

文章编号:1004-7220(2020)02-0223-05

# 锁定螺钉不同头部角度对钉板系统力学性能的影响

季东升<sup>1</sup>, 郑云<sup>2</sup>, 霍尔凡<sup>2</sup>, 邢鸿雁<sup>1</sup>

(1.天津科技大学机械工程学院,天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室,天津 300222;

2.天津纳通医学科技研究院,天津 300308)

**摘要:**目的 探究锁定螺钉的头部角度以及锁定次数对钉板系统力学性能的影响,为医生在临床手术过程中选用适当锁定螺钉和把控锁定次数提供理论依据。**方法** 选用具有不同头部角度的锁定螺钉与同种接骨板配合,并进行不同次数的锁定,通过悬臂弯曲试验,比较各组试件力学性能的差异。**结果** 头部角度不同的锁定螺钉与锁定加压接骨板配合后的失效载荷与抗弯刚度存在显著性差异( $P<0.05$ ),锁紧程度最佳的钉板系统的力学性能最优;钉板配合进行3次锁定与进行1次锁定之间显著性差异不明显( $P>0.05$ );不同头部角度锁定螺钉在不同锁定次数情况下的螺钉失效形式存在差异,锁定螺钉失效形式与其头部角度以及锁定次数正相关。**结论** 头部角度不同的锁定螺钉与锁定加压接骨板配合后力学性能的差异性不容忽视,医生在临床过程中选用锁紧程度最佳的锁定螺钉与锁定加压接骨板,并选用合适扭矩的限力扳手酌情进行多次锁定,避免螺钉松动影响患者康复。

**关键词:**锁定螺钉;钉板系统;悬臂弯曲;力学性能

**中图分类号:** R 318.01 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.16156/j.1004-7220.2020.02.015

## Effects of Locking Screws with Different Head Angles on Mechanical Properties of Screw-Plate System

Ji Dongsheng<sup>1</sup>, Zheng Yun<sup>2</sup>, Huo Erfan<sup>2</sup>, Xing Hongyan<sup>1</sup>

(1. Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-Line Monitoring for Light Industry & Food Machinery and Equipment, School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China; 2. Tianjin Naton Institute of Medical Technology, Tianjin 300308, China)

**Abstract: Objective** To investigate the effects from head angle and locking times of locking screws on mechanical properties of the screw-plate system, so as to provide a theoretical basis for doctors to select appropriate locking screws and master the locking times in clinical surgical procedure. **Methods** Locking screws with different head angles were selected to match with locking compression plates in the case of different locking times, and cantilever bending method was used to compare the differences of mechanical properties in each group. **Results** There were significant differences in failure load and bending stiffness between locking compression plate and locking screw with different head angles ( $P<0.05$ ). The mechanical properties of the screw-plate system with the best locking degree were optimum. There was no significant difference between 3 time-locking and 1 time-locking ( $P>0.05$ ). The failure modes of locking screw with different head angles and different locking times were different, and the failure mode of locking screw had a positive correlation with its head angle and locking times. **Conclusions** The differences in mechanical properties between locking screw with different head angles and

收稿日期:2019-06-19;修回日期:2019-07-24

通信作者:邢鸿雁,副教授,E-mail:hyxing@tust.edu.cn

locking compression plate cannot be neglected. It is suggested that doctors should choose locking screw and locking compression plate with the best locking degree in clinical procedure, and choose the right torque wrench to lock in multiple times if necessary, thus to prevent screw loosening from affecting recovery of the patients.

**Key words:** locking screw; screw-plate system; cantilever bending; mechanical properties

近几十年来,临床上针对骨折有手术和非手术治疗两种方法<sup>[1]</sup>。20世纪80年代以前,人们还普遍认为管型石膏、支架固定等非手术治疗的效果比手术治疗的效果要好。但随着各种新材料的成功研制以及内固定装置的不断改进和完善,骨板与骨钉相结合的手术方法已经成为目前骨折治疗最为常用的方法<sup>[2-4]</sup>。

锁定加压接骨板的出现被认为是骨板发展史上的里程碑,这是一种集合了普通接骨板螺钉技术、加压螺钉技术和锁定接骨板螺钉技术于一体的骨折内固定治疗手段<sup>[5-6]</sup>。锁定加压接骨板的原理是通过锁定螺钉将接骨板与人体骨折断端紧密衔接起来,使它们呈现锁紧状态,让骨折断端能够在—个稳定的环境中完成康复,避免螺钉松动、骨板断裂等不利于骨折愈合现象的发生<sup>[7]</sup>。因此,锁定加压接骨板和锁定螺钉的生物力学性能就显得尤为重要。—直以来,研究者普遍关注锁定加压接骨板与锁定螺钉各自本身的性能差异,并进行大量测试,但是有关接骨板与螺钉配合后钉板系统力学性能的研究却鲜有报道。由于生产批次与加工工艺等因素的限制,在现实生活中,即使是—家生产的锁定螺钉与锁定接骨板,也无法保证能够完美契合,再加上不同厂家生产的锁定螺钉头部角度仍存在微小差别,导致医生在临床手术过程中错误选

用螺钉的现象时有发生。微小头部角度差异的锁定螺钉是否可以相互替换,其与锁定接骨板配合后的细微松动会对钉板系统的稳定性甚至于对患者的康复治疗产生多大影响,目前还不明确。拧紧螺钉时不同的锁定次数是否会影响钉板系统的稳定性,也—直是医生们所关心的问题。本文从实际操作出发,选取头部角度有微小差异的锁定螺钉与锁定加压接骨板配合,使用相同力矩的限力扳手进行不同次数的锁定,通过悬臂弯曲的试验方法分析各钉板系统之间力学性能的差异性,为医生在临床手术过程中对锁定螺钉的选用以及锁定次数的把控提供理论依据。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 接骨板与骨钉

本实验所用样品为头部角度为 $17^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 皮质骨锁定螺钉和若干锁定加压型接骨板(适配头部角度 $20^{\circ}$ 锁定螺钉),所有锁定螺钉的材质均为钛合金TC20(Ti-6Al-7Nb)、规格均为 $\phi 3.5\text{ mm}\times 26\text{ mm}$ ;锁定加压钢板材质为钛合金TC4(Ti-6Al-4V),规格为6孔、 $84\text{ mm}\times 11\text{ mm}$ ,所有样品均由天津正天医疗器械有限公司提供。肉眼观察锁定加压接骨板与锁定螺钉表面完整无任何损伤,实验样品如图1所示。



图1 实验样品

Fig.1 Experimental sample (a) Locking compression plate, (b) Picture of locking screw, (c) Sketch map of locking screw

### 1.2 试样制备与分组

按照锁定螺钉头部角度( $17^{\circ}\sim 18^{\circ}$ 、 $18^{\circ}\sim 18.5^{\circ}$ 、 $18.5^{\circ}\sim 19^{\circ}$ 、 $19^{\circ}\sim 20^{\circ}$ )分为4组,按锁定次数不同分为两类。不同组实验之间先各取5枚锁定螺钉和

5块锁定加压接骨板,用 $0.8\text{ N}\cdot\text{m}$ 限力扳手将锁定螺钉拧入锁定加压接骨板最远端锁定孔,只锁定1次;再另取5枚锁定螺钉以相同方法拧入另外5块锁定加压接骨板,进行3次锁定。

### 1.3 实验方法

采用悬臂弯曲的试验方法,将装配完成的锁定加压钢板中部以下部位竖直固定在实验机器下方的夹具上,采用三点弯曲辊轴对锁定螺钉施加竖直向下的压力,实验过程中锁定螺钉与三点弯曲辊轴始终保持垂直状态,初始加载工装偏距(三点弯曲辊轴中心到接骨板内表面的水平距离)为 10 mm (见图 2)。本次实验的加载速率为 0.1 mm/s,加载至螺钉失效时停止实验,记录相关载荷及位移数据。

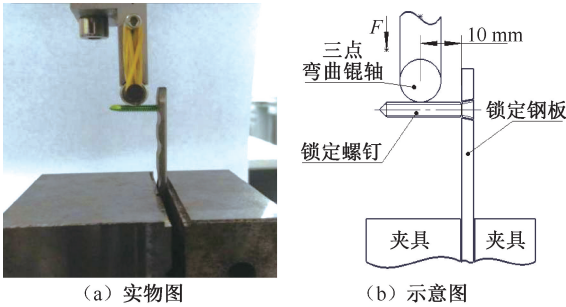


图 2 试验装置

Fig.2 Experimental device (a) Picture, (b) Schematic diagram

所使用的实验设备为 MTS Acumen 电子伺服试验系统[美特斯工业系统(中国)有限公司],搭载 $\pm 1$  kN 传感器。实验结束计算机自动输出数据。

### 1.4 统计学分析

实验结果导入 SPSS 19.0 软件包进行数据处理,符合正态分布进行  $t$  检验,不符合正态分布采用单因素方差分析。 $P < 0.05$  表示差异具有统计学意义。

## 2 结果

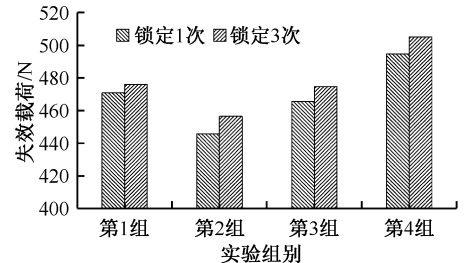
### 2.1 失效载荷与刚度分析

所有实验均在室温下进行,并且实验过程中均没有出现接骨板倾斜、移位、断裂以及三点弯曲辊轴与锁定螺钉之间打滑的现象,故各组实验所测数据均为有效数据。采用悬臂弯曲的测试方法测量锁定螺钉与锁定加压钢板配合后钉板系统的失效载荷与抗弯刚度,并以此为依据分析不同头部角度的锁定螺钉在钉板系统中进行不同锁定次数后的力学性能。各实验组失效载荷及抗弯刚度对比见表 1、图 3。

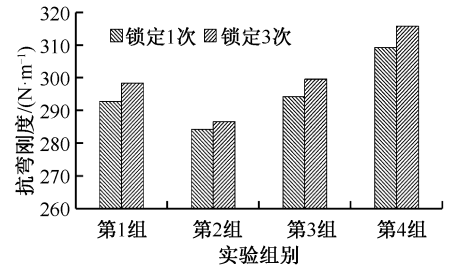
表 1 各组失效载荷及抗弯刚度对比 ( $n=5$ )

Tab.1 Comparison of failure load and bending strength in each group

组别	螺钉头部角度/ $(^\circ)$	锁定次数	失效载荷/N	抗弯刚度/ $(N \cdot m^{-1})$
1	17~18	1	470.84 $\pm$ 20.27	292.76 $\pm$ 9.11
		3	475.95 $\pm$ 5.24	298.40 $\pm$ 3.75
2	18.0~18.5	1	445.75 $\pm$ 8.83	284.17 $\pm$ 2.90
		3	456.35 $\pm$ 6.52	286.59 $\pm$ 1.97
3	18.5~19.0	1	465.62 $\pm$ 8.05	294.18 $\pm$ 5.04
		3	474.74 $\pm$ 7.13	299.57 $\pm$ 4.60
4	19~20	1	494.68 $\pm$ 16.19	309.27 $\pm$ 9.81
		3	505.06 $\pm$ 9.76	315.76 $\pm$ 6.05



(a) 失效载荷



(b) 抗弯刚度

图 3 各组失效载荷与抗弯刚度对比

Fig.3 Comparison of failure load and bending stiffness in each group (a) Failure load, (b) Bending stiffness

结果显示,不同头部角度的锁定螺钉与锁定加压接骨板配合之后的失效载荷存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ),具体表现为无论是进行 1 次锁定还是进行 3 次锁定,第 4 组实验的失效载荷和抗弯刚度明显高于其他 3 组实验,说明螺钉头部角度对钉板系统性能有较大影响。

锁定螺钉与锁定加压接骨板配合进行 3 次锁定与进行 1 次锁定之后的失效载荷与抗弯刚度显著性差异不明显 ( $P > 0.05$ ),但是仍然可以看出进行 3 次锁定后的钉板系统的失效载荷与抗弯刚度普遍比只进行 1 次锁定的失效载荷与抗弯刚度要略高。



## 2.2 失效形式分析

钉板系统在悬臂弯曲实验过程中出现的锁定螺钉头部脱出现象以及锁定螺钉干部断裂现象均属正常失效形式。每组实验进行不同锁定次数后所发生的失效状况见表2,两种钉板系统失效形式如图4所示。结果表明,每组实验以及每组实验中不同锁定次数之间的锁定螺钉失效形式也存在显著性差异,具体表现为随着螺钉头部角度变大和锁定次数增加,锁定螺钉的失效形式从一开始的螺钉头部脱出变为干部断裂,说明锁定螺钉失效形式的不同与螺钉的头部角度和钉板配合时螺钉的锁定次数有关。

表2 钉板系统失效形式表

Tab.2 Failure modes of the screw-plate system

组别	锁定1次	锁定3次
1	头部脱出5根	头部脱出5根
2	头部脱出3根;干部断裂2根	头部脱出2根;干部断裂3根
3	头部脱出1根;干部断裂4根	干部断裂5根
4	干部断裂5根	干部断裂5根



(a) 螺钉头部脱出

(b) 螺钉干部断裂

图4 锁定螺钉失效形式

Fig.4 Failure modes of locking screws (a) Disengagement of locking screw head, (b) Fracture of locking screw

## 3 讨论与结论

锁定钢板作为目前最为常用的骨科植入物,其原理在于锁定螺钉直接锁进钢板里面从而形成一种稳定的锁定机制,当这种锁定机制受到纵向的压力时,其稳定性不会使骨折复位丢失,并且锁定螺钉直接将人骨所受的力传递到钢板,保护了钢板下的血液供应<sup>[8-10]</sup>。与普通钢板不同的是,锁定钢板并非依靠钢板与人骨之间的静摩擦来连接固定,而是依靠锁定钢板与锁定螺钉形成的交锁结构来实现,故钉板系统的生物力学性能对患者的康复治疗有着至关重要的影响。本研究通过悬臂弯曲实验比较微小头部角度差异的锁定螺钉与锁定接骨板配合后的失效载荷与抗弯刚度发现,第4组实验即

头部角度为 $19^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 锁定螺钉与锁定接骨板配合后拥有最好的力学性能,能够给患者提供更坚强的结构支持。相比之下,其他几组实验所测失效载荷与抗弯刚度存在一定差距,且不容忽视。

在临床实际操作过程中,医生一般通过限力扳手将锁定螺钉拧入锁定钢板,形状不同的锁定螺钉通常需要配备不同力矩的限力扳手来保证钉板系统的锁紧程度,力矩过大或过小都会对患者产生一定的影响。即使是使用同一扳手锁紧同种螺钉,多次锁定与单次锁定之间的差别也一直以来是人们所关心的问题。通过实际操作和分析发现,锁定3次后钉板系统的力学性能与单次锁定之间差异没有显著性,但从图3中可以清楚地观察到,锁定螺钉与锁定接骨板配合进行3次锁定后,其失效载荷与抗弯刚度均略微提高。因此,建议医生在实际临床手术过程中选用锁紧程度最好的锁定螺钉与锁定加压接骨板来配合使用,锁定过程中酌情增加锁定次数,尽量避免锁定螺钉与接骨板之间产生松动,一方面提高了配合之后钉板系统的力学性能,另一方面也增强了螺钉锁紧程度及钢板固定后的稳定性。

在轴向压应力以及向前、向后弯曲应力的影响下,钉板系统的应力主要集中在患者骨折断端和钉板系统中的螺钉与钢板连接处。在较大的剪切应力作用下,锁定螺钉会受到一定影响,一旦外力超出螺钉所能承受的弹性极限,就极易出现断裂<sup>[11]</sup>。研究发现,锁定螺钉的作用力可分解为沿螺钉螺纹方向的切向力和沿螺钉杆方向的轴向力,部分螺钉在螺钉头部和螺钉杆连接部位存在应力薄弱点,应力集中极易出现螺钉松动、螺钉尾部和螺杆连接处发生断裂、螺钉尾部滑丝、打滑等现象<sup>[12-13]</sup>。通过分析不同头部角度的锁定螺钉在不同锁定次数下的失效形式发现,锁定螺钉与锁定钢板之间的松紧程度会对螺钉的失效形式产生较为显著的影响。钉板配合越松,螺钉头部螺纹越容易受到破坏,并最终导致锁定螺钉脱出锁定钢板;反之,螺钉与钢板衔接越紧密,钉板系统受力达到一定程度后会导致螺钉杆干部断裂现象的发生。究其原因,排除螺钉自身缺陷等不可控因素,在压应力作用下,头部角度较小的锁定螺钉与锁定钢板的间隙会使两者产生一定倾斜角度,再随着所受压力不断增大,螺

纹接触面积不断减少,并最终产生破坏,使锁定螺钉脱出锁定钢板。而当锁定螺钉与锁定钢板紧密啮合时,两者螺纹接触面积充足,使所受应力分散,衔接处螺纹极难产生破坏,故此时的螺钉失效形式多以螺钉杆干部断裂为主。

综上所述,微小头部角度差异的锁定螺钉对钉板系统的力学性能及失效形式所产生的影响不容忽视。为了追求更卓越的钢板内固定效果,医生在临床过程中应挑选配合度更高的锁定螺钉与锁定加压钢板,并选用合适扭矩的限力扳手酌情进行多次锁定来进行骨折复位手术,让患者骨折部位能够在一个安全稳定的环境中实现康复。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 彭远来, 马新硕, 危紫翼, 等. 锁骨接骨板预弯塑形的生物力学研究[J]. 医用生物力学, 2018, 33(1): 1-5.  
PENG YL, MA XS, WEI ZY, *et al.* Biomechanical study on pre-bending of clavicle plate [J]. J Med Biomech, 2018, 33(1): 1-5.
- [ 2 ] HEALY WL, BROOKER AF. Distal femoral fractures. Comparison of open and closed methods of treatment [J]. Clin Orthop Relat R, 1983, 174(174): 166-171.
- [ 3 ] DAVIDOVITCH RI, ELKATARAN R, ROMO S, *et al.* Open reduction with internal fixation versus limited internal fixation and external fixation for high grade pilon fractures (OTA Type 43C) [J]. Foot Ankle Int, 2011, 32(10): 955-961.
- [ 4 ] DEMIRHAN M, BILSEL K, ATALAR AC, *et al.* Biomechanical comparison of fixation techniques in midshaft clavicular fractures [J]. J Orthop Trauma, 2011, 25(5): 272-278.
- [ 5 ] FRIGG R. Locking compression plate (LCP). An osteosynthesis plate based on the dynamic compression plate and the point contact fixator (PC-Fix) [J]. Injury, 2001, 32(7): 63-66.
- [ 6 ] PERREN SM. Backgrounds of the technology of internal fixators [J]. Injury, 2003, 34(S2): 1-3.
- [ 7 ] MUSGRAVE DS, IDLER RS. Volar fixation of dorsally displaced distal radius fractures using the 2.4-mm locking compression plates [J]. J Hand Surg, 2005, 30(4): 743-749.
- [ 8 ] SCHLIEMANN B, WAHNERT D, THEISEN C, *et al.* How to enhance the stability of locking plate fixation of proximal humerus fractures? An overview of current biomechanical and clinical data [J]. Injury, 2015, 46(7): 1207-1214.
- [ 9 ] JASTIFER JR. Topical review: Locking plate technology in foot and ankle surgery [J]. Foot Ankle Int, 2014, 35(5): 512-518.
- [ 10 ] KHALSA AS, TOOSI N, TABB LP, *et al.* Distal tibia fractures: Locked or non-locked plating? [J]. Acta Orthop, 2014, 85(3): 299-304.
- [ 11 ] 吕志强, 李兴华, 王爱国. 桥接组合式内固定与金属锁定接骨板钉系统修复股骨干骨折的生物力学比较[J]. 中国组织工程研究, 2016, 20(17): 24515-24521.
- [ 12 ] 张克玉, 华子恺. 接骨螺钉的失效分析与强度测试[J]. 医用生物力学, 2018, 33(3): 280-284.  
ZHANG KY, HUA ZK. Failure analysis and strength testing of bone screws [J]. J Med Biomech, 2018, 33(3): 280-284.
- [ 13 ] 陈路. 钢板螺钉内固定技术应用于四肢长管骨创伤骨折的效果及生物力学分析[J]. 中国组织工程研究, 2012, 16(30): 5639-5643.