

基于广义 Maxwell 模型非球面透镜模压成型的仿真分析

胡军, 许凯乐*, 马壮壮, 马强

天津科技大学机械工程学院, 天津 300222

摘要 为优化非球面透镜模压成型过程中的工艺参数, 利用 MSC.Marc 软件建立了二维轴对称模型。基于五单元广义 Maxwell 黏弹性模型对 D-ZK3 玻璃材料的模压成型过程进行有限元仿真, 分析了玻璃预制体和模具等效应力的变化以及模压温度、模压速率、摩擦因数对等效应力的影响。结果表明, 透镜边缘的等效应力大于透镜中心, 上表面中心点的等效应力大于下表面中心点, 透镜和模具的等效应力都随模压速率和摩擦因数的增大而增大、随模压温度的升高而减小, 且模具的等效应力大于透镜。正交试验表明, 模压温度和模压速率是影响玻璃预制体等效应力的主要因素, 结合实际应用得到最合适的模压工艺参数是模压温度为 580 °C、模压速率为 0.1 mm/s、摩擦因数为 0.2。

关键词 光学制造; 非球面透镜; 仿真分析; 成型工艺

中图分类号 TH164

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.092201

Simulation Analysis of Aspherical Lens Molding Based on Generalized Maxwell Model

Hu Jun, Xu Kaile*, Ma Zhuangzhuang, Ma Qiang

College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China

Abstract In order to optimize the process parameters of aspherical lens molding process, a two-dimensional axisymmetric model is established by MSC.Marc software. Based on five-element generalized Maxwell viscoelastic model, a finite element simulation of the molding process of D-ZK3 glass materials is carried out. The changes in equivalent stress of glass preform and dies, and the influence of molding temperature, molding rate, and friction factor on the equivalent stress are analyzed. The results show that the equivalent stress at the edge of the lens is larger than that at the center of the lens, and the equivalent stress at the center point of the upper surface is greater than that at the center point of the lower surface. The equivalent stress of the lens and the die increases with the increase of molding rate and friction coefficient, and decreases with the increase of molding temperature. The equivalent stress of the die is larger than that of the lens. Orthogonal test shows that the molding temperature and molding rate are the main factors affecting the equivalent stress of the glass preform. Combined with practical application, the most suitable molding parameters are molding temperature of 580 °C, molding rate of 0.1 mm/s, and friction factor of 0.2.

Key words optical fabrication; aspherical lens; simulation analysis; molding process

OCIS codes 220.4610; 220.1250; 220.3630

1 引言

随着光电、通信、生物工程、航空航天技术及军用装备的快速发展, 光学玻璃的应用越来越广泛, 光

学非球面玻璃透镜不仅能有效减小影像畸变、提高鉴别能力, 还能简化仪器结构^[1-2]。传统的非球面玻璃透镜生产需要经过粗磨、精磨、抛光等十几道工序, 流程繁琐、周期长, 且成品精度误差波动大, 生产

收稿日期: 2019-09-11; 修回日期: 2019-09-22; 录用日期: 2019-09-24

基金项目: 天津市自然科学基金(18JCQNJC05200)

* E-mail: 2225166921@qq.com

效率与工艺稳定性均无法满足发展需求。为解决该问题,20世纪70年代出现了一种高精度玻璃模压成型技术,通过专用模具,在高温下施加一定压力将模腔形状复制到软化的玻璃预制体上,再经退火固化,加工出达标的非球面光学透镜^[3]。这种方法成型精度高、节能环保、生产周期短,适合批量生产。该技术主要包括低熔点模压玻璃材料的研发、模压设备的制造、精密模具的加工与模压工艺参数的选取等方面。美国柯达公司首先开发了玻璃模压成型技术,韩国、日本也有相关设备。国内相关产品距离规模化生产还有一段距离,为适应国内高精非球面玻璃透镜需求量急剧增长现状,亟需掌握玻璃模压成型的核心技术。

有限元仿真能为实际生产提供重要参考,本文根据玻璃模压成型原理,利用 MSC.Marc 软件对 D-ZK3 玻璃预制体模压成型进行仿真。分析了模

压过程中玻璃预制体等效应力的变化,研究了模压温度、模压速率、摩擦因数对玻璃和模具等效应力的影响,利用正交试验寻求合适的模压工艺参数。

2 基本原理

2.1 模压成型加工原理

非球面玻璃透镜模压成型需要经过加热、加压、退火、脱模四个阶段^[4],如图1所示。具体步骤:1)在充满氮气的密闭空间中,将玻璃预制体和模具加热到玻璃预定温度;2)控制模具移动,挤压高温软化的玻璃,将模腔形状复制到玻璃预制体上;3)保持一定压力并使温度低于玻璃的转化点,以固化透镜形状和降低残余应力;4)冷却至室温后,取出玻璃成形体。该加工方法工艺简单,生产一个透镜需要5~8 min,大大缩短了生产周期^[5]。

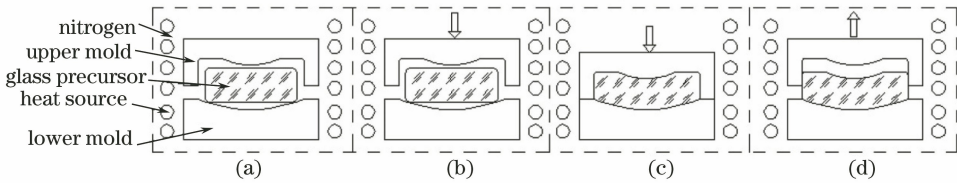


图1 玻璃模压原理示意图。(a)加热;(b)加压;(c)退火;(d)脱模

Fig. 1 Schematic diagram of glass molding principle. (a) Heating; (b) compression; (c) annealing; (d) mold unloading

2.2 玻璃的黏弹性与摩擦因数

玻璃在屈服温度附近具有黏弹性,即在变形的同时具有黏性和弹性特征,表现为蠕变和松弛。Maxwell 模型是一种黏弹性模型,由一个弹簧和一个阻尼器串联而成,弹簧用来表示物体受到载荷时形变瞬间达到的平衡,阻尼器用来表示形变随时间的线性变化^[6]。俄亥俄州立大学的 Jain^[7]用 BK7 玻璃研究表明广义 Maxwell 模型能很好表示玻璃的应力松弛。通常将五单元广义 Maxwell 模型应用到玻璃模压仿真中,如图2所示,五单元广义 Maxwell 模型由一个弹簧和五个基本 Maxwell 模型并联而成,可表示为

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0 \omega_\infty}{E_\infty} + \sigma_0 \sum_{i=1}^5 \omega_i \left(\frac{1}{E_i} + \frac{t}{\eta_i} \right), \quad (1)$$

式中, ω_∞ 、 ω_i 为权重因子 E_∞ 、 E_i 对应的杨氏模量,所有的权重因子之和等于1, η_i 为黏度, σ_0 为 $t=0$ 时施加的恒定应力值。采用 William-Landel-Ferry 方程描述温度对黏弹性的影响^[8],可表示为

$$X_{LEA}(t) = -\frac{C_1(T - T_R)}{C_2 + (T - T_R)}, \quad (2)$$

式中, T 为应力松弛温度, T_R 为应力松弛参考温度,

C_1 、 C_2 为常量。实际模压过程中摩擦力呈非线性变化,很难获得实时的摩擦因数^[9]。仿真时通常采用库仑摩擦表示玻璃预制体与模具之间的摩擦,即摩擦因数与剪切屈服应力的乘积。设玻璃预制体和模具温度已达到模压预定温度,且与环境温度一致。

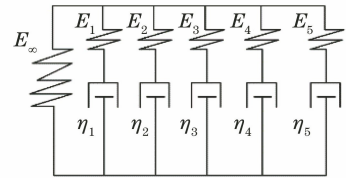


图2 五单元广义 Maxwell 模型

Fig. 2 Generalized Maxwell model of five elements

2.3 有限元仿真模型的建立

利用 MSC.Marc 软件仿真模拟玻璃模压过程,玻璃材料为 D-ZK3,转变温度为 511 °C,屈服温度为 546 °C,模具材料为 WC,部分参数如表1所示。

可供选择的玻璃预制体有球状体和圆柱体,已有研究表明球状体加热时间长,模压过程中变形严重,易导致仿真结果不收敛^[10]。因此仿真选用的玻璃预制体形状为圆柱体,半径为 4.8 mm,高为 3.6 mm,如图3所示,整体采用二维轴对称模型,用四边形单元

表1 玻璃与模具材料的参数

Table 1 Parameters of glass and mold materials

Property	Modulus of elasticity / (G · Pa)	Poisson's ratio	Density / (kg · m ⁻³)	Heat capacity / (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	Thermal conductivity / (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)
D-ZK3	93	0.234	2830	314	0.78
WC	570	0.220	14650	760	63

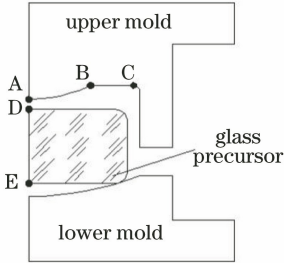


图3 玻璃模压仿真模型

Fig. 3 Simulation model of glass molding

划分网格,将玻璃预制体划分为 1843 个单元、上模分为 1098 个单元、下模分为 837 个单元。固定下模,将

上模向下移动 3.42 mm。其中,AB 为上模的非球面部分,BC 为上模的平面部分,B 为拐点,D、E 分别为玻璃预制体的上表面中心点和下表面中心点。

3 仿真结果与分析

3.1 模压过程中等效应力变化

实际生产中(高温密闭的环境)很难用仪器测量玻璃预制体的等效应力、位移等参数,利用 MSC.Marc 软件可以获得相关参数,为提高成型质量提供参考。温度为 580 °C,摩擦因数为 0.1,模压速率为 0.1 mm/s,模压过程如图 4 所示。

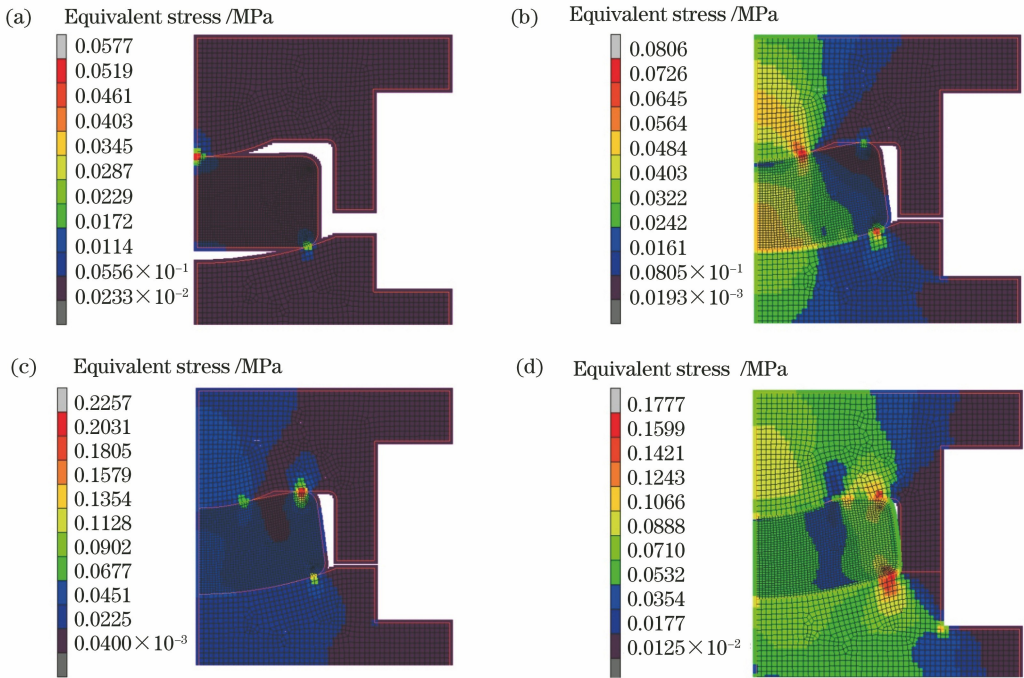


图4 模压过程中整体的等效应力变化。(a) AB 接触预制体瞬间的等效应力;(b) BC 接触预制体前一刻的等效应力;(c) BC 接触预制体瞬间的等效应力;(d)合模瞬间的等效应力

Fig. 4 Overall equivalent stress change during the molding process. (a) Equivalent stress when AB contacts the preform; (b) equivalent stress immediately before BC contacts the preform; (c) equivalent stress when BC contacts the preform; (d) equivalent stress during mold clamping

图 4(a)中 AB 接触预制体瞬间的整体等效应力达到 0.0577 MPa;图 4(b)中随着 AB 的移动,在 BC 接触预制体前一刻整体的等效应力逐渐上升到 0.0806 MPa;图 4(c)中 BC 部分接触预制体瞬间的等效应力骤变到 0.2257 MPa;图 4(d)中合模瞬间整

体的等效应力达到 0.1777 MPa,小于图 4(c)的整体等效应力,原因是玻璃的应力松弛。模压完成后透镜在边缘的等效应力大于透镜中心,原因是模压过程中玻璃材料的离散点由中心向边缘移动,模具阻碍了离散点的移动,导致应力松弛较慢。

为研究模压过程中预制体上表面中心点 D 与下表面中心点 E 的等效应力变化,用 MSC.Marc 软件对仿真结果进行处理。如图 5 所示,当 AB 和 BC 部分接触玻璃预制体时,两点的等效应力都发生了突变,且整个模压过程中 D 点的等效应力都大于 E 点。

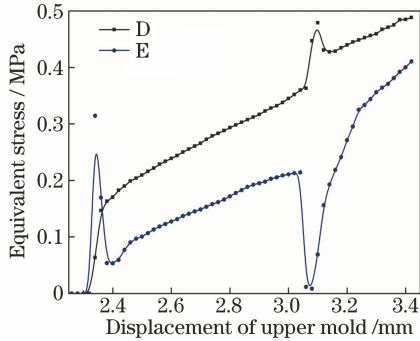


图 5 玻璃预制体上下中心点应力的变化

Fig. 5 Changes in stress at the upper and lower center points of glass preforms

3.2 模压温度与等效应力的关系

当模压温度低于屈服温度时玻璃未达到塑性变形,在较高的模压载荷下容易破碎,且玻璃的流动性差、不易充满型腔;如果温度过高,玻璃与模具易发生粘连。因此模压温度一般高于玻璃屈服温度 $20\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[11]。模压速率为 0.1 mm/s ,摩擦因数为 0.1 时,仿真得到模压温度分别为 $560, 570, 580, 590\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时模具和玻璃预制体的等效应力如图 6 所示。可以看出,预制体和模具的等效应力都随温度的升高而减小,其中下模承受的等效应力大于上模。模压温度从 $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增加到 $590\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,预制体的等效应力由 0.3527 MPa 降至 0.0944 MPa 。原因是随模压温度的升高玻璃黏度降低,内部分子链断裂使流动性变好。此外由于玻璃的应力松弛,较高温度使玻璃分子能在短时间达到新的平衡状态^[12]。

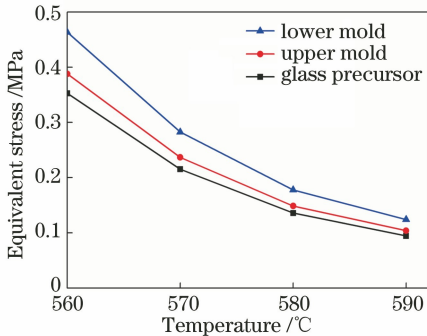


图 6 温度对模具和预制体应力的影响

Fig. 6 Effect of temperature on stress of mold and preform

3.3 模压速率与等效应力的关系

模压速率是影响成形体等效应力的重要因素,温度为 $580\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、摩擦因数为 0.1 时,仿真得到不同模压速率下模具和玻璃预制体的等效应力,如图 7 所示。可以看出,模具和玻璃成形体的等效应力都随着模压速率的增加而增大,对下模的影响更大。原因是较快的模压速率压缩了玻璃成型时间,导致玻璃内部的应力来不及松弛。

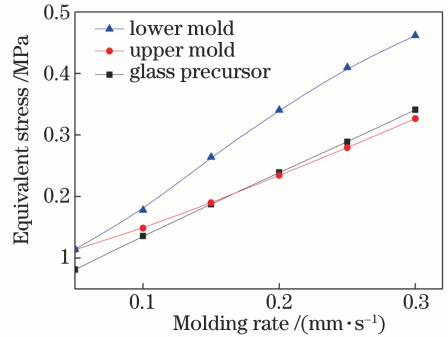


图 7 模压速率对模具和预制体应力的影响

Fig. 7 Effect of molding rate on stress of mold and preform

3.4 摩擦因数与等效应力的关系

温度为 $580\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、模压速率为 0.1 mm/s 时,仿真得到摩擦因数对模具和玻璃预制体的等效应力的影响如图 8 所示。可以看出,两者的等效应力都随摩擦因数的增大而增大。原因是较大的摩擦因数使熔融的玻璃难以在型腔中流动,导致玻璃的等效应力不能及时松弛,同时增加了上模移动的阻力,所以上模的等效应力受摩擦因数的影响更大。

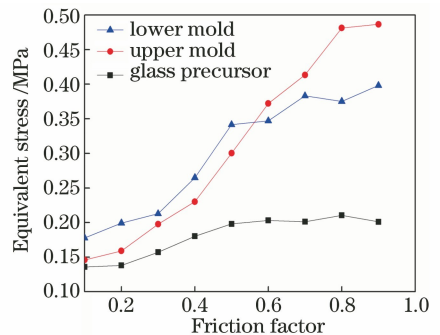


图 8 摩擦因数对模具和预制体应力的影响

Fig. 8 Effect of friction factor on stress of mold and preform

3.5 基于正交试验的等效应力分析

正交试验是一种根据正交性挑选出有代表性的点进行试验,以寻找最优水平组合的高效试验方法^[13]。为优化模压工艺参数,采用正交试验进行分析。以温度为 $570, 580, 590\text{ }^{\circ}\text{C}$,速率为 $0.05, 0.10,$

0.15 mm/s,摩擦因数为 0.1、0.2、0.3 组成三个元素三个水平的正交试验表,计算玻璃的等效应力。通过 9 组正交试验得到温度、速率、摩擦因数对应的等效应力极差分别为 0.136、0.131、0.052 MPa,这表明模压温度和模压速率是影响玻璃等效应力的主要因素,摩擦因数对其影响较小。结果还表明如果以等效应力为单一指标,得到的最优工艺参数是模压温度为 590 °C,速率为 0.05 mm/s,摩擦系数为 0.1。

通过分析仿真结果可以看出,模压温度越高、模压速率越低、摩擦因数越小,玻璃的等效应力越小,但实际应用中,过高的温度意味着过长的加热时间,会对模具和镀膜材料的抗高温能力提出更高的要求。此外 590 °C 更接近 D-ZK3 玻璃的软化点,易导致玻璃和模具表面发生粘着问题,从而影响玻璃成形体表面精度。过低的模压速率会影响生产效率,过小的摩擦因数会增大加工成本和加工工艺的难度。综合考虑,最优的工艺参数是模压温度为 580 °C,速率为 0.1 mm/s,摩擦系数为 0.2。

4 结 论

对非球面透镜模压成型过程进行了有限元仿真,结果表明玻璃预制体边缘的等效应力大于玻璃中心,上表面中心点的等效应力大于下表面中心点,实际生产中应注意控制玻璃成形体边缘的应力。玻璃预制体和模具的等效应力都随模压速率和摩擦因数的增大而增大,随温度的升高而降低,其中模压速率对下模的等效应力影响较大,摩擦因数对上模的等效应力影响较大。模具的等效应力大于玻璃,这表明模压时模具需要承受较大的力。通过正交试验可知,温度和速率是影响玻璃等效应力的主要因素,摩擦因数是次要因素。结合仿真参考与实际应用得到 D-ZK3 玻璃的最优模压参数是温度为 580 °C、速率为 0.1 mm/s、摩擦因数为 0.2。由于实验条件的限制,目前只进行了仿真研究,随着实验设备的逐渐完善,将实验结果与仿真研究进行对比分析是今后需要研究的方向,以便为实际生产提供更全面的借鉴价值。

参 考 文 献

[1] Chen F J, Yin S H, Fan Y F, et al. Ultra-precision single-point grinding technique and profile error compensation method for machining aspheric mould [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46 (23): 186-191.

陈逢军, 尹韶辉, 范玉峰, 等. 一种非球面超精密单

点磨削与形状误差补偿技术[J]. 机械工程学报, 2010, 46(23): 186-191.

- [2] Fu X H, Jiang H Y, Zhang J, et al. Preparation of short and medium wave infrared anti-reflective coating based on chalcogenide glass [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0903002.
付秀华, 姜洪妍, 张静, 等. 基于硫系玻璃的短中波红外减反膜研制[J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0903002.
- [3] Zhou T F, Xie J Q, Liang Z Q, et al. Advances and prospects of molding for optical microlens array [J]. Chinese Journal of Optics, 2017, 10(5): 603-618.
周天丰, 解加庆, 梁志强, 等. 光学微透镜阵列模压成形研究进展与展望[J]. 中国光学, 2017, 10(5): 603-618.
- [4] Yan J W, Zhou T F, Masuda J, et al. Modeling high-temperature glass molding process by coupling heat transfer and viscous deformation analysis [J]. Precision Engineering, 2009, 33(2): 150-159.
- [5] Yin S H, Huo J J, Zhou T F, et al. Simulation of the heating and pressing parameters of micro aspheric lens molding process [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2011, 38(1): 35-39.
尹韶辉, 霍建杰, 周天丰, 等. 小口径非球面透镜模压成形加热加压参数仿真[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(1): 35-39.
- [6] Yin S H, Jin S, Zhu K J, et al. Stress analysis of compression molding of aspherical glass lenses using finite element method [J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(10): 111-115, 143.
尹韶辉, 靳松, 朱科军, 等. 非球面玻璃透镜模压成型的有限元应力分析[J]. 光电工程, 2010, 37(10): 111-115, 143.
- [7] Jain A. Experimental study and numerical anlysis of compression molding process for manufacturing precision aspherical glass lenses[D]. Columbus: The Ohio State University, 2006.
- [8] Liu W G, Shen P. Viscoelastic properties of chalcogenide glasses and simulation of molding process [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(3): 569-574.
刘卫国, 沈萍. 硫系玻璃的粘弹性及模压工艺的仿真[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 569-574.
- [9] Zhang X B, Yin S H, Zhu K J, et al. Simulation of compression molding aspherical glass lenses based on generalized Maxwell model [J]. Materials Review, 2013, 27(20): 148-152.
张小兵, 尹韶辉, 朱科军, 等. 基于广义 Maxwell 模

- 型的非球面光学镜片成型模拟[J]. 材料导报, 2013, 27(20): 148-152.
- [10] Wang Z B, Li J Q, Zhang F, et al. The design of mold with simulation for chalcogenide glass precision molding[J]. Opto-Electronic Engineering, 2016, 43(5): 53-58.
汪志斌, 李军琪, 张峰, 等. 硫系红外玻璃精密模压模具有限元仿真设计[J]. 光电工程, 2016, 43(5): 53-58.
- [11] Ni J J, Fan Y F, Chen W H. Simulation study of molding of aspherical optical glass lens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 032201.
倪佳佳, 范玉峰, 陈文华. 非球面光学玻璃透镜的模压仿真研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 032201.
- [12] Liu X R, Xue C X. Optimization of molding process parameters of chalcogenide glass based on finite element simulation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 082203.
刘学儒, 薛常喜. 基于有限元仿真的硫系玻璃模压工艺参数优化[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 082203.
- [13] Chen K. Experimental design and analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 72-136.
陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 72-136.