

文章编号:1004-7220(2018)01-0062-08

# 基于正交试验的股骨干骨折内固定系统 螺钉布局的参数化研究

盛伟<sup>1</sup>, 纪爱敏<sup>1</sup>, 陈长胜<sup>1,2</sup>, 方润心<sup>1</sup>

(1. 河海大学 机电工程学院, 常州 213022; 2. 常州奥斯迈医疗器械有限公司, 常州 213022)

**摘要:**目的 评估锁定钢板固定股骨干骨折时不同螺钉布局对股骨干骨折内固定系统稳定性的影响,为股骨干骨折内固定系统螺钉布局的临床研究提供指导。**方法** 针对4组螺钉的3个参数化水平进行正交试验方案设计,分别对9组不同螺钉布局的股骨干骨折内固定系统进行生物力学有限元分析,得出各组试验的4项考察指标:接骨板最大等效应力、螺钉最大等效应力、股骨最大等效应力及内固定系统最大轴向位移,并利用权矩阵分析方法进行正交试验数据分析。**结果** 不同组别螺钉参数对内固定系统稳定性的影响权重不同,4组螺钉参数中对内固定系统稳定性影响的最大权重分别为13.86%、7.57%、7.53%及5.91%。**结论** 正交试验中螺钉布局的最佳方案为第1组螺纹孔不固定螺钉,第2组螺纹孔固定单皮质螺钉,第3、4组螺纹孔固定双皮质螺钉。

**关键词:**股骨干骨折;螺钉布局;正交试验;参数化;权矩阵;有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI:10.16156/j.1004-7220.2018.01.011

## Parametric Study on Screw Layout of Internal Fixation System of Femoral Shaft Fracture Based on Orthogonal Experiment

SHENG Wei<sup>1</sup>, JI Aimin<sup>1</sup>, CHEN Changsheng<sup>1,2</sup>, Fang Runxin<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, Jiangsu, China;  
2. Changzhou Orthmed Medical Instrument Co., Ltd., Changzhou 213022, Jiangsu, China)

**Abstract:** **Objective** To evaluate the effects of locked plates with different screw layouts on stability of the internal fixation system for femoral shaft fracture, so as to provide guidance for clinical study on screw layout of the internal fixation system for femoral shaft fracture. **Methods** Orthogonal test design method was used with 4 groups of screws at 3 parametric levels. Biomechanical properties of the internal fixation system for femoral shaft fracture under 9 screw layouts were analyzed respectively by the finite element method, and 4 inspection indices, namely, the maximum equivalent stress of the plate, the screw and the femur, and the maximum axial displacement of the internal fixation system were obtained from each group of the experiment, and the orthogonal test weight matrix analysis method was conducted for data analysis. **Results** The influences of different screw parameters on stability of the internal fixation system varied, and the maximum weights of the 4 sets of screw parameters in stability of the internal fixation system were 13.86%, 7.57%, 7.53% and 5.91%, respectively. **Conclusions** The best scheme for screw layout in orthogonal test is the screw with none-fixed threaded holes in the first group, the single cortical screws with fixed threaded holes in the second group and the double cortical screws with fixed threaded holes in

收稿日期:2017-04-17; 修回日期:2017-06-27

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2016B49614),江苏省研究生培养创新工程项目(KYLX16\_0708),江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2012061)

通信作者:纪爱敏,教授,E-mail:jam@ustc.edu

the third and fourth group.

**Key words:** femoral shaft fracture; screw layout; orthogonal experiment; parameterization; weight matrix; finite element analysis

股骨干骨折约占全身骨折的6%,是一种目前较为常见的骨骼损伤<sup>[1-2]</sup>。在股骨干骨折的临床治疗中,锁定钢板被普遍使用,但钢板或螺钉断裂率依然偏高<sup>[3]</sup>。为解决这一问题,国内外进行了大量的研究<sup>[4-8]</sup>。张魁忠等<sup>[5]</sup>认为,螺钉数目极大影响了内固定系统的结构稳定性,少螺钉固定可增加结构的弹性形变能力。Field等<sup>[8]</sup>研究发现,有选择性地减少固定的螺钉数目不会影响内固定系统的结构刚度和骨表面应力,但并未得出最佳的螺钉布局方案。近年来,有限元方法被广泛运用于骨折内固定系统研究中<sup>[9-12]</sup>。张岩等<sup>[9]</sup>利用有限元方法探究单双皮质螺钉不同组合固定方式对内固定系统应力分布的影响,但其采用的全面试验法极大增加了试验次数,经济性与实用性较差。林振恩等<sup>[12]</sup>运用全面试验法对内固定系统的螺钉布局进行研究,其对有限元模型进行了大幅的简化。上述研究表明,接骨板上固定螺钉的数目和布局是影响内固定系统稳定性的主要因素。在进行多因素、多水平研究时,单因素轮换法只能得到局部区域内的最佳因素水平;全面试验法的结果相对可靠,但成本太高;而利用正交试验设计方法能挑选出具有代表性的试验点进行试验,通过对正交试验结果的分析了解全面试验的情况,极大地减少试验次数,且能选出多因素的最佳匹配方案<sup>[13]</sup>。因此,本文提出基于三维建模技术及有限元分析方法,利用正交试验设计方法对锁定钢板固定股骨干骨折内固定系统多个螺钉孔的螺钉布局进行生物力学研究,并结合权矩阵分析方法计算影响内固定系统稳定性的各螺钉孔不同螺钉参数的权重,快速探究螺钉布局的最佳匹配方案,为股骨干骨折内固定临床治疗提供指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验方案设计

主要对股骨干内固定系统的螺钉布局综合考虑,得到最佳的螺钉布局方案,以保证内固定系统的稳定性。所使用的接骨板及螺钉均参照某医疗器械公司正在生产使用的产品。由文献及临床表

现可知,对接骨板两远端螺纹孔固定双皮质螺钉可增加螺钉的抗拔出<sup>[14]</sup>,故主要对4组螺纹孔进行螺钉布局的研究。如图1所示,A、B、C、D分别表示第1、2、3、4组螺纹孔所布置的螺钉皮质类型。每组螺纹孔所固定螺钉各有3个水平,具体数据见表1。

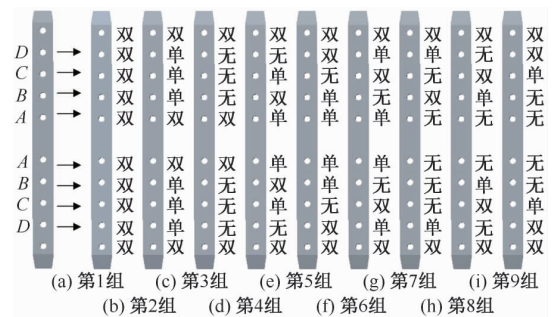


图1 4研究因素及不同组别螺钉布局方案示意图

Fig.1 Schematic diagram of 4 research factors and screw layout for different groups

- (a) The first group,
- (b) The second group, (c) The third group, (d) The fourth group, (f) The sixth group, (g) The seventh group, (e) The fifth group, (h) The eighth group, (i) The ninth group

表1 因素与水平表

Tab.1 The table of factors and levels

水平	因素A	因素B	因素C	因素D
	第1组螺钉长度/mm	第2组螺钉长度/mm	第3组螺钉长度/mm	第4组螺钉长度/mm
1	4.6(双皮质螺钉)	4.6	4.6	4.6
2	2.8(单皮质螺钉)	2.8	2.8	2.8
3	0(无螺钉)	0	0	0

本研究为4因素3水平试验,通过正交表进行正交试验设计(见表2)。其中,以 $\text{II}_1$ 、 $\text{III}_2$ 为例说明I、II、III值的算法, $\text{II}_1$ 表示第1个因素A在第“2”水平时的实验结果之和,即 $\text{II}_1 = F_4 + F_5 + F_6$ ;  $\text{III}_2$ 表示第2个因素B在第“3”水平的实验结果之和, $\text{III}_2 = F_3 + F_6 + F_9$ 。以极差 $\Delta_1$ 为例说明 $\Delta$ 值的算法: $\Delta_1 = \max\{I_1, \text{II}_1, \text{III}_1\} - \min\{I_1, \text{II}_1, \text{III}_1\}$ ; 如果经过计算得到的结果为 $\Delta_2 > \Delta_3 > \Delta_1 > \Delta_4$ ,则可

说明因素  $B$  对该指标影响最大,其次为因素  $C$ ,再次为因素  $A$ ,而因素  $D$  影响最小<sup>[15]</sup>。本研究试验结果的4项指标分别为:接骨板最大等效应力( $P$ )、螺钉最大等效应力( $N$ )、股骨最大等效应力( $K$ )和内固定系统最大轴向位移( $L$ ),指标均越小越好。

表2 4因素3水平正交表

Tab. 2 Orthogonal table of 4 factors and 3 levels

试验编号	因素				实验结果 F
	A	B	C	D	
	第1列	第2列	第3列	第4列	
1	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	F <sub>1</sub>
2	A <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	F <sub>2</sub>
3	A <sub>1</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	F <sub>3</sub>
4	A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>
5	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	D <sub>1</sub>	F <sub>5</sub>
6	A <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	F <sub>6</sub>
7	A <sub>3</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>3</sub>	D <sub>2</sub>	F <sub>7</sub>
8	A <sub>3</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>3</sub>	F <sub>8</sub>
9	A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	F <sub>9</sub>
	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>4</sub>	
实验结果处理	II <sub>1</sub>	II <sub>2</sub>	II <sub>3</sub>	II <sub>4</sub>	
	III <sub>1</sub>	III <sub>2</sub>	III <sub>3</sub>	III <sub>4</sub>	

### 1.2 几何模型建立

选择1名健康成年男性,经检查排除股骨病变后,进行股骨CT扫描并以DICOM格式保存。在医学影像软件Mimics 17.0中对初期的点云数据进行处理,建立股骨整体模型并导出Mimics以IGS格式保存。再运用逆向工程软件Geomagic Studio 12.0进行表面处理,完成股骨三维模型的建立。分析模型中锁定钢板及螺钉结构参数的设置均参照某医疗器械公司生产产品,简化接骨螺钉为圆柱体,锁定钢板为板状模型。

### 1.2 内固定模型生成

根据前期确定的内固定系统螺钉布局方案,在Pro/E 4.0中完成对锁定钢板、锁定螺钉、股骨的装配。根据4因素3水平正交表的设计,完成上述9组试验的内固定系统装配工作。

### 1.3 有限元模型生成

在有限元分析软件ANSYS 14.0中导入内固定系统装配模型,在股骨中段切分出3mm厚度断片模拟骨折初期骨痂状态。设置模型单元类型为10节点四面体单元Solid 187。假设股骨、骨痂、钛合金接骨板、钛合金螺钉均为连续、均质、各向同性的线弹性材料<sup>[16]</sup>,弹性模量分别为12、0.01、105、

105 GPa,泊松比均为0.3<sup>[10]</sup>。由于锁定螺钉与锁定钢板、锁定螺钉与股骨之间无相对运动,故可将锁定螺钉与锁定钢板、锁定螺钉与股骨的接触关系设置为粘结状态<sup>[17]</sup>,经过切分形成的骨痂上下端与股骨干亦默认成粘结状态。最后完成对内固定模型的网格划分。

### 1.4 施加载荷并求解

在股骨头上方建立一关键点,选择3D Mass 21的单元类型及设置实常数,完成对关键点的网格划分,生成主节点,在主节点与股骨头表面上的从属节点间建立刚性区域。考虑正常成人单腿站立下的股骨受力情况,设置600 N轴向载荷和10 N·m扭转载荷作用于主节点上,对股骨远端底面进行位移全约束。其中,第1组试验的具体约束与加载设置如图2所示。在ANSYS中使用默认求解器完成对有限元模型的求解计算,得到相应的等效应力云图与轴向位移云图。

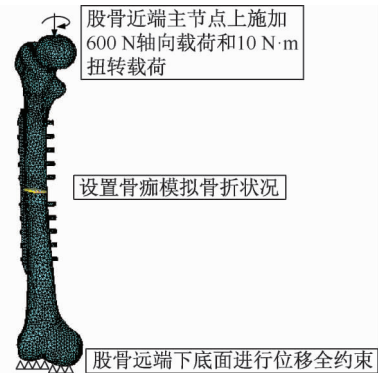


图2 第1组试验约束与加载设置示意图

Fig. 2 Diagram of constraint and loading setting for the first group of experiment

## 2 结果

对正交试验设计的9组试验方案进行生物力学有限元分析后,得到4项主要指标的试验结果(见表3)。在植入物最大等效应力方面,各组试验内固定系统最大等效应力出现在螺钉上,而第9组试验接骨板最大等效应力要远小于其他各组。第2组试验股骨最大等效应力小于其他各组,而上述所有试验内固定系统最大等效应力均出现在第3组螺钉上。在内固定系统最大轴向位移方面,第3组要远小于其他各组。其中,4个指标的直观分析表如表4所示。进行权矩阵分析可知,因素A的3个

水平对试验结果的影响权重分别为: $A_1 = 0.1239$ ,  
 $A_2 = 0.1185$ , $A_3 = 0.1386$ , $A_3$  的权重最大;同理,因  
 素  $B$  中  $B_2$  的权重最大;因素  $C$  中  $C_1$  的权重最大;  
 因素  $D$  中  $D_1$  的权重最大。

表 3 正交试验的有限元分析结果

Tab. 3 Finite element results of orthogonal experiment

组别	$P/MPa$	$N/MPa$	$K/MPa$	$L/mm$
1	299	393	69.6	0.505
2	257	396	63	0.637
3	300	514	76.7	0.370
4	267	383	88.7	0.672
5	283	350	80.3	0.556
6	297	444	71.8	0.543
7	221	391	70.4	0.645
8	215	343	69.3	0.621
9	169	384	73.3	0.626

表 4 4 个指标的直观分析表

Tab. 4 Intuitive analysis table of the 4 indices

试验编号	因素				实验结果			
	$A$	$B$	$C$	$D$	$P$	$N$	$K$	$L$
	第 1 列	第 2 列	第 3 列	第 4 列	第 1 项	第 2 项	第 3 项	第 4 项
1	$A_1$	$B_1$	$C_1$	$D_1$	$P_1$	$N_1$	$K_1$	$L_1$
2	$A_1$	$B_2$	$C_2$	$D_2$	$P_2$	$N_2$	$K_2$	$L_2$
3	$A_1$	$B_3$	$C_3$	$D_3$	$P_3$	$N_3$	$K_3$	$L_3$
4	$A_2$	$B_1$	$C_2$	$D_3$	$P_4$	$N_4$	$K_4$	$L_4$
5	$A_2$	$B_2$	$C_3$	$D_1$	$P_5$	$N_5$	$K_5$	$L_5$
6	$A_2$	$B_3$	$C_1$	$D_2$	$P_6$	$N_6$	$K_6$	$L_6$
7	$A_3$	$B_1$	$C_3$	$D_2$	$P_7$	$N_7$	$K_7$	$L_7$
8	$A_3$	$B_2$	$C_1$	$D_3$	$P_8$	$N_8$	$K_8$	$L_8$
9	$A_3$	$B_3$	$C_2$	$D_1$	$P_9$	$N_9$	$K_9$	$L_9$
I	285.33	262.33	270.33	250.33	接骨板最			
II	282.33	251.67	231	258.33	大等效应			
III	201.67	255.33	268	260.67	力直观			
极差	83.67	10.67	39.33	10.33	分析			
优方案	$A_3$	$B_2$	$C_2$	$D_1$				
I	434.33	389	393.33	375.67		螺钉最大		
II	392.33	363	387.67	410.33		等效应力		
III	372.67	447.33	418.33	413.33		直观分析		
极差	61.67	84.33	30.67	37.67				
优方案	$A_3$	$B_2$	$C_2$	$D_1$				
I	69.77	76.23	70.23	74.4			股骨最大	
II	80.27	70.87	75	68.4			等效应力	
III	71	73.93	75.8	78.23			直观分析	
极差	10.5	6.36	5.57	9.83				
优方案	$A_1$	$B_2$	$C_1$	$D_2$				
I	0.5040	0.6073	0.5563	0.5623				内固定系
II	0.5903	0.6047	0.5645	0.6083				统最大轴
III	0.6307	0.5130	0.5237	0.5543				向位移直
极差	0.1267	0.0943	0.1213	0.054				观分析
优方案	$A_1$	$B_3$	$C_3$	$D_3$				

### 3 讨论

有限元方法极大增加了骨科植入物稳定性研究的经济性和可重复性,可为实验研究提供有效的指导<sup>[18-19]</sup>。锁定钢板未对骨干表面进行加压,极大程度减少了对骨干表面血运的破坏<sup>[20]</sup>。

本文将正交试验设计方法与有限元分析方法相结合,应用于股骨干骨折内固定系统稳定性的研究中。将正交试验设计方法创造性地应用于骨折内固定系统多因素生物力学研究中,在保证试验效果的同时,极大减少了试验数目。正交试验设计方法的优点不仅表现在试验的设计上,更表现在对试验结果的处理上。

通过正交试验设计的9组试验,每个因素中每一个水平都有3个试验,任一因素的任一水平与其他因素的每一水平相遇且仅相遇1次<sup>[21]</sup>。本研究进行4因素3水平正交试验设计的生物力学分析,通过直观分析法不仅可以得到所研究因素影响内固定系统稳定性的主次次序,还可以考察不同因素之间的相互作用。将正交试验直观分析法与权矩阵分析法综合使用,不仅分别具体分析了4个因素3个水平上对每个指标的影响情况,而且得出了本研究正交试验的最优方案及各个因素对正交试验指标值影响的主次顺序。

通过对接骨板最大等效应力直观分析表明, $\Delta_1 > \Delta_3 > \Delta_2 > \Delta_4$ ,可见对接骨板最大等效应力来说,第1组螺纹孔螺钉布局方案A是其主要影响因素,第3组螺纹孔螺钉布局方案C次之,第2组螺纹孔螺钉布局方案B再次之,而第4组螺纹孔螺钉布局方案D影响最小。对于接骨板最大等效应力来说,其值越小越好。由 $\text{III}_1 < \text{II}_1 < \text{I}_1$ 可知, $A_3$ 为第1组螺纹孔螺钉布局的最佳方案;同理, $B_2$ 、 $C_2$ 、 $D_1$ 分别为第2、3、4组螺纹孔螺钉布局的最佳方案。

通过对螺钉最大等效应力直观分析表明, $\Delta_2 > \Delta_1 > \Delta_4 > \Delta_3$ ,可见对螺钉最大等效应力来说,第2组螺纹孔螺钉布局方案B是其主要影响因素,第1组螺纹孔螺钉布局方案A次之,第4组螺纹孔螺钉布局方案D再次之,而第3组螺纹孔螺钉布局方案C影响最小。对于螺钉最大等效应力来说,其值越小越好。由 $\text{III}_1 < \text{II}_1 < \text{I}_1$ 可知, $A_3$ 为第1组螺纹孔螺钉布局的最佳方案;同理, $B_2$ 、 $C_2$ 、 $D_1$ 分别为第2、3、4组螺纹孔螺钉布局的最佳方案。

通过对股骨最大等效应力直观分析表明, $\Delta_1 > \Delta_4 > \Delta_3 > \Delta_2$ ,可见对股骨最大等效应力来说,第1组螺纹孔螺钉布局方案A是其主要影响因素,第4组螺纹孔螺钉布局方案D次之,第3组螺纹孔螺钉布局方案C再次之,而第2组螺纹孔螺钉布局方案B影响最小。对于股骨最大等效应力来说,其值越小越好。由 $\text{I}_1 < \text{III}_1 < \text{II}_1$ 可知, $A_1$ 为第1组螺纹孔螺钉布局的最佳方案;同理, $B_2$ 、 $C_1$ 、 $D_2$ 分别为第2、3、4组螺纹孔螺钉布局的最佳方案。

通过对内固定系统最大轴向位移直观分析表明, $\Delta_1 > \Delta_3 > \Delta_2 > \Delta_4$ ,可见对内固定系统最大轴向

位移来说,第1组螺纹孔螺钉布局方案A是其主要影响因素,第3组螺纹孔螺钉布局方案C次之,第2组螺纹孔螺钉布局方案B再次之,而第4组螺纹孔螺钉布局方案D影响最小。对于内固定系统最大轴向位移来说,其值越小越好。由 $\text{I}_1 < \text{II}_1 < \text{III}_1$ 可知, $A_1$ 为第1组螺纹孔螺钉布局的最佳方案;同理, $B_3$ 、 $C_3$ 、 $D_3$ 分别为第2、3、4组螺纹孔螺钉布局的最佳方案。

由上述正交试验设计的考察指标直观分析可知,对于接骨板最大等效应力来说,最优方案是 $A_3B_2C_2D_1$ ;对于螺钉最大等效应力来说,最优方案是 $A_3B_2C_2D_1$ ;对于股骨最大等效应力来说,最优方案是 $A_1B_2C_1D_2$ ;对于内固定系统最大轴向位移来说,最优方案是 $A_1B_3C_3D_3$ ,故需要对4个方案进行综合考量。权矩阵分析方法可计算出各因素水平影响试验考察指标的权重,快速得出试验的最佳方案<sup>[18]</sup>。

根据文献[22],以表2为例,假设指标F越小越好,介绍权矩阵分析方法中权函数 $\omega$ 的求解过程。

指标层矩阵:

$$M = \begin{bmatrix} \frac{1}{\text{I}_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\text{II}_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\text{III}_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\text{I}_2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\text{II}_2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\text{III}_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\text{I}_3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\text{II}_3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\text{III}_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\text{I}_4} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\text{II}_4} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\text{III}_4} \end{bmatrix}$$

因素层矩阵:

$$T = \begin{bmatrix} \frac{1}{\text{I}_1 + \frac{1}{\text{II}_1} + \frac{1}{\text{III}_1}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\frac{1}{\text{I}_2} + \frac{1}{\text{II}_2} + \frac{1}{\text{III}_2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\frac{1}{\text{I}_3} + \frac{1}{\text{II}_3} + \frac{1}{\text{III}_3}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\frac{1}{\text{I}_4} + \frac{1}{\text{II}_4} + \frac{1}{\text{III}_4}} \end{bmatrix}$$

$$\omega_2 = M_2 T_2 S_2 = \begin{bmatrix} 0.002302 & 0 & 0 & 0 \\ 0.002549 & 0 & 0 & 0 \\ 0.002683 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.002571 & 0 & 0 \\ 0 & 0.002755 & 0 & 0 \\ 0 & 0.002236 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.002542 & 0 \\ 0 & 0 & 0.002580 & 0 \\ 0 & 0 & 0.002390 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.002662 \\ 0 & 0 & 0 & 0.002437 \\ 0 & 0 & 0 & 0.002419 \end{bmatrix} \times$$

水平层矩阵:

$$S = \begin{bmatrix} \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4} \\ \frac{\Delta_2}{\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4} \\ \frac{\Delta_3}{\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4} \\ \frac{\Delta_4}{\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 132.72 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 132.26 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 133.11 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 133.01 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.2877 \\ 0.3935 \\ 0.1431 \\ 0.1757 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.08792 \\ 0.09733 \\ 0.10250 \\ 0.13380 \\ 0.14340 \\ 0.11630 \\ 0.04842 \\ 0.04913 \\ 0.04553 \\ 0.06222 \\ 0.05697 \\ 0.05656 \end{bmatrix}$$

影响试验指标值的权矩阵:  $\omega = M \cdot T \cdot S$ 。

第 1 个考察指标为接骨板最大等效应力, 其值越小越好, 权矩阵  $\omega_1$  计算如下:

$$\omega_1 = M_1 T_1 S_1 = \begin{bmatrix} 0.003505 & 0 & 0 & 0 \\ 0.003542 & 0 & 0 & 0 \\ 0.004959 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.003812 & 0 & 0 \\ 0 & 0.003974 & 0 & 0 \\ 0 & 0.003916 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.003699 & 0 \\ 0 & 0 & 0.004329 & 0 \\ 0 & 0 & 0.003731 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.003995 \\ 0 & 0 & 0 & 0.003871 \\ 0 & 0 & 0 & 0.003836 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.16960 \\ 0.17140 \\ 0.24000 \\ 0.02413 \\ 0.02515 \\ 0.02479 \\ 0.08592 \\ 0.10060 \\ 0.08667 \\ 0.02450 \\ 0.02374 \\ 0.02353 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 82.397 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 85.456 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 85.038 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 85.456 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.5810 \\ 0.7407 \\ 0.2732 \\ 0.0718 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.02515 \\ 0.02479 \\ 0.08592 \\ 0.10060 \\ 0.08667 \\ 0.02450 \\ 0.02374 \\ 0.02353 \end{bmatrix}$$

第 3 个考察指标为股骨最大等效应力, 其值越小越好, 权矩阵  $\omega_3$  计算如下:

$$\omega_3 = M_3 T_3 S_3 = \begin{bmatrix} 0.01433 & 0 & 0 & 0 \\ 0.01246 & 0 & 0 & 0 \\ 0.01409 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01312 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01411 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01353 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01424 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01333 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01319 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.01344 \\ 0 & 0 & 0 & 0.01462 \\ 0 & 0 & 0 & 0.01278 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.11780 \\ 0.10240 \\ 0.11570 \\ 0.05525 \\ 0.05943 \\ 0.05697 \\ 0.06219 \\ 0.05823 \\ 0.05762 \\ 0.10350 \\ 0.11260 \\ 0.09843 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 24.464 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 24.537 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 24.531 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 24.484 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.3358 \\ 0.1716 \\ 0.1780 \\ 0.3145 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.05943 \\ 0.05697 \\ 0.06219 \\ 0.05823 \\ 0.05762 \\ 0.10350 \\ 0.11260 \\ 0.09843 \end{bmatrix}$$

第 2 个考察指标为螺钉最大等效应力, 其值越小越好, 权矩阵  $\omega_2$  计算如下:

第4个考察指标为内固定系统最大轴向位移, 其值越小越好, 权矩阵  $\omega_4$  计算如下:

$$\omega_4 = M_4 T_4 S_4 = \begin{bmatrix} 1.9841 & 0 & 0 & 0 \\ 1.6940 & 0 & 0 & 0 \\ 1.5856 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.6465 & 0 & 0 \\ 0 & 1.6538 & 0 & 0 \\ 0 & 1.9493 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.7975 & 0 \\ 0 & 0 & 1.5504 & 0 \\ 0 & 0 & 1.9096 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.7783 \\ 0 & 0 & 0 & 1.6438 \\ 0 & 0 & 0 & 1.8040 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.12050 \\ 0.10290 \\ 0.09627 \\ 0.07465 \\ 0.07498 \\ 0.08838 \\ 0.10470 \\ 0.09028 \\ 0.11120 \\ 0.04636 \\ 0.04286 \\ 0.04703 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1900 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1905 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1902 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1914 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.3196 \\ 0.2380 \\ 0.3061 \\ 0.1363 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.12050 \\ 0.10290 \\ 0.09627 \\ 0.07465 \\ 0.07498 \\ 0.08838 \\ 0.10470 \\ 0.09028 \\ 0.11120 \\ 0.04636 \\ 0.04286 \\ 0.04703 \end{bmatrix}$$

本正交试验考察指标的总权矩阵为4个指标值的权矩阵的平均值, 计算如下:

$$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4}{4} = \frac{1}{4} \left( \begin{bmatrix} 0.16960 \\ 0.17140 \\ 0.24000 \\ 0.02413 \\ 0.02515 \\ 0.02479 \\ 0.08592 \\ 0.10060 \\ 0.08667 \\ 0.02450 \\ 0.02374 \\ 0.02353 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.08792 \\ 0.09733 \\ 0.10250 \\ 0.13380 \\ 0.14340 \\ 0.11630 \\ 0.04842 \\ 0.04913 \\ 0.04553 \\ 0.06222 \\ 0.05697 \\ 0.05656 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.11780 \\ 0.10240 \\ 0.11570 \\ 0.05525 \\ 0.05943 \\ 0.05697 \\ 0.06219 \\ 0.05823 \\ 0.05762 \\ 0.10350 \\ 0.11260 \\ 0.09843 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.12050 \\ 0.10290 \\ 0.09627 \\ 0.07465 \\ 0.07498 \\ 0.08838 \\ 0.10470 \\ 0.09028 \\ 0.11120 \\ 0.04636 \\ 0.04286 \\ 0.04703 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 0.12390 \\ 0.11850 \\ 0.13860 \\ 0.07195 \\ 0.07573 \\ 0.07162 \\ 0.07530 \\ 0.07455 \\ 0.07525 \\ 0.05914 \\ 0.05903 \\ 0.05638 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix}$$

综合上述计算, 因素A的3个水平对试验结果的影响权重分别为:  $A_1 = 0.1239$ 、 $A_2 = 0.1185$ 、 $A_3 = 0.1386$ ,  $A_3$  的权重最大; 同理, 因素B中  $B_2$  的权重最大; 因素C中  $C_1$  的权重最大; 因素D中  $D_1$  的权重最大。由此可知, 本研究中正交试验的最优方案  $A_3 B_2 C_1 D_1$ , 即第1组螺纹孔不固定螺钉, 第2组螺纹孔固定单皮质螺钉, 第3、4组螺纹孔固定双皮质螺钉。同时, 可得出各个因素对正交试验考察指标影响的主次顺序为  $ACBD$ 。

研究表明, 对接骨板最大等效应力、股骨最大等效应力及内固定系统最大轴向位移来说, 第1组螺纹孔螺钉布局方案A均是最主要影响因素, 而对于螺钉最大等效应力来说, 第2组螺钉布局方案B是最主要因素。对于接骨板最大等效应力来说, 最优方案是  $A_3 B_2 C_2 D_1$ ; 对于螺钉最大等效应力来说, 最优方案是  $A_3 B_2 C_2 D_1$ ; 对于股骨最大等效应力来说, 最优方案是  $A_1 B_2 C_1 D_2$ ; 对于内固定系统最大轴向位移来说, 最优方案是  $A_1 B_3 C_3 D_3$ 。因素A、B、C、D的3个水平对试验结果的影响权重最大的分别为  $A_3$ 、 $B_2$ 、 $C_1$ 、 $D_1$ , 即本研究中正交试验的最优方案为  $A_3 B_2 C_1 D_1$ , 各个因素对正交试验指标值影响的主次顺序为  $ACBD$ 。

本研究通过大量的假设以简化分析模型, 保证了研究的简便性。在进行股骨材料赋值时, 将股骨视为统一均匀材料, 而实际情况是股骨材料属性与股骨CT图像的灰度值存在着紧密联系。在该课题的后续研究工作中, 将逐渐完善分析中的不足, 为相关临床治疗提供指导。

### 参考文献:

- [1] 胥少汀, 葛宝丰, 徐印坎. 实用骨科学[M]. 北京: 人民军医出版社, 2009: 723.
- [2] 韦善平. 股骨干骨折钢板内固定失效24例原因分析[J]. 医学理论与实践, 2010, 23(5): 555-556.
- [3] 高宏文, 陈秀云. 股骨干骨折锁定钢板内固定术后螺钉钢板断裂分析[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2009, 24(3): 279-280.
- [4] ROY S, GEORGE JH, TED M, et al. Minimal versus maximal plate fixation techniques of the ulna: The biomechanical effect of number of screws and plate length [J]. J Orthop Trauma, 2002, 16(3): 166-171.
- [5] 张魁忠, 吴柄华, 徐聪, 等. 螺钉数量对钢板螺钉内固定结构载荷的生物力学影响[J]. 中国组织工程及临床康复,

- 2009, 13(43): 8454-8457.
- [ 6 ] 丁志宏, 张岩, 王铭春, 等. LISS 钢板治疗股骨远端骨折的生物力学研究[J]. 医用生物力学, 2009, 24(2): 143-147.  
DING ZH, ZHANG Y, WANG MC, *et al.* Biomechanical evaluation of the less invasive stabilization system used to treat distal femur fractures [J]. J Med Biomech, 2009, 24(2): 143-147.
- [ 7 ] CUI S, BLEDSOE JG, ISRAEL H, *et al.* Locked plating of comminuted distal femur fractures: Does unlocked screw placement affect stability and failure? [J]. J Orthop Trauma, 2014, 28(2): 90-96.
- [ 8 ] FIELD JR, TÖRNKVIST H, HEARN TC, *et al.* The influence of screw omission on construction stiffness and bone surface strain in the application of bone plates to cadaveric bone [J]. Injury, 1999, 30(9): 591-598.
- [ 9 ] 张岩, 杨铁毅, 刘树义, 等. 有限元分析 LISS-DF 治疗股骨远端骨折近端螺钉单双皮质不同组合固定方式的应力分布[J]. 中国组织工程研究, 2012, 16(4): 581-583.
- [ 10 ] 高亚磊, 董黎敏, 李炫, 等. 钛合金接骨板固定股骨骨折的有限元分析及实验验证[J]. 天津理工大学学报, 2014, 30(4): 6-9.
- [ 11 ] KIM JD, KIM NS, HONG CS, *et al.* Design optimization of a xenogeneic bone plate and screws using the taguchi and finite element methods [J]. Int J Precis Eng Man, 2011, 12(6): 1119-1124.
- [ 12 ] 林振恩, 谢丹, 张森. 股骨远端骨折锁定钢板螺钉布局的有限元分析 [J]. 中国组织工程研究, 2014, 18(22): 3517-3522.
- [ 13 ] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9): 52-55.
- [ 14 ] 冯大倡, 雷春, 陈森荣. 锁定钢板治疗股骨骨折内固定术后松动、骨折不愈合的疗效分析[J]. 当代医学, 2012, 18(18): 88-89.
- [ 15 ] 王乃坤, 江树华, 曲志程. 正交试验设计方法在试验设计中的应用[J]. 黑龙江交通科技, 2003, 26(8): 89-90.
- [ 16 ] 章伟, 芮碧宇, 潘垚, 等. 新型锁定钢板与 AO-PHILOS 钢板固定肱骨近端四部分骨折的三维有限元分析[J]. 医用生物力学, 2016, 31(6): 548-555.  
ZHANG W, RUI BY, PAN Y, *et al.* Three-dimensional finite element analysis on the novel locking plate and AO-PHILOS plate for fixing four-part proximal humeral fractures [J]. J Med Biomech, 2016, 31(6): 548-555.
- [ 17 ] 吴泽海, 王永清, 董黎敏, 等. 异体骨接骨板联合不同螺钉治疗股骨干骨折有限元分析[J]. 实用骨科杂志, 2014, 20(10): 910-913.
- [ 18 ] 唐刚, 王建革, 罗红霞. 髌关节置换前后不同步态下股骨应力分布 [J]. 医用生物力学, 2015, 30(2): 143-147.  
TANG G, WANG JG, LUO HX. Stress distributions on the femur under different gaits before and after hip joint replacement [J]. J Med Biomech, 2015, 30(2): 143-147.
- [ 19 ] 李孝林, 任伯绪, 徐自胜. 兔胫骨骨折的有限元模型[J]. 中国组织工程研究, 2013, 17(4): 621-624.
- [ 20 ] 王军, 魏登伟, 牛立峰, 等. 微创钢板接骨术治疗胫骨干骨折[J]. 疾病监测与控制, 2014, 8(3): 184-185.
- [ 21 ] 周玉珠. 正交试验设计的矩阵分析方法[J]. 数学的实践与认识, 2009, 39(2): 202-207.
- [ 22 ] 魏效玲, 薛冰军, 赵强. 基于正交试验设计的多指标优化方法研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2010, 27(3): 95-99.