

## 查理与3D打印巧克力工厂

郭玥汐<sup>2</sup>, 李朝阳<sup>3</sup>, 代婧伟<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>南开大学药物化学生物学全国重点实验室, 天津 300350

<sup>2</sup>南开大学化学学院, 天津 300071

<sup>3</sup>南开大学材料科学与工程学院, 天津 300350

**摘要:** 以《查理与巧克力工厂》小说为背景, 简要介绍巧克力的化学成分。通过通俗易懂的方式介绍几种主流的3D打印技术及其原理, 讨论食品3D打印在食品制造业的应用优势。同时, 重点介绍巧克力3D打印的历史沿革、工作原理与口感风味。本文将日常生活中熟悉的食品与新颖的科学前沿结合, 轻松易懂、易于阅读, 充分达到大众科普的目的。

**关键词:** 3D打印; 食品3D打印; 巧克力生产

**中图分类号:** G64; O6

## Charlie and the 3D Printing Chocolate Factory

Yuexi Guo<sup>2</sup>, Zhaoyang Li<sup>3</sup>, Jingwei Dai<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Medicinal Chemical Biology, Nankai University, Tianjin 300350, China.

<sup>2</sup> College of Chemistry, Nankai University, Tianjin 300071, China.

<sup>3</sup> School of Materials Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China.

**Abstract:** Incorporating the backdrop of the novel *Charlie and the Chocolate Factory*, this paper provides a brief introduction to the chemical composition of chocolate. It offers a user-friendly explanation of several mainstream 3D printing technologies and their principles, discussing the advantages of food 3D printing in the food manufacturing industry. Furthermore, it places a particular focus on the historical development, working principles, and sensory aspects of chocolate 3D printing. By merging familiar everyday foods with cutting-edge scientific advancements, this article is presented in an easily understandable and reader-friendly manner, effectively serving the purpose of popularizing science.

**Key Words:** 3D printing; Food 3D printing; The production of chocolate

### 1 受邀

自从在旺卡巧克力工厂的一番冒险后, 查理被选中为旺卡先生的继承者。他接手了这家世界上最大的巧克力工厂, 踏入巧克力生产行业, 并勤勤恳恳地不断开发出备受欢迎的新品。最近, 查理听闻一家巧克力工厂声名鹊起, 他们自称采用最新的食品3D打印技术生产巧克力, 并邀请了一众业界精英参观, 查理自然在受邀之列。

邀请函不同于旺卡先生的金奖券, 它虽然表面像镀金般光滑, 却比金奖券更厚、更硬, 且一样

收稿: 2023-09-19; 录用: 2023-10-30; 网络发表: 2023-11-21

\*通讯作者, Email: jingweidai@nankai.edu.cn

基金资助: 南开大学大型仪器实验技术研发项目(23NKSYJS08); 南开大学实验课程教学改革项目(23NKSYKF03); 南开大学2023年本科教育教学改革项目(NKJG2023053)

轻巧而精致。

## 2 参观

### 2.1 了解巧克力

负责接待查理的是一位名叫安娜的女士，她确认了查理的邀请函后，领着他进入工厂。工厂走廊的墙壁上绘制着巧克力的发展历史，从公元前玛雅人发现并种植可可树开始，到可可豆随新大陆开发传入欧洲，再到固体巧克力在荷兰被发明，无不精美详尽，栩栩如生，让人不由驻足。

“查理先生，您是我们巧克力行业的业界翘楚，相信您对巧克力一定有着很深的了解，”她说，“先人的智慧让我们从可可豆中发现了巧克力这种美妙的食物。通过在制造过程中控制不同的成分比例，就能得到多样的巧克力种类。请问，在您的工厂，巧克力是怎么生产的呢？”

查理的工厂虽然和一般的巧克力工厂不太一样，靠小矮人们劳动，但生产巧克力的方法是一样的：按特定比例加入可可浆、可可脂和其他配料；研磨使其混合均匀；再通过精炼进一步改善巧克力的风味；最后注入模具使其成型，脱模后就得到各式各样的巧克力产品<sup>[1]</sup>。

安娜听完点头：“其实我们原材料的生产流程也是这样，只是最后的成型环节有所不同。您也知道，作为一种复杂多相分散体系，巧克力包含可可脂、糖、乳固体及少量的空气和水等多种分散相。其中的关键成分是可可脂。作为一种天然油脂，可可脂由多种甘油三酯构成，导致它们的熔点低、熔程大……”

查理不由自主地接话：“但可可脂通常是由POP、POS、SOS三种熔点相近的甘油三酯组成(P：棕榈酸，S：硬脂酸，O：油酸，图1)，使它的熔程控制在30–34 °C，造就了巧克力‘只融你口，不融你手’的特点<sup>[2]</sup>。”

安娜接道：“没错，从微观结构观察，可可脂还有六种晶型(图2)，前四种晶型易于融化，软且不易塑形；第六种晶型坚硬且熔点高，口腔内融化慢。只有第五种晶型最为适宜<sup>[3]</sup>。”

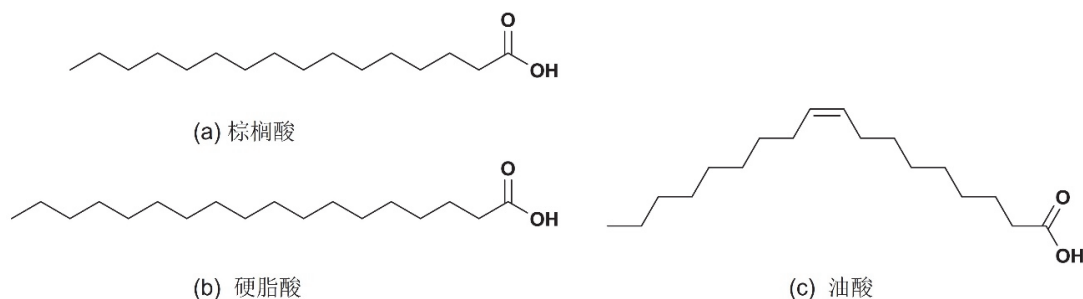


图1 构成可可脂典型甘油三酯中的三种常见脂肪酸

晶系	六方晶系 $a_1 = a_2 = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ \gamma = 120^\circ$ 六方晶系		四方晶系 $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 四方晶系		三斜晶系 $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ 三斜晶系	
分类	I 型	II 型	III 型	IV 型	V 型	VI 型
熔点	17.3°C	23.3°C	25.5°C	27.5°C	33.8°C	36.3°C
口感	易于熔化，软，难塑形				最佳	熔点高，坚硬，口感差

图2 可可脂结晶类型及其性质

“因此，巧克力生产中需要多次融化、凝固，并控制温度以得到最佳的V型晶体。而生产过程中加热融化的巧克力液粘度适宜、流动性好，是理想的3D打印材料。

“接下来，我们需要认识一下3D打印技术。”

## 2.2 初识3D打印

这座工厂不大，穿过走廊却有个极宽阔的展览厅，厅内一系列大大小小的机器排开，弥漫着淡淡的巧克力香气。

安娜介绍说，“3D打印技术也称增材制造，是快速成型技术的一种。这一技术诞生于20世纪80年代，经由40年的发展，它的定义和应用领域已经扩大了许多。目前，3D打印指依据计算机辅助设计的三维数据模型，将材料逐层累加以快速制造物体的技术。它能满足复杂结构的制造，并具有较传统制造方法更高的效率，材料的损耗率也更低，顺应了制造业的发展趋势<sup>[4]</sup>。

“这里展示的3D打印机并非都完全适用于巧克力生产，它们囊括了目前市面上绝大部分3D打印技术，包括在个人工作室里常见的熔融沉积法(FDM)和立体光固化(SLA)，到用于工业的纳米粒子喷射技术(NPJ)、三维打印黏结成型(3DP)方法等等。”

“对不起，我对这些字母的含义不是很了解。”查理诚恳地说，“请您为我讲解一下。”

“乐意效劳。”安娜走到桌边，打开桌台上一个小型机器的开关。“FDM是Fused Deposition Modeling的缩写，即熔融沉积法(图3)。这便是一台采用FDM技术的3D打印机，它的工作原理是使用加热挤出的线材构成面的图案，再通过面的堆叠制造出立体物品。”

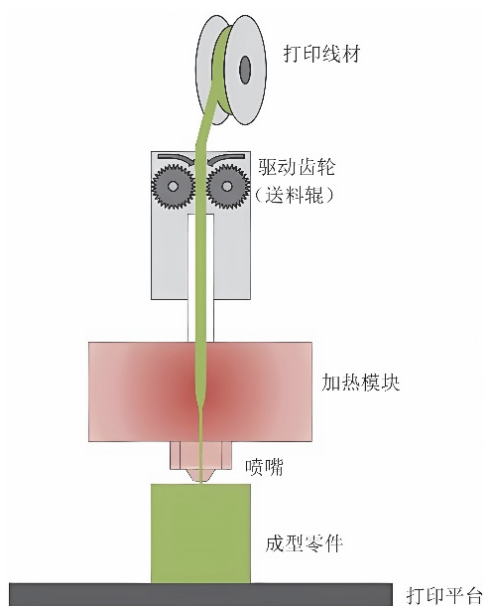


图3 熔融沉积法(FDM)打印示意图<sup>[5]</sup>

机器嗡嗡地工作着，喷头快速移动来移动去，打印平台上一个小立方体逐渐成型。查理仔细研究了片刻，感叹：“很像奶油裱花。”

安娜赞同地笑了：“原理就是这样，不过FDM所用的材料一般都能够固化，这样才有足够的结构应力层层堆叠成立体。”

她关掉这台机器，取出制作完成的立方体，领着查理走到下一台机器前。这台机器处于密闭环境，内置一个大液槽。它没有类似于上一台机器的喷嘴，查理很好奇它的材料是从哪里给出。

打开开关，仍没有材料挤出，机器内却亮起来，液槽内的平台缓缓下降。等到打印完成，平台从液槽中升起，上面俨然已经印好了一个金字塔。

“这是最早被提出并商业化的打印技术，SLA (Stereo Lithography Appearance)，又名立体光固化成型技术。液槽里装的是光固化材料，通常为光敏树脂。工作时光照在特定的区域使光敏树脂固化，完成一层后平台下降，随之固化新一层，在多层固化结束后，最终就得到设计的结构(图4)。”

查理点头：“设计它的人真是天才!”

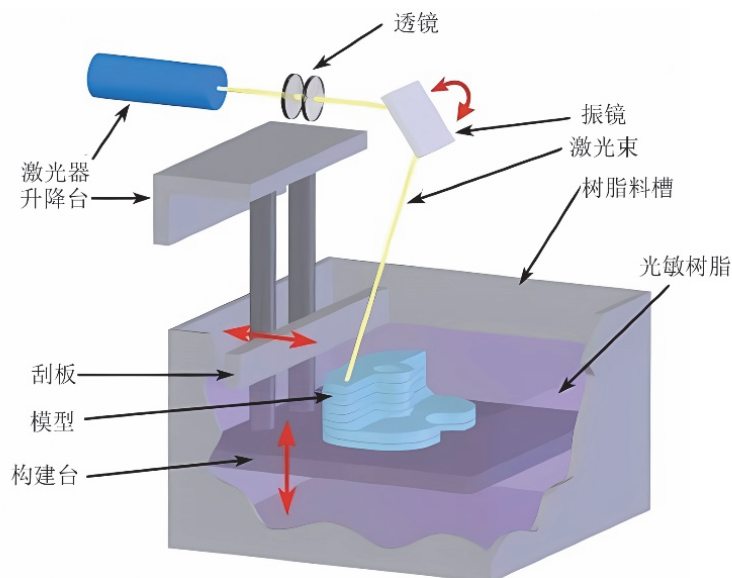


图4 立体光固化(SLA)打印示意图<sup>[6]</sup>

时间所限，安娜只能再向查理演示一台设备。这是一台采用NPJ技术的3D打印机，NPJ是Nano Particle Jetting的缩写，意为纳米粒子喷射技术。这台设备没有针头，而是拥有一排类似打印机的喷墨口。安娜向查理介绍说，这台3D打印机喷出的易挥发液体里含有纳米粒子，当喷到加热的打印平台上时，液体受热挥发，而纳米粒子因为热度粘在一起，形成平面，重复这个过程就能实现3D打印了<sup>[7]</sup> (图5)。

“您的邀请函就是这样打印的，用了较轻的金属材料，”安娜给查理展示了邀请函的样品，“这是以色列一家名为XJet的公司开发的新技术，它的细节可以达到微米量级，具有极高的精细度，可以打印非常小的字母，且打印速度是普通激光3D打印的五倍。”

查理恍然大悟，不由得多看了这台机器一眼。

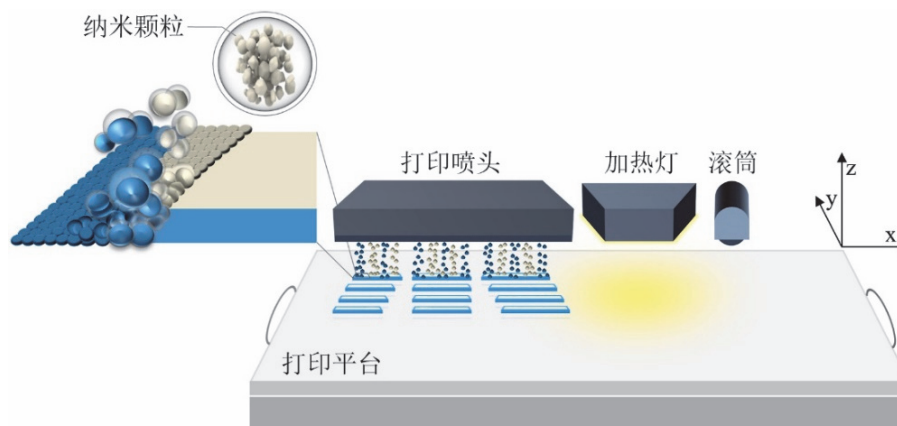


图5 纳米粒子喷射技术(NPJ)示意图<sup>[7]</sup>

### 2.3 巧克力3D打印

在真正进入生产车间前,安娜和查理聊起了食品3D打印。食品3D打印是3D打印在食品领域的应用,又名食品分层制造(Food-Layered Manufacture, FLM)。

“把3D打印技术应用于食品制造,这真是一个非常有趣的想法!”查理感叹道:“不知道食品3D打印是谁第一个发明的呢?”

“2001年,Nanotek Instruments公司首次提出了3D打印食品的概念,将这一面向食品的快速原型制作方法成功申请美国专利。之后的2008年,Philips Food Creation Printer公司设计了食品墨盒,并通过层叠制造技术制作食品,成功开启了食品3D打印的新时代<sup>[8]</sup>。”

安娜接着说道:“随着食品3D打印技术的问世,巧克力行业也开始积极探索新技术的应用和突破。2007年,一款可用于巧克力打印的3D打印机(Fab@home)正式亮相,带来了巧克力3D打印理念落地的实质性进展。2010年,Choc Edge公司设计了一款创新型巧克力3D打印机,给巧克力3D打印开辟了新的制造方式。随后,ChefJet™与CocoaJet™这些新型巧克力3D打印机相继面世,为巧克力3D打印领域创造了更广泛的机遇,也为巧克力制造业注入了新的活力<sup>[9]</sup>。”

“但是,由于食品材料通常较普通3D打印材料柔软,并对打印环境有着极高的要求,因此仅有部分3D打印技术能够应用于食品制造。”

言毕,她让查理猜猜看,应用到巧克力生产的是哪种食品3D打印技术。

查理思考良久:“挤出的方法吧,巧克力生产过程中需要调温来保证结晶整齐,用光固化难以控制温度,用其他粉末固化也无法得到巧克力。”

“说得很对,”安娜鼓掌,推开门,巧克力浓烈的香气扑面而来。车间里一台台设备极速运转着,细看却发现它们生产的产品都不一样(图6)。



图6 不同种类的3D打印巧克力产品<sup>[10]</sup>

有一台设备正打印着黑白熊猫头造型的巧克力块。查理正疑惑地研究黑白两色是怎么打印出来的时候,安娜适时补充道:“除了你提到的原因外,一台挤出式食品3D打印设备的喷嘴有多个,可以存储不同的巧克力液,生产过程中可以方便地替换,就能够生产多色或夹心的巧克力,满足定制的需要。”

“挤出式是食品3D打印行业中最常见的技术,它成本低、设计灵活,能适配多种多样的食物墨水(图7)。这种方法的原理有点类似之前看到的FDM的方法,不仅能打印巧克力、果冻凝胶这类本身就具备良好流动性和粘度的材料,肉糜、果蔬基<sup>[11]</sup>、谷物基<sup>[12]</sup>等材料,通过添加凝胶或提高含水量等各种处理,也能适用于挤出式食品3D打印。”

“此外,已经有研究者将药物与巧克力液混合后打印,以生产对婴幼儿友好的药剂。他们将扑热息痛和布洛芬溶解在巧克力与玉米糖浆的混合液中,打印成品造型多样且多为受儿童喜爱的卡通造型,还能定制药物剂量,达到辅助治疗的效果<sup>[13]</sup>。”

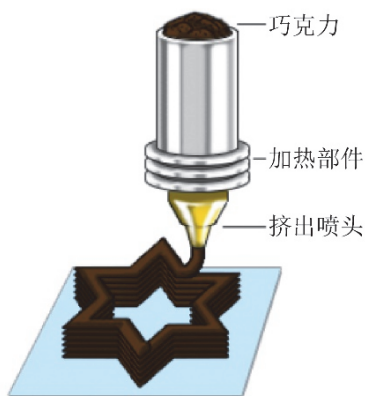


图7 挤出式食品3D打印示意图<sup>[14]</sup>

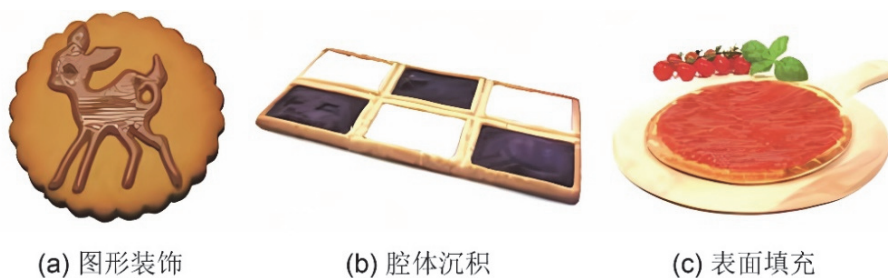
查理欣赏了一会儿，又提出问题：“可是用线来形成立体造型的巧克力，会不会效率太低了？”

安娜点头表示认可：“所以针对易脱模的立体造型巧克力，我们还有另一种方式：通过普通3D打印迅速制作出模具，然后用传统方法生产(图8)。这种情况下，根据模具材质的不同，可选择3D打印技术也更多。”



图8 3D打印得到的模具和巧克力产品<sup>[15]</sup>

“同时，为满足不同种类产品生产需要，也可以采用其他食品3D打印方法。如原料替换成巧克力粉，就可以用类似于SLA的SLS (Selected Laser Sintering)，即选择性激光烧结技术，通过激光加热实现塑性的目的，一些粉末状食品原料便可以使用这种打印技术；而使用巧克力装饰食品表面时，还可以采用喷墨食品打印技术IJP (Inkjet printing)，将巧克力喷印在待装饰的原料表面，形成图案(图9)<sup>[16]</sup>。”



(a) 图形装饰

(b) 腔体沉积

(c) 表面填充

图9 喷墨(IJP)3D打印食品<sup>[14]</sup>

安娜不无骄傲地说：“我们工厂的目标不仅是3D打印巧克力，还期望将3D打印技术与整个食品行业相结合，生产出更多满足消费者需要的3D打印食品。”

“很棒的想法！那么，我可以试吃一块打印好的作品吗？”查理笑着说。

“请跟我来，今天的参观怎么能少了试吃环节呢。”安娜也笑了起来，带着查理来到展台前。只见各种各样的巧克力如同一个个精致的艺术品，摆满了众多展架。“这些产品都是利用3D打印工艺制作的，您可以随便品尝。”

查理看中了一个形似花篮的巧克力，带好试吃用的手套，拿起巧克力花篮放入嘴中。“是一块黑巧，味道很正宗呢。”他兴奋地说。

“没错，您吃的这个小花篮的确是用黑巧克力作为原料打印而成的。由于巧克力3D打印对原材料材质有所要求，选用可可脂含量高的黑巧克力有利于打印出完美的巧克力产品。当然，我们也研制了使用其他种类原材料加工的巧克力制品，像牛奶巧克力、白巧克力都能作为打印原料。与黑巧克力相比，牛奶巧克力和白巧克力的可可脂含量要低得多，而且含有乳类，导致打印原料的黏度会比较低，因此打印出的成品巧克力也会因为牛奶含量的不同而变软、易潮湿或更加油腻。但软质巧克力也有很多顾客喜欢呢<sup>[17]</sup>。”

听完安娜的介绍，查理品尝了一块白色的字母巧克力。“口感的确更加柔软，但我觉得风味依然很好。”

“巧克力的风味通常取决于巧克力的成分，例如可可脂的含量、糖以及乳制品的含量。如果3D打印巧克力使用与传统巧克力相同的成分，那么它们的风味几乎不会有太大区别。”安娜解释道。

“3D打印的巧克力有着这么丰富多样的外观，它们的保质期和普通方法制作的巧克力相比是否受影响呢？”查理问。

“使用高品质的巧克力作为打印原料，制作完成后如果储存得当，3D打印的巧克力和传统巧克力的保质期是非常相似的。不过，根据不同巧克力类型和添加成分的不同，保质期也会有所区别。”安娜回答着他的提问，继续为查理介绍展台上的其他巧克力产品。

### 3 合作

结束参观后，查理与这家巧克力厂签订了合作。

“经过这次参观，我觉得3D打印技术的未来有无限可能。”他很认真地说，“这一技术既满足了现在人们对个性化定制的需求，又符合节省耗材的环保趋势，生产方面也一边降低了开模的成本，一边提高了精细程度。

“在食品领域，3D打印技术兼顾个性化的营养复合和创意造型，并促进新食物原料进入大众餐桌，较传统食品工业还减少了食物浪费，前景十分广阔。

“我想，尽管食品3D打印的应用在目前还有着诸多限制，例如可供打印的食品材料有限、打印结构较脆弱、与烹饪方式结合应用较少、需要应对后处理带来的不确定性等。但我相信，随着科技的不断创新，3D打印技术在食品及各行各业定会大有可为。”

### 参 考 文 献

- [1] 何瑞芳, 张虹, 毕艳兰, 沈琪. 食品工业科技, 2016, 37 (1), 368.
- [2] 王红, 巢强国, 葛宇, 严罗美. 食品研究与开发, 2009, 30 (4), 178.
- [3] Ghazani, S. M.; Marangoni, A. G. *Annu. Rev. Food Sci. Technol.* 2021, 12, 567.
- [4] 卢秉恒, 李涤尘. 机械制造与自动化, 2013, 42 (4), 1.
- [5] Pandzic, A.; Hodzic, D. Milovanovic, A. Effect of Infill Type and Density on Tensile Properties of PLA Material for FDM Process. In *Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium, Zadar, Croatia, Oct 23–26, 2019*; Katalinic, B., Ed.; DAAAM International: Vienna, Austria, 2019.

- [6] 韩承都. 立体光固化3D打印机控制系统研究[硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2019.
- [7] Zhong, S. P.; Shi, Q. M.; Deng, Y. L.; Sun, Y.; Politis, C.; Yang, S. F. *Ceram. Int.* **2022**, 48, 33485.
- [8] Sun, J.; Zhou, W.; Huang, D.; Fuh, J. Y. H.; Hong, G. S. *Food Bioprocess Technol.* **2015**, 8, 1605.
- [9] Athira, V. A.; Udayarajan, C. T.; Goksen, G.; Brennan, C. S.; Nisha, P. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2023**, 58, 2811.
- [10] Choc Edge Gallery of Chocolate Printing. [2023-09-09]. <https://chocedge.org/gallery.html>
- [11] 林敏, 袁佳璐, 周佳, 程玉姣, 焦必宁, 马亚琴. 食品与发酵工业, **2024**, No. 9, 340.
- [12] 耿涵, 王莉, 陈正行, 左中钰. 食品与机械, **2022**, 38 (2), 1.
- [13] Christina, K.; Angelos, G.; Thomas, M.; Christos, R.; Dimitrios, G. F. *Eur. J. Pharm. Sci.* **2019**, 147, 105291.
- [14] Sun, J.; Zhou, W.; Yan, L.; Huang, D.; Lin, L.-Y. *J. Food Eng.* **2018**, 220, 1.
- [15] 巧克力3D打印的原理与实现. [2023-05-20]. [https://zhuanlan.zhihu.com/p/26250172?utm\\_id=0](https://zhuanlan.zhihu.com/p/26250172?utm_id=0)
- [16] 刘倩楠, 张春江, 张良, 胡小佳, 余永名, 胡宏海, 黄峰, 田芳, 谭瑶瑶, 戴小枫, 等. 农业工程学报, **2018**, 34 (16), 265.
- [17] 3D Chocolate Printing Guide. [2023-09-09]. <https://chocedge.org/faq.html>