutive model of dual-phase steel body panel DP780 in warm forming [J]. Journal of University of Jinan: Science and Technology, 2019, 33 (4): 301-307.
- [2] 李韶华,张兵,冯桂珍. 重型载货汽车柔性车架的轻量化研究 [J]. 机械设计与制造, 2020, (10): 110-114.  
Li S H, Zhang B, Feng G Z. Lightweight research on flexible frame of heavy truck [J]. Machinery Design & Manufacture, 2020, (10): 110-114.
- [3] 吴钟鸣,徐礼辉,郭语. 小型电动汽车车架的设计与轻量化改进 [J]. 现代制造工程, 2020, (4): 77-82.  
Wu Z M, Xu L H, Guo Y. Design and lightweight improvement of small electric vehicle frame [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020, (4): 77-82.
- [4] 陈满秀,陈德林. 应用正交试验法汽车 B 柱轻量化设计分析 [J]. 机械设计与制造, 2021, (3): 97-100, 105.  
Chen M X, Chen D L. Lightweight design analysis of automobile B-pillar based on orthogonal test method [J]. Machinery Design & Manufacture, 2021, (3): 97-100, 105.
- [5] 李奇涵,景淑帆,高嵩,等. 基于响应面法的 22MnB5 高强度钢热冲压成形性优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (6): 93-101.  
Li Q H, Jing S F, Gao S, et al. Optimization on hot stamping formability for 22MnB5 high strength steel based on response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (6): 93-101.
- [6] 陈明. 基于 DynaForm 的高强度钢液压拉深成形数值模拟研究 [J]. 汽车零部件, 2019, (3): 14-17.  
Chen M. Numerical simulation of hydroforming of high strength steel based on DynaForm [J]. Automobile Parts, 2019, (3): 14-17.
- [7] 孔政,张杰,李洪波,等. 摩擦系数对 DP780 钢拉深成形极限的影响 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (2): 252-259.  
Kong Z, Zhang J, Li H B, et al. Effects of friction coefficient on the deep-drawing forming limit of dual-phase steel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (2): 252-259.
- [8] 刘建辉,王少英. 材料性能对汽车用高强度钢回弹的影响分析 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (7): 144-149.  
Liu J H, Wang S Y. Influence analysis of material properties on springback of high strength steel for automobile [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (7): 144-149.
- [9] 付泽民,熊伟杰,张锁怀,等. 高强度钢板热力耦合冲压成形数值模拟 [J]. 制造技术与机床, 2018, (7): 142-145.  
Fu Z M, Xiong W J, Zhang S H, et al. Numerical simulation of high strength steel hot stamping forming [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2018, (7): 142-145.
- [10] 李达. 高温条件下 DP780 的成形性能仿真研究 [J]. 汽车零部件, 2020, (8): 22-25.  
Li D. Simulation research on formability of DP780 under high temperature [J]. Automobile Parts, 2020, (8): 22-25.
- [11] 刘俊英. 基于正交试验的车用螺母成形分析及模具磨损优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (2): 182-187, 193.  
Liu J Y. Forming analysis and mould wear optimization on nuts for vehicle based on orthogonal test [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (2): 182-187, 193.
- [12] 胡建军,李小平. DEFORM-3D 塑性成形 CAE 应用教程 [M]. 2 版. 北京: 北京大学出版社, 2011.  
Hu J J, Li X P. DEFORM-3D Plastic Forming CAE Application Course [M]. 2nd Edition. Beijing: Peking University Press, 2011.
- [13] 谢晖,李江曼,王诗恩,等. 超高强度钢板冲压模具磨损 CAE 分析研究与应用 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2015, 42 (8): 15-21.  
Xie H, Li J M, Wang S E, et al. Research and application of die wear CAE analysis of ultra high strength steel stamping [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42 (8): 15-21.
- [14] Lee R S, Jou J L. Application of numerical simulation for wear analysis of warm forging die [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140 (1-3): 43-48.
- [15] 许贤博,邵华. 基于田口算法和灰色关联理论的车削参数多目标优化研究 [J]. 工具技术, 2015, 49 (8): 15-18.  
Xu X B, Shao H. Multi-object optimization of parameters for turning based on Taguchi method and grey relational analysis [J]. Tool Engineering, 2015, 49 (8): 15-18.
- [16] 郭佩剑,樊文欣,李志伟,等. 基于灰色关联度的筒形件二道次强力旋压工艺参数优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (4): 108-113.  
Guo P J, Fan W X, Li Z W, et al. Optimization on two-pass power spinning process parameters for cylindrical parts based on grey correlation degree [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (4): 108-113.