

# 基于 Dynaform 及响应面法的 6016 铝合金散热壳体冲压成形及优化

尤 晋<sup>1</sup>, 龚红英<sup>1</sup>, 刘尚保<sup>1</sup>, 贾星鹏<sup>1</sup>, 徐培全<sup>1</sup>, 廖泽寰<sup>2</sup>

(1. 上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620; 2. 上海东芙冷锻制造股份有限公司, 上海 201100)

**摘要:** 以 6016 铝合金散热壳体为研究对象, 通过分析零件的成形工艺, 确定采用 Dynaform 软件对零件的拉深成形工艺进行有限元模拟, 以零件的最大减薄率为评价其成形质量的指标。基于正交试验设计, 研究了压边力、摩擦因数、冲压速度以及模具间隙对零件成形质量的影响规律。基于灰色系统 (GS) 理论分析出与零件最大减薄率关联度较高的工艺参数, 并通过响应面法 (RAM) 进行中心复合设计 (CCD), 得到最优的工艺参数组合为: 压边力为 20.1 kN、摩擦因数为 0.16、冲压速度为 1500 mm·s<sup>-1</sup>、模具间隙为 1.05 mm, 零件最大减薄率为 23.029%。将采用该方案制得的实体零件与数值模拟结果进行对比和分析, 结果表明数值模拟分析结果具有可靠性, 可为散热装置零件的成形提供一定指导。

**关键词:** 拉深成形; 6016 铝合金; 最大减薄率; 正交试验; 响应面法; 灰色系统理论

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.03.008

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 03-0054-05

## Stamping and optimization on 6016 aluminum alloy radiator shell based on Dynaform and response surface method

You Jin<sup>1</sup>, Gong Hongying<sup>1</sup>, Liu Shangbao<sup>1</sup>, Jia Xingpeng<sup>1</sup>, Xu Peiquan<sup>1</sup>, Liao Zehuan<sup>2</sup>

(1. School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. Shanghai Dongfu Cold Forging Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201100, China)

**Abstract:** For 6016 aluminum alloy radiator shell, by analyzing the forming process of part, the finite element simulation of the deep drawing process for part was conducted by using software Dynaform, and the maximum thinning rate of part was used as the index to evaluate its forming quality. Then, based on the orthogonal test design, the influence laws of blank holder force, friction coefficient, stamping speed and die clearance on the forming quality of part were studied, and based on grey system (GS) theory, the process parameters with high correlation with the maximum thinning rate of part were analyzed, and the central composite design (CCD) was conducted by the response surface method (RAM). Furthermore, the optimal process parameter combination was obtained with the blank holder force of 20.1 kN, the friction coefficient of 0.16, the stamping speed of 1500 mm·s<sup>-1</sup>, the die clearance of 1.05 mm, and the maximum thinning rate of part was 23.029%. The comparison and analysis between the solid parts made by this scheme and the numerical simulation results show that the numerical simulation analysis results are reliable, which could provide some guidance for the forming of radiator parts.

**Key words:** deep drawing; 6016 aluminum alloy; maximum thinning rate; orthogonal test; response surface method; grey system theory

近年来, 新能源汽车产业迅速发展, 使得铝合金材料的冲压零件在汽车轻量化这一领域的优势更为突出<sup>[1]</sup>。得益于数值模拟技术的发展, 大量学者开始针对冲压零件的起皱、回弹以及拉裂等诸多问

题进行大量研究, 对冲压零件的成形提出了指导性意见。李有通等<sup>[2]</sup>采用了响应面法与 NSGA-II 算法相结合的工艺多目标优化方法, 以最小化冲压件的最大减薄率和最大增厚率为优化目标, 使用数值模拟软件, 基于二阶响应面法拟合质量参数-工艺参数之间的非线性关系, 通过基因编码将优化问题转化为寻优问题, 使用 NSGA-II 算法搜索到多目标优化的 Pareto 前沿解, 指导了汽车 A 柱加强板成形。Li H H 等<sup>[3]</sup>在 Think-Design 全局形状建模并对铝合金发动机罩内板进行回弹补偿的基础上, 通过 BP

收稿日期: 2021-01-30; 修订日期: 2021-04-20

作者简介: 尤 晋 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1002086445@qq.com

通信作者: 龚红英 (1974-), 女, 博士, 教授

E-mail: ghyyw1974@163.com

神经网络和遗传算法的回弹补偿和工艺参数优化对零件进行参数优化，有效地提高了冲压零件的成形质量。施为钟等<sup>[4]</sup>通过正交试验对圆筒件成形过程中的工艺参数进行分析，联系灰色系统理论和响应面法，得到压边力以及冲压速度对圆筒件成形的影响较大，通过 Dynaform 软件分析出圆筒件成形的最优工艺参数组合，为拉深件的实际生产提供参考。

本文对 6016 铝合金散热壳体零件的拉深工艺进行研究分析，借助 UG 软件建立零件模型，通过 Dynaform 软件进行有限元分析。运用正交试验研究了压边力、摩擦因数、冲压速度以及模具间隙对零件最大减薄率的影响，并通过灰色系统理论（GS）得出与零件最大减薄率关联度较大的工艺参数，在使用 Design-Export 软件进行响应面预测并获得最优工艺参数组合的基础上，通过 Dynaform 软件对最优工艺参数组合进行模拟，验证试验方案的合理性，并通过制造实体零件进行检验分析。

## 1 工艺分析及模型建立

### 1.1 方盒件拉深工艺分析

6016 铝合金散热壳体零件为方盒件，为典型的对称性零件，由圆角部分和直边部分组成。拉深时受直边的影响，变形不均匀，圆角和直边的变形不是简单的弯曲变形与拉深变形，拉深时圆角部分的金属向直边流动<sup>[5]</sup>。在试验中需要注意圆角部分出现拉裂以及直边部分出现拉裂和起皱的情况。散热壳体零件的成形为多工步成形，工艺步骤为拉深—修边—冲孔—翻边。本次模拟主要是针对散热壳体零件的拉深工艺进行研究。6016 铝合金散热壳体的零件图如图 1 所示。

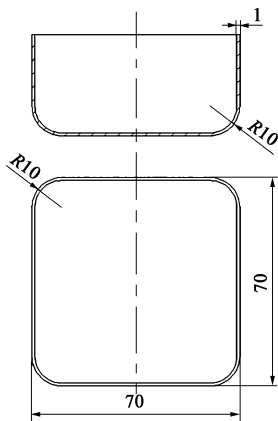


图1 散热壳体零件图  
Fig.1 Part drawing of radiator shell

### 1.2 模型建立

散热壳体零件的材料为 6016 铝合金，厚度为 1 mm，其元素组成见表 1<sup>[6]</sup>。六系铝合金的合金元素组成以 Mg 和 Si 为主，其耐腐蚀性能、抗氧化性能以及加工性能优良，且铜元素含量较低，使得 6016 铝合金具有更加优异的抗时效稳定性和强化效果，被广泛应用于汽车工业<sup>[7]</sup>。

表 1 6016 铝合金元素组成（%，质量分数）  
Table 1 Element compositions of 6016 aluminum alloy  
(%, mass fraction)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ti	Zn	Al
1.06	0.31	0.1	0.14	0.40	0.04	0.02	0.01	余量

运用 UG 软件设计出散热壳体零件的模型，输出 IGS 文件，并将其导入 Dynaform 软件中进行材料定义和网格划分。板料是从方盒件的中性层通过软件模拟出轮廓线定义而成，凹模是从方盒件下表面提取而成，压边圈和凸模是通过网格偏置而成。凹模、凸模、板料、压边圈均定义为刚性体。闭合压边速度设置为  $2000\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，摩擦因数为 0.15~0.19，冲压速度设置为  $500\sim 2500\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，凹凸模间隙设置为 1.05~1.25 mm。压边力的设置取决于压边圈的面积以及单位压边力，查询冲压手册<sup>[8]</sup>，压边力  $F$  的计算公式为：

$$F = P \times A \tag{1}$$

式中： $A$  为实际压边面积， $\text{mm}^2$ ； $P$  为单位压边力，MPa。

计算压边圈压板料的实际面积约为  $16818.48\text{ mm}^2$ ，查询冲压手册<sup>[8]</sup>，确定选取压边力的范围为 13.5~20.1 kN。方盒件拉深的 Dynaform 有限元模型如图 2 所示。

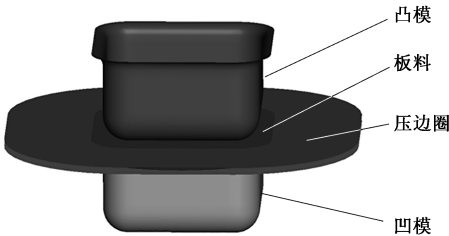


图2 方盒件有限元模型  
Fig.2 Finite element model of square box part

## 2 试验设计

### 2.1 正交试验

正交试验设计能够从所有的试验方案中选取少

数均匀分散、齐整可比、代表性较强的试验方案，并统计分析这些方案从而得到最优方案，大大减少了试验次数，是一种高效率的试验设计方法<sup>[9]</sup>。本次模拟主要针对散热壳体零件的拉深工艺进行研究，以散热壳体零件的最大减薄率为评价零件成形质量的指标，Dynaform 软件中零件的最大减薄率不得超过 30%，否则会出现拉裂现象。正交试验设计为 4 因素 5 水平，通过对压边力、摩擦因数、冲压速度以及模具间隙取值，设计出  $L_{25}(5^4)$  正交表，见表 2，正交试验结果见表 3。

表 2 正交试验参数设置

Table 2 Setting of parameters for orthogonal experiment

水平	因素			
	压边力/ kN	摩擦因数	冲压速度/ (mm·s <sup>-1</sup> )	模具间隙/ mm
1	13.5	0.15	500	1.05
2	15.1	0.16	1000	1.10
3	16.8	0.17	1500	1.15
4	18.5	0.18	2000	1.20
5	20.1	0.19	2500	1.25

2.2 灰色系统理论分析

考虑到多个因素对零件最大减薄率产生的影响，为了方便、快捷地寻求最优解，需要判断影响因素与优化目标之间的关联程度。灰色系统理论分析是动态发展过程中发展的量化分析，在影响因素与目标之间关系不清晰的情况下，其是判断影响因素与目标之间关联度大小的方法<sup>[10-11]</sup>。关联度越大，则影响因素对目标的影响程度也越大。

设  $X_0 = \{X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(n)\}$ ，为参考序列， $X_i = \{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)\}$ ，为其他序列，则  $X_0$  与  $X_i$  的关联系数  $\varepsilon_{ij}$  为：

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\min_i \min_j |X_0(j) - X_i(j)| + \rho \max_i \max_j |X_0(j) - X_i(j)|}{|X_0(j) - X_i(j)| + \rho \max_i \max_j |X_0(j) - X_i(j)|} \quad (2)$$

式中： $i$  为序列序号，且  $i$  为任意整数； $j$  为序列中某一项， $1 \leq j \leq n$ ，且  $j$  为整数； $n$  为序列项数， $n \geq 2$ ，且为整数； $\rho$  为分辨率，取值为 0.5； $\min_i \min_j |X_0(j) - X_i(j)|$  与  $\max_i \max_j |X_0(j) - X_i(j)|$  分别为  $X_0(j)$ 、 $X_i(j)$  这两个级数的最小差和最大差。

灰色关联度  $\varepsilon_i$  为：

$$\varepsilon_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

表 3 正交试验设计方案与结果

Table 3 Design schemes and results of orthogonal test

试验 序号	压边力/ kN	摩擦 因数	冲压速度/ (mm·s <sup>-1</sup> )	模具间隙/ mm	最大减薄 率/%
1	13.5	0.15	500	1.05	20.481
2	13.5	0.16	1000	1.10	21.768
3	13.5	0.17	1500	1.15	23.262
4	13.5	0.18	2000	1.20	24.793
5	13.5	0.19	2500	1.25	27.249
6	15.1	0.15	1000	1.15	22.087
7	15.1	0.16	1500	1.20	23.622
8	15.1	0.17	2000	1.25	24.914
9	15.1	0.18	2500	1.05	22.669
10	15.1	0.19	500	1.10	23.831
11	16.8	0.15	1500	1.25	23.848
12	16.8	0.16	2000	1.05	21.997
13	16.8	0.17	2500	1.10	23.703
14	16.8	0.18	500	1.15	24.960
15	16.8	0.19	1000	1.20	31.544
16	18.5	0.15	2000	1.10	22.590
17	18.5	0.16	2500	1.15	24.327
18	18.5	0.17	500	1.20	25.472
19	18.5	0.18	1000	1.25	32.193
20	18.5	0.19	1500	1.05	27.187
21	20.1	0.15	2500	1.20	24.114
22	20.1	0.16	500	1.25	23.532
23	20.1	0.17	1000	1.05	23.856
24	20.1	0.18	1500	1.10	28.652
25	20.1	0.19	2000	1.15	37.672

$\varepsilon_i$  值越大，表明影响因素与减薄率之间的关联程度越大。将正交试验中的影响因素与最大减薄率的数据代入灰色系统理论公式，可以得到各因素与最大减薄率的关联程度，见表 4。

表 4 各因素与最大减薄率的关联程度

Table 4 Degree of correlation between each factor and maximum thinning rate

影响因素	压边力	摩擦因数	冲压速度	模具间隙
关联度	0.80	0.91	0.49	0.82

由表 4 可知，摩擦因数与模具间隙对该零件最大减薄率的影响较大，而压边力与冲压速度对该零件的最大减薄率的影响较小。在优化研究中对摩擦因数与模具间隙进一步优化。

2.3 响应面试验

常规的试验设计未能给出直观的图形，也未能给出最优点。响应面分析法运用图形技术将体系响应作为一个或多个因素的函数关系显示出来，并寻求出最优解<sup>[12-13]</sup>。根据灰色系统理论分析，以摩擦因数和模具间隙为影响因素，以最大减薄率为优化目标，通过 Design-Export 软件的中心复合设计寻求最优组合方案，得到在摩擦因数和模具间隙作用下的数据，见表 5，其等值线图 and 三维响应面曲面图如图 3 所示。

表 5 中心复合试验设计  
Table 5 Design of central composite test

试验序号	摩擦因数	模具间隙/mm	最大减薄率/%
1	0.15	1.25	25.107
2	0.20	1.15	50.334
3	0.17	1.15	26.611
4	0.14	1.15	23.088
5	0.17	1.01	23.495
6	0.17	1.29	30.318
7	0.17	1.15	26.485
8	0.17	1.15	26.604
9	0.15	1.05	22.295
10	0.17	1.15	26.514
11	0.19	1.05	30.181
12	0.19	1.25	43.842
13	0.17	1.15	26.566

3 分析和验证

根据响应面试验，当摩擦因数为 0.16、模具间隙为 1.05 mm 时，最大减薄率达到最优值 21.5382%。将优化后的工艺参数在 Dynaform 软件中进行验证，得到优化后零件的最大减薄率为 23.029%，减薄率云图如图 4 所示。方盒件成形时减薄出现在底部圆角与直壁处。在拉深成形过程中，方盒件的直壁部分受到凸模拉应力的作用，产生单向受拉的变形，导致厚度减薄。方盒件底部圆角处同时受到直壁部分的拉应力与凸模的压力，故此处为减薄最大处，易产生拉裂缺陷。优化后的成形极限图如图 5 所示。通过响应面预测结果与仿真结果对比，得到误差值为 1.4908%，该误差值表明响应面法对散热壳体零件的拉深成形预测较为准确。优化后的实物图如图 6 所示。

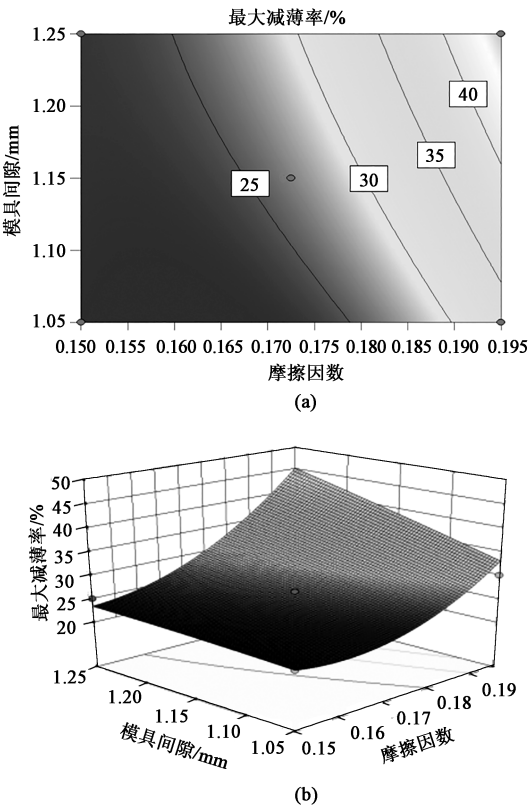


图 3 响应面法分析结果  
(a) 等值线图 (b) 三维响应面曲面图  
Fig. 3 Analysis results of response surface method  
(a) Contour map (b) 3D response surface map

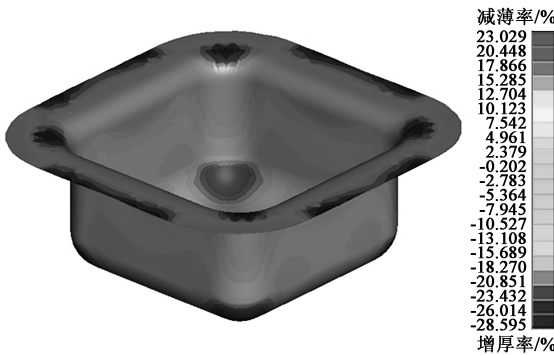


图 4 减薄率云图  
Fig. 4 Nephogram of thinning rate

4 结语

通过 Dynaform 软件对 6016 铝合金材料的散热壳体零件进行有限元模拟分析，设计正交试验，以散热壳体零件的最大减薄率为优化目标，对其工艺参数进行优化。运用灰色系统理论对工艺参数与优化目标间的关联度进行分析，可知压边力和冲压速度的关联度较小，通过对正交试验设计结果进行极

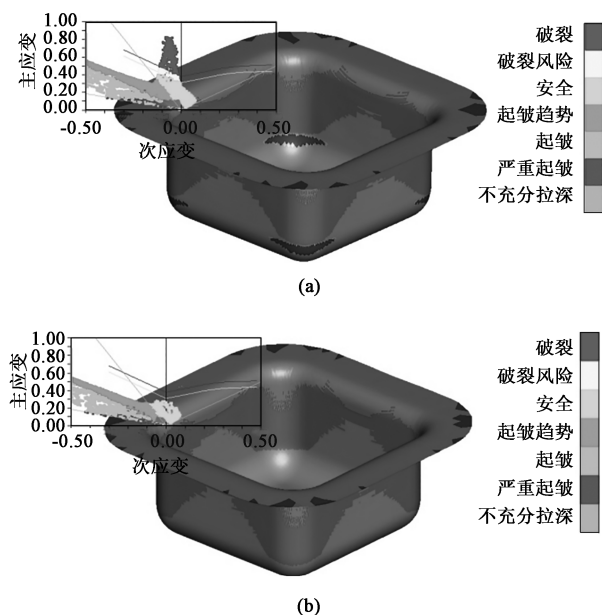


图 5 成形极限图

(a) 优化前 (b) 优化后

Fig. 5 Forming limit diagrams

(a) Before optimization (b) After optimization



图 6 优化后实物图

Fig. 6 Physical map after optimization

差分析, 选取压边力为 20.1 kN, 冲压速度为  $1500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。运用响应面法对摩擦因数和模具间隙进一步优化, 得到最优工艺参数组合为摩擦因数为 0.16, 模具间隙为 1.05 mm, 散热壳体零件的最大减薄率达到最小值。响应面的预测结果与仿真结果的误差值为 1.4908%, 表明响应面的预测较为精准。该研究可对散热壳体零件的冲压成形提供一定帮助。

#### 参考文献:

- [1] 张生林. 新能源汽车铝合金冲压轻量化技术 [J]. 设备管理与维修, 2018, (17): 125-126.  
Zhang S L. New energy aluminum alloy stamping lightweight technology for automobile [J]. Plant Maintenance Engineering, 2018, (17): 125-126.
- [2] 李有通, 陈益庆, 李沁逸, 等. 车辆 A 柱加强板热冲压工艺的 NSGA-II 多目标优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (2): 59-65.
- [3] Li Y T, Chen Y Q, Li Q Y, et al. Multi-object optimization on hot stamping process for vehicle A-pillar reinforced plate by NSGA-II [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (2): 59-65.
- [4] Li H H, Hu Z L, Hu W Z, et al. Forming quality control of an AA5182-O aluminum alloy engine hood inner panel [J]. JOM: The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 2019, 71 (5): 1687-1695.
- [5] 施为钟, 龚红英, 姜天亮, 等. 基于 Dynaform 和响应面法的带凸缘圆筒件拉深工艺优化 [J]. 上海工程技术大学学报, 2020, 34 (2): 168-173.
- [6] Shi W Z, Gong H Y, Jiang T L, et al. Optimization of deep drawing process for flanged cylinder based on Dynaform and response surface method [J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2020, 34 (2): 168-173.
- [7] 翁其金, 徐新成. 冲压工艺及冲模设计 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [8] Wen Q J, Xu X C. Stamping Technology and Die Design [M]. 2nd edition. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [9] 徐燕萍, 任月路, 许泽兵, 等. 冷轧工艺对 6016 铝合金  $r$  值影响 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (23): 41-44.
- [10] Xu Y P, Ren Y L, Xu Z B, et al. Effect of cold roll process on  $r$  value of 6016 aluminum alloy [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (23): 41-44.
- [11] Ramona Prillhofer, Gunther Rank, Josef Berneder, et al. Property criteria for automotive Al-Mg-Si sheet alloys [J]. Materials, 2014, 7 (7): 5047-5068.
- [12] 王孝培. 冲压手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [13] Wang X P. Stamping Manual [M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [14] 罗时光, 金红娇, 丁元生, 等. 试验设计与数据处理 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- [15] Luo S G, Jin H J, Ding Y S, et al. Design and Data Processing [M]. Beijing: China Railway Press, 2018.
- [16] 熊文韬. 基于 GS 理论与神经网络的汽车覆盖件成形优化 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [17] Xiong W T. Optimization of Automobile Panel Forming Based on GS Theory and Neural Network [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [18] 宋志浩, 缪卫东, 陈桂, 等. Candy-plug 型 NiTi 合金血管支架力学性能的有限元分析 [J]. 稀有金属, 2020, 44 (7): 706-715.
- [19] Song Z H, Chou W D, Chen G, et al. Mechanical analysis of candy-plug NiTi alloy vascular stents by finite element analysis [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44 (7): 706-715.
- [20] 孙元贵, 刘泓滨, 熊文韬, 等. 基于响应面法的汽车灯底板成形参数设计 [J]. 汽车工程学报, 2017, 7 (6): 445-449.
- [21] Sun Y G, Liu H B, Xiong W T, et al. Design of forming parameters of automobile lamp base plate based on response surface method [J]. Journal of Automotive Engineering, 2017, 7 (6): 445-449.
- [22] 李莉, 张赛, 何强, 等. 响应面法在试验设计与优化中的应用 [J]. 试验室研究与探索, 2015, 34 (8): 41-45.
- [23] Li L, Zhang S, He Q, et al. Application of response surface methodology in experimental design and optimization [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015, 34 (8): 41-45.