

文章编号: 1004-7220(2020)05-0396-05

钻头刃型结构和钻削参数对骨骼钻削过程的影响

程肖¹, 程正¹, 杜兴泽², 杜茂华¹

(1. 昆明理工大学机电工程学院, 昆明 650500; 2. 中汽昌兴(洛阳)机电设备工程有限公司, 河南 洛阳 471000)

摘要:目的 在不同钻型和钻削参数下对骨骼进行钻削力学和热学分析,降低钻骨过程中的钻削力和钻削温度,减小对周围骨组织的损伤。**方法** 通过有限元仿真软件 AdvantEdge 建立骨骼钻削模型并与猪股骨钻削实验对比,分析标准麻花钻与3种标准群钻在不同转速和进给速度下的仿真与实验结果。**结果** 仿真与实验对比发现,钻头刃型、钻头转速和进给速度对钻削力和钻削温度的影响趋势一致,建立的仿真模型可信。**结论** 相同钻削条件下,橡胶群钻比标准麻花钻的钻削力和钻削温度更低。研究结果为群钻在骨折手术中的应用提供理论依据。

关键词: 群钻; 钻削力; 钻削温度; 有限元仿真

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2020.05.002

The Influence of Drill Bit Structure and Drilling Parameters on Bone Drilling Process

CHENG Xiao¹, CHENG Zheng¹, DU Xingze², DU Maohua¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Luoyang Changxing Mechanical & Electrical Equipment Engineering Co., Ltd., Luoyang 471000, Henan, China)

Abstract: **Objective** To make drilling mechanical and thermal analysis of bones with different drill bits and drilling parameters, so as to reduce the drilling force and drilling temperature in drilling process and decrease the damage to surrounding bone tissues. **Methods** The bone drilling model was established by finite element simulation software AdvantEdge. By comparison with the pig femur drilling experiment, the simulated and experimental results of standard twist drill and three standard multi-facet drills at different speeds and feed rates were analyzed. **Results** The simulation and experiment comparison showed that the influences of drill bit structure, drilling speed, feed rate on drilling force and drilling temperature were consistent, and the established simulation model was credible. **Conclusions** Under the same drilling conditions, the multi-facet drill for drilling rubber had lower drilling force and drilling temperature than the standard twist drill. The research findings provide theoretical basis for the application of multi-facet drill in fracture surgery.

Key words: multi-facet drill; drilling force; drilling temperature; finite element simulation

钻削在骨外科手术中的应用很常见。然而由于骨骼材质具有导热性差、蜂窝状结构等特性,钻削力和钻削温度过高都会对钻孔周围骨骼组织造成损伤。李长树^[1]对猪骨进行钻削实验,发现钻孔

对骨骼周围组织的破坏范围达3 mm;Malak等^[2]通过对牛股骨钻削实验发现,改变钻削参数和钻头刃型结构可以降低刀具对骨骼结构的破坏。研究表明,44~47℃是骨骼发生严重损伤的温度临界

收稿日期:2019-10-31; 修回日期:2019-12-27

基金项目:国家自然科学基金项目(61562055)

通信作者:杜茂华,副教授, E-mail: kmmhdu@kust.edu.cn

值^[3-4]。因此,降低钻骨过程中的钻削力和钻削温度十分必要。然而,骨外科临床手术中常用的标准麻花钻的刃型结构在钻削中往往会产生过高的钻削力和钻削力温度。虽然外科手术中常用生理盐水进行冷却可以降低钻削温度,但是生理盐水的流速不稳定以及钻削过程中钻头与骨骼接触部分产生的局部高温,依然会对骨骼周围的组织造成损伤。群钻是一类通过对标准麻花钻修磨、不断实验和生产实践改进形成的一套匹配于不同材料的新钻型,可以降低钻削力和钻削温度^[5]。

目前,有限元仿真技术在骨组织生物力学领域的应用越来越广泛和成熟^[6-7]。而针对骨骼钻削的研究,大多集中在钻削参数对钻削力和钻削温度的影响上^[8-10]。本文综合有限元仿真方法和猪股骨钻削实验,探索钻头刃型、钻头转速、进给速度对钻削力和钻削温度的影响,为进一步提高骨骼钻削水平提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 AdvantEdge 钻削仿真模型建立

由于 AdvantEdge 内部并未配置群钻模型,自身绘图模块也无法完成复杂模型创建,本文使用三维设计软件 CATIA V5 R21 绘制钻头实体模型,材质为普通高速钢。将骨骼视为各向同性材料,其材料属性参数见表 1。采用的 Johnson-Cook 本构模型参数见表 2。

表 1 骨骼材料属性参数^[11]

Tab.1 Property parameters of bone materials

密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	泊松比	导热系数/ [$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$]	比热容/ [$\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$]
1 800	13.8	0.35	0.434	1.26

表 2 Johnson-Cook 模型参数

Tab.2 Parameters of Johnson-Cook model

A/MPa	B/MPa	n	c	m	$T_m/^{\circ}\text{C}$
50	101	0.08	0.03	1.03	875

在 AdvantEdge 中,只需要控制网格的最大、最小尺寸等参数,软件可以根据切削类型、工件与刀具的形状以及它们之间的接触特性自适应地划分网格,在保证求解精确度的同时又能降低求解时间。自适应网格划分后的网格模型如图 1 所示。

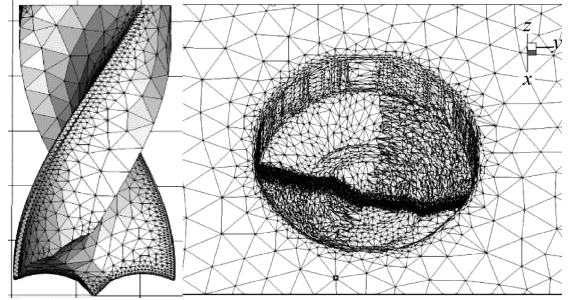


图 1 钻骨网格模型

Fig.1 Mesh model of drilling bone

1.2 猪股骨钻削实验

使用 XD-40 A 型三坐标数控铣床作为钻削实验设备,测力仪为 JHBS-1 型箱式荷重传感器,量程 0~1 kN;测温设备为 FLIR 公司生产的 E40 红外测温仪,量程 0~300 $^{\circ}\text{C}$ 。测力传感器通过台虎钳夹紧固定于数控铣床的工作台上;骨骼标本由钢带用螺钉固定在测力传感器的上平面,测力传感器的数值显示在显示器上;红外热像仪固定在三角架上,调整镜头对准钻削区域,并保持两者之间的距离在 1 m 内(见图 2)。



图 2 骨骼钻削实验装置

Fig.2 Experimental device of bone drilling

1.3 实验条件

实验所用标准麻花钻直径 5 mm,螺旋角 30°,顶角 125°。由于不同钻削材料的标准群钻刃型都不相同,目前还没有专用于钻削骨骼的群钻刃型。从工艺的角度出发,选择以下 3 种与骨骼钻削过程加工工艺类似的群钻刃型进行试验。实验中的群钻都是在万能工具磨床上对原 $\Phi 5$ mm 标准麻花钻按如表 3 所示标准群钻结构参数进行刃型修磨后所得。

表3 群钻结构参数

Tab.3 Structural parameters of multi-facet drills

钻头类型	直径/ mm	修磨长度/ mm	$\varphi/(\circ)$					
			外刃锋角	横刃斜角	外刃轴向角	内刃前角	外刃后角	圆弧后角
钻胶木群钻	5	1.5	125	65	8	-10	10	18
钻有机玻璃群钻	5	2.0	110	65	40	-5	22	27
钻橡胶群钻	5	1.5	125	65	10	-10	10	18

采用全因素实验方法,对比相同钻削条件下仿真与实验结果的钻削力和钻削温度变化,每组实验做1次,安排64组实验。为了降低刀具磨损对实验结果产生影响,猪骨钻削实验中,同一组实验每钻8个孔后更换新钻头;相邻孔间距大于4 mm。骨外科手术中手持电钻的钻速不超过3 000 r/min;钻削进给力是由医生手持电钻提供,进给速度不大,所设定的钻削参数如表4所示。

表4 钻削参数

Tab.4 Drilling parameters

钻头类型	钻削速度/ ($r \cdot \min^{-1}$)	钻头进给速度/ ($\text{mm} \cdot r^{-1}$)
	标准麻花钻	700
胶木群钻	1 100	0.07
有机玻璃群钻	1 500	0.11
橡胶群钻	1 900	0.15

2 实验结果与分析

2.1 仿真钻削力分析

钻削过程中,钻头的每一切削刃都会产生切削力,本文主要考察垂直于切削平面的轴向力。分析4种钻头刃型的钻削力仿真曲线发现,钻削过程中

钻头转速对钻削力的影响不大,不同转速下的钻削力曲线大致处于同一水平线上。当钻头的进给速度高于0.11 mm/r时,3种群钻的钻削力都略高于标准麻花钻;当钻头进给速度低于0.11 mm/r时,3种群钻的钻削力都低于标准麻花钻。钻胶木群钻的钻削力相较于标准麻花钻没有明显降低;钻有机玻璃群钻和钻橡胶群钻在进给速度不高于0.11 mm/r时,在各个转速区间的钻削力都要小于标准麻花钻。其中,钻橡胶群钻在此区间内的钻削力在所有钻型中最低(见图3)。

2.2 实验钻削力分析

采用与 AdvantEdge 仿真相同的钻削参数对猪股骨进行钻削实验。分析不同钻型和钻削参数下的钻削力发现,钻削过程中进给速度对钻削力的影响最大。但由于骨骼材质的特殊性,过大的进给速度导致钻头对骨骼的挤压程度加剧,破坏了原有的组织结构,切削力反而会降低;相同进给速度下,钻削力的变化幅度不大,说明改变钻速降低钻削力的效果十分有限;相同条件下,标准麻花钻的钻削力要高于钻有机玻璃群钻和钻橡胶群钻,但低于钻胶木群钻,钻橡胶群钻在4种钻型中的钻削力最小(见图4)。

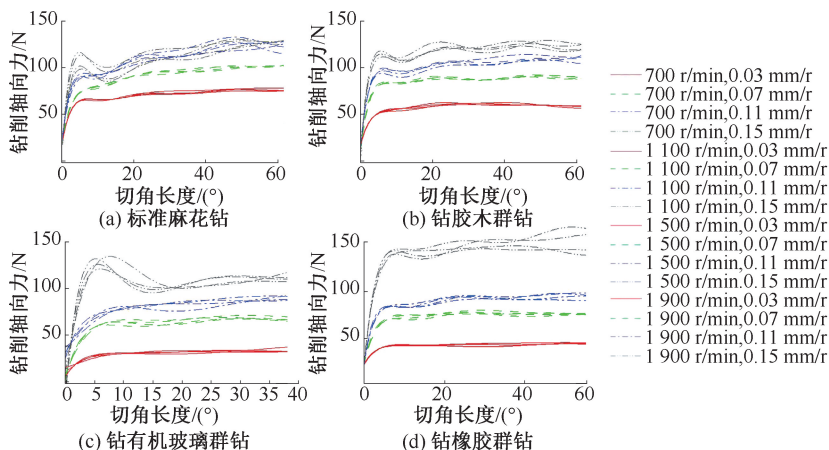


图3 不同钻型的钻削力仿真曲线

Fig.3 Simulation curves of drilling force for different drill types (a) Standard twist drill, (b) Multi-facet drill for drilling bakelite, (c) Multi-facet drill for drilling plexiglass, (d) Multi-facet drill for drilling rubber

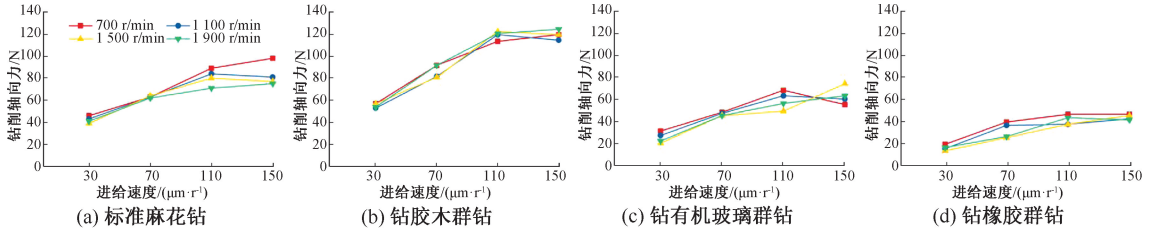


图4 不同钻型的实验钻削力

Fig.4 Experimental drilling force for different drill types (a) Standard twist drill, (b) Multi-facet drill for drilling bakelite, (c) Multi-facet drill for drilling plexiglass, (d) Multi-facet drill for drilling rubber

2.3 仿真钻削温度分析

分析4种钻头在不同钻削条件的仿真温度发现,除钻橡胶群钻的钻削温度稍高外,其余3种钻型在相同钻削参数下的钻削温度相差不大;钻削温度受钻头进给速度的影响较大,除钻有机玻璃

群钻和钻橡胶群钻在进给速度为0.15 mm/r时温度出现降低外,4种钻型的钻削温度随进给速度增大有上升趋势;进给速度一定的条件下,钻头转速增加会导致钻削温度有不同幅度的上升(见图5)。

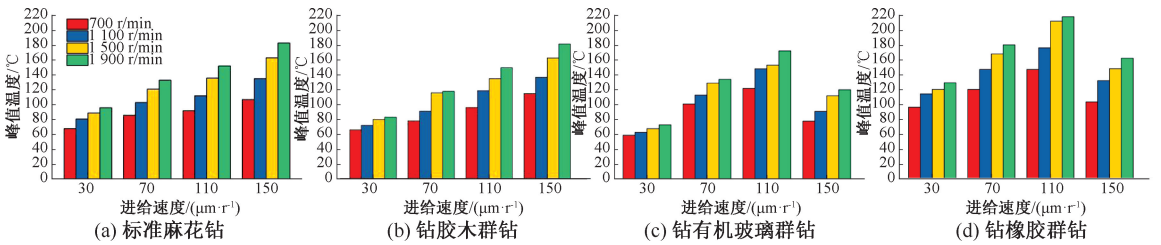


图5 不同钻型的仿真钻削温度峰值

Fig.5 Peak of simulated drilling temperature for different drill types (a) Standard twist drill, (b) Multi-facet drill for drilling bakelite, (c) Multi-facet drill for drilling plexiglass, (d) Multi-facet drill for drilling rubber

2.4 实验钻削温度分析

图6所示为钻削实验中不同钻型的钻削温度变化曲线。与其他刃型的钻削温度对比后发现,3种群钻在猪股骨钻削实验中的钻削温度都比标准

麻花钻稍低,在低进给速度时显得尤为明显;随着进给速度的增大,转速对钻削温度的影响降低,不同刃型钻头的钻削温度都有下降的趋势;同一条件下,不同钻头刃型结构的钻削温度相差不大。

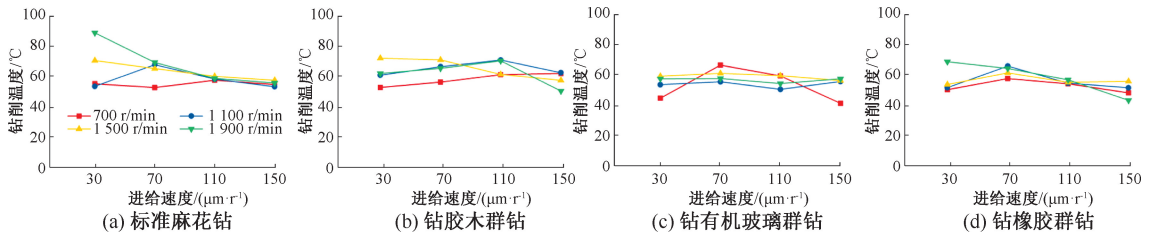


图6 不同钻型的实验钻削温度

Fig.6 Experimental drilling temperature of different drill types (a) Standard twist drill, (b) Multi-facet drill for drilling bakelite, (c) Multi-facet drill for drilling plexiglass, (d) Multi-facet drill for drilling rubber

对钻骨过程的分析结果表明,钻橡胶群钻的表现最佳,更适合钻削骨骼;钻橡胶群钻与骨折手术中常用标准麻花钻相比,钻削力可降低20%以上,

同时钻削温度的降幅也在5%以上,且钻头转速1100 r/min,进给速度0.03 mm/r钻削参数下钻削力与钻削温度达到最优。

3 讨论与结论

本文通过切削专用有限元仿真软件 AdvantEdge, 探讨刃型结构和钻削参数对骨骼钻削过程的影响; 并对 $\Phi 5$ mm 标准麻花钻进行修磨, 制作 3 种群钻, 在相同条件下验证了仿真与实验结果的一致性。因此, 可以把此仿真模型用作对骨骼钻削的定性分析, 为骨科临床手术研究拓宽了一种新渠道和新参考。

但对比仿真与实验结果发现, 仿真值偏大, 推测原因如下: ① 实际骨骼材料属性是各向异性, 基于各向同性下的骨骼模型并不准确^[12]; ② 红外热像仪为非接触式测温方法, 不能探测到钻头与骨骼接触区域的钻削温度, 并且容易受到外界环境的影响, 故这种测温方法在测量钻削温度时存在缺陷^[13]。目前有关冷却液使用、钻削间隔、钻头类型对钻削区温度、钻削力、钻头扭矩影响的研究已经开展^[14]。在本文的基础上, 今后可针对骨骼模型参数、钻头几何参数、钻削参数等开展更加深入的研究。

参考文献:

[1] 李长树. 面向虚拟手术系统离体股骨干钻削力学参数的测试与研究[D]. 广州: 南方医科大学, 2014.

[2] MALAK SFF, ANDERSON IA. Orthogonal cutting of cancellous bone with application to the harvesting of bone autograft [J]. *Med Eng Phys*, 2008, 30(6): 717-724.

[3] HILLERY MT, SHUAIB I. Temperature effects in the drilling of human and bovine bone [J]. *J Mater Process Technol*, 1999, 92: 302-308.

[4] ERIKSSON RA, ALBREKTSSON T. The effect of heat on bone regeneration: An experimental study in the rabbit using the bone growth chamber [J]. *J Oral Maxillofac*

Surg, 1984, 42(11): 705-711.

[5] 北京永定机械厂小组. 群钻[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982: 5-12.

[6] 李昊, 李瑞欣, 冷雪, 等. 皮质骨中骨单元应力集中效应的有限元分析[J]. *医用生物力学*, 2017, 32(6): 500-505.
LI H, LI RX, LENG X, *et al.* Finite element analysis on the stress concentration effect of osteons in cortical bone [J]. *J Med Biomech*, 2017, 32(6): 500-505.

[7] 刘玉新, 孙培栋, 毕振宇, 等. 松质骨拉力螺钉紧固过程的隐式动力分析[J]. *医用生物力学*, 2018, 33(2): 121-125.
LIU YX, SUN PD, BI ZY, *et al.* Implicit dynamic analysis on tightening procedure of cancellous lag screw placement [J]. *J Med Biomech*, 2018, (2): 121-125.

[8] LEE JE, OZDOGANLAR OB, RABIN Y. An experimental investigation on thermal exposure during bone drilling [J]. *Med Eng Phys*, 2012, 34(10): 1510-1520.

[9] SEZEK S, AKSAKAL B, KARACA F. Influence of drill parameters on bone temperature and necrosis: A FEM modelling and *in vitro* experiments [J]. *Comput Mater Sci*, 2012, 60: 13-18.

[10] 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): 560-566.
LI CS, BAI YZ, KONG XX, *et al.* Testing of drilling feed force on fresh porcine femur [J]. *J Med Biomech*, 2014, 29(6): 560-566.

[11] TU YK, CHEN LW, HUANG CC, *et al.* Finite element simulation of drill bit and bone thermal contact during drilling[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Shanghai: IEEE, 2008: 1268-1271.

[12] 苏哩莉, 胡亚辉, 江汪彪, 等. 基于各向异性皮质骨的钻削温度研究[J]. *工具技术*, 2017, 51(2): 52-55.

[13] 付永强, 张松, 李剑峰, 等. 皮质骨钻削过程中的温度场分析[J]. *工具技术*, 2018, 52(7): 53-57.

[14] FELDMANN A, WANDEL J, ZYSSET P. Reducing temperature elevation of robotic bone drilling [J]. *Med Eng Phys*, 2016, 38(12): 1495-1504.