

仿生耕槽刀的设计与仿真实验

Simulation and design of raking knives based on bionic design method

张志丰^{1,2}张峻霞^{1,2}张 琰^{1,2}ZHANG Zhi-feng^{1,2} ZHANG Jun-xia^{1,2} ZHANG Yan^{1,2}

(1. 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222;

2. 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)

(1. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-line

Monitoring for Light Industry & Food Machinery and Equipment, Tianjin 300222, China)

摘要:为了缩短麦芽汁在过滤槽内的过滤周期,提高麦芽汁的品质,设计了一种适合过滤槽耕槽作业的仿生耕槽刀。通过重构蝼蛄挖掘足爪趾的生物体模型,并模拟爪趾楔入土壤的动力学过程,发现爪趾 T4 的功能特性与耕槽刀的设计目标相似性最高。提取爪趾 T4 的生物模型的主要轮廓曲线,并拟合曲线方程,生成拟合曲线,将拟合曲线应用于仿生耕槽刀的耕犁轮廓线和刀板水平截面轮廓线的设计。对方案进行耕槽模拟验证。研究结果表明,与原型产品相比仿生耕槽刀作用于麦糟后,耕槽刀表面产生的最大剪切应力降低 18.90%;过滤槽内壁面产生的最大剪切应力降低 19.01%;最大流体速度降低 11.46%。

关键词: 仿生设计; 耕槽刀; 有限元; 两相流仿真

Abstract: In order to shorten the filtration period of wort in the lauter tun and improve the quality of wort, A bionic raking knife suitable for the operation of the lauter tun was designed. The biological model of mole cricket claw teeth of its digging foot was reconstructed, and the dynamic process of claw teeth wedging into soil was simulated. According to the simulation results, the claw tooth T4 has the highest similarity with the design objectives of raking knife. The key contour curve is extracted from the biological model of claw tooth T4, and the curve formula is fitted with the coordinates of several points of the curve, and the fitted curves are generated. The fitting curves are applied to the design of plow contour line of bionic raking knife and the main contour line of horizontal section of blade board. Finally, the design scheme was verified by simulation. The results show that, com-

pared with the prototype, the maximum shear stress on the surface of the raking knife is reduced by 18.90%; the maximum shear stress on the inner wall of the lauter tun is reduced by 19.01%; and the maximum fluid velocity is reduced by 11.46%.

Keywords: bionic design; raking knives; FEA; two-phase flow simulation

过滤槽法是一种传统的过滤麦芽汁的方法,世界上大约 75% 的啤酒酿造使用的是过滤槽生产的麦芽汁^[1]。耕槽刀作为过滤槽的关键部件,通过绕中心轴旋转耙松被压实的麦糟层,实现加速麦芽汁过滤和辅助洗槽的功能^[2-3],达到缩短收集麦芽汁时长,保证麦芽汁质量,提高啤酒酿造品质的目的。然而目前与耕槽刀相关的著述和文献较少^[4-5],耕槽刀的设计和制造也存在较大的随意性,主要依靠经验,现用耕槽刀的形态是在生产中逐步改良的结果。仿生设计通过对自然生物功能及形态^[6]进行研究借鉴,能有效解决工程问题^[7]。课题拟通过对功能相似的生物形态特征进行系统的分析,采用仿生设计方法,以实现对流体的低剪切应力、优化流场特征为目标,解决耕槽刀优化设计的问题。

1 耕槽刀功能分析

耕槽刀由上下两个主要部分构成,如图 1(a)所示,上部分称为刀板,其截面呈楔形;下部分称为耕犁,其底面呈三角形。在实际应用中常见的耕槽刀通常分为单脚耕槽刀、双脚耕槽刀、燕尾耕槽刀(见图 1)^[8]。耕槽刀以过滤槽中心轴为圆心慢速旋转,远离轴的耕槽刀线速度逐渐增大,因此在大型过滤槽中,随旋转半径不同会装备不同形式的耕槽刀,确保能均匀耕槽。

课题的优化设计对象是单脚耕槽刀,通过逆向工程方法获得原型耕槽刀的三维模型。基于流体力学原理,

基金项目:国家自然科学基金青年基金(编号:51405341);天津市自然科学基金(编号:15JCYBJC19300)

作者简介: 张志丰,男,天津科技大学在读博士研究生。

通信作者: 张峻霞(1968—),女,天津科技大学教授,博士生导师,博士。E-mail: zjx@tust.edu.cn

收稿日期: 2020-07-07

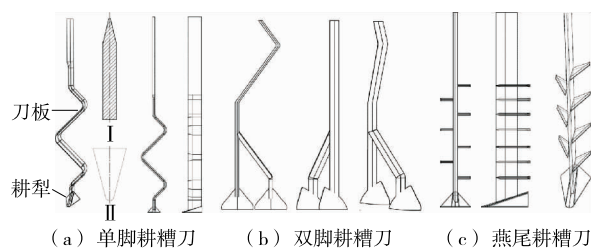


图 1 耕槽刀结构与形式

Figure 1 Structure and form of raking knives

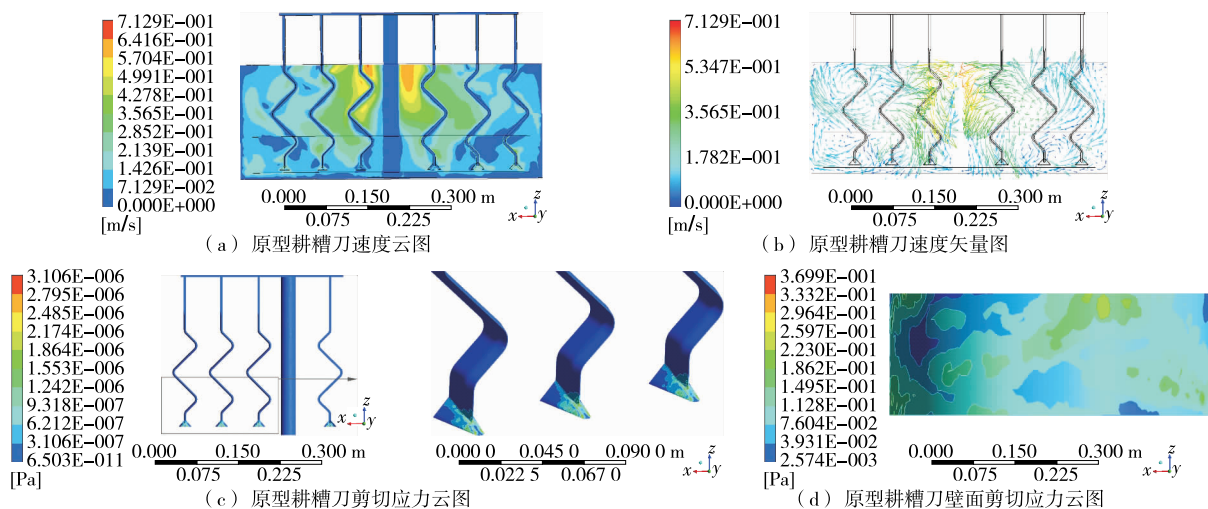


图 2 原型耕槽刀仿真模拟结果

Figure 2 Simulation results of prototype raking knife

域流场流动方向比较混乱[图 2(b)],流体的流速范围为 $0.000 \sim 7.129 \times 10^{-1} \text{ m/s}$;剪切应力云图显示耕型曲面位置产生的剪切应力较大[图 2(c)],应力值范围为 $6.503 \times 10^{-11} \sim 3.106 \times 10^{-6} \text{ Pa}$,在过滤槽壁面位置因流体与壁面发生相对运动而产生剪切应力,壁面切应力分布不均匀[图 2(d)],应力值范围为 $2.574 \times 10^{-3} \sim 3.699 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ 。

2 生物形态及功能相似性分析

过滤槽法是利用滤饼过滤的方法,将沉降的麦糟层作为过滤介质,因此在耕槽过程中需保护麦糟层结构,保证耕槽刀在糟层内穿行时不产生过大的剪切力,同时要减小对流体的扰动和推力,避免流体与壁面之间出现相对运动。针对这些设计要求,仿生耕槽刀的设计目标为:降低耕槽刀对麦糟层产生的剪切力,耕槽时不产生湍流、不破坏糟层结构、不压实下方糟层。

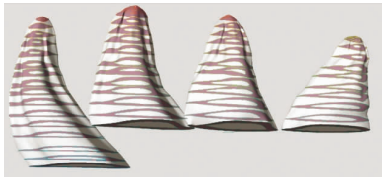
对自然界有类似功能的生物进行筛选,发现蜈蚣爪趾在楔入土壤时有相似性。蜈蚣爪趾在楔入土壤时,因其特殊的楔形构形,能够快速楔入土壤,在楔入过程中对上层土壤的松土能力强,同时不会对下层土壤产生扰动。两者在功能特征上具有一定的相似性。

使用 Fluent 仿真方法,模拟耕槽刀在过滤槽内耙松麦糟的耕槽过程。仿真试验设定在直径 800 mm 、高 300 mm 的过滤槽内以双臂耕槽机各带动 3 个耕槽刀旋转耕槽,转速设定为 10 r/min ,槽内流体设定为固液两相流,其中液相麦芽汁密度 1076 kg/m^3 ,黏度 $0.002 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$,固相麦糟颗粒设定为直径为 6.88 mm 的球体,密度 2000 kg/m^3 。运算后绘制速度云图、速度矢量图和剪切应力云图见图 2。原型耕槽刀速度云图显示在靠近中心轴区域的流体速度最高[图 2(a)],速度矢量图显示该区

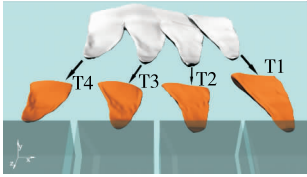
对蜈蚣挖掘土壤的过程进行仿真分析,可以直观地了解各个爪趾在挖掘时的力学特征。首先建立蜈蚣爪趾的三维模型,提取试样的分层截面图像是构建爪趾逆向模型的基础,将试样及定位参照物用树脂包埋,逐次打磨一定的高度,使用徕卡 LEICA-S6D 体视显微镜对每次打磨后的蜈蚣爪趾截面进行图像采集。依次提取试样轮廓曲线,按顺序及相邻截面距离将样条曲线垂直移动到相应空间位置。对 17 个截面切片的内外轮廓曲线进行放样,分别得到蜈蚣爪趾的外侧表皮生物模型和内腔生物模型,将两个生物模型进行组合完成 4 个爪趾的三维模型[图 3(a)],分别对 4 个爪趾进行有限元分析模拟其在土壤中的挖掘过程[图 3(b)]。

3 蜈蚣爪趾楔入土壤动力学有限元仿真分析

为了明确 4 个爪趾在楔入土壤时的力学差别和对土壤作用效果的差别,爪趾以一定角度楔入土壤,选取 23.7° 楔入土壤,其中 23.7° 是在试验中测得爪趾挖掘力最大时的角度^[9-10],试验中保证 4 个爪趾在胫节上的相对角度不变,分别设定相同的运动条件和相同的土壤材料参数进行仿真模拟,运算得到土壤产生的最大应力和土壤的



(a) 爪趾三维模型及构成切片



(b) 有限元三维模拟

图3 爪趾的三维模型

Figure 3 Three dimensional model of claw teeth

最大位移情况。爪趾模型采用前文通过逆向建模方法构建的生物模型。将爪趾模型的趾尖移动到恰好接触土壤模型的位置,爪趾的运动特征设定为以 0.05 s 的时间楔入土壤模型 10 mm。土壤参数采用 LS-DYNA971 的土壤材料 MAT147(MAT_FHWA_SOIL),该模型采用的是基于 Mohr-Coulomb 准则修正的 Drucker-Prager 准则^[11],其屈服表面的数学表述

$$F = -P \sin \varphi + \sqrt{J_2 K(\theta)^2 + \gamma^2 \sin^2 \varphi} - c \cos \varphi, \quad (1)$$

式中:

F ——屈服面;

P ——压力,Pa;

φ ——内摩擦角,°;

J_2 ——应力偏张量的第二不变量;

$K(\theta)$ ——应力罗德角函数;

c ——黏聚力,N;

γ ——定义修正后屈服面和标准 Mohr-Coulomb 屈服面之间贴合度的参数。

土壤参数设置^[12]如表 1 所示。

结果(表 2 和表 3)显示,爪趾 T4 在以 23.7°楔入土壤时对土壤产生的应力为 4.044 Pa,在 4 个爪趾中相对最小,爪趾 T1 楔入土壤时产生的应变最小,为 18.34 mm。在选取仿生原型时根据耕槽刀的设计目标:以应力相对最小为标准,选择土壤应变相对较小的生物原型。因此选择以爪趾 T4 为生物形态原型,提取爪趾的生物轮廓曲线,仿生耕槽刀耕犁采用 23.7°的楔入角度。

表 1 土壤主要参数设置

Table 1 Soil parameter

土壤密度/ (g · mm ⁻³)	体积模 量/MPa	剪切模 量/MPa	内摩擦 角/°	黏聚力/ MPa	含水率/ %
2.08E-003	35	20	0.436	0.022	3.4

表 2 土壤最大应力

Table 2 Maximum stress of soil

Pa

爪趾	T1	T2	T3	T4
应力值	4.683	4.929	4.978	4.044

表 3 土壤最大应变

Table 3 Maximum strain of soil

mm

爪趾	T1	T2	T3	T4
应变值	1.834E+001	4.753E+001	6.487E+001	2.848E+001

4 仿生耕槽刀设计与分析

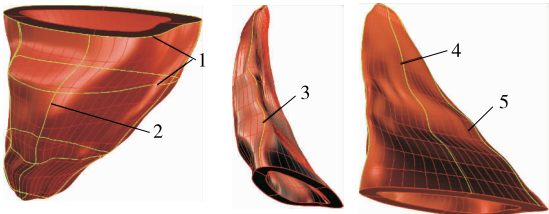
由获得的蜈蚣爪趾逆向模型可得模型的网格曲线,抽离紧贴模型曲面的网格曲线(轴向、径向方向的生物曲线),如图 4 所示。

提取蜈蚣爪趾的生物轮廓曲线,采用投影方法,取与趾楔入土壤运动方向平行的平面,将轮廓线投影到平面获得曲线(如图 5 所示)。对爪趾轮廓线进行投影获得投影曲线后,对投影曲线进行拟合,获得曲线拟合方程:

$$\varphi(x) = A_1 x^3 + A_2 x^2 + A_3 x + A_4. \quad (2)$$

方程参数 A_1, A_2, A_3, A_4 见表 4 中爪趾 T4 拟合公式参数。

提取爪趾生物曲线时,以爪趾 T4 的模型为基础,提取爪趾两侧(上/下)边缘线及内侧凸筋曲线,趾根部内侧截面线。将提取的生物曲线进行拟合,其拟合曲线 R^2 值均大于 0.96(见表 4)。



1. 截面曲线 2. 凸筋曲线 3. 趾下侧边缘线 4. 外侧面曲线 5. 趾上侧边缘线

图 4 爪趾 T4 网格边缘轮廓示意图

Figure 4 Outline of T4 mesh edge of claw toe

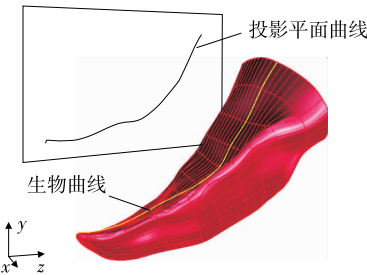


图 5 投影方法获得生物曲线的平面线

Figure 5 Two-dimensional curve of biological curves obtained by projection method

表 4 爪趾 T4 拟合公式参数
Table 4 Parameters of fitting formula of claw tooth T4

拟合生物曲线名称	A1	A2	A3	A4	R ²	X 区间/mm
凸筋曲线	-0.152 8	0.075 5	0.136 9	0.086 6	0.980 2	-1.816~0.000
趾下侧边缘线	0.330 8	0.961 2	-0.079 0	0.177 5	0.982 3	-1.555~0.000
趾上侧边缘线	-0.357 2	0.009 0	0.058 8	0.120 5	0.972 4	-1.543~0.000
趾根部内侧截面线	-0.163 4	-0.214 7	0.833 5	0.052 0	0.968 3	0.000~1.713

将拟合曲线分别应用于仿生耕槽刀耕犁和刀板的设计中。如图 6 所示,以爪趾的下边缘线拟合得到的曲线作为仿生耕槽刀的曲线 *ab*,趾上边缘线为原型拟合后得到曲线 *ac*,凸筋中线为原型拟合后得到曲线 *ad*,曲线 *bc* 为爪趾根部内侧截面曲线拟合曲线。由爪趾的仿真结果分析可知,趾 T4 以 23.7°角楔入土壤所实现的功能符合耕槽刀的设计目标,所以耕犁与水平面呈 23.7°角。

仿生刀板的主体形态与原型刀板保持一致,为蛇形刀板形态,弯曲位置呈 90°角。仿生耕槽刀刀板截面中曲线 *ab*、*ae* 为爪趾凸筋曲线的拟合曲线。将仿生方案模型尺寸放大到与原型耕槽刀一致大小,完成仿生耕槽刀的设计过程。

5 仿生耕槽刀与原型耕槽刀对比试验

研究证实^[13-17]仿真结果和平台试验结果具有相同的变化趋势,证明仿真结果在对比方案之间的性能差异方面具有参考性。

对仿生耕槽刀进行仿真试验,将仿真结果与原型耕槽刀的结果进行对比。仿生耕槽刀的仿真试验参数设置与原型耕槽刀仿真试验相同。从流场速度云图(图 7)可以看出,仿生耕槽刀耕犁位置远离中心轴的耕犁周围流体速度最高,越靠近中心位置速度越低;刀板附近流体速度分布相反,靠近中心轴的刀板周围流体速度最高。

从原型耕槽刀的耕槽速度云图[图 2(a)]可以看出,流体速度分布不均匀,过滤槽中心轴靠近液面的流体速度较高,仿生耕槽刀的云图特征与原型方案相似,其中仿生方案的流体速度最大值低于原方案,仿生耕槽刀的刀板对糖化醪的搅动作用比原型方案小,流体流速较大区域均位于靠近中心轴的两个刀板,由表 5 可知,仿生方案产生的流体速度最大值比原型产品减小 11.46%,更能保护已经形成的上层糟层;在耕槽刀耕犁下面的精滤层差别较大,结合速度矢量图特征(图 8)可以看出仿生耕槽刀

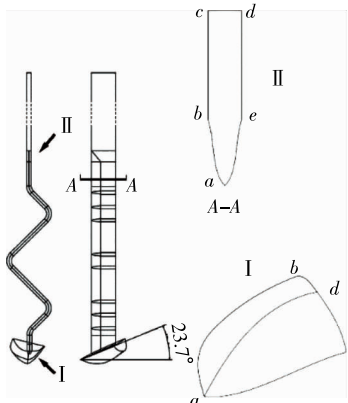


图 6 仿生耕槽刀结构图示
Figure 6 Structure of bionic raking knife

精滤层比原型产品更稳定,速度更小。

如图 8 所示,仿生耕槽刀对醪液流体区域作用后没有产生明显的湍流,符合过滤槽最理想流体特征。与原型耕槽刀相比较可以看出仿生耕犁对最底层的精滤层产生的向下速度小于原型耕犁,可以有效防止在耕槽过程中压实底层的精滤层。

耕槽刀在旋转过程中直接对麦糟产生剪切应力,图 9 反映了仿生耕槽刀在降低剪切应力方面的优势,特别是耕犁部件位置。原型耕犁表面会产生较大的剪切应力[图 2(c)],这会破坏麦芽颗粒和麦糟层的结构,导致过滤麦芽汁混浊的问题,仿生方案中剪切应力在耕槽刀上分布均匀,仅在耕犁的尾部出现较大的剪切应力。耕槽过程中麦糟与壁面之间会发生相对运动或有相对运动趋势,壁面产生剪切应力。理想条件下麦糟与壁面之间不发生相对运动,壁面剪切应力为 0,所以壁面产生的剪切应力也是评判耕槽效果的一个标准,由表 5 计算出仿生方案比原型方案在壁面位置产生的剪切应力最大值低 19.01%,仿生耕槽刀表面产生的剪切力降低了 18.90%。

表 5 仿生耕槽刀与原型耕槽刀仿真结果对比
Table 5 Comparison of simulation results of bionic and prototype raking knife

耕槽刀类型	静止坐标系下的绝对速度/(m·s ⁻¹)		刀体剪切应力/Pa		槽内壁剪切应力/Pa	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
仿生耕槽刀	6.312E-001	0.000	2.519E-006	8.534E-012	2.996E-001	3.382E-003
原型耕槽刀	7.129E-001	0.000	3.106E-006	6.503E-011	3.699E-001	2.574E-003

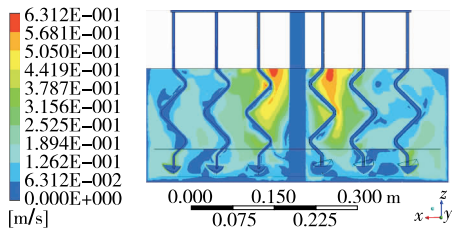


图7 仿生耕槽刀速度云图

Figure 7 The cloud chart of velocity of bionic raking knife

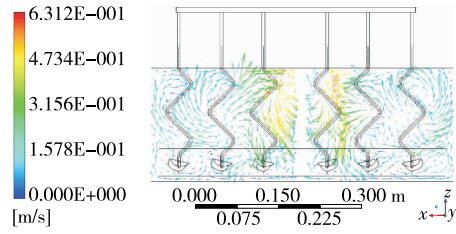
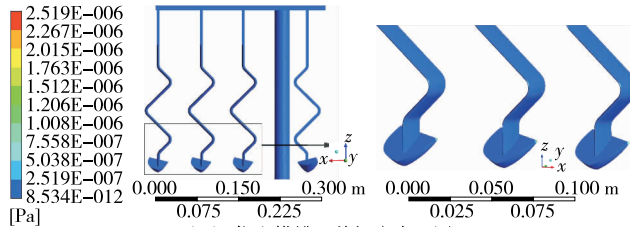
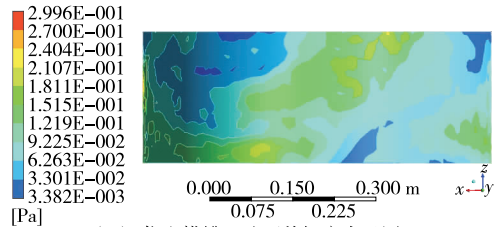


图8 仿生耕槽刀流体速度矢量图

Figure 8 Fluid velocity vector chart of bionic raking knives



(a) 仿生耕槽刀剪切应力云图



(b) 仿生耕槽刀壁面剪切应力云图

图9 仿生耕槽刀剪切应力云图

Figure 9 The cloud charts of wall shear of bionic raking knives

6 结论

(1) 通过对爪趾挖掘土壤过程的有限元动力学仿真分析,发现蜈蚣挖掘足爪趾 T4 楔入时土壤应力相对最小、土壤应变较小,符合耕槽刀的设计要求,所以选择爪趾 T4 作为耕槽刀仿生设计的生物原型。

(2) 拟合爪趾 T4 的主要生物曲线,将拟合曲线应用于仿生耕槽刀的设计,对仿生设计方案与原型方案分别做仿真分析,得到的仿真结果显示仿生耕槽刀对糖化醪液的搅动作用比原型耕槽刀更小,剪切应力较原型方案明显下降,更适宜耕槽操作。

参考文献

- [1] HENNEMANN M, GASTL M, BECKER T. Inhomogeneity in the lauter tun: A chromatographic view[J]. European Food Research and Technology, 2019, 245(3): 521-533.
- [2] KÜHBECK Florian, BACK Werner, KROTTENTHALER Martin. Influence of lauter turbidity on wort composition, fermentation performance and beer quality: A review[J]. Journal of the Institute of Brewing, 2006, 112(3): 215-221.
- [3] TIPPMANN J, SCHEUREN H, VOIGT J, et al. Procedural investigations of the lautering process[J]. Chemical Engineering & Technology, 2010, 33(8): 1 297-1 302.
- [4] 马婷. 高比例玉米淀粉辅料麦芽汁过滤堵塞的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 3-6.
- [5] 林兴华, 刘海洋, 徐孝雅, 等. 麦芽汁的压滤研究(1): 糖化醪液和麦芽汁的物性参数研究[J]. 啤酒科技, 2009, 11(5): 36-41.
- [6] TANVIR Mustafy, IRÈNE Londono, ISABELLE Ville-

mure. Experimental and finite element analyses of bone strains in the growing rat tibia induced by in vivo axial compression[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2019, 94: 176-185.

- [7] 檀润华, 曹国忠, 刘伟. 创新设计概念与方法[J]. 机械设计, 2019(9): 1-6.
- [8] 张志强. 啤酒酿造技术[M]. 北京: 轻工业出版社, 2011: 29-35.
- [9] 张鹏涛. 基于虚拟仪器的挖掘力测试系统的研制[D]. 天津: 天津科技大学, 2017: 54-55.
- [10] ZHANG Zhi-feng, ZHANG Yan, ZHANG Jun-xia, et al. Structure, mechanics and material properties of claw cuticle from mole cricket Gryllotalpaorientalis[J]. PloS one, 2019, 14(9): e0222116.
- [11] LEWIS B A. Manual for LS-DYNA soil material model 147 (FHWA-HRT-04-095)[R]. [S.l.]: Federal, Highway Administration, USA, 2004.
- [12] 丁峻宏, 金先龙, 郭毅之, 等. 土壤切削大变形的三维数值仿真[J]. 农业机械学报, 2007(4): 124-127.
- [13] 赵淑红, 谭贺文, 张先民, 等. 新型锐角开沟器的设计及数值模拟[J]. 农机化研究, 2017, 39(11): 44-48, 58.
- [14] 张智泓. 田间土壤表面微形貌加工滚动触土部件与土壤相互作用及仿生几何结构[D]. 长春: 吉林大学, 2014: 95-98.
- [15] 郭志军, 周德义, 周志立. 几种不同触土曲面耕作部件的力学性能仿真研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 71-75.
- [16] 程菊, 安家彦, 董文勇, 等. 基于 CFD 技术的瓶装啤酒隧道式巴氏杀菌过程研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(8): 98-102.
- [17] 赵洪亮. 新型机械搅拌槽中多相流动的物理与数值模拟[D]. 沈阳: 东北大学, 2014: 125-127.