基于电流体加工技术对益生菌包封作用研究进展

刘凯龙[1,2,3]，姚国强[1,2,3]，张和平[*1,2,3]

（1. 内蒙古农业大学 乳品生物技术与工程教育部重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010018；2. 内蒙古农业大学 农业农村部奶制品加工重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010018；3. 内蒙古农业大学 内蒙古自治区乳品生物技术与工程重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010018）

摘要：益生菌在加工储运过程中存在菌体活性易衰减的现象，电流体加工技术是一种新型的非热封装技术，对细胞活性损伤较小，在益生菌生产中具有巨大的应用潜力。作者综述了基于电流体加工原理的静电纺丝和静电喷雾技术在活性益生菌封装中的应用现状，具体包括电流体加工技术原理、装置、工艺参数以及封装材料，可为益生菌制剂的加工研究提供新的思路和借鉴，以期实现高活性益生菌制剂生产。

关键词：益生菌；电流体加工技术；静电纺丝；静电喷雾

中图分类号：TS 201.1　**文章编号：**1673-1689(2022)07-0024-08　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2022.07.003

Research Progress in Encapsulation of Probiotics Based on Electrofluid Processing Technology

LIU Kailong[1,2,3]，*YAO Guoqiang*[1,2,3]，*ZHANG Heping*[*1,2,3]

（1. Key Laboratory of Dairy Biotechnology and Engineering, Ministry of Education, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China；2. Key Laboratory of Dairy Products Processing, Ministry of Agriculture, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China；3. Inner Mongolia Key Laboratory of Dairy Biotechnology and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China）

Abstract: In processing, storage and transportation of probiotics, there is a technical bottleneck of easy attenuation of bacterial activity. Electro-fluid processing technology is a new non-thermal packaging technology, which has little damage to cell activity and has great application potential in the production of probiotics. Based on principle of electric fluid processing in this paper, the author discusses the electrostatic spinning and electrostatic spray technology in the application status of active probiotic encapsulation, including electric fluid processing technology principle, equipment, process parameters and packaging materials, which could provide new ideas and references for the study of probiotics processing, in order to realize highly active probiotics preparation production.

Keywords: probiotics, electrofluid processing technology, electrospinning, electrostatic spray

收稿日期：2022-03-18

基金项目：财政部和农业农村部：国家现代农业产业技术体系资助项目(CARS36)；内蒙古自治区高等学校科学技术研究项目(NJZZ22488)。

作者简介：刘凯龙(1995—)，男，博士研究生，主要从事乳酸菌制剂与乳制品加工研究。E-mail：kailong1113@163.com

***通信作者：**张和平(1965—)，男，博士，教授，博士研究生导师，主要从事益生菌研究及应用研究。E-mail：hepingdd@vip.sina.com

益生菌是指摄入足够数量会对宿主健康产生确切健康功效从而促进宿主微生态平衡、充分发挥有益作用的微生物总称[1]。其对人体健康发挥有益作用的重要条件是可活着到达肠道[2],活性益生菌具有维持肠道菌群平衡、促进人体消化吸收、抑制病原菌生长、提高免疫、防止胃肠道疾病等功能[3-4]。然而,益生菌在胃肠道传递和加工贮藏过程中,温度、湿度、氧气、胃酸、胆汁盐和消化酶等是导致其活性下降的主要因素,严重制约了益生菌终端产品的应用开发及其保健作用的发挥[5]。为此,提高益生菌生产制备工艺,成为了首要解决的问题,乳化包埋技术和微胶囊化处理技术成为益生菌加工行业关注的重点。通过该技术制备的益生菌产品存活率较高、具有良好的贮藏稳定性且对不良环境的抵抗力强。微胶囊制备技术一般采用蛋白质、多糖和脂质等大分子物质,并结合喷雾干燥技术、冷冻干燥技术、低温喷雾干燥技术、挤压和乳化等技术形成微凝胶组装体,以期提高益生菌在加工储运期间的存活率。

1934 年 Formhals 首次提出电流体加工技术是一种生产纳米纤维的通用技术,其直径范围在微米至纳米之间[6],具有制备工序简单、制备的纳米纤维比表面积大、可有效对生物活性物质进行包埋等优点。电流体加工技术凭借其独特的优势,直至 20 世纪 90 年代已逐步应用于组织工程、储能转换、食品包装、药物输送及释放,以及催化剂、传感器、过滤材料等各个领域[7-9]。随着益生菌在国内外广泛应用,基于电流体加工技术对益生菌的封装研究也不断增加,其主要原因是该加工工艺在不需要热量的情况下便可进行封装,对益生菌菌体活性损伤小,可有效提高菌体存活率。目前,国内关于电流体加工技术应用于包封益生菌的相关综述较少,因此作者重点论述了电流体加工技术的相关内容及其对益生菌包封的研究进展,简要介绍了电流体加工技术的相关参数,重点讨论了电流体加工工艺和纳米纤维结构对益生菌菌体活性的影响,以及纳米纤维技术在益生菌加工过程中的潜在应用前景,以期为更多的研究提供思路。

1 电流体动力学

电流体动力学 (electrohydrodynamics,EHD)是多相流体力学、电动力学以及微流动学等的交叉学科,是液滴在电荷相互作用下,呈现出定向运动、变形、凝聚扩散等特性。目前许多研究学者对液滴的运动特性进行了大量研究。在 20 世纪 80 年代,有研究者通过对电场中液滴的运动分布、速度以及轨迹进行测试,初步了解了液滴的动力学过程,并获得液滴动力学经验方程,具体是以液滴运动过程中空气阻力和电场力二者建立的,虽描述了液滴在电场中的运动,但方程中并未考虑液滴间的库伦斥力[10]。随后,Hartman 等在此基础上纳入库伦斥力,完善了液滴运动方程,建立了液滴在电场中的群运动方程,一定程度上揭示了液滴间的相互作用对液滴运动轨迹的影响[11],但由于其外加电场是由电量不同的点电荷组成的,故不具有普遍性。2010 年,Khalid 对液滴的生成进行了数值模拟,其涉及到液滴初始形成阶段的运动[12],但缺少对液滴后续运动的模拟;而 Hume 等提出的运动方程,包括阻力、重力、浮力以及电场力,且对液滴的后续运动进行了模拟[13],但只是单个液滴的一维运动,模拟计算时液滴的初速度和位置也是假设的,因此尚未形成完整的液滴动力学方程。近年来,众多的研究学者对液滴的运动特性不断地试验和模拟,将液滴的尺寸、电荷分布、液滴之间的相互作用、外加电场力、重力等纳入液滴运动模型中,初步建立了电流体动力学的基本方程。目前利用液滴的运动特性,可满足一切适用于电流体的工业需求,但要对液滴运动实现精准控制,获得最佳的雾化效果和沉积特性,还需研究者做大量模拟运算。

静电纺丝和静电喷雾是生产纳米到微米材料纤维和颗粒的通用电流体动力学技术,该加工技术可用于包封生物活性物质,如微量营养素、营养保健品、益生菌等,其目的是保护活性物质免受不良环境因素(光、氧气、水分、酸等)的影响,且保证与基质中的其他成分不发生相互作用。包封所用的生物活性剂,通常由一种或多种聚合物组成,其对于确保生物活性物质顺利抵达人体体内起着不可替代的作用。此外,电流体动力学过程是非热的,有利于对热不稳定的营养保健品和成分进行封装。

静电纺丝和静电喷雾可以被认为是复杂纤维和颗粒的“自下而上”的一种组装技术。为满足生产要求,其必须依赖于聚合物、溶剂和其他基本成分之间的相互作用,通过控制溶液特性(浓度、黏度、表面张力、电导率和电流体动力学加工条件),从而

实现生产直径从数百纳米到数十微米的纤维和颗粒。

2 电流体益生菌加工技术

目前,用于益生菌的包封主要采用挤压、乳化、喷雾干燥、冷冻干燥等方法[14]。挤压法制备的微胶囊粒径大,均匀性差;乳化法通常需要使用植物油,致使形成的胶囊大小和形状发生变化,且对包封壁材要求较高; 喷雾干燥是指菌液通过喷雾干燥系统,分散在热空气中,菌液迅速失水形成固体粉末的过程[15],此过程制粉迅速且用时较短,生产成本低,但由于热存在,对细胞活力损伤较大[16];冷冻干燥是在真空条件下,将冰升华至水蒸气,以除去菌液中的水蒸气而形成的冻干菌粉[17],与其他方法相比,此方法对于细胞的热损伤最小,因此制得的益生菌发酵剂活菌数相对较高、活性较好,但其成本较高且在冷冻过程中,因冰晶的形成也同样会使菌体细胞受到不同程度的损伤[18]。近年来,随着电流体动力学的发展,基于静电纺丝和静电喷雾等电流体动力学加工技术制备益生菌发酵剂具有技术简单、条件温和、包埋率高、粒径均匀等优点,逐步成为封装益生菌的新型技术。

2.1 静电纺丝

静电纺丝是一种电液滴动力学过程,将液滴在电荷作用下形成的微射流,经机械拉伸、伸长以及干燥步骤固化成纤维并吸附到接收板上的技术,制造出连续的聚合物纤维,其直径从纳米级至微米级不等[19]。静电纺丝设备有多种类型[20],根据接收装置可分为平板式、滚筒式以及多电极式静电纺丝;根据针头类型可分为单轴式、同轴式、三轴式和多针头式静电纺丝;根据包埋生物活性物质方式可分为单轴共混式、同轴式和乳液式静电纺丝等。

静电纺丝装置由注射器推注泵、喷丝装置、高压供电装置和收集器组成,静电纺丝的基本装置如图 1 所示。在静电纺丝过程中,聚合物溶液被泵吸入电喷丝板,使液滴带电,由于液滴表面电荷之间的静电排斥作用, 致使表面斥力大于表面张力,液滴呈现出圆锥结构,产生泰勒锥[21],射流最初是直线延伸, 后由于弯曲不稳定而剧烈地进行鞭打运动,当射流被拉伸到更细的直径时,迅速固化,从而导致固体纤维沉积在接地收集器上[22]。

通常静电纺丝过程可分为 4 个连续步骤:1)液滴的充注以及泰勒锥射流的产生;2)带电射流沿线扩散、细化和劈裂;3)电场作用下,带电射流变薄致使溶剂快速挥发;4)在集电极板处产生分布均匀的纳米纤维。

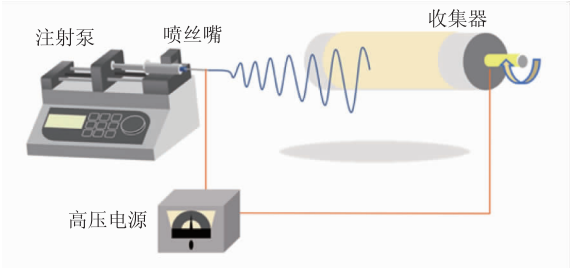


图 1 静电纺丝的基本装置示意图[22]

Fig. 1 Schematic diagram of basic device of electrospinning[22]

静电纺丝对益生菌活力的影响一直是研究热点,有研究者以聚乙烯醇为包封材料,利用静电纺丝技术将乳双歧杆菌 Bb-12 包封在“核-壳”结构的纳米纤维中, 得到平均直径为 150 nm 的电纺丝纤维,其在室温下贮藏 40 d 和 4 ℃下贮藏 130 d,纤维中益生菌的存活率显著高于未包埋的益生菌(P<0.05)[23],这项研究初步表明静电纺丝技术是一种包封益生菌的可行技术。将益生菌利用静电纺丝技术封装在纳米纤维中,以提高其在加工、贮藏期间菌体存活率及活力的研究也因此不断增加。但在纺丝过程中,影响纤维形态与纳米纤维成形效果的参数通常分为 3 类,即聚合物溶液的理化特性、加工条件和环境参数[24],适当的调控上述参数,才可获得所需形态的纳米纤维材料。以上 3 类因素共同决定着纳米纤维的成形效果,进而影响包封益生菌菌体的活性。

2.1.1 溶液参数 聚合物溶液的物理化学特性对纤维的形成至关重要,例如相对分子质量、浓度、电导率、溶剂特性、黏度系数等[25]。在静电纺丝过程中,为保证形成纤维的连续性,聚合物溶液的浓度一定要适中。通常情况下,静电纺丝纳米纤维是由高浓度的聚合物溶液组成。聚合物浓度太低,在静电纺丝过程中会形成纳米液滴,不能呈纤维状态;中等浓度的聚合物溶液中, 分子链仍因纠缠度不足,无法形成连续纤维;而高浓度的聚合物溶液,分子链纠缠度高,稳定了聚合物的射流,避免聚合物沿射流纤维成珠或破裂,能够形成结构良好的纺丝纤维[26]。在 Yilmaz 等研究中发现与聚乙烯醇纳米纤维中包裹的细菌相比,海藻酸钠/聚乙烯醇包裹的细菌

具有更高的存活率[27],这可能是由于聚乙烯醇的羟基和海藻酸钠的氨基之间形成了分子间氢键,导致纤维的微观结构高度致密。因此,聚合物溶液的性质直接决定着被包封益生菌菌体的活性大小。

此外,静电纺丝溶液中的一些添加剂可有效保护包封的菌体。Salalha 等在包封大肠杆菌时发现在纺丝溶液中添加适量的甘油,可避免其快速脱水,从而保证菌体的形态和存活率[28]。也有报道表明,在纺丝溶液中添加益生元(低聚果糖等)或某些冻干保护剂(海藻糖、菊粉等),同样可提高纺丝化益生菌活力。

有研究者将 10 种不同的乳酸菌封装在聚环氧乙烷纳米纤维中,发现其活性的丧失与细菌细胞的亲水性有关,亲水性细菌活性更易降低[29],这表明细菌表面的疏水分子(胞外多糖等)在并入纳米纤维的过程中能够为细菌提供更好的保护。研究表明,多糖是由糖苷键连接的单糖重复单元建立的大分子[30],具有增强细菌细胞的表面黏附性、抗生物膜、抗氧化剂、抗肿瘤和免疫刺激活性,并保护其免受重金属的影响等功能,具有良好的生物相容性、黏度和乳化稳定性,利于菌体更好地减少胃酸和胆盐的损害,因此被应用于电流体加工技术中。此外,生产纳米纤维的聚合物溶液的溶剂应具有挥发性、互溶性和一定沸点等理化特性。溶剂挥发性较低,虽未对介质破坏,但易形成湿纤维;反之,挥发度太高时,聚合物射流更易凝固,纤维很难形成。Rieger 等研究表明含不同浓度肉桂醛的壳聚糖/聚环氧乙烷水溶液随着聚合物含量增加,纳米纤维形态逐步由初始的珠串状变为圆柱形,证实了高相对分子质量决定了纳米纤维的结构形态[31]。同时,随着聚合物溶液电导率的增加,其纳米纤维直径会变小且分布均匀[32]。

2.1.2 工艺参数 在静电纺丝过程中,工艺参数会直接影响纤维的特性,如两个电极间的电压、聚合物溶液喷出的速度、喷丝嘴和收集器间的距离等。施加的电压对纤维形态具有重要影响,一般来说,当纺丝电压较低时,电场力无法克服溶液本身的表面张力,从而阻碍了本身拉伸和分裂,导致形成的纤维直径较大;反之,电场强度越大,聚合物溶液的射流易发生拉伸和分裂,会形成直径较小的纳米纤维。Larrondo 等研究发现增加电场强度,会使射流静电排斥力增加,从而形成的纤维直径较小[33]。

Škrlec 等通过研究电压对植物乳杆菌 ATCC8014 的影响,发现电压在 15 kV 时,菌体存活率最高,当电压增加到 20 kV(减少 2.03 lg(CFU/mL))或减少到 10 kV(减少 1.30 lg(CFU/mL))时,菌体存活率显著下降(P<0.05),但是当施加的电压从 10 kV 升至 20 kV,对生成的纳米纤维的厚度无显著影响(P>0.05)[34]。而 Beachley 等在研究中表明,同一范围内,随着施加电压的增加,纳米纤维的直径会显著减小[35]。但在上述研究中,纳米纤维直径没有随电压的改变而改变,可能是由于随着外加电压的增加,流量也随之增加,两个参数的共同调整使生成的纳米纤维厚度无显著差异。

静电纺丝过程中,应根据纺丝要求,合理有效地控制各电极丝间产生的脉冲电流,有利于形成连续而均匀的纳米纤维。推进注射器的速度直接决定纺丝速率,当纺丝速率较低时,纤维直径较小,随着纺丝速率的增加,纤维直径逐渐变大,直至出现珠状纤维。Megelski 等在一项研究中发现纤维直径和孔径与纺丝过程中的流速成正比[36]。此外,喷丝嘴和收集器间的距离直接影响电场的强度和溶剂的挥发,从而影响纤维直径,因此保持适当的距离,以便形成形貌较好的纺丝纤维[37]。

2.1.3 环境参数 温度、相对湿度和气流等环境参数也会影响静电纺丝纤维的特性。Mituppatham 等研究发现,温度会影响纳米纤维的直径,二者呈负相关[38],其原因是温度的改变会使溶液的黏度发生变化,黏度降低,纤维的直径会减小。此外,相对湿度较低的环境下,可以生产连续纤维,反之较难形成[39]。

表 1 中为部分基于静电纺丝技术包封的益生菌菌株的罗列,以期为静电纺丝技术应用于益生菌包封提供更多的参考。

2.2 静电喷雾

静电喷雾又称电喷涂,其基本原理与静电纺丝类似,即带电溶液在电场力作用下,受到重力、库仑力以及表面张力作用,当 3 种力达到平衡时,处于针头处的液滴会形成泰勒锥,液滴雾化后形成细小微粒,被收集在接收板上。此时,需控制聚合物溶液在低浓度范围,在此条件下由于分子链段缠结度低,易形成微小颗粒,即为静电喷雾,其形成的液滴尺寸小且直径分布均匀,可通过调节电参数对液滴的运动轨迹、速度以及沉积特性进行调控,应用于

表 1 静电纺丝包封益生菌研究文献

Table 1 Research references of probiotics encapsulated by electrospinning

菌株	聚合物	聚合物质量浓度	加工条件	平均直径	参考文献
B. lactis Bb-12	聚乙烯醇(PVOH)	PVOH:100 g/L	11 kV、13 cm、0.06~0.30 mL/h	150 nm	[23]
B. animalis Bb-12	壳聚糖聚(CH)、聚乙烯醇(PVA)、菊粉(I)	CH: 10 g/L;PVA:150 g/L	18 kV、15 cm、0.1 mL/h	(117.5±70.6)~(217.6±62.7) nm	[40]
L. rhamnosus GG	海藻酸钠(SA)、聚乙烯醇(PVA)	SA: 30 g/L;PVA: 200 g/L	22 kV、10 cm、1.2 mL/h	583.1 nm	[41]
L. acidophilus FTDC8933	可溶性膳食纤维(SDF)、聚乙烯醇(PVA)	PVA:80 g/L	12 kV、15 cm、0.1 mL/h	229~703 nm	[42]
L. acidophilus 016	细菌纤维素(BC)、聚乙烯醇(PVA)	BC: 50 g/L;PVA:50 g/L	20 kV、20 cm、0.5 mL/h	450~800 nm	[43]
L. reuteri E81	聚乙烯醇(PVA)	未说明	25 kV、10 cm、0.4 mL/h	(381.83±130.69) nm	[44]
L. paracasei KS-199	海藻酸钠(SA) 、聚乙烯醇(PVA)	PVA: 200 g/L;SA: 30 g/L	15~27 kV、6~15 cm、1.2 mL/h	170~360 nm	[27]
L. plantarum ATCC 8014	聚环氧乙烷(PEO) 、PEO/冻干保护剂(L)	PEO: 40 g/L;L: 40 g/L	15 kV、15 cm、0.4 mL/h	(815±115) nm	[34]
L. plantarum (具体未指出)	海藻酸钠(SA) 、聚乙烯醇(PVA)	SA: 20 g/L;PVA: 60 g/L 或 80 g/L	16 kV、14 cm、0.4 mL/h	(270±64) nm	[45]
L. paracasei (具体未指出)	甘油(G,核)、淀粉(S,壳)	G: 99.50 g/L;S:170 g/L	21 kV、2 mL/h (G)、5 mL/h (S)	(4.45±0.91) μm	[46]

注:未表明的聚合物质量浓度为参考文献中未注明。

益生菌菌体的包封过程中。有研究者以磷酸盐缓冲液和脱脂牛奶为溶剂,研究了基于静电喷雾技术浓缩蛋白和普鲁兰胶囊对乳双歧杆菌 Bb-12 的封装作用, 结果发现封装基质影响益生菌的生存能力,与普鲁兰相比,浓缩蛋白作为包封材料具有更强的保护能力[23]。

海藻酸盐是一种海藻多糖, 属于天然聚合物,具有良好的生物性能,通过海藻酸盐对益生菌进行包封, 益生菌菌体表现出了更高的存活率。Laelorspoen 等通过海藻酸钠/甘油溶液和静电喷雾形成的酸性玉米醇溶蛋白与 $CaCl_2$ 的溶液来制备胶囊, 探究了核壳海藻酸盐-玉米醇溶蛋白微胶囊包裹嗜酸乳杆菌的作用,结果发现包封嗜酸乳杆菌仅减少 1 lg(CFU/mL),而非包埋细菌的数量减少 5 lg(CFU/mL)[47]。Coghetto 等将海藻酸钠和植物乳杆菌 BL011 静电喷雾到 0.5 mol/L $CaCl_2$ 溶液中,发现海藻酸钠和海藻酸钠/柠檬果胶的羧基与钙离子交联,并在微胶囊表面形成刚性外壁,暴露于模拟胃液和肠液 2 h 后,非包裹细胞(对照组)的存活率分别下降 6.0 lg(CFU/mL)和 4.2 lg(CFU/mL),而微囊化细胞在胃液和肠液中的存活率分别降低了 2.9 lg(CFU/mL)和 2.7 lg(CFU/mL),表明基于静电喷雾技术包埋益生菌可显著提高其存活率 ($P<0.05$),同时进一步确认了该技术在益生菌封装方面的潜力[48]。Davood 等将植物乳杆菌利用静电喷雾技术生产的海藻酸钙/壳聚糖水凝胶微胶囊中,结果发现与游离细胞(对照组)相比,这些胶囊在模拟胃液(pH 2.5)和肠液(pH 7.4)中使细胞存活率提高了

1 lg(CFU/mL),封装效率为98%[49]。Phuong 等基于静电喷雾技术并采用海藻酸淀粉和壳聚糖封装植物乳杆菌,并将其制备的微胶囊用于胃肠道模拟实验,结果发现壳聚糖包覆的海藻酸钠颗粒在胃黏膜上表现出良好的保留能力,与纯壳聚糖对照组相当[50]。由于淀粉是一种非离子型多糖,且黏液黏附性差,因此还观察到海藻酸淀粉颗粒(阴性对照)的弱保留。此外,需要注意的是,静电喷雾产生的结构良好的黏液黏附性能,充分延长了益生菌在胃肠道中的停留时间以及与肠道微生物群的相互作用,对于益生菌的包封是有利的。

Librán 等将生物聚合物如乳清蛋白浓缩物、抗性麦芽糊精和聚乙烯吡咯烷酮作为基质,基于静电喷雾技术封装冷冻干燥的婴儿双歧杆菌 CECT 4552,结果发现包被的益生菌在 23%相对湿度下和 37 ℃的条件下可存活 600 d,600 d 后活菌数超过 6 lg(CFU/g),而非包被的细胞在相同条件下无法存活[51]。表 2 中罗列了基于静电喷雾技术包封的益生菌菌株的部分信息,以期为静电喷雾技术应用于益生菌包封提供更多的参考。

表 2 静电喷雾包封益生菌研究文献

Table 2 Research references on electrostatic spraying encapsulation of probiotics

菌种	聚合物	聚合物质量浓度	加工条件	平均直径	参考文献
B. lactis Bb-12	壳聚糖(CH)、菊粉(I)、抗性淀粉(RS)	CH: 50 mg/g; I: 50 mg/g	9.5 kV、5 mL/h	460~710 μm	[52]
L. plantarum BL011	海藻酸钠(ALG)、海藻酸钠/柠檬果胶(ALG/PEC)	ALG: 30 g/L; ALG/PEC: 30~40 g/L	24 kV、15 cm、2 mL/h	ALG:(109±15) μm; ALG/PEC:(105 ±13) μm	[48]
L. plantarum ATCC8014	海藻酸钠(SA)、壳聚糖(CH)	SA:50 g/L; CH:2.0 g/L	9.5 kV、10 cm、5 mL/h	300~550 μm	[50]
B. lactis Bb12	乳清蛋白浓缩物(WPC)、支链淀粉	WPC:300~400 g/L; Pullulan:150~200 g/L	12~14 kV、7 cm、0.3 mL/h	Pullulan/milk:658~1 315 nm; WPC/milk:259~2 024 nm	[23]
L. acidophilus TISTR1338	核:海藻酸钠(SA)、甘油(G);壳:蛋清(EA)、硬脂酸(SA)	SA: 2.50 g/L;G: 80 g/L; EA: 80 g/L	8 kV、6 cm、10 mL/h	(450±50) μm	[53]
B. infantis CECT 4552	麦芽糊精(M)、抗性麦芽糊精(F)、玉米蛋白、乳清蛋白浓缩物(WPC)	F: 200 g/L;WPC: 200 g/L; 玉米蛋白: 120 g/L;聚乙烯吡咯烷酮: 100 g/L	未说明	WPC:(2.47±1.15) μm; F:(87.00±2.07) μm; M:(1.95 ±0.54) μm	[51]

注:未表明的聚合物质量浓度为参考文献中未注明。

3 展 望

乳酸菌制剂广泛应用于发酵食品、益生菌制品和活菌药物领域,而高活性菌体数量是乳酸菌制剂加工的核心诉求。近年来,电流体加工技术因其加工工艺温和、功能特点较强、负载率高且制备的纤维能达到纳米级等优点,在开发高活性、高活菌数量益生菌制剂领域备受关注,为益生菌加工行业提供了新的可能。当前,为扩大电流体加工技术的潜在应用,应考虑包封益生菌壁材的安全性,不断优化电流体加工技术工艺参数,以期提高益生菌的存活率。益生菌包裹纳米纤维的制造必须依赖合成聚合物,因此,应用于包封益生菌的潜在生物聚合物需具备较高的可纺性及其对益生菌菌体活性的影响值得更深入的研究。

参考文献:

[1] RANJBAR S,SEYEDNEJAD S A,AZIMI H,et al. Emerging roles of probiotics in prevention and treatment of breast cancer:a comprehensive review of their therapeutic potential[J]. **Nutrition and Cancer**,2019,71(1):1-12.

[2] LINARES D M,GOMEZ C,RENES E,et al. Lactic acid bacteria and *Bifidobacteria* with potential to design natural biofunctional

health-promoting dairy foods[J]. **Frontiers in Microbiology**,2017,8(4):8-16.
[3] PENG M,TABASHSUM Z,ANDERSON M,et al. Effectiveness of probiotics,prebiotics,and prebiotic-like components in common functional foods[J]. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**,2020,19(4):8-9.
[4] 崔龙. 便秘治的再认识[J]. 临床外科杂志,2016,24(6):411-412.
[5] MARTÍN M J,LARA-VILLOSLADA F,RUIZ M A,et al. Microencapsulation of bacteria:a review of different technologies and their impact on the probiotic effects[J]. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**,2015,27(3):15-25.
[6] MIGUEL S P,FIGUEIRA D R,SIMOES D,et al. Electrospun polymeric nanofibres as wound dressings:a review[J]. **Colloids and Surfaces B:Biointerfaces**,2018,169(34):60-71.
[7] ZHAO L,DUAN G,ZHANG G,et al. Electrospun functional materials toward food packaging applications:a review[J]. **Nanomaterials**,2020,10(1):15-20.
[8] CHENG H,YANG X,CHE X,et al. Biomedical application and controlled drug release of electrospun fibrous materials[J]. **Materials Science and Engineering:C**,2018,90(12):750-763.
[9] LIU Y,MA H,HSIAO B S,et al. Improvement of meltdown temperature of lithium-ion battery separator using electrospun polyethersulfone membranes[J]. **Polymer**,2016,107(54):163-169.
[10] COLBERT S A. Numerical simulations of droplet trajectories from an electrostatic rotary-bell atomizer[D]. Philadelphia:Drexel University,2007:12-15.
[11] HARTMAN R,BORRA J P,BRUNNER D J,et al. The evolution of electrohydrodynamic sprays produced in the cone-jet mode,a physical model[J]. **Journal of Electrostatics**,1999,47(3):143-170.
[12] KHALID R,JEONG-BEOM K,SALEEM K,et al. Simulation of droplet generation through electrostatic forces[J]. **Journal of Mechanical Science & Technology**,2010,24(1):307-310.
[13] HUME A P,WEATHERLEY L R,PETERA J. Trajectories of charged drops in a liquid-liquid system[J]. **Chemical Engineering Journal**,2003,95(6):171-177.
[14] HAFFNER F B,DIAB R,PASC A. Encapsulation of probiotics:insights into academic and industrial approaches[J]. **Aims Materials Science**,2016,3(1):114-136.
[15] ROONGRUANGSRI W,BRONLUND J E. A review of drying processes in the production of pumpkin powder[J]. **International Journal of Food Engineering**,2015,11(6):9-19.
[16] GARRE E,RAGINEL F,PALACIOS A,et al. Oxidative stress responses and lipid peroxidation damage are induced during dehydration in the production of dry active wine yeasts[J]. **International Journal of Food Microbiology**,2010,136(3):295-303.
[17] 王秀芝,关志强,李敏. 真空冷冻干燥及其替代技术的研究及展望:第十届全国冷冻干燥学术交流会论文集[C]. [出版地不详]:中国制冷学会小型制冷机低温生物医学专业委员会,2010.
[18] ROSEN R,BUCHINGER S,PFÃNDER R,et al. Sos gene induction and possible mutagenic effects of freeze-drying in *Escherichia coli* and *Salmonella typhimurium*[J]. **Applied Microbiology and Biotechnology**,2016,100(21):55-64.
[19] BHARDWAJ N,KUNDU S C. Electrospinning:a fascinating fiber fabrication technique[J]. **Biotechnology Advances**,2010,28(3):325-347.
[20] 冯坤,韦昀姗,吴虹. 基于静电流体的静电纺丝/喷涂技术在食品领域中的研究进展[J]. 食品科学,2021,42(15):231-241.
[21] KHALF A,MADIHALLY S V. Recent advances in multiaxial electrospinning for drug delivery[J]. **European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics**,2016,112(3):1-17.
[22] SAJEDEH K,ATEFEH S,HAMID M,et al. A review of key challenges of electrospun scaffolds for tissue-engineering applications[J]. **Journal of Tissue Engineering & Regenerative**,2016,10(9):715-738.
[23] LOPEZ-RUBIO A,SANCHEZ E,SANZ Y,et al. Encapsulation of living bifidobacteria in ultrathin pvoh electrospun fibers[J]. **Biomacromolecules**,2009,10(10):23-29.
[24] 邓伶俐,张辉. 静电纺丝技术在食品领域的应用[J]. 食品科学,2020,41(13):283-290.
[25] 杨豆,张卫波,刘锰钰,等. 静电纺丝制备纳米纤维的影响因素研究进展[J]. 合成技术及应用,2017,32(5):29-33.
[26] LIU Y,HE J H,YU J Y,et al. Controlling numbers and sizes of beads in electrospun nanofibers[J]. **Polymer International**,2010,57(4):632-636.
[27] YILMAZ M T,TAYLAN O,KARAKAS C Y,et al. An alternative way to encapsulate probiotics within electrospun alginate nanofibers as monitored under simulated gastrointestinal conditions and in kefir[J]. **Carbohydrate Polymers**,2020,244(5):11-16.
[28] SALALHA W,KUHN J,DROR Y,et al. Encapsulation of bacteria and viruses in electrospun nanofibres[J]. **Nanotechnology**,2006,17(18):46-55.
[29] ZUPANČIČ Š,ŠKRLEC K,KOCBEK P,et al. Effects of electrospinning on the viability of ten species of lactic acid bacteria in

poly(ethylene oxide) nanofibers[J]. **Pharmaceutics**,2019,11(9):4-8.
[30] 戴晋军,周小辉. 常见多糖的研究进展[J]. 中国牧业通讯,2009,2(23):2-5.
[31] RIEGER K A,BIRCH N P,SCHIFFMAN J D. Electrospinning chitosan/poly (ethylene oxide) solutions with essential oils: correlating solution rheology to nanofiber formation[J]. **Carbohydrate Polymers**,2016,139(9):131-138.
[32] ABRIGO M,KINGSHOTT P,MCARTHUR S L. Electrospun polystyrene fiber diameter influences bacterial attachment, proliferation and growth[J]. **ACS Applied Materials & Interfaces**,2015,7(14):44-52.
[33] LARRONDO L,MANLEY R S J. Electrostatic fiber spinning from polymer melts:experimental observations on fiber formation and properties[J]. **Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics**,1981,19(6):9-20.
[34] ŠKRLEC K,ZUPANČIČ Š,MIHEVC S P,et al. Development of electrospun nanofibers that enable high loading and long-term viability of probiotics[J]. **European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics**,2019,136(67):10-11.
[35] BEACHLEY V,WEN X. Polymer nanofibrous structures:fabrication,biofunctionalization,and cell interactions[J]. **Progress in Polymer Science**,2010,35(7):8-22.
[36] MEGELSKI S,STEPHENS J S,CHASE D B,et al. Micro-and nanostructured surface morphology on electrospun polymer fibers [J]. **Macromolecules**,2002,35(22):56-66.
[37] SHAHABADI S M,KHERADMAND A,MONTAZERI V,et al. Effects of process and ambient parameters on diameter and morphology of electrospun polyacrylonitrile nanofibers[J]. **Polymer Science Series A**,2015,57(2):155-167.
[38] MITUPPATHAM C,NITHITANAKUL M,SUPAPHOL P. Ultrafine electrospun polyamide-6 fibers:effect of solution conditions on morphology and average fiber diameter[J]. **Macromolecular Chemistry & Physics**,2004,205:27-38.
[39] 徐聪,李同燮,钱珊珊,等. 静电纺丝技术在食品领域应用的研究进展[J].食品工业科技,2021,42(2):9-12.
[40] MOJAVERI S J,HOSSEINI S F,GHARSALLAOUI A. Viability improvement of *Bifidobacterium animalis* Bb-12 by encapsulation in chitosan/poly(vinyl alcohol) hybrid electrospun fiber mats[J]. **Carbohydrate Polymers**,2020,241(56):11-16.
[41] CEYLAN Z,MERAL R,KARAKAS C Y,et al. A novel strategy for probiotic bacteria:ensuring microbial stability of fish fillets using characterized probiotic bacteria-loaded nanofibers[J]. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**,2018,48(5): 212-218.
[42] FUNG W Y,YUEN K H ,LIONG M T. A growaste-based nanofibers as a probiotic encapsulant:fabrication and characterization [J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**,2011,59(15):40-47.
[43] TILAK J,SANJEEV B,MARIMUTHU S,et al. Bacterial cellulose nano fiber as carrier support for the immobilization of probiotic,*Lactobacillus acidophilus* 016[J]. **Carbohydrate Polymers**,2020,34(3):11-16.
[44] CEYLAN Z,USLU E,ISPIRLI H,et al. A novel perspective for *Lactobacillus reuters*:nanoencapsulation to obtain functional fish fillets[J]. **LWT–Food Science and Technology**,2019,115(56):10-18.
[45] FENG K,HUANG R M,WU R Q,et al. A novel route for double-layered encapsulation of probiotics with improved viability under adverse conditions[J]. **Food Chemistry**,2020,310(25):12-15.
[46] LANCUKI A,AMMAR A A,AVRAHAMI R,et al. Design of starch formate compound fibers as encapsulation platform for biotherapeutics[J]. **Carbohydrate Polymers**,2017,158(58):68-76.
[47] LAELORSPOEN N,WONGSASULAK S,YOOVIDHYA T,et al. Microencapsulation of *Lactobacillus acidophilus* in zein-alginate core-shell microcapsules via electrospraying[J]. **Journal of Functional Foods**,2014,7(4):342-349.
[48] COGHETTO C C,BRINQUES G B,SIQUEIRA N M,et al. Electrospraying microencapsulation of *Lactobacillus plantarum* enhances cell viability under refrigeration storage and simulated gastric and intestinal fluids[J]. **Journal of Functional Foods**, 2016,24(17):316-326.
[49] DAVOOD Z,MAHBOOBE S J, BEHROUZ G,et al. Electrospray assisted fabrication of hydrogel microcapsules by single and double-stage procedures for encapsulation of probiotics[J]. **Food and Bioproducts Processing**,2017,50(10):250-259.
[50] PHUONG T P,BUJNA E,KUN S,et al. Electrosprayed mucoadhesive alginate-chitosan microcapsules for gastrointestinal delivery of probiotics[J]. **International Journal of Pharmaceutics**,2021,597(35):12-23.
[51] LIBRÁN C M,CASTRO S,LAGARON J M. Encapsulation by electrospray coating atomization of probiotic strains [J]. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**,2017,39:16-22.
[52] ZAEIM D,SARABI-JAMAB M,GHORANI B,et al. Double layer co-encapsulation of probiotics and prebiotics by electro-hydrodynamic atomization[J]. **LWT– Food Science and Technology**,2019,110(66):102-109.
[53] PITIGRAISORN P,SRICHAISUPAKIT K,WONGPADUNGKIAT N,et al. Encapsulation of *Lactobacillus acidophilus* in moist-heat-resistant multilayered microcapsules[J]. **Journal of Food Engineering**,2017,192(37):11-18.