

超声波辅助切割技术在食品加工领域的应用

许唯栋^{1,2}, 王婧怡^{1,2}, 王文骏^{1,2,3}, 周建伟^{1,2,3}, 徐恩波^{1,2,3}, 刘东红^{1,2,3*}

(¹浙江大学生物系统工程与食品科学学院 智能食品加工技术与装备国家地方联合工程实验室
浙江省农产品加工技术研究重点实验室 浙江省食品加工技术与装备省级工程实验室 杭州 310058

²浙江大学宁波研究院 浙江宁波 315100

³浙江大学馥莉食品研究院 杭州 310058)

摘要 切割是食品加工中的重要环节。传统的切割方式需要较大的切割力,易造成切面破损和污染,从而降低食品品质 and 安全性。超声波辅助切割作为一种新型加工技术,将超声高频振动附加到刀具上对物料进行周期性的微量切割,改变了物料的破裂方式,具有切割力小、切面平整和污染少等优点,已成为食品加工领域的研究热点。本文介绍超声波辅助切割装置与切割参数,阐述超声波辅助切割的基本原理,分析超声波辅助切割中,刀具参数、切割过程参数和物料特性对切割性能的影响,以及食品储藏品质的变化,探讨超声波辅助切割技术的优势以及未来的发展方向,旨在推动超声波辅助切割该技术在食品加工领域中的应用与发展。

关键词 食品加工; 超声辅助切割; 切割性能; 切割参数; 储藏品质

文章编号 1009-7848(2023)02-0398-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.02.038

切割是将带有锋利刀刃的刀具压向待切割物料,将大块的物料切分成规定大小、尺寸和质量的过程,是确保后续食品包装和储运的关键步骤,在食品加工中扮演着重要的角色^[1-2]。根据 2019 年联合国粮农组织的统计,中国的农作物和食品的生产指数相比于 2010 年增长约 15%^[3]。此外,3D 打印和人造肉技术的快速发展,使食品具有多种多样的成分和物性,对切割行业提出了挑战^[4-5]。在食品切割加工中,除了一些定量的标准外,切面的粗糙度、几何稳定性、切面品质以及刀具污染、环境污染和能源消耗情况也至关重要^[6]。常规的食品切割方式主要有线切割、锯切割和渐开线切割等^[7],其在切割脆性食品时,使物料受到强烈的冲击作用,从而产生大量碎屑以及崩边现象,造成环境污染和刀具磨损;在切割黏弹性食品时,由于食品的高弹性和黏连性,使物料产生不可逆的变形和黏刀情况,从而降低切面品质并引起交叉污染^[8-9]。为满足现代化食品切割的需要,亟需开发一种新型

的切割技术。

超声波辅助切割(Ultrasonic-assisted cutting, UAC)是一种新型的非热切割技术^[10-12],将 20~50 kHz 的超声振动附加到目标刀具上,使刀具产生周期性的高频振动,改变了刀具与物料之间的接触和切割方式,是一种高效节能、绿色环保的切割技术^[13-14]。UAC 特殊的切割方式使其具有切割力小、刀具磨损小和切面光滑平整等优势,在农作物收割^[15]、医学手术切割^[16]和航空航天材料加工^[17]等领域得到广泛的应用,然而,在食品切割领域中的研究仍处于起步阶段。目前还没有文献对 UAC 在食品加工行业中的应用进行系统性的总结。本文介绍 UAC 装置的组成和相应的切割参数,阐述 UAC 的基本原理;分析在 UAC 中,刀具参数、切割过程参数和物料特性对切割性能的影响,以及食品储藏品质的变化;探讨 UAC 的优势以及未来发展方向,为食品领域的 UAC 切割技术的研究和应用提供参考。

收稿日期: 2022-02-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0400301);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2021QN6002)

第一作者: 许唯栋,男,硕士

通信作者: 刘东红 E-mail: dhliu@zju.edu.cn

1 超声波辅助切割装置与切割参数

1.1 切割装置

UAC 装置的开发是其技术实现工程应用的关键。高精度、稳定性的 UAC 系统有助于其在工业中的生产和应用。

图 1 所示为 UAC 装置, 主要由超声波发生器、换能器、变幅杆和切割刀具 4 部分构成^[18]。超声波发生器可将市电转换为高频交流电信号, 传输给超声波换能器; 换能器通过压电陶瓷将传输来的电信号等频率转换为线性机械振动信号; 变幅杆的作用有: 声阻抗匹配、放大机械振动信号、固定整个机械系统和避免发热现象和化学腐蚀等影响换能器的稳定性; 切割刀具作为整个装置的最终负载, 一方面进一步放大机械振幅信号, 另一方面将超声波能量聚集到刀刃上, 使得待切割物料在高频能量的冲击下瞬间破裂, 大大降低物料

1.2 切割参数

UAC 的基本参数主要有刀尖振动频率 f (Hz)、振幅 a (m)、超声振动速度 v_{us} (m/s)、切割速度 v_c (m/s) 等。由于超声振动是周期性的振动信号, 从微观的角度来看, 切割刀刃中某个离散粒子在时域中的振动位移 x (m) 为^[19]:

$$x = a \sin(\omega t) = a \sin(2\pi f t) \quad (1)$$

式中, ω ——角速度, rad/s; t ——时间, s。

超声振动速度 v_{us} (m/s) 表示为:

$$v_{us} = \dot{x} = a\omega \sin(\omega t) \quad (2)$$

可以得出 v_{us} 的最小值为 0, 最大值为 $a\omega$ 。

UAC 的真实切割速度 v (m/s) 为^[20]:

$$v = v_c + v_{us} \quad (3)$$

当 $v_c > a\omega$ 时, 刀具与物料一直处于接触状态, 即为普通切割方式; 当 $v_c < a\omega$ 时, 为 UAC, 刀具与物料接触的有效时间仅占整个周期中的很小一部分。因此 $v_{us}(\max) = a\omega = 2\pi a f$, 其中 v_{us} 为临界超声振动速度, 与振幅 a 和频率 f 有关。

UAC 完成一次物料切割所需要的能量 W_c (J) 可以表示为:

$$W_c = \int_0^s F_c(s) ds \quad (4)$$

式中, F_c ——切割力, N; s ——切割距离, m。

W_c 由 4 部分组成^[8]:

$$W_c = W_E + W_{D,V} + W_{frict} + W_{fract} \quad (5)$$

式中, W_E ——弹性变形耗散能, J; $W_{D,V}$ ——黏性流耗散能, J; W_{frict} ——摩擦耗散能, J; W_{fract} ——破裂耗散能, J。

最后, 为了比较 UAC 与常规切割之间的差

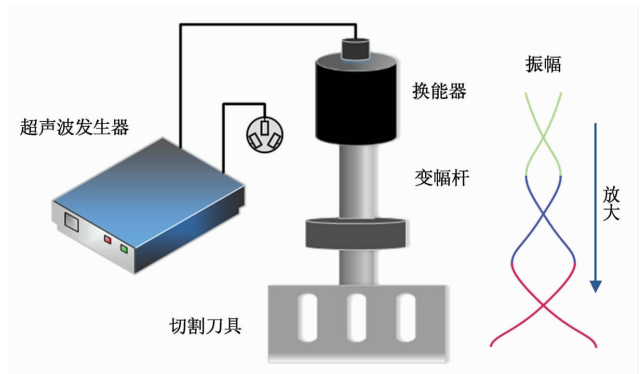


图 1 UAC 系统的装置组成

Fig.1 The device composition of the UAC

别, 引入无量纲参数 K_w :

$$K_w = W_c / W_0 \quad (6)$$

式中, K_w ——常规切割所做的功, J。

当 $K_w < 1$ 时, 表明 UAC 比常规切割更节能; 当 $K_w = 1$ 时, 表明 UAC 和常规切割能耗类似; 当 $K_w > 1$ 时, 表明 UAC 比常规切割更耗能。

2 超声波辅助切割的基本原理

UAC 中刀具对物料的切割原理如图 2 所示。

图 2a 表明在 UAC 中, 刀具振动方向与切割方向一致。超声振动位移随时间变化情况如图 2b 所示, 刀头在点 O 处以振幅 a 和超声波频率 f (振动周期 $T = 1/f$) 做周期性的振动位移, 其表示为式 (1); 切割速度随时间变化情况如图 2c 所示, 超声振动速度 v_{us} 表示为式 (2), 切割速度为 v_c , 真实切割速度为 v 表示为式 (3)。在一次 UAC 的周期中 ($v_c < a\omega$), 刀头振动前进并在 t_a 处与物料接触, 此时表明切割开始; 在 t_b 处, 真实速度 v 逐渐降低到 0, 表明切割结束, 此时刀头开始振动后退。因此, 有效切割时间 t_c (s) 可以表示为^[21]:

$$t_c = (t_b - t_a) / T \quad (7)$$

因此, t_c 仅占整个周期内的很小一部分。从图 2b 和 2c 还可以得出:

$$v_c + a\omega \cos(\omega t_b) = 0 \quad (t = t_b) \quad (8)$$

$$a \sin \omega (T + t_a) - a \sin \omega t_b = v_c (T + t_a - t_b) \quad (9)$$

由式 (7)~(9) 可以得出:

$$v_c (1 - t_c) = 2af \sin(\pi t_c) \cos[\cos^{-1}(-v_c / (2\pi \pi a f)) - \pi t_c] \quad (10)$$

从式 (10) 可以得出: 在 $v_c < a\omega$ 的情况下, t_c 仅

取决3个重要的参数,分别为:超声频率 f 、超声振幅 a 和切割速度 v_c 。由于仅在有效切割时间 t_c 内发生连续切割行为,因此切割力也仅出现在该时间段内,这意味着较低的 t_c 值可以有效降低UAC的切割力。此外,在 t_c 时间段内,由于刀刃的瞬时速度和加速度极大,且超声作用在切割位点产生很大的能量,因此有效地减短了材料的弹性形变时间和塑性断裂时间,使黏弹性材料和塑性材料

在切割瞬间趋向于脆性断裂,减小切割形变。

UAC是在刀具上附加超声振动,使超声振动能量在刀刃上聚集并作用到物料的切割位点,在极短的时间内完成微量的切割,其以极大的瞬时速度和加速度对物料进行周期性冲击,从而改变了物料瞬时物性和断裂机制,缩短了刀具与物料之间的有效接触时间,减小了摩擦力,降低了切割温度,改善了切割性能^[13]。

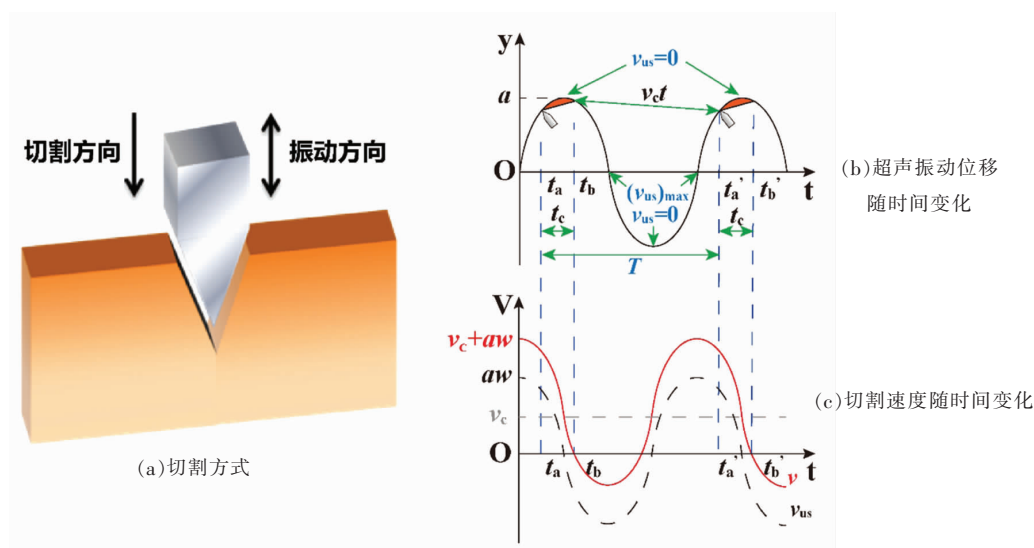


图2 UAC中刀具对物料的切割原理^[19]

Fig.2 The cutting mechanism of the tool to the material using UAC^[19]

3 超声波辅助切割在食品领域的研究与应用现状

UAC是将超声振动与指定刀具进行耦合的一种新型切割技术,具有高频间歇式振动切割特点,可以有效提高切面光滑度、减小切割力和切面污染等不良现象。Carlson等^[22]发现刀刃在超声的作用下变得更锋利,且在15 min内温度仅上升0.4℃。目前,UAC虽已在金属加工领域中得到了广泛的应用,但在食品领域内的研究处于起步阶段。基于此,本文就UAC在刀具参数、切割过程参数、物料参数和对切后的食品品质与储藏期的影响进行分析和讨论,旨在进一步理解UAC在食品领域中的加工现状和影响因素,并扩大其在食品领域中的研究和应用范围。

3.1 刀具参数对食品切割的影响

在工业化的切割加工中,刀具的材料和结构

对切割有很大的影响,需要在重量、锋利度、刚度、耐久度和成本等因素之间进行权衡^[23]。

在UAC系统的设计中,ANSYS是最常用的有限元分析软件,用来计算超声波切割装置各部位的谐振频率,从而指导刀具参数设计,实现更高效的切割^[24-25]。狭槽是UAC刀具上的特殊几何结构,合理的狭槽设计可以使超声的振动形式为纵向振动,减少横向无效振动,进而提高振动效率和刀具稳定性。张水田等^[26]在设计蛋糕切割的超声刀具时,发现刀面上的狭槽数量对UAC的稳定性和均匀性有很大的影响,通过ANSYS分析得出4个狭槽最佳,设计出的超声刀具在20 kHz附近以纵向振动为主,并且振幅均匀,谐振频率精确。张云电等^[27]根据超声波振动理论,利用解析法设计了切割刀具的模型,并使用ANSYS软件进行模态分析,发现超声横向振动的节点处应力比较集中,且易产生横向振动,因此将狭槽设计在该处来抑制

横向振动。试验表明设计的 20 kHz 宽刃 UAC 系统振幅均匀且稳定性好。Koc 等^[15]同样发现在刀具上设计狭槽,可以加强纵向的超声振动效果,提高 UAC 的稳定性。

较小的刀尖半径使刀具更锋利,而太小会降低刀具强度,出现崩边情况。在 UAC 刀尖半径的设计中,Xiao 等^[21,28]提出了大刀尖半径的 UAC 策略,试验表明 0.02 mm 的刀尖半径可以显著提高刀具强度,切割稳定性和切面光洁度。

超声刀具的几何形状设计主要采用有限元分析法^[25-26],合理的 UAC 刀具参数设计可以提高切割性能。目前,UAC 的刀具参数对食品切割的影响主要集中于狭槽和刀尖半径,细节处的设计却少有研究。在传统的刀具参数设计中已大量展开了楔角^[29]、刀尖半径^[30]、锋利度^[31-32]、刀面光洁度^[33]、表面涂层^[34]和表面织构^[35-36]对切割影响的研究,对 UAC 的刀具参数设计有指导作用。因此,后续可以逐步研究在 UAC 中,上述刀具参数对食品切割的影响。

3.2 切割过程参数对食品切割的影响

在食品领域的 UAC 中,超声切割过程参数对食品切割起着关键性的作用,合理的过程参数选择可以提高切割品质。式(2)表明超声振动速度与频率和振幅有关,式(3)和式(10)表明有效切割时间与频率、振幅和切割速度有关。因此,在 UAC 中,超声频率、振幅和切割速度是主要的切割过程参数。

表 1 总结了有关 UAC 的切割参数对食品切割影响的研究。Astashov 等^[37]通过理论和试验相结合的方式,得出当 $v_c < a\omega$ 时,切割速度越快,切割力越大;切割振幅越大,切割力越小的结论。King^[38]发现提高超声振动速度可以减少摩擦力,以及表面断裂能和塑性能,即缩短弹性应变时间。然而,较大的超声振动速度需要匹配更快的切割速度,对硬件设备提出了巨大的挑战,因此需要根据实际需求确定切割过程参数。如图 3 所示,Zahn 等^[39]研究不同超声振动速度对酵母饺子的切割力和切割功的影响。从图 3a 中可以看出,无超声作用下:0~2 mm 为初始切割阶段,2~15 mm 为样本变形阶段,15~26 mm 为切割破裂阶段,26~30 mm 为切割结束阶段;而在 UAC 中,切割变形阶段显

著缩短 35%~84.6%,使得最大切割力大约减小 53.6%~77.6%,且超声振动速度越快,变形阶段越短,所需切割力越小。图 3b 为酵母饺子在不同振动速度和频率下的相对切割功变化情况,研究发现:随着最大振动速度的提高,显著降低,当最大振动速度为 1.51 m/s 和 5.03 m/s 的情况下,切割功相比于常规切割分别降低了 46%和 79%,其主要归因于 UAC 的高频周期性振动特性,一方面缩短了有效切割时间;另一方面改变了物料的断裂方式,减小了弹性变形和塑性变形过程,使断裂趋于脆性断裂。

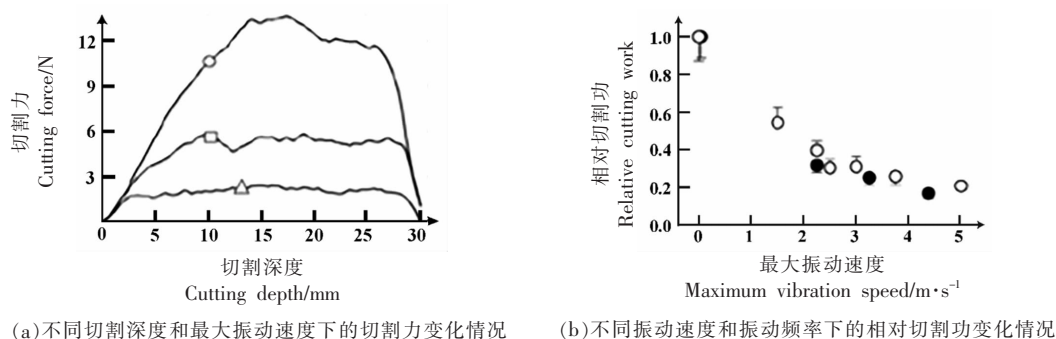
Schneider 等^[40]研究 UAC 能耗与过程参数之间的关系,发现振幅和频率越大,能耗越多,而通过加快切割速度减少切割时间的策略,可以减少总能耗的消耗。因此,需要对 UAC 过程参数进行优化,减小切割力的同时降低能耗。该团队^[41]在另一项研究中发现 UAC 虽可显著降低切割过程中的滑动摩擦力,但改变超声振幅对摩擦力几乎没有影响。通过滑动摩擦力试验,发现食品的表面形态对摩擦力的贡献更大,质地光滑的食品在 UAC 中有“悬停”的现象,可极大地减小摩擦力;而质地粗糙的食品在 UAC 中,易与空气发生高频空气压缩的现象,阻碍滑动摩擦力的减小。UAC 食品的研究均表明:切割速度与切割力之间呈正相关,超声振动速度与切割力之间为负相关,从而振动速度与切割功也负相关^[42]。

在日常的食品切割中,除了正向的挤压运动外,通常还会附加一个垂直于切割方向的滑动运动,将这两种运动方式进行叠加,可以有效的减少切割力^[43]。Atkins 等^[44]在常规正向切割运动中附加不同滑动速度的切割情况,并定义了参数切压比 ξ (滑动方向的速度与正向方向的速度之比),发现在常规切割种, ξ 越大,切割干酪和香肠的切割力越小;而增大 ξ 的同时,切割路径增长,导致摩擦力的作用也越大。该团队通过改变刀刃弧度,使刀具本身具有 ξ 特性,减小食品切割所需要的切割力,从而减少食品破损情况^[45]。King^[38]指出在 UAC 中同样也存在这种现象,通过在正向切割时附加滑动切割可以减小切割力,但该团队没有进一步探讨切割力的减小主要归因于 ξ 还是振动切割特性。Arnold 等^[46]随后对斜切在 UAC 中的作用展开

表1 比较UAC的加工参数对食品切割影响的研究

Table 1 Comparison of various studies on the influence of UAC processing parameters on food cutting

参考文献	物料	试验参数	表征参数	结论
King ^[38]	2种部位的 马肉	频率:0~1 kHz 振幅:0~11 400 μm 切速:40~320 mm/s	切割力 摩擦力 塑性能 断裂能	振速越大,切割力越小,最大可下降10% 物料温度越低,切割力越大,且在-32.5~-5 $^{\circ}\text{C}$ 时,UAC切割力下降不明显 在-5~-1.5 $^{\circ}\text{C}$ 时,UAC可显著减小切割力
Zahn等 ^[39]	9种烘焙食 品	频率:20,40 kHz 振幅:0~35 μm 垂直切速:1 000 mm/min	切割力 切割功 表面形态	在最大振速度下,切割力减小77.6%,切割 功至少减少60%,切面品质好 物料中的声速与切割力减小的程度成反比
Zahn等 ^[42]	16种食品	频率:20,40 kHz 振幅:0~36 μm 垂直切速:0.167~4.17 cm/s	切割力 切割功	相比于常规切割,振动速度越快,切割力减 小约75%,切割功最大下降61% 切割速度越快,切割功越多,最大增加41% 高柔性物料,低速切割好
Schneider 等 ^[40]	6种食品	频率:20,40 kHz 振幅:0~35 μm 垂直切速:300~2 500 mm/min	切割力 功率 切割功 表面形态	食品特性对UAC影响最大,需要对不同食 品进行参数优化 超声振速越大,有/无载功率变大,但相比 于常规切割,切割功显著降低约75% 切割速度越快,能耗越小
Arnold等 ^[49]	8种奶酪	频率:40 kHz 振幅:0~18 μm 垂直切速:1 000~2 500 mm/min	切割力 功率 切割功	食品成分对切割性能影响大 UAC切割功与奶酪的蛋白质含量成正比, 与脂肪在干物质中的含量和水分在非脂肪 固体中的含量成反比, 超声振幅越大,切割力越小,但振幅过大会 导致脂肪松散和释放,降低切面品质
Schneider 等 ^[41]	8种奶酪	频率:40 kHz 振幅:0~10 μm 垂直切速:300 mm/min	切割力 切割功 摩擦力	超声切割降低切割功约63%~92%,降低摩 擦功约40%~75% 振幅与摩擦力和摩擦功无关,可能与切面 形态有关
Koc等 ^[15]	生物茎秆	频率:19.551 kHz 振幅:2.8 μm 垂直切速:3~400 mm/s	切割力 切割功	UAC减小切割力,且最多减少66.85%和 80.58%的柳枝和桔梗茎的切割能 UAC对生物茎秆的损坏小 UAC刀具上开槽可增强刀刃振动稳定性
Arnold等 ^[46]	15种食品	频率:20.9 kHz 振幅:37 μm 水平切速:65,130 mm/s 垂直倾斜角:0 $^{\circ}$ ~45 $^{\circ}$	切割力 切割功	食品特性影响UAC切割性能 斜切角度过大会对样本施加压的作用,使 物料变形,降低切面品质 斜切不能有效解释UAC中切割力减小
陈健 ^[47]	2种面包	频率:20 kHz 振幅:26 μm 水平切速:5~30 mm/s 垂直倾斜角:0 $^{\circ}$ ~60 $^{\circ}$	切割力 切割时间	在UAC面包时,切割速度在5~30 mm/s 时,切割力先减后增,切割时间逐渐减小 切割力和切割时间随倾斜角的增加而增大 UAC的切面品质好



注:a图中,圆圈表示对照组,正方形表示频率为40 kHz,最大振速为1.51 m/s,三角形表示频率为40 kHz,最大振速为5.03 m/s; b图中,白圆圈为40 kHz;黑圆圈为20 kHz。

图3 酵母饺子在不同UAC下的切割力和相对切割功^[39]

Fig.3 Cutting force and relative cutting work of yeast dumplings in various UAC^[39]

了研究,通过对15种不同食品的UAC发现:切割力和切割功的减少主要归因于切割速度和食品物性,斜切不能有效解释该现象;当斜切角越来越大时,压的运动占主导作用,使部分奶酪被压入样品架,品相变差。陈健^[47]在面包的UAC中发现倾斜角度越大,切运动逐渐转变为压运动,导致切割力变大,面包切割时间增长;而在无振动切割中,斜切有效地减小了切割力^[29,48]。在UAC和常规切割中,斜切具有不同的切割表现,可能是因为超声振动速度、切割速度对切割力的减小起主导作用,斜切的影响较小;也有可能是食品的物性差异导致。

超声切割过程参数对食品的切割有很大的影响,合理的频率、振幅、切割速度和切压比可以有效降低切割力、切割功和摩擦力,并提高切割品相和装置寿命。因此,后续研究可以尝试利用深度学习算法、多目标优化算法和计算机仿真来对上述切割过程参数进行优选,以此提高UAC性能。

3.3 物料特性对食品切割的影响

食品的成分和结构对切割有巨大的影响,如多孔和致密的食品、植物基和动物基食品等,各类食品的成分和物性存在较大的差异,呈现出不同的黏弹性、塑脆性,在UAC中的切割表现有较大的差异^[50]。此外,食品是一种温度依赖性物料,不同温度下食品的物性存在较大的差别,影响其UAC性能。因此,需展开物料特性对切割影响的研究。

Schneider等^[51]根据食品在UAC中的表现,将食品在宏观上分为:均匀紧密固体、多孔固体、植

物基和动物基物料,并发现由于超声的热效应和空化效应,植物基和动物基食品易产生次级效应,可以通过优化切割过程参数来减小不良影响^[51-52]。通过比较5种烘焙类食品的UAC发现^[40],食品的物性与能耗显著相关,高水分或高脂肪的致密性食品相比于多孔的食品所需要的切割力更小,在UAC过程中,切面与刀具之间生成了一层润湿性的滑膜,减小了滑动摩擦力。图4所示为奶油面包在UAC和常规切割中的现象,可以发现相较于常规切割,奶油蛋糕在UAC下的品质更高,UAC具有不黏刀和自清洁的优点,适合于黏弹性食品的加工^[47]。Arnold等^[49]比较了8种不同成分的奶酪在UAC中的表现,发现水含量的提高削弱了蛋白质之间的相互作用,降低了奶酪的弹性模量,从而减小了切割力;而低脂高蛋白奶酪因其具有致密性

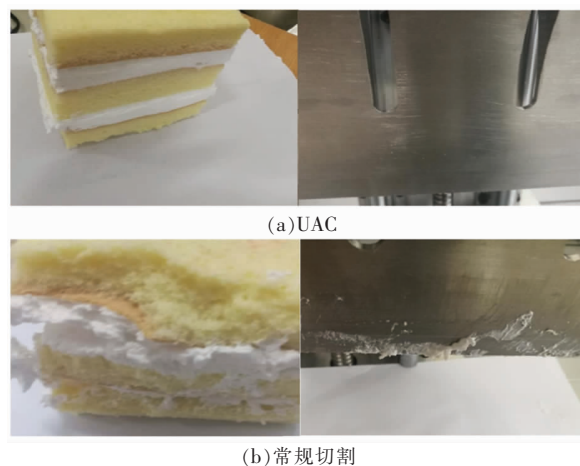


图4 奶油面包的切割情况^[47]

Fig.4 Cutting phenomenon of butter bread^[47]

的结构网络,通常硬度较高,需要更大的分离力。因此,食品的成分极大的改变了其物性,在UAC中有不同的切割表现。此外,在常规切割中,Wu等^[30]表明物料颗粒大小对切割力有较大的影响。目前,UAC还没有研究食品中的颗粒大小对切割性能的影响,后续需完善该方面的研究。

食品具有温度依赖性,温度越低,食品的硬度越大,反之变软。King^[38]探讨了两类冷冻肉的UAC现象,发现温度越低,切割力越大;在-30~-15℃下,两类肉的切割力没有明显差异,可能是因为在低温条件下,肉中的冰晶占主导作用,对切割力的贡献更大,成分的影响较小;在-5~-1.5℃时,冷冻肉仍拥有较大的硬度,每增加一倍切割速度,切割力就增加10%,可能是因为物料不能及时吸收切割冲击能,只能将吸收不了的冲击能反向作用于刀具,抵抗切割运动的进行,从而提高了切割力。Brown等^[53]对不同温度下奶酪、牛肉和培根的常规切割中也同样发现温度越低,所需切割力越大。

由于食品的组分、结构特征和温度会导致物性间存在较大的差别,进而对UAC产生较大影响。因此,为了扩大食品质构特性对UAC的影响研究,后续可利用高分子材料来模拟不同物性的食品,并尝试建立相应的切割数据库,为未来不同特性的食品UAC提供借鉴和参考。

3.4 超声波辅助切割对食品品质与储藏期的影响

UAC在食品切割中,可以减少切割拖尾、变形、破裂和黏刀现象,在切割黏性和脆性食品中有独特的优势,在食品加工领域内逐渐受到了人们的关注。目前,有关UAC在食品中应用的研究大多集中于切割过程中的力学变化,对UAC处理后的食品品质及在储藏期内的影响却鲜有报道。

通常,钝刀在切割中需要更大的切割力,而较大的切割力使切面破损更严重,破坏切面细胞并使其与空气大量接触,从而降低抗氧化活性,降低食品切后品质^[54]。UAC是高频振动切割方式,其切割力和破坏小,并且拥有自清洁能力,减少切割过程中的交叉污染和停机清洗时间,适合对食品进行切割加工^[55]。Yildiz等^[56]研究3种超声振幅和不使用超声对3种切后奶酪的品质和储藏期的影响,通过比较储藏21d内的奶酪切面色泽、pH

值、过氧化物值、表面形态和感官特性发现:经UAC的奶酪表现出更光亮、平滑的切面品质,在储藏期内切面褐变程度小, L^* 值高。同时UAC可以降低奶酪的过氧化物值,其可能的原因是UAC奶酪的切面破损小,因此暴露在空气中的机会小,不易发生氧化反应。虽然在储藏期内UAC后的奶酪感官评分均高于不使用超声切割的奶酪,但差异不显著;此外,50%振幅切割的奶酪品质相对更好。有文献研究了有/无超声对蛇果和金冠苹果切后品质与储藏期的影响^[57]。如图5所示,相比于常规切割,50%振幅的UAC金冠苹果的切面更光滑和光亮,褐变缓慢, L^* 值更高。观察2种切法的扫描电镜图,同样可以发现:常规切割法的苹果表面较粗糙,更多的细胞出现破裂和滑移现象,同时存在几毫米的裂缝,导致细胞液和组织液泄露,褐变严重且切后品质急剧下降;而经UAC的苹果切面致密光滑,细胞损伤小,在14d内保持了更好的品相。经感官评价分析同样可以得出UAC苹果拥有更高的评分,值得注意的是,当切后苹果储藏到第7天和第14天时,经0%和30%振幅的UAC中产生不良的味道,而经40%和50%振幅的UAC中没有发现异味。可能是因为当超声振幅太小,UAC的振动效果不明显,导致细胞破损严重,降低苹果的切后品质;也可能是因为振幅过低导致的超声次级效应明显,降低了切割品质。因此,为了获取

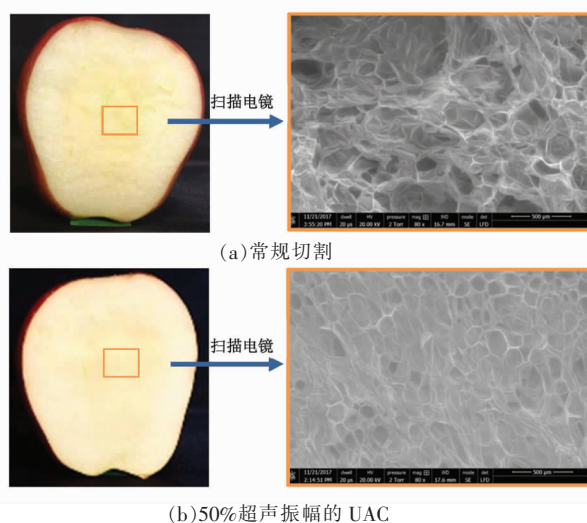


图5 金冠苹果切割面的外观及形态^[57]

Fig.5 Appearance and morphology of section surface in Golden Delicious apple^[57]

最佳的切后品质,需要对 UAC 切割参数进行优化。

UAC 有助于延缓切后食品在储藏期内的品质下降程度,可作为新的切割技术替代传统的切割方法。同时,UAC 具有不黏刀和自清洁的特性,可以有效防止切割过程中的染色和交叉污染等不良现象的发生。因此,UAC 可用于连续快速的切割,提高切后食品品质并提高切割效率和产能,在现代食品加工业领域中有广阔的应用前景。

4 超声波辅助切割的优点

UAC 是一种新型的冷切割技术,通过将超声振动叠加到相应的刀具上,实现对食品的高效切割。与传统切割相比,UAC 主要有以下优势^[47,58]:

1) 降低切割力、摩擦系数和切割温度。由于刀具在超声激励下不断周期性振动,因此刀刃与物料之间的有效接触时间仅占整个振动周期的很小一部分,该时间内的切割距离也是微量的,此时超声波能量聚集在刀刃处,使裂纹处组织软化、熔化、断裂,进而降低切割力,提高切割品质的同时降低切割能耗。此外,刀具的动态特性使刀面上出现滑动层,从而降低摩擦系数和切割温度,减少对食品的破坏。

2) 提高切面品质和产品储藏期。在 UAC 中,刀刃与物料之间的碰撞遵循不灵敏性振动切削机理,使得产品形变非常小,切割处于相对静止状态,提高了切割稳定性和切割精度,切面光滑平整;此外,UAC 有切面熔合作用,一方面防止切面松散破裂;另一方面在切面处形成封膜,减少细胞与空气接触,从而延长储藏期。

3) 减少食品交叉污染和环境污染。在 UAC 中,由于刀具的动态特性,在切割过程中几乎不会发生黏刀现象,减少连续切割或复合食品切割中食品交叉污染的情况;此外,UAC 主要表现为“切割”作用,不存在将物料挤压、打碎和崩坏的情况,因此加工中切屑和碎屑较少,几乎没有环境污染。

4) 刀具磨损小,延长刀具寿命。在 UAC 中,刀具与物料在整个切割周期内的接触时间和作用距离极小,不易产生刀具的切割疲劳;同时切割力、摩擦系数和切割温度的降低,减少了刀刃的磨损状况,从而延长了刀具的寿命。

5 超声波辅助切割在食品领域的展望

UAC 是一种新型的切割技术,因其独特的切割方式和优点,有望取代传统的切割方法。为了打破传统切割能耗高、品质差的壁垒,提高 UAC 在食品领域中的应用范围,需重点开展以下的研究:

1) 在食品的切割中,提高刀具的耐腐蚀性和耐磨性至关重要,因此需要开发新型的智能材料或生物材料制作刀具涂层,以减少食品对刀具的黏附和腐蚀情况,延长刀具的使用寿命。此外,刀具参数如楔角、锋利度、刀面光洁度和表面织构等对 UAC 切割性能的影响还不够完善,需逐一进行研究,以提高切割品质和产能;

2) 不同切割参数对切割品质有较大的影响,在激光刀切割加工应用中,已逐渐采用人工智能算法优化切割过程参数,并取得了较好的结果^[59]。因此,在食品领域的 UAC 中,需要对系统参数、物料参数和切割过程参数进行优化,以及采用多目标优化算法对 UAC 加工中的能耗、产量、碳排放等因素同时进行优化,构建切割模型并逐步建立食品切割领域内的 UAC 数据库,打造高品质、低能耗的现代化食品智能 UAC 方式;

3) 由于食品的组分和结构对其物性有较大的影响,因此需要研究不同食品的力学特性对切割性能的影响,并结合计算机仿真和 UAC 试验对不同黏性、弹性、塑性和脆性食品在切割过程中的破裂机制进行探讨,以构建不同物性的食品在 UAC 中的力学变化和组织的破裂机理,建立不同物性食品在 UAC 作用下的数据库,对未知物料的 UAC 提供指导作用;

4) 随着无损检测技术和化学计量学方法的快速发展,使近红外光谱、高光谱和机器视觉等原位无损检测食品的理化属性成为可能^[60-62]。此外,工业 4.0 和中国制造 2025 的逐步推进,亟需发展现代化食品智能加工技术。因此,在食品的 UAC 中需要结合高精度的传感器(如:视觉传感器、力值传感器、光学传感器等),对食品的物性和状态进行在线检测,帮助切割系统完成切割参数选择;同时开发多刀头切割系统和多自由度切割装置,来提高切割效率和产能,以实现智能化、柔性化和个性化的现代食品切割制造。

目前正处于各类食品的大需求、高品质及绿

色低碳生产的大环境下,UAC技术在食品加工领域中具有广阔的应用空间。

参 考 文 献

- [1] 陈胜姝, 孟祥忍, 屠明亮, 等. 切割方式对免浆猪肉片加工品质的影响[J]. 现代食品科技, 2019, 35(8): 214-219.
CHEN S S, MENG X R, TU M L, et al. Effect of cutting methods on the quality of sizing-free pork slices [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2019, 35(8): 214-219.
- [2] BHARGAVA N, MOR R S, KUMAR K, et al. Advances in application of ultrasound in food processing: A review [J]. *Ultrasonic Sonochemistry*, 2021, 70: 105293.
- [3] 佚名. 未来10年, 农业产量增长将使食品价格保持低位, 但仍面临诸多不确定因素[J]. 世界农业, 2019(8): 110-111.
ANON. Future 10 years, the growth of agricultural production will keep food prices low, but there are still many uncertainties[J]. *World Agriculture*, 2019(8): 110-111.
- [4] 江连洲, 张鑫, 窦薇, 等. 肉制品研究进展与未来挑战[J]. 中国食品学报, 2020, 20(8): 1-10.
JIANG L Z, ZHANG X, DOU W, et al. Advance and challenges in plant-based meat [J]. *Journal of Chinese Institution of Food Science and Technology*, 2020, 20(8): 1-10.
- [5] 董雷超, 陈炫宏, 王赛, 等. 马铃薯淀粉对豌豆蛋白3D打印材料结构及特性的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(1): 127-133.
DONG L C, CHEN X H, WANG S, et al. Effect of potato starch on the structure and properties of pea protein 3D print [J]. *Journal of Chinese Institution of Food Science and Technology*, 2020, 20(1): 127-133.
- [6] PHUHONGSUNG P, 张慙. 不同切割干姜对真空包装草鱼片新鲜度的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(8): 112-118.
PHUHONGSUNG P, ZHANG M. Effect of different cutting of dried ginger on the freshness of grass carp fillet during vacuum storage [J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2019, 38(8): 112-118.
- [7] BREMER F, MATTHIESEN S. A review of research relating to food slicing in industrial applications [J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 268: 109735.
- [8] SCHULDT S, BODEN L, SCHNEIDER Y, et al. Pre-crack cutting properties of viscoelastic food models [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 169: 272-277.
- [9] 潘永贵, 陈维信. 鲜切加工对果蔬挥发性风味影响 [J]. 食品科学, 2008, 29(10): 670-674.
PAN Y G, CHEN W X. Evaluation on effects of fresh-cutting on volatile flavor of fruits vegetables [J]. *Food Science*, 2008, 29(10): 670-674.
- [10] HAO F, BARBOSA-CANOVAS G V, WEISS J. Ultrasound technologies for food and bioprocessing [M]. New York: Spring Science +Business Media, 2011: 211-234.
- [11] 黄秀秀, 胡小平, 于保华, 等. 基于断裂力学的Nomex蜂窝复合材料超声切割机理研究 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(23): 205-212.
HUANG X X, HU X P, YU B H, et al. Research on ultrasonic cutting mechanism of Nomex honeycomb composites based on fracture mechanics [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(23): 205-212.
- [12] ZHENG L, CHEN W Q, HUO D H. Review of vibration devices for vibration-assisted machining [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 108(5/6): 1631-1651.
- [13] 聂立新, 李保定, 赵明利. 振动切削特点及形成机理分析 [J]. 机械研究与应用, 2006(4): 20-21.
NIE L X, LI B D, ZHAO M L. Analysis of vibration cutting characteristics and forming mechanism [J]. *Mechanical Research and Application*, 2006(4): 20-21.
- [14] YANG Z C, ZHU L D, ZHANG G X, et al. Review of ultrasonic vibration-assisted machining in advanced materials [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2020, 156: 103594.
- [15] KOC A B, LIU B. Ultrasonic cutting of switchgrass and miscanthus stems [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2018, 34(2): 343-353.
- [16] YING Z Z, SHU L M, SUGITA N. Experimental and finite element analysis of force and temperature in ultrasonic vibration assisted bone cutting [J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2020, 48(4): 1281-1290.
- [17] XIAO X Z, ZHENG K, LIAO W H, et al. Study

- on cutting force model in ultrasonic vibration assisted side grinding of zirconia ceramics[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2016, 104: 58–67.
- [18] 黄秀秀. NOMEX 蜂窝复合材料直刃刀超声复合切割机理研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2015.
HUANG X X. Study of ultrasonic cutting mechanism on straight blade cutter of NOMEX honeycomb composites[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2015.
- [19] NATH C, RAHMAN M. Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008, 48(9): 965–974.
- [20] WANG X J, ZHOU M, GAN J G K, et al. Theoretical and experimental studies of ultraprecision machining of brittle materials with ultrasonic vibration[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2002, 20(2): 99–102.
- [21] XIAO M, WANG Q M, SATO K, et al. The effect of tool geometry on regenerative instability in ultrasonic vibration cutting[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46(5): 492–499.
- [22] CARLSON C S, POHL A, KEIR D G, et al. Cutting edge technology: Sound sharpens the blade[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 166: 107336.
- [23] HAN X, ZHANG D Y, SONG G. Review on current situation and development trend for ultrasonic vibration cutting technology[J]. *Materials Today-Proceedings*, 2020, 22: 444–455.
- [24] 罗经平, 傅波, 胡涛. 超声切割系统的设计与优化[J]. *机械制造*, 2017, 55(11): 46–49.
LUO J P, FU B, HU T. Design and optimization of ultrasonic cutting system[J]. *Machinery*, 2017, 55(11): 46–49.
- [25] 尤晓镇, 隆志力, 傅惠, 等. 基于有限元模型的超声切割刀优化设计[J]. *压电与声光*, 2015, 37(6): 1083–1087.
YOU X Z, LONG Z L, FU H, et al. Optimization design of ultrasonic knife cutting system based on finite element model[J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2015, 37(6): 1083–1087.
- [26] 张水田, 李远. 蛋糕超声波辅助切割刀的优化设计[J]. *声学技术*, 2015, 34(2): 152–156.
ZHANG S T, LI Y. The structural design of ultrasonic cutter for cakes[J]. *Technical Acoustics*, 2015, 34(2): 152–156.
- [27] 张云电, 陈健, 储瑞, 等. 宽刃超声波切割刀的研究与设计[J]. *机电工程*, 2017, 34(12): 1382–1386.
ZHANG Y D, CHEN J, CHU R, et al. Structural design of wide edge ultrasonic cutter[J]. *Journal of Mechanical and Electrical Engineering*, 2017, 34(12): 1382–1386.
- [28] XIAO M, SATO K, KARUBE S, et al. The effect of tool nose radius in ultrasonic vibration cutting of hard metal[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, 43(13): 1375–1382.
- [29] MARSOT J, CLAUDON L, JACQMIN M. Assessment of knife sharpness by means of a cutting force measuring system[J]. *Applied Ergonomics*, 2007, 38(1): 83–89.
- [30] WU X, LI L, HE N, et al. Influence of the cutting edge radius and the material grain size on the cutting force in micro cutting[J]. *Precision Engineering*, 2016, 45: 359–364.
- [31] MCCARTHY C T, HUSSEY M, GILCHRIST M D. On the sharpness of straight edge blades in cutting soft solids: Part I – indentation experiments[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2007, 74(14): 2205–2224.
- [32] MCCARTHY C T, ANNAIDH A N, GILCHRIST M D. On the sharpness of straight edge blades in cutting soft solids: Part II – Analysis of blade geometry[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2010, 77(3): 437–451.
- [33] MCGORRY R W, DOWD P C, DEMPSEY P G. The effect of blade finish and blade edge angle on forces used in meat cutting operations[J]. *Applied Ergonomics*, 2005, 36(1): 71–77.
- [34] ZHAO J F, LIU Z Q, WANG B, et al. Tool coating effects on cutting temperature during metal cutting processes: Comprehensive review and future research directions[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 150: 107302.
- [35] MACHADO A R, DA SILVA L R R, DE SOUZA F C R, et al. State of the art of tool texturing in machining[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 293: 117096.
- [36] 郝秀清, 宋晓路, 李亮. 表面织构化刀具的研究现状与进展[J]. *表面技术*, 2016, 45(9): 170–181.
HAO X Q, SONG X L, LI L. Development and

- perspective of surface texturing tools[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(9): 170–181.
- [37] ASTASHEV V K, BABITSKY V I. Ultrasonic cutting as a nonlinear (vibro-impact) process[J]. *Ultrasonics*, 1998, 36(1–5): 89–96.
- [38] KING M J. Slicing frozen meat with an oscillating knife[J]. *Meat Science*, 1999, 51(3): 261–269.
- [39] ZAHN S, SCHNEIDER Y, ZUCKER G, et al. Impact of excitation and material parameters on the efficiency of ultrasonic cutting of bakery products[J]. *Journal of Food Science*, 2005, 70(9): E510–E513.
- [40] SCHNEIDER Y, ZAHN S, ROHM H. Power requirements of the high-frequency generator in ultrasonic cutting of foods[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 86(1): 61–67.
- [41] SCHNEIDER Y, ZAHN S, SCHINDLER C, et al. Ultrasonic excitation affects friction interactions between food materials and cutting tools[J]. *Ultrasonics*, 2009, 49(6/7): 588–593.
- [42] ZAHN S, SCHNEIDER Y, ROHM H. Ultrasonic cutting of foods: Effects of excitation magnitude and cutting velocity on the reduction of cutting work[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2006, 7(4): 288–293.
- [43] MORA S, POMEAU Y. Cutting and slicing weak solids[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(3): 038002.
- [44] ATKINS A G, XU X, JERONIMIDIS G. Cutting, by pressing and slicing, of thin floppy slices of materials illustrated by experiments on cheddar cheese and salami[J]. *Journal of Materials Science*, 2004, 39(8): 2761–2766.
- [45] ATKINS T. Optimum blade configurations for the cutting of soft solids[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2006, 73(16): 2523–2531.
- [46] ARNOLD G, ZAHN S, LEGLER A, et al. Ultrasonic cutting of foods with inclined moving blades[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 103(4): 394–400.
- [47] 陈健. 面包超声波切割装置和实验研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2018.
CHEN J. Bread ultrasonic cutting device and experimental research[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2018.
- [48] SPAGNOLI A, BRIGHENTI R, TERZANO M, et al. Cutting resistance of soft materials: Effects of blade inclination and friction[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2019, 101: 200–206.
- [49] ARNOLD G, LEITERITZ L, ZAHN S, et al. Ultrasonic cutting of cheese: Composition affects cutting work reduction and energy demand[J]. *International Dairy Journal*, 2009, 19(5): 314–320.
- [50] CRETON C, CICCOTTI M. Fracture and adhesion of soft materials: A review[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2016, 79(4): 046601.
- [51] SCHNEIDER Y, ZAHN S, LINKE L. Qualitative process evaluation for ultrasonic cutting of food[J]. *Engineering in Life Sciences*, 2002, 2: 153–157.
- [52] SCHNEIDER Y, ZAHN S, HOFMANN J, et al. Acoustic cavitation induced by ultrasonic cutting devices: A preliminary study[J]. *Ultrasonic Sonochemistry*, 2006, 13(2): 117–120.
- [53] BROWN T, JAMES S J, PURNELL G L. Cutting forces in foods: Experimental measurements[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 70(2): 165–170.
- [54] DOVENE A K, LI W, BOKHARY S U F, et al. Effect of cutting styles on quality and antioxidant activity of stored fresh-cut sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) cultivars[J]. *Foods*, 2019, 8(12): 674–674.
- [55] WANG D, ROY A, SILBERSCHMIDT V V. Production of high-quality extremely-thin histological sections by ultrasonically assisted cutting[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 276: 116403.
- [56] YILDIZ G, RABABAH T M, HAO F. Ultrasound-assisted cutting of cheddar, mozzarella and Swiss cheeses – Effects on quality attributes during storage[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 37: 1–9.
- [57] YILDIZ G, PALMA S, HAO F. Ultrasonic cutting as a new method to produce fresh-cut Red Delicious and Golden Delicious apples[J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(12): 3391–3398.
- [58] 沈莹. 尖形切割刀超声波声学系统研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2014.
SHEN Y B. Study of an ultrasonic acoustic system of the pointed cutter[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2014.
- [59] BAKHTIYARI A N, WANG Z, WANG L, et al. A review on applications of artificial intelligence in modeling and optimization of laser beam machining[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 135: 106721.

- [60] ÖZDOĞAN G, LIN X H, SUN D W. Rapid and noninvasive sensory analyses of food products by hyperspectral imaging: Recent application developments[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 111: 151–165.
- [61] ZHOU L, ZHANG C, QIU Z J, et al. Information fusion of emerging non-destructive analytical techniques for food quality authentication: A survey[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2020, 127: 115901.
- [62] SANCHEZ P D C, HASHIM N, SHAMSUDIN R, et al. Applications of imaging and spectroscopy techniques for non-destructive quality evaluation of potatoes and sweet potatoes: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 96: 208–221.

Application of Ultrasonic Assisted Cutting Technology in Food Processing Industry

Xu Weidong^{1,2}, Wang Jingyi^{1,2}, Wang Wenjun^{1,2,3}, Zhou Jianwei^{1,2,3}, Xu Enbo^{1,2,3}, Liu Donghong^{1,2,3*}

(¹College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, National-Local Joint Engineering Laboratory of Intelligent Food Technology and Equipment, Zhejiang Key Laboratory for Agro-Food Processing, Zhejiang Engineering Laboratory of Food Technology and Equipment, Hangzhou 310058

²Ningbo Research Institute, Zhejiang University, Ningbo 315100, Zhejiang

³Fuli Institute of Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

Abstract Cutting is an important part in food processing. The conventional cutting strategy requires a large cutting force, and easily causes damage and contaminant to the cutting surface, which will reduce food quality and generate safety problems. Ultrasonic-assisted cutting (UAC), a novel processing technology, with the advantages of small cutting force, smooth cutting section and less pollution, has become the focus in the food processing industry. Therefore, this article firstly introduced the UAC device and cutting parameters. Then, the mechanism of the UAC was described. Moreover, the influence of the tool parameters, cutting process parameters and material properties on cutting performance and food storage quality in UAC were systematic analyzed. Finally, the advantages and future trends of UAC technology were presented. This study aimed to promote the application and development of UAC technology in the food processing industry.

Keywords food processing; ultrasonic assisted cutting; cutting performance; cutting parameters; storage quality