

引用格式: 姚帅, 赵韡, 陈俊伟. 基于瞬态平面热源法的牛皮质骨导热系数测试实验研究[J]. 中国测试, 2022, 48(3): 41-46. YAO Shuai, ZHAO Wei, CHEN Junwei. Experimental research on thermal conductivity test of bovine cortical bone based on transient plane source method[J]. China Measurement & Test, 2022, 48(3): 41-46. DOI: 10.11857/j.issn.1674-5124.2021080043



基于瞬态平面热源法的牛皮质骨导热系数测试实验研究

姚 帅, 赵 韡, 陈俊伟
(中北大学, 山西 太原 030051)

摘 要: 为模拟皮质骨切削的温度传递过程, 需要可靠的导热系数参数。该文阐述基于瞬态平面热源法测量牛皮质骨导热系数的原理及实验方法。该方法针对牛皮质骨在垂直、交叉、平行三个正交方向的导热系数进行测量, 并研究其对皮质骨导热系数的影响。实验表明: 在温度、湿度等环境因素及组织水分为主的骨材料性能等条件相对确定的前提下, 皮质骨的平行方向导热系数测量平均值为 $0.6286 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 交叉方向导热系数测量平均值为 $0.6288 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 垂直方向导热系数测量平均值为 $0.7257 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; 皮质骨导热系数在交叉方向与平行方向上差异很小, 在垂直方向上实验测量值较另外两个方向增长约 15%; 在模型构建过程中, 导热系数在平行方向和交叉方向可不做区分, 取值为 $0.62\sim 0.63 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 在垂直方向可取 $0.72\sim 0.73 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 为参考值。

关键词: 瞬态平面热源法; 导热系数; 生物骨; 牛皮质骨

中图分类号: TB302.1; R318

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2022)03-0041-06

Experimental research on thermal conductivity test of bovine cortical bone based on transient plane source method

YAO Shuai, ZHAO Wei, CHEN Junwei
(North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to simulate the temperature transfer process of cortical bone cutting, reliable thermal conductivity parameters are required. The article describes the principle and experimental method of measuring the thermal conductivity of cortical bone based on the transient plane source method. The method measures the thermal conductivity of cortical bone in three orthogonal directions, vertical, cross, and parallel, and studies its influence on the thermal conductivity of cortical bone. Experiments show that: under the premise of relatively certain conditions such as temperature, humidity and other environmental factors and tissue moisture-based bone material performance and other conditions, the average measured thermal conductivity of the cortical bone in the parallel direction is $0.6286 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, the average measured thermal conductivity in the cross direction is $0.6288 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, and the average measured thermal conductivity in the vertical direction is $0.7257 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. The thermal conductivity of cortical bone has little difference between the cross direction and

收稿日期: 2021-08-09; 收到修改稿日期: 2021-09-25

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (51905499); 中国博士后科学基金面上项目 (2019M661067)

作者简介: 姚 帅(1996-), 男, 山西吕梁市人, 硕士研究生, 专业方向为生物组织切削技术。

the parallel direction, and the experimental measurement value in the vertical direction has increased by about 15% compared with the other two vertical directions. In the process of model construction, the thermal conductivity in the parallel direction and the cross direction can be omitted to distinguish, the value is 0.62-0.63 W/(m·K). In the vertical direction, 0.72-0.73 W/(m·K) can be taken as a reference value.

Keywords: transient plane source; thermal conductivity; biological bone; bovine cortical bone

0 引言

骨组织的外科手术^[1]涉及切削、钻、锯、研磨、激光烧蚀等过程,这些过程都会导致热量在热源周围小区域积聚;生物骨组织可以进行调节温度以保护重要器官。若手术工具使用不当,导致大量热量积聚,依靠生物骨组织来调节是远远不够的;骨组织温度超过临界阈值会发生变质,最终导致骨组织严重热损伤^[2]。因此,估计骨组织中热量产生和温度变化对于避免骨组织在手术中产生不可逆转的热损伤至关重要。骨组织中的温度分布和热量生成可以通过热模型预测。导热系数是构建热模型的重要参数之一,它代表了骨组织的导热能力。因此,准确预测骨组织的导热系数可以提高其热模型模拟的准确性。

Sundén^[3]通过实验研究,得出兔胫骨的导热系数为 0.5225 W/(m·K)。Biyikli^[4]等测量了新鲜和干燥人类尸体股骨的导热系数,干燥样品的热导率在 0.1600~0.2400 W/(m·K)范围内,新鲜样品的热导率在 0.2600~0.3400 W/(m·K)范围内。Moses^[5]等使用平行板法的测量技术测量了马皮质骨的热导率,测量到湿骨和干骨分别为 0.8000 W/(m·K)和 0.7000 W/(m·K)。Feldmann^[6]等使用稳态法测得牛皮质骨的导热系数为 (0.6400±0.0400) W/(m·K)。这些结果有助于改善生物骨组织的热有限元模型,帮助学者开发新的手术工具。

测试导热系数的方法主要分为稳态法和瞬态法。稳态法^[7]建立温度场所需时间较长,测试效率低,并且对测量系统的绝热条件及样品尺寸要求较为苛刻。为了克服这些缺点,瞬态法应运而生。在瞬态法^[8]中,试样内的温度分布随着时间而变化,是一个非稳定的温度场,记录试样温度的变化速率,进而可以得到导热系数。与稳态法相比,瞬态法测试时间短,速度快,可以减少测试时水分的蒸发或空气自然对流引起的误差,热源稳定,试验升温较平和,且容易操作。

本文采用瞬态平面热源法在切削试验环境条件

下,针对切削试验用牛皮质骨在 3 个正交的典型特征方向上的导热性能进行实验研究,获得其导热系数,为骨组织模型构建及其切削研究的开展提供支撑。

1 实验原理

瞬态平面热源法^[9](transient plane source, TPS)是在热线法的基础上发展起来的一种材料热物性的检测方法,也被称作 Hot Disk 法。其原理是假定探头被置于无限大的骨组织试样中,电流以阶跃式或脉冲式通过探头,使得探头金属片温度升高并释放热量。同时探头也作为传感器,测量试样测试点处探头和试样的温升。连续双螺旋结构的圆盘型 TPS 探头如图 1 所示,使用双螺旋镍膜作为传热和温度传感器,外层为 Kapton^[10]薄膜,起到保护和绝缘的作用。镍加热器的延伸部分有四个触点,用于探头电加热、电流连接和电压感应。探头与骨组织样品放置示意图见图 2,测试时 TPS 探头放置在 2 块骨样品中间。主机为镍加热器提供短时间的恒定功率,同时测量镍加热器的电阻。已知镍的电阻温度系数,骨组织随加热时间变化的温升就可通过探头获取。

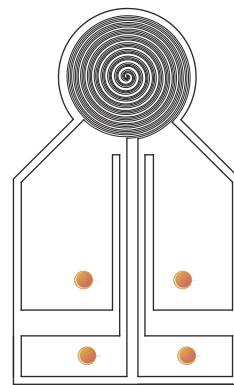


图 1 连续双螺旋结构的圆盘型 TPS 探头

骨组织样品温升与时间的关系为:

$$\Delta T(\tau) = \frac{P}{\lambda r \sqrt{\pi^3}} D(\tau) = kD(\tau) \quad (1)$$

式中: $\Delta T(\tau)$ ——探头的温升;

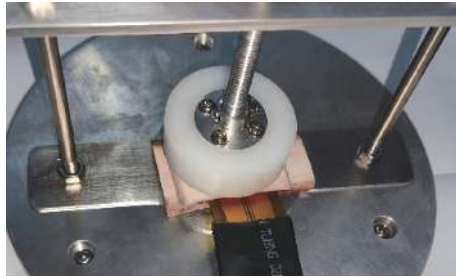


图 2 探头装夹实物图

P ——探头功率;
 r ——探头半径 (测量骨组织的探头半径为 7.5 mm);
 λ ——骨组织试样的导热系数;
 $D(\tau)$ ——与探头尺寸无关的时间函数。

$$\tau = \frac{\sqrt{\alpha t}}{r} \quad (2)$$

式中: α ——试样的热扩散系数;
 t ——骨组织的测试时间。

实验测试探头和试样的温升, 并作 $\Delta T(\tau)$ 的拟合直线图, 通过直线图求得斜率 k , 并由式 (1) 计算试样的导热系数 λ :

$$\lambda = \frac{P}{kr \sqrt{\pi^3}} \quad (3)$$

2 实验

测量装置由样品夹具、测试探头、Hot-disk 热常数分析仪以及计算机组成。室温环境为 15~22 °C, 室温环境下较小的温度差异对材料导热性能影响不大。样品支架外置隔离装置, 防止环境气流流动影响测试结果。

2.1 样品制备

骨的传热性质是各向异性的。Zelenov^[11] 等直接测量了不同方向上的导热系数, 发现了方向差异引起的导热系数差异。Abouzia^[12] 等在骨钻孔过程中检测到不同方向的不同温度梯度, 得出皮质骨是各向异性的结论。由于牛骨与人骨在温度特性方面有很高的相似性^[13-14], 试验骨样品取自成年牛的新鲜牛股骨的中骨段。皮质骨组织内部存在纤维结构, 在传统机床加工皮质骨组织过程中 (见图 3), 考虑到骨纤维裂纹萌生和发展的方向与程度是不一样的, 而骨纤维排列方向上导热系数是否有差异有待考究, 故对此有了更深一步的探究。

进行测量前, 样品必须加工平整, 见图 4。制备过程中产生的热量可能会改变骨组织材料的结构和

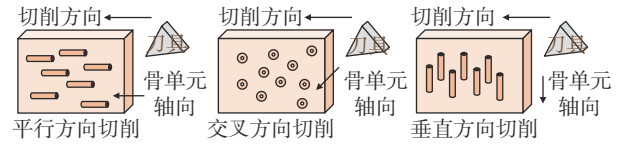


图 3 骨切削方向示意图

生物力学性质等, 从而改变其热性能, 故使用目前唯一一种冷加工手段, 水射流切削技术进行样品制备, 避免切削热对骨材料造成损伤。

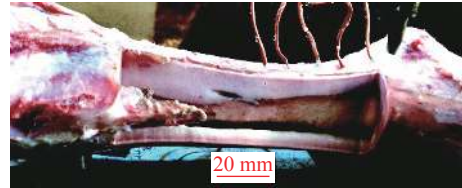


图 4 加工皮质骨示意图

由于皮质骨样品制备较为困难, 牛皮质骨骨壁相对较薄, 通过测量, 其壁厚小于探头半径, 只能对平行方向进行制取, 为了更好地测量另外两个方向的导热系数, 使用导热硅胶对多个骨组织样品进行粘接 (见图 5)。导热硅胶导热系数为 0.8000 W/(m·K), 导热性能良好; 同时, 导热硅胶的粘接性、防水性较好, 不影响水射流机床对它的二次加工。

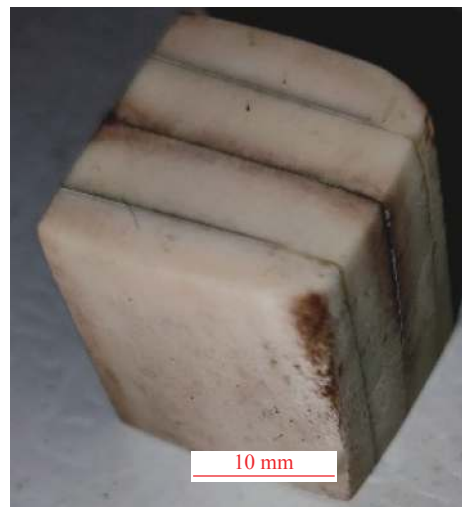


图 5 粘接后的骨组织示意图

2.2 试验测试

样品制备完成后, 为了避免温度、湿度等环境因素及组织水分为主的骨材料性能等条件差异对测量结果产生较大的影响。在导热仪加热 30 min 达到稳定状态后, 将样品从冷藏室内取出, 并用测温枪测量骨样表面温度, 等待其恢复到室温后进行各个切削方向导热系数的测量。

骨样品在加热测试时间内, 采样频率 6.25 Hz。

瞬态曲线图显示样品表面温度连续升高,没有间断或跳跃,符合实验要求(如图6(a)所示)。若检测到表面温度出现了明显上升或者下降趋势,需重新实验(如图6(b)所示)。确认瞬态曲线符合要求之后代入式(2),作出 τ 与 ΔT 的图(见图7)并进行线性拟合,输出拟合直线的斜率为 k 。

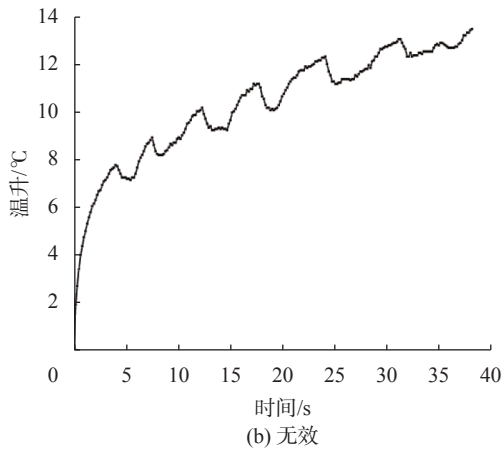
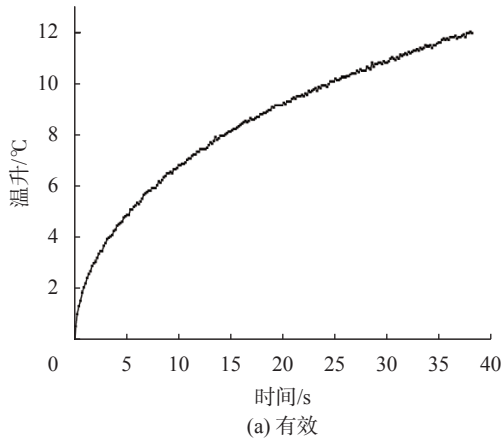


图6 加热测试的瞬态曲线图

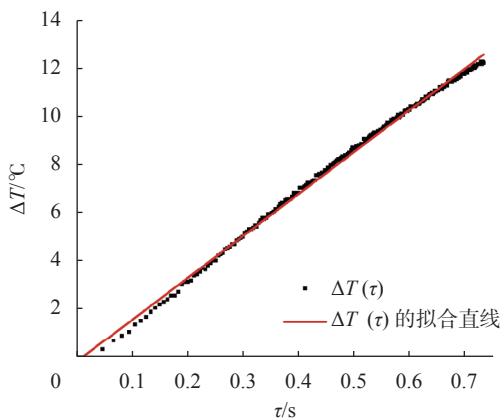


图7 时间函数 $\Delta T(\tau)$ 的拟合直线图

3 实验结果分析与讨论

温度上升与加热功率有关,为了达到较高的测

试精度,对样品进行充分的自然冷却;对于主机,为避免温升过大而造成不必要的热损失,加热功率不要有太大变化,经过多次测试,设置在0.4~0.5 W之间较为合适。

实验选用的导热硅胶是否会影响骨组织导热系数的测量,目前没有一个明确的结论。骨材料由于本身材料特殊性,局部散热较快,镍加热器功率较小,产生的热量较小,而选用的导热硅胶对于导热系数较小的骨组织直接热传递并不会造成太大影响。为了验证这一猜想,对切削方向为平行方向进行有无粘接导热硅胶的对比试验,输出结果如表1所示。

表1 平行方向皮质骨测试输出结果

有无粘接	初始温度/°C	功率/W	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
无	15.2	0.4600	0.6234
无	18.2	0.4710	0.6269
无	16.0	0.4740	0.6274
有	17.6	0.4600	0.6323
有	16.1	0.4650	0.6334
有	19.5	0.4520	0.6286

由表1可知,切削方向为平行方向时,没有进行导热硅胶粘接的骨样品,所测得的导热系数平均值为0.6258 W/(m·K),粘接后的骨样品(见图8(a))导热系数平均值为0.6314 W/(m·K)。通过数据分析,两者导热系数值的变化不足1%说明导热硅胶对骨组织导热系数的测量影响较小。骨样品的制样大小是否影响导热系数的测量,也可以由表1得出,在不影响探头采样的前提下,加工后的骨样品大小对导热系数的测量影响不大。

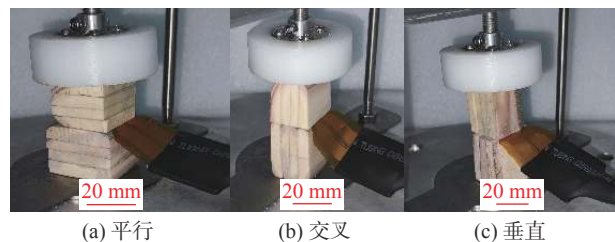


图8 各方向装夹示意图

3.1 不同方向骨样品的导热系数

对交叉、垂直方向进行装夹测量(见图8)。控制功率和室温温度与平行方向的取值相近。

由表2可知,经过粘接后测量得到切削方向为交叉方向的骨组织,导热系数平均值为0.6288 W/(m·K),

相比平行方向粘接后测得的导热系数差别较小; 切削方向为垂直方向的导热系数平均值为 $0.7257 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 相比平行、交叉方向差别较大。

表 2 其他正交方向皮质骨测试输出结果

切削方向	初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	功率/ W	导热系数/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
交叉	17.3	0.4680	0.6356
交叉	18.5	0.4550	0.6229
交叉	19.7	0.4580	0.6182
交叉	22.1	0.4600	0.6389
交叉	18.7	0.4620	0.6285
垂直	18.8	0.4490	0.7250
垂直	18.2	0.4500	0.7232
垂直	19.9	0.4500	0.7208
垂直	21.9	0.4510	0.7332
垂直	21.1	0.4510	0.7263

通过比较平行、交叉、垂直方向的拟合直线图(如图 9 所示), 发现平行方向与交叉方向斜率较为接近, 垂直方向相比另外两个方向斜率较小。通过式(1)可知, $\Delta T(\tau)$ 相同的情况下, k 越小, 需要的时间就越长, 反映出垂直方向相比其他两个方向散热更快, 导热系数高。

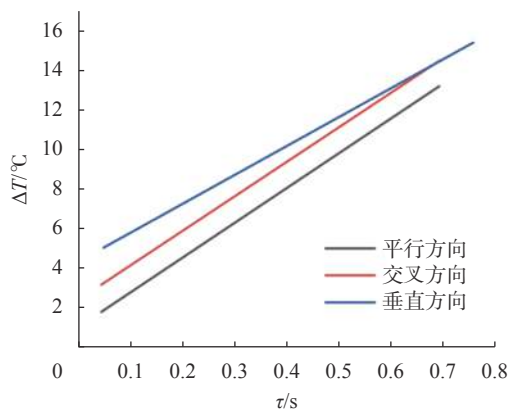


图 9 平行、交叉、垂直方向的拟合直线图

3.2 材料表面温度对导热系数的影响

Sierpowska^[15] 等研究骨小梁发现温度过低会显著影响其导热率。因此对平行方向未经粘接的骨样进行低温测量。

由表 3 可知, 低温环境下, 平行方向骨材料的导热系数与常温环境下的导热系数差异很大。初始温度在低温的情况下, 骨组织样品的导热系数平均值为 $0.5690 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 室温条件下平行方向的导热

系数比低温条件平均值高了 10%, 说明低温会影响骨组织的物理性能, 使其导热系数降低。

表 3 低温测量平行方向导热系数

初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	功率/ W	导热系数/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
4.9	0.4560	0.5698
6.2	0.4600	0.5806
4.2	0.4530	0.5568

3.3 骨样品含水量对导热系数的影响

Biyikli^[4] 和 Moses^[5] 研究发现湿骨和干骨的导热系数是有差异的, 说明骨样品中的水分含量会对导热系数的测量产生影响。因此在实验前后会对样品进行称重, 骨样品是在室温环境下进行实验的, 骨样品中水分的损失可以忽略, 实验前后样品的质量没有发生改变, 所以实验所用的骨样品性能是均匀稳定的。经计算得湿骨的骨样品密度为 $2.12 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。样品在室温下的真空室中干燥处理后的干骨骨密度为 $1.95 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。因此, 湿骨的含水量为 8%。

比较平行方向(如图 10 所示)的湿骨、干骨的导热系数, 湿骨的导热系数平均值为 $0.6286 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; 干骨的导热系数平均值为 $0.6011 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。湿骨比干骨导热系数测量的平均值增长了 4.6%, 变化较为明显。

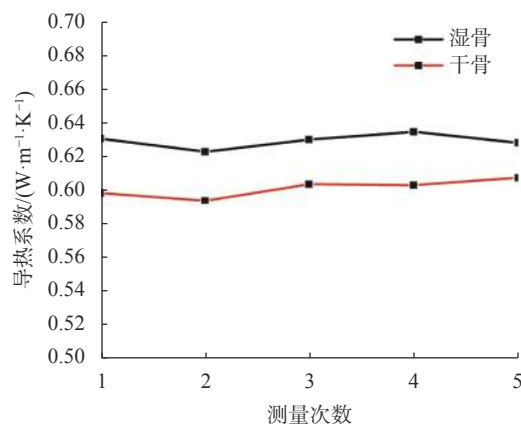


图 10 湿骨、干骨的导热系数对比图

4 结束语

本文通过实验测试研究了牛皮质骨在平行、交叉、垂直三个正交方向的导热系数, 得出的主要结论如下:

1) 在温度、湿度等环境因素及组织水分为主的骨材料性能等条件相对确定的前提下, 皮质骨的平行方向导热系数测量平均值为 $0.6286 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 交

叉方向导热系数测量平均值为 $0.6288 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 垂直方向导热系数测量平均值为 $0.7257 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; 皮质骨导热系数在交叉方向与平行方向上差异很小, 在垂直方向上实验测量值较另外两个方向增长了约 15%; 在模型构建过程中, 导热系数在平行方向和交叉方向可不做区分, 取值为 $0.62\sim 0.63 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 在垂直方向可取 $0.72\sim 0.73 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 为参考值。

2) 导热硅胶的导热系数比骨样品的导热系数大, 对其导热系数测量影响不大, 尺寸较小的轻薄低导热率材料可利用导热硅胶粘接后采用瞬态法对其导热系数进行测量。

3) 瞬态法能够在短时间内得到稳定的结果, 在一些需要短时间得到导热系数的环境下较为适用。

参考文献

- [1] LEE J B, RABIN Y, OZDOGANLAR O B. A new thermal model for bone drilling with applications to orthopaedic surgery[J]. *Medical Engineering & Physics*, 2011, 33(10): 1234-44.
- [2] MEDIOUNI M, KUCKLICK T R, PONCET S, et al. An overview of thermal necrosis: present and future[J]. *Current Medical Research and Opinion*, 2019, 35: 1555-1562.
- [3] SUNDEN G. Some aspects of longitudinal bone growth: An experimental study of the rabbit tibia[J]. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 1967, 38(S103): 1-134.
- [4] BIYIKLI S, MODEST M F, TARR R R. Measurements of thermal properties for human femora[J]. *Journal of biomedical materials research*, 1986, 20(9): 1335-45.
- [5] MOSES W, WITTHAUS F W, HOGAN H A, et al. Measurement of the thermal conductivity of cortical bone by an inverse technique[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1995, 11: 34-39.
- [6] FELDMANN A, WILI P, MAQUER G B, et al. The thermal conductivity of cortical and cancellous bone[J]. *European cells & materials*, 2018, 35: 25-33.
- [7] LEE J, HUH S J, LEE H J. Experimental determination of thermal conductivity of cortical bone by compensating heat loss in parallel plate method[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2018, 19: 569-576.
- [8] 丰正功, 李艳宁. 基于 TPS 法简化模型测量物质导热系数[J]. *纳米技术与精密工程*, 2017, 15(4): 323-327.
- [9] 贺永智, 徐旭, 潘江, 等. 基于 TPS 法液体导热系数的测量[J]. *中国测试*, 2021, 47(5): 52-57.
- [10] SULEIMAN B M, KARAWACKI E, GUSTAFSSON S E. Thermal conductivity and diffusivity of KH 2 PO 4 and NH 4 H 2 PO 4 polycrystalline samples near their phase transitions[J]. *Journal of Materials Research*, 1994, 9(7): 1895-1898.
- [11] ZELENOV E S. Experimental investigation of the thermophysical properties of compact bone[J]. *Mechanics of Composite Materials*, 1986, 21: 759-762.
- [12] ABOUZGIA M B, JAMES D F. Temperature rise during drilling through bone[J]. *The International Journal of Oral and Maxillofacial Implants*, 1997, 12(3): 342-53.
- [13] WIGGINS K L, MALKIN S. Drilling of bone[J]. *Journal of biomechanics*, 1976, 9(9): 553-9.
- [14] KRAUSE W R. Orthogonal bone cutting: saw design and operating characteristics[J]. *Journal of biomechanical engineering*, 1987, 109(3): 263-71.
- [15] SIERPOWSKA J, HAKULINEN M A, TOYRAS J, et al. Interrelationships between electrical properties and microstructure of human trabecular bone[J]. *Physics in medicine and biology*, 2006, 51(20): 5289-303.

(编辑:莫婕)