

圆弧槽克氏针结构参数对骨钻削的影响

王义文, 娄德钰, 付鹏强, 闫克攀

(哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 哈尔滨 150080)

摘 要: 针对在骨科手术中, 骨钻削时超过 55℃ 会导致骨组织坏死甚至发生氧化, 影响手术效果的问题, 采用在针尖表面设计分屑槽等微结构的方法可以有效降低钻削温度。选用圆弧槽克氏针对骨进行钻削实验, 通过单因素实验和多因素正交实验法, 研究得出了圆弧槽长度、圆弧槽深度、圆弧槽与尖端距离 3 个圆弧槽克氏针结构参数对骨钻削温度及骨钻削力的影响规律及主次关系。建立了骨钻削温度及骨钻削力的预报模型, 对经验模型的回归方程及系数进行了显著性检验, 并对其进行了参数优化, 得出了结构参数的最优组合。

关键词: 克氏针; 结构参数; 骨钻削温度; 骨钻削力

DOI: 10.15938/j.jhust.2020.06.013

中图分类号: TG501.1 文献标志码: A 文章编号: 1007-2683(2020)06-0092-06

Influence of Structural Parameters of Arc Groove K-wire on Bone Drilling

WANG Yi-wen, LOU De-yu, FU Peng-qiang, YAN Ke-pan

(School of Mechanical Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In orthopaedic surgery, bone drilling over 55 C will lead to bone tissue necrosis and even oxidation, affecting the effect of surgery. The drilling temperature can be effectively reduced by designing micro-structures such as chip grooves on the tip surface. By choosing Kirschner wire with arc groove for bone drilling experiment, single factor experiment and multi-factor orthogonal experiment method, the influence of structural parameters of Kirschner wire with arc groove (length of arc groove, depth of arc groove, distance between arc groove and tip) on bone drilling temperature and bone drilling force was studied and the primary and secondary relations were obtained. The prediction model of bone drilling temperature and force is established. The regression equation and coefficient of the empirical model are tested and optimized. The optimal combination of structural parameters is obtained.

Keywords: K-wire; structural parameters; bone drilling temperature; bone drilling force

收稿日期: 2019-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(51475127)。

作者简介: 娄德钰(1989—), 男, 硕士研究生;

付鹏强(1983—), 男, 副教授, 硕士研究生导师。

通信作者: 王义文(1972—), 男, 教授, 硕士研究生导师, E-mail: 13946030110@126.com。

0 引言

骨钻削技术广泛应用于骨科手术中^[1],尤其在口腔手术中或者在整形外科手术中用于骨折修复或者固定假肢等^[2]。在外科手术的钻骨过程中,不锈钢医疗钻头与骨的接触表面上会有热量产生的现象早已被认知^[3]。由于骨的导热系数比较小,产生的热量很难被传播,而骨对热量非常敏感,因此大家普遍关心的是骨的热损伤^[4]。为了减小骨的热损伤,研制一种新型的骨钻削工具,是十分必要的,本文涉及到的克氏针(K-wire)是骨科手术中用于固定发生骨折的骨的一种常用的骨钻工具。克氏针钻骨过程中,由于克氏针与骨屑之间的切削和摩擦,会产生大量的热量,引起局部高温,导致骨坏死和其他继发性损伤。为了减少热损伤和其他与高温相关的并发症,Yao Liu等^[5]研究了一种新的克氏针,在牛皮质骨上进行钻孔实验,研制的新型克氏针能有效地降低钻骨过程中的温度、推力和扭矩,对克氏针尖端进行微细的设计,可以有效地降低钻骨过程中的温度。

有研究表明,当骨的温度高于55℃并持续30 s会对骨造成损伤^[6]。钻孔角度的变化对骨温度升高无明显影响。随着进给量的增加,骨温度升高的幅度降低^[7]。因此,如何减小骨钻削过程中的钻削温度是现阶段要研究的技术难题。杜兴泽等^[8]通过对钻削仿真结果和猪股骨钻削试验数据进行对比分析得出,群钻在钻削过程中产生的钻削力均比标准麻花钻低,其中钻橡胶群钻在猪股骨钻削试验中产生的钻削力最低。江汪彪等^[9]进行骨钻削试验,验证了模拟模型的正确,获取了钻削温度关于切削参数和微织构参数变化的规律。杨毅欣、王成勇等^[10]对猪胫骨进行了高速钻削实验,通过改变钻头转速、进给量和钻头结构,研究轴向钻削力和钻削区域温度的变化规律,实验结果表明转速和进给量的增大都会使钻削力降低,改进医疗钻头的结构会降低钻削力和钻削区域的加工温度。李长树等^[11]利用自行改装的钻削性能采集系统采集数据,研究了钻削用量、新鲜骨的性质对轴向钻削力的影响。研究结果表明骨头的组织性质、钻头转速和进给量对钻削骨头时的轴向力影响很明显。何玲等^[12]采用有限元分析方法建立了合理的三维骨钻削模型,分析了温度与钻头转速、进给速度和钻头直径的关系,建立了数学模型,得出钻头的直径对加工温度影响最大,进给速度次之的结论。

通过圆弧槽克氏针对骨进行钻削实验的单因素和多因素正交实验,分析圆弧槽克氏针骨钻削温度及骨钻削力的变化规律,建立其经验模型,进而对结构参数进行多目标函数优化,获得最优的参数组合,以此来降低骨钻削对骨细胞的损伤,优化手术效果。

1 实验设计

1.1 实验条件

运用Solidworks软件创建克氏针和骨的三维立体模型,三维立体模型如图1所示。实验选用外层密质骨、内层松质骨^[13],经过锯条切割处理后的骨,尺寸为100 mm×65 mm×8 mm。

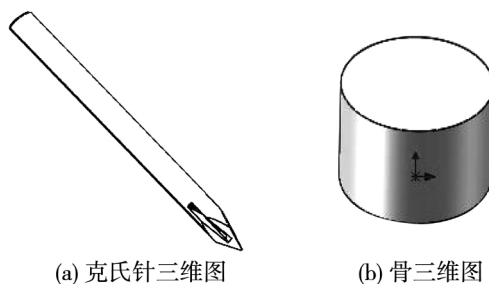


图1 克氏针及骨三维立体模型

Fig. 1 3D drawings of K-wire and bone

搭建骨钻实验平台,如图2所示。利用工作长度1 000 mm,通过控制X、Y、Z三轴运动,进行圆弧槽克氏针磨制及骨钻削实验,刀具采用圆弧槽克氏针,规格为 $\varnothing 2$ mm×10 mm,材料为317L不锈钢。

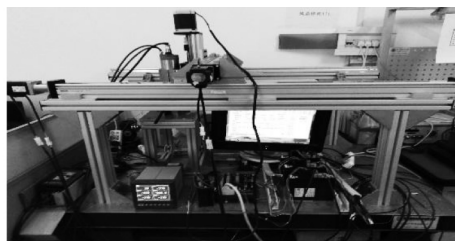


图2 骨钻削实验平台

Fig. 2 Bone drilling experimental platform

采用K型热电偶^[14]导线测量骨钻削温度,热电偶的测温范围为0~1 000℃;采用三向测力仪^[15]测量骨钻削力,在每组参数下测得4次数值后取平均数。

1.2 实验方案

结合骨钻削时钻削参数的选择,制定单因素实验方案为:圆弧槽与尖端距离 c 为0.5、0.7、0.9、1.1、1.3 mm,圆弧槽深度 h 为0.2、0.4、0.6、0.8、

1 mm,圆弧槽长度 l 为 2.5、3.5、4.5、5.5、6.5 mm,根据实验结果得出骨钻削温度及骨钻削力在不同结构参数下的变化规律。实验通过 $L_{16}(3^4)$ 正交分析,得出影响骨钻削温度及骨钻削力的主次结构参数,确定骨钻削温度及骨钻削力的经验模型,并验证模型的显著性,正交实验方案及结果如表 1 所示。

表 1 正交实验方案及结果

Tab. 1 Orthogonal experimental scheme and results

	c/mm	h/mm	l/mm	$t_1/^\circ\text{C}$	P_1/N
1	0.5	0.2	2.5	29	6.523
2	0.5	0.4	4	30	7.124
3	0.5	0.6	5.5	31	5.687
4	0.5	0.8	7	33	5.865
5	0.7	0.2	4	35	6.985
6	0.7	0.4	2.5	36	4.934
7	0.7	0.6	7	37	4.213
8	0.7	0.8	5.5	41	4.457
9	0.9	0.2	5.5	43	4.452
10	0.9	0.4	7	44	5.575
11	0.9	0.6	2.5	46	4.658
12	0.9	0.8	4	48	4.697
13	1.1	0.2	7	49	5.763
14	1.1	0.4	5.5	52	5.845
15	1.1	0.6	4	53	5.975
16	1.1	0.8	2.5	54	6.043

2 实验分析

2.1 结构参数对骨钻削温度的影响规律

根据单因素试验结果得出结构参数对骨钻削温度及骨钻削力的变化关系。由图 3 可知,随圆弧槽与尖端距离逐渐增大,骨钻削温度呈先较快下降,后较快增长的趋势。克氏针圆弧槽与尖端距离在 0.7 mm 时对骨细胞损伤较低。因为随着圆弧槽与尖端距离逐渐减小,产生的圆弧槽空间储存以及排屑能力不断提升,改善了骨钻削过程的排屑条件,骨屑可以带走大量的钻削热,进而降低钻削温度;但随着圆弧槽与尖端距离继续减小,克氏针尖端材料逐渐减少,加工过程容易出现克氏针尖端弯折断裂现象,造成骨屑不能及时从圆弧槽中排出,克氏针钻骨环境逐渐恶化,钻削温度迅速上升,钻削力迅速增大。

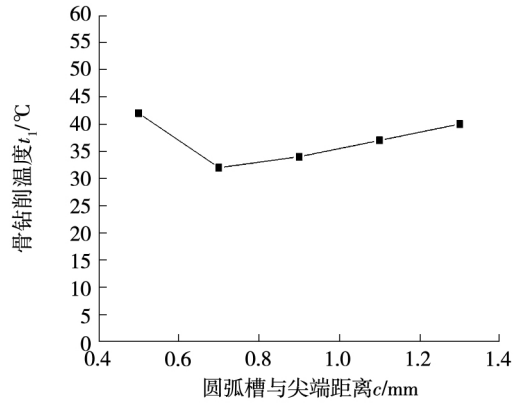


图 3 骨钻削温度随圆弧槽与尖端距离的变化

Fig. 3 Changes of drilling temperature with the distance between arc groove and tip

随着圆弧槽深度的逐渐增加,骨钻削温度先降低后升高,0.4 mm 附近骨钻削温度较低,如图 4 所示。当加大圆弧槽深度时,圆弧槽内可以储存更多的骨屑,可以排出更多的骨屑,骨钻削温度随之下降。随着圆弧槽深度进一步加深,克氏针强度下降的同时,克氏针的刚度也在下降,克氏针尖端易发生弯折甚至断裂现象,容易导致骨屑不能及时地排出,导致骨钻削温度又产生上升的趋势。单因素实验结果表明,圆弧槽深度 $h = 0.4$ mm 附近较好,对骨细胞的损伤较小。

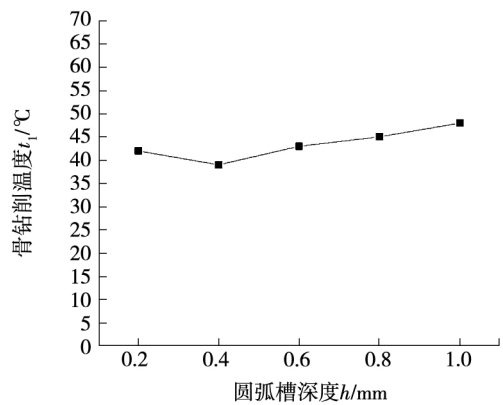


图 4 骨钻削温度随圆弧槽深度的变化

Fig. 4 Changes of drilling temperature with arc groove depth

如图 5 所示,当圆弧槽长度在 2.5 ~ 6.5 mm 区间变化时,骨钻削温度大体呈下降趋势,圆弧槽长度在 5.5 mm 附近骨钻削温度较小,其原因是圆弧槽长度越长,在骨钻削区域更有利于骨屑排出,越能增强空气与骨屑、克氏针及骨表面的热量交换,起到冷却作用。随着圆弧槽长度进一步加深,克氏针强度下降的

同时,克氏针易发生弯折现象,容易导致骨屑不能及时地排出,导致骨钻削温度又产生上升的趋势。

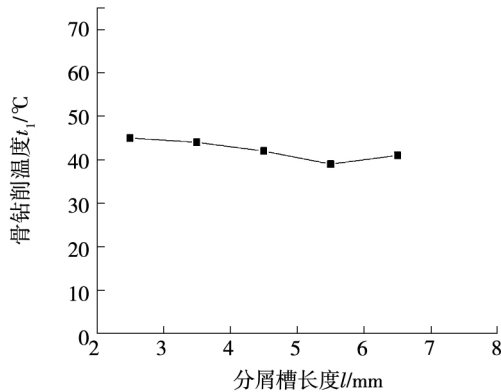


图5 骨钻削温度随圆弧槽长度的变化

Fig. 5 Changes of drilling temperature with arc groove length

2.2 结构参数对骨钻削力的影响规律

图6为骨钻削力随圆弧槽与尖端距离的变化曲线,随着圆弧槽与尖端距离的增大,使得骨钻削力下降;随着圆弧槽与尖端距离继续增大机械载荷的变化频率增大,加剧了圆弧槽克氏针表面磨损,骨钻削力相应升高。因此,将克氏针圆弧槽与尖端的距离 $c=0.7\text{ mm}$ 作为其边界距离,在实际骨科手术中具有一定的参考价值。

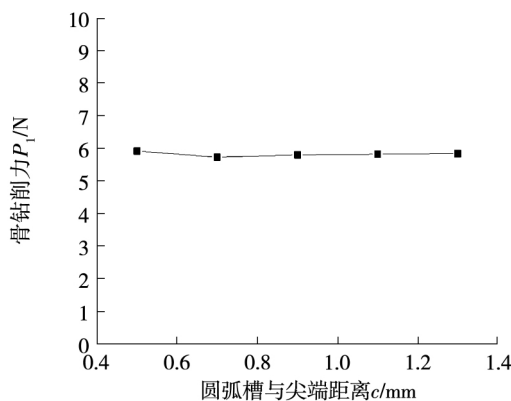


图6 骨钻削力随圆弧槽与尖端距离的变化

Fig. 6 Changes of bone drilling force with the distance between arc groove and tip

如图7所示,随圆弧槽深度的增加骨钻削力先减小后增大。这是由于适当加大圆弧槽深度有利于增加在骨钻削过程中骨屑带走的热量,减小克氏针表面磨损,使骨钻削力减小;但进一步加大圆弧槽深度时会使骨钻削力上升,骨钻削过程中颤振增大,使骨钻削力增大。因此,选择适当的圆弧槽深度能保证较小的骨钻削力,圆弧槽深度 $h=0.4\text{ mm}$ 可以作

为临界值为实际骨科手术提供参考。

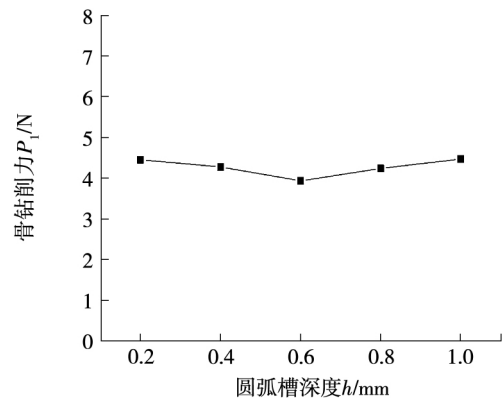


图7 骨钻削力随圆弧槽深度的变化

Fig. 7 Changes of bone drilling force with the depth of arc groove

如图8所示,随着圆弧槽长度的增加骨钻削力整体大致呈先减小后增大的趋势。这是因为圆弧槽长度的增加,有助于骨屑的折断,减少了克氏针与骨屑间的摩擦,从而间接减少了骨钻削力;但进一步加大圆弧槽长度时会使骨钻削力上升,骨钻削过程中克氏针容易弯折,骨及克氏针塑性变形增大,钻削条件恶劣使骨钻削力增大。圆弧槽长度 $l=2.5\text{ mm}$ 时,骨钻削力最小。

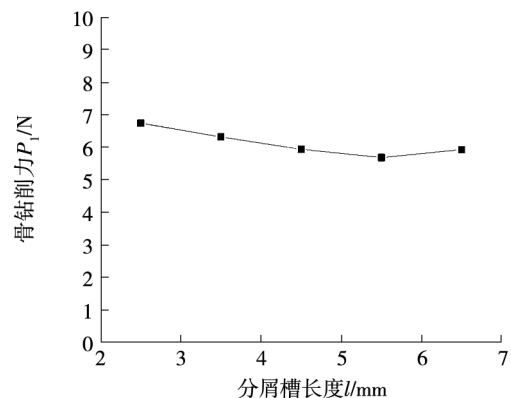


图8 骨钻削力随圆弧槽长度的变化

Fig. 8 Changes of bone drilling force with the length of arc groove

综上所述,在实际骨科手术中,在保证稳定骨钻削及减小骨损伤的前提下,选择较小的圆弧槽与尖端距离、较浅的圆弧槽深度以及适当的圆弧槽长度,有利于减轻骨损伤。

2.3 建立经验模型

根据最小二乘法对正交实验结果进行回归分析,并利用 MATLAB 软件确定骨钻削温度 t_1 的经验模型为

$$t_1 = 125.893c^{0.0239}h^{0.1625}l^{-0.0833} \quad (1)$$

骨钻削力 P_1 的经验模型为

$$P_1 = 34.914c^{-0.1446}h^{-0.7604}l^{-0.111} \quad (2)$$

利用 F 检验法验证模型的显著性,判断模型的拟合度。通过数学软件 SPSS 分析依次得出 $F = 8.832, 9.648$, 取显著水平 α 为 0.1, 查 $F(p, n-p-1)$ 分布表, 得 $F_{0.1}(3, 10) = 2.73, F_{0.1}(3, 9) = 2.81$, 获得模型的 F 统计量, 两个经验模型均为显著。

利用 t 检验法对模型系数做显著性检验, 其中圆弧槽与尖端距离 c 对骨钻削温度影响较为显著, 圆弧槽长度 l 对骨钻削力 P_1 影响最显著, 回归系数的检验见表 2, $t_{0.05}(10) = 1.8125, t_{0.05}(9) = 1.8331$ 。

表 2 回归系数的显著性检验

Tab. 2 Significance test of regression coefficient

自变量	β_1 c	β_2 h	β_3 l	回归系数 显著性
t_1	19.92	11.67	0.01	$\beta_1 > \beta_2 > 1.81 > \beta_3$
P_1	-1.50	0.69	2.69	$\beta_3 > 1.83 > \beta_2 > \beta_1$

3 骨钻削温度及骨钻削力模型的参数优化

利用回归分析方法建立了骨钻削温度、骨钻削力与圆弧槽结构参数的数学模型。模型采用遗传算法对圆弧槽克氏针骨钻削过程中的圆弧槽结构参数进行多目标优化, 以降低骨钻削温度、减小骨钻削力为目标, 求得参数的最优组合。

优化模型中设计变量分别为克氏针骨钻削正交实验 3 个结构参数圆弧槽与尖端距离 c 、圆弧槽深度 h 、圆弧槽长度 l , 依据所得克氏针骨钻削温度及骨钻削力的非线性模型进行多目标优化, 以模型的最小值为目标。

骨钻削温度:

$$\min t_1 = \min(125.893c^{0.0239}h^{0.1625}l^{-0.0833}) \quad (3)$$

骨钻削力:

$$\min P_1 = \min(34.914c^{-0.1446}h^{-0.7604}l^{-0.111}) \quad (4)$$

优化模型的建立主要是基于正交实验条件来选定圆弧槽结构参数的约束条件, 各参数的约束条件为: 圆弧槽与尖端距离 $0.5 \text{ mm} < c < 1.1 \text{ mm}$, 圆弧槽深度 $0.2 \text{ mm} < h < 0.8 \text{ mm}$, 圆弧槽长度 $2.5 \text{ mm} < l$

$< 7 \text{ mm}$ 。

在利用 Matlab 软件求解过程中, 个体按基于排序的随机遍历抽样方法进行筛选, 交叉运算采用单点交叉算子, 交叉概率 CrossoverFraction 为 0.85, 变异运算采用离散变异算子, 变异概率 MutationFraction 为 0.33。由于骨钻削温度对骨细胞活性的影响高于骨钻削力, 故骨钻削温度权重取 0.8, 骨钻削力权重取 0.2。优化模型如下式:

$$\min P_1(c, h, l) = \min(0.8 \times 125.893c^{0.0239}h^{-0.1625}l^{-0.0833} + 0.2 \times 34.914c^{-0.1446}h^{-0.7604}l^{-0.111}) \quad (5)$$

综上, 根据遗传算法得出优化结果: 当圆弧槽与尖端距离 0.7 mm、圆弧槽深度 0.6 mm、圆弧槽长度 5.5 mm 时, 骨钻削温度及骨钻削力最小。

4 结 论

以骨为实验对象, 通过单因素实验来研究圆弧槽结构参数对骨钻削温度及骨钻削力的影响; 依据正交实验结果建立骨钻削温度及骨钻削力的经验预测模型, 并对圆弧槽结构参数进行多目标优化, 进而得出结论, 即克氏针结构参数对骨钻削温度及骨钻削力的影响程度从大到小依次为圆弧槽与尖端距离、圆弧槽深度、圆弧槽长度。

1) 骨钻削温度受圆弧槽与尖端距离及圆弧槽深度的影响较大, 而受圆弧槽长度的影响相对较小。在控制各研究参数的情况下, 当距离为 0.7 mm, 深度 0.4 mm 时, 骨钻削温度较低, 骨细胞的损伤程度也较小。

2) 影响骨钻削力的首要因素为圆弧槽长度, 而圆弧槽与尖端距离及圆弧槽深度对其影响较小。对比本研究所选取的不同圆弧槽长度下的实验结果, 发现当圆弧槽长度 $l = 5.5 \text{ mm}$ 时, 骨钻削力最小, 可以减小对骨细胞的损伤。

3) 在基于遗传算法对圆弧槽结构参数进行优化的过程中, 比照本研究假定的不同实验参数所得出的结论, 发现当圆弧槽与尖端距离为 0.7 mm、圆弧槽深度为 0.6 mm 且圆弧槽长度为 5.5 mm 时, 骨钻削温度及骨钻削力能够达到最优, 更加有利于骨细胞愈合。

参 考 文 献:

- [1] HILLERY M T, SHUAIB I. Temperature Effects in the Drilling of Human and Bovine Bone [J]. Journal of Materials Processing

- Technology, 1999, 93(9): 302.
- [2] AUGUSTIN G, DAVILA S, UDILLJAK T, et al. Temperature Changes During Cortical Bone Drilling with a Newly Designed Step Drill and an Internally Cooled Drill [J]. International Orthopaedics, 2012, 36(7): 1449.
- [3] KARACA F, AKSAKAL B, KOM M. Influence of Orthopaedic Drilling Parameters on Temperature and Histopathology of Bovine Tibia: an in Vitro Study [J]. Medical Engineering & Physics, 2011, 33(10): 1221.
- [4] TU Y K, LU W H, CHEN L W, et al. Thermal Contact Simulation of Drill Bit and Bone during Drilling [C] // Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2010 4th International Conference on IEEE, 2010: 1.
- [5] YAO Liu, BARRY Belmont, YIWEN Wang, et al. Notched K-wire for low thermal damage bone drilling [J]. Medical Engineering & Physics, 2017, 45: 25.
- [6] HILLERY M T, SHUAIB I. Temperature Effects in the Drilling of Human and Bovine Bone [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 93(9): 302.
- [7] ASOLIDWORKSUSTIN G, DAVILA S, MIHOCI K, et al. Thermal Osteonecrosis and Bone Drilling Parameters Revisited [J]. Archives of Orthopaedics & Trauma Surgery, 2008, 128(1): 71.
- [8] 杜兴泽. 骨钻钻头刃形结构对钻削力与温度的影响研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- [9] 江汪彪. 微结构医疗钻头骨钻削温度及刀具磨损研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2017.
- [10] 杨毅欣, 王成勇, 秦哲, 等. 医疗钻头钻削力和钻削温度的实验研究 [J]. 机械设计与制造, 2010, 11(11): 118.
- YANG Yixin, WANG Chengyong, QIN Zhe, et al. Experimental Study on Drilling Force and Drilling Temperature of Medical Drill [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2010, 11(11): 118.
- [11] 李长树, 白宇哲, 孔祥雪, 等. 测试新鲜猪股骨干钻削进给力 [J]. 医用生物力学, 2014, 29(6): 560.
- LI Changshu, BAI Yuzhe, KONG Xiangxue, et al. Testing the Feeding Power of Fresh Pig Thighbone Drilling [J]. Medical Biomechanics, 2014, 29(6): 560.
- [12] 何玲. 基于正交各向异性分析的骨钻削的仿真与实验研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2015.
- [13] HUANG C C, LIU Y C, CHEN L W, et al. Temperature Rise of Alveolar Bone during Dental Implant Drilling Using the Finite Element Simulation [J]. Life Science Journal, 2010, 7(1): 68.
- [14] ZHANG L, TAI B L, WANG G, et al. Thermal Model to Investigate the Temperature in Bone Grinding for Skull Base Neurosurgery [J]. Medical Engineering & Physics, 2013, 35(10): 1391.
- [15] SUI J, SUGITA N. Experimental Study of Thrust Force and Torque for Drilling Cortical Bone [J]. Annals of Biomedical Engineering, 2019, 47: 802.

(编辑: 温泽宇)