



叶慧,王子,吴君章,等. 卷烟微胶囊技术功能化研究进展[J]. 轻工学报,2026,41(3):76-87.

YE H, WANG Y, WU J Z, et al. Research progress of multifunctionalization of cigarette microcapsule technology [J]. Journal of Light Industry, 2026, 41(3): 76-87. DOI: 10. 12187/2026. 03. 008

卷烟微胶囊技术多功能化研究进展

叶慧^{1,2}, 王子², 吴君章², 胡文豪¹, 庞煜霞¹, 楼宏铭¹

1. 华南理工大学 化学与化工学院, 广东 广州 510641;
2. 广东中烟工业有限责任公司 技术中心, 广东 广州 510310

摘要: 为全面评估微胶囊技术在卷烟工业中的开发与应用潜力,从香味缓释、保湿增润、抑菌、降低毒害、温控导热、染色固色、烟气 pH 值调节 7 个方面梳理卷烟微胶囊技术多功能化研究进展,并阐述了新兴微胶囊制备技术的发展现状。随着技术的创新与发展,卷烟微胶囊已从单一香味缓释功能向多元化功能体系延伸。在香味缓释方面,囊膜扩散、壁材降解、压力破裂等机制可有效控制香精释放速率;在保湿增润方面,油性芯材的低挥发性和复合壁材的多重保护功能可稳定提升烟丝含水率;在抑菌方面,采用天然抑菌香料微胶囊可抑制霉菌生长和繁殖;在减害方面,主要通过多孔吸附剂微胶囊来降低烟气中的 CO 和亚硝胺类致癌物含量;在温控导热方面,温度响应型微胶囊的初步探索为优化加热不燃烧卷烟的热传递效率提供了可能;在染色固色方面,微胶囊技术通过物理隔离和化学保护的双重机制,显著提升天然色素在卷烟纸中的抗氧化性和色泽稳定性;在烟气 pH 值调节方面,利用微胶囊技术将有机酸包埋后添加到卷烟纸,可实现对烟气 pH 值的有效调控。新兴微胶囊制备技术凭借精准控释设计、低温绿色工艺等优势,为解决传统制备方法存在的包埋率不稳定、粒径分布宽泛、热敏成分易损伤等问题提供了新路径,但其在卷烟工业中的规模化应用仍面临低通量、高成本、工艺放大困难等挑战。未来可融合新兴制备技术的优势,从释放行为智能调控、芯壁材优化设计、多功能集成等方面深入研究,推动卷烟微胶囊技术向精准化、智能化与绿色化发展。

关键词: 卷烟;微胶囊技术;多功能化;香味缓释;卷烟保润;抑菌减害

中图分类号: TS452 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1553(2026)03-0076-12

0 引言

微胶囊技术是一种利用天然或合成高分子材料将固体、液体或气体封装形成微米或纳米尺度颗粒的技术^[1-2]。微胶囊结构由芯材和壁材构成,根据形态和内部结构差异,可分为单核、多核、双壳、

无定型、复合型等^[3]。基于微胶囊结构在保护敏感物质、控制芯材释放、掩盖不良气味及改变物质状态等方面的特性,微胶囊技术已成为卷烟工业功能化设计的关键手段,例如通过壁材的屏障和缓释作用封装易挥发香精,不仅可调控香味释放速率以实现增香效果,还能显著降低香精的环境暴露程度,

收稿日期:2025-05-15;修回日期:2025-07-15;出版日期:2026-06-15

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2023B0202080002);广东中烟工业有限责任公司科技项目(粤烟工科学[2024]-第41号)

作者简介:叶慧(1996—),女,广东省韶关市人,华南理工大学博士后,主要研究方向为烟草化学。E-mail: 870473589@qq.com

通信作者:楼宏铭(1975—),男,浙江省东阳市人,华南理工大学教授,博士,主要研究方向为可再生资源高效利用。E-mail: cehmlou@scut.edu.cn

从而提升其储存稳定性^[4]。近年来,伴随卷烟工业向低危害、高品质和智能化方向发展,微胶囊技术在卷烟领域的开发与研究日益受到重视。然而,该技术在卷烟中的实际应用仍面临诸多问题,如壁材的稳定性、释放机制的精准调控及与新型烟草制品的适配性等。因此,系统梳理微胶囊技术在卷烟中的功能化研究进展,对明晰现状、突破瓶颈及指导未来研究方向具有重要价值。

目前,国内关于卷烟微胶囊技术的研究主要集中于香精香料微胶囊的制备和加香应用,已有学者从芯壁材类别、制备方法、缓释原理、加香部位等角度进行了归纳^[5-8]。然而,该技术在卷烟中多功能化研究仍较为匮乏,这主要源于对非香味物质的微胶囊化及其功能探索相对有限。事实上,非香味物质的微胶囊化在卷烟工业中同样具有重要的应用价值,在保润、减害等功能方向发挥重要作用^[9-10]。鉴于此,本文系统梳理近20年国内卷烟微胶囊技术的功能化研究进展,涵盖香味缓释、保湿增润、抑菌、减害、温控导热、染色固色、烟气pH值调节等多元功能体系。此外,鉴于复凝聚法、锐孔法、喷雾干燥法等传统微胶囊制备技术在精准控释和规模化生产中的局限性^[6],进一步阐述了Pickering乳液模板法、微流控芯片等新兴合成技术在卷烟中的应用潜力,以期为卷烟微胶囊技术的多功能开发提供参考与借鉴。

1 卷烟微胶囊技术的多功能作用

1.1 香味缓释作用

随着低焦油卷烟技术的发展,减害降焦过程中的香气损失补偿成为烟草工业的核心课题。当前主要解决方案是在烟丝及辅料中直接添加香精香料^[11],但该方法难以有效调控香味物质释放速率,导致卷烟感官品质不稳定。微胶囊化技术通过壁材封装可有效解决香精易挥发、氧化及光解等问题,延缓香精变质并实现缓慢释放,从而提升卷烟抽吸体验的丰富性与愉悦感^[12-16]。微胶囊技术在传统卷烟中的应用主要集中于香精微胶囊的制备,其释放机理主要归纳为三种^[7]:1)囊膜扩散释放,即小分子香味物质经壁材的微孔或通道扩散而释

放,释放速率可通过壁材渗透性、厚度及温湿度进行调控。2)壁材的降解或溶解,即壁材在温度、水分、pH值、酶等特定环境作用下逐步溶解或发生生物降解而释放芯材。3)内外压力差致膜层破裂,即抽吸卷烟时,微胶囊壁材在手指、嘴唇的挤压或主流烟气的内外压力差作用下破裂而瞬时或快速释放香精。对于挥发性香精,上述机制可实现缓释,半挥发性或非挥发性香精则可借助易挥发载体完成迁移释放^[17]。

合适的壁材和制备工艺是实现香精有效缓释的关键^[18]。烟用微胶囊壁材多选用糖类、脂质类、蛋白类等无毒无害、生物相容性良好的天然聚合物,或纤维素衍生类等兼具良好溶解性和成膜性的半合成高分子材料,制备方法则以喷雾干燥、复凝聚、分子包络最为常用; β -环糊精具有独特的空腔结构,疏水性或部分疏水性的香味分子可以嵌入到环糊精的空腔内,形成主客体包合物,适合采用分子包络法或饱和水溶液法包埋薄荷醇、 β -紫罗兰酮等小分子挥发性香精,制备微胶囊包埋率可达80%以上,主要通过扩散和包合物解离实现缓释^[19-20]。阿拉伯胶、海藻酸钠、明胶、壳聚糖等壁材具有良好的溶解性和成膜性,适合采用喷雾干燥、喷雾冷凝或冷冻干燥法制备微胶囊^[21-22]。该类微胶囊囊壁具有多孔结构,其香精释放主要借助贯通孔道为香味分子提供高效扩散途径,释放快速,缓释周期较短。明胶-阿拉伯胶、明胶-羧甲基纤维素钠、壳聚糖-三聚磷酸钠等带相反电荷的天然高分子复合物适合采用复凝聚法形成致密连续的低孔隙率聚合物壁膜,可赋予微胶囊优异的香味阻隔性能,缓释持久,释放特性受壁材交联度、芯材性质及外部环境(燃烧温度、摩擦等)综合调控^[23-25]。

香味物质与壁材的分子相互作用对释放行为同样具有决定性影响:1)氢键、静电络合、包合作用等高强度非共价相互作用,将显著降低扩散释放速率,需特定环境触发方可释放。例如含—OH, —COOH, —NH₂, —C=O官能团的香味化合物(如肉桂醛、肉桂醇)与明胶、壳聚糖等壁材的极性基团(—OH, —COOH, —CONH—)形成氢键网络,会限制分子迁移并延长缓释时间^[26-27]。2)离子型

香精与阳离子壳聚糖、阴离子海藻酸钠、阿拉伯胶等带相反电荷的壁材通过库仑力形成稳定络合物,需环境离子强度剧增或pH诱导电荷反转才能触发释放^[28]。3)范德华力、物理吸附及空间位阻效应等弱相互作用也可降低缓释速率。此外,微胶囊粒径亦会直接影响其释放动力学,粒径过大会导致囊壁破裂,加速释放;粒径过小则会延缓释放,30~60 μm被证实为最佳粒径范围^[18]。

香精微胶囊已广泛应用于传统卷烟的烟丝、滤棒、卷烟纸、胶黏剂及包装材料等^[29-32]。例如,徐世涛等^[33]研究发现,玫瑰精油微胶囊在再造烟叶烘干过程中的损失率比常规精油要低,证实了微胶囊壁材的物理阻隔作用可抑制香精过早挥发,实现缓释。郭洪辉等^[27]将肉桂醇微胶囊添加到卷烟滤棒中,可以显著改善肉桂醇逐口释放的均匀稳定性,这主要得益于海藻酸钠-明胶复合致密壁材对芯材分子逸散的有效调控。左满兴等^[34]将摩擦释香微胶囊(外力触发囊壁破裂)应用于卷烟纸,发现β-紫罗兰酮4个月内留香稳定,在30 d内摩擦1—5次释香均匀,并在抽吸时可转移至卷烟主流烟气中,能够满足卷烟纸产品在贮存留香、摩擦释香和烟气转移等环节的性能要求。

在新型烟草领域,微胶囊可被引入电子烟烟油基质、加热不燃烧烟草薄片及烟草咀嚼片等载体^[35-37],但受低温释放效率与生物环境稳定性等限制,相关研究仍处于技术探索与效能优化的发展阶段。巩效伟等^[38]用β-环糊精包埋烟草香精,并将其应用于电子烟油,发现随着抽吸口数增加,对照组单位烟气中香气成分和烟碱释放量均呈下降趋势,而实验组则呈上升趋势,证实了微胶囊对香精具有缓释效果。郭林青等^[39]将薄荷微胶囊添加至加热卷烟中,发现微胶囊芯材释放速率降至未包埋组的35%~40%,释放均匀性与持久性显著提升。鉴于新型烟草制品香气表达的局限性,建议优先选用高浓度、特征香气显著的香精进行微胶囊化设计,以满足产品开发需求。

综上所述,微胶囊技术在传统卷烟加香缓释中成效显著,但在新型烟草制品中的适配性研究仍显薄弱。因此,微胶囊释放行为需针对差异化的热力

学环境、气溶胶介质及抽吸行为进行优化,释放精准性、壁材高温稳定性与安全性等共性问题尚待突破。

1.2 保湿增润作用

卷烟的保湿增润性能直接影响其香味和舒适度,理想保润剂须具备强锁水能力、无异味且与香精料液相容性好等特征^[40]。甘油、丙二醇、山梨醇等多元醇类保润剂富含羟基结构,可通过氢键作用与水分子结合,吸湿特性良好,且在卷烟加工阶段能有效维持烟丝水分含量并提升其加工耐受性,是当前国内烟草行业应用与研究的主流,但对于维持成品卷烟含水率及改善抽吸口感(如降低烟气干燥感、提升甜润度)效果仍显不足^[41]。为此,微胶囊化保润剂制备技术成为近年研究热点^[42]。该技术利用高分子壁材将水性或油性保润剂封装于微胶囊内,其核心作用机制包括:1)物理屏障作用,即利用壁材阻隔保润剂与烟丝或环境的直接接触,减少其在加工、储存过程中的迁移和损失;2)控释增润作用,即选择合适壁材使其在特定条件(如烟丝烘干阶段保持完整,在燃烧温度>200℃时破裂)下释放芯材,提升烟气湿润度。

余振华等^[43]选用改性淀粉类壁材包封原生态水制备微胶囊保润剂,将其涂覆于卷烟纸内表面,在卷烟燃烧过程中可维持常规烟气指标稳定,并能释放水分湿润烟气,为功能性卷烟纸的开发提供了新途径。叶荣飞等^[44]采用复凝聚技术包封油性物质制备微胶囊保润剂,与丙二醇相比,其在存储30 d后仍保持8.7%的湿度优势,表现出更优异的保润与防潮性能。也有研究将保润剂橄榄果油脂、蔗糖脂与烟草分子蒸馏物进行配伍,通过喷雾干燥制备微胶囊保润剂,经水分散后添加至烟丝中,可显著改善卷烟生津保润效果,且无须改变现有卷烟加工工艺,具备实际生产应用潜力^[45]。

综上所述,微胶囊技术实现了保润成分的稳定释放和高效利用,并成功克服了传统保润剂分散性不佳的局限。然而,当前研究多停留于实验室验证阶段,其规模化应用仍受制于工艺复杂度与成本效益。此外,现有微胶囊体系缺乏对不同烟草制品差异化保润需求,特别是加热不燃烧卷烟的低温保润

的针对性设计,难以适应多样化的应用场景。

1.3 抑菌作用

烟草吸湿性较强,且含有葡萄糖、蛋白质、有机酸等营养源,为霉菌提供了理想生长基质,易引发微生物滋生导致烟草制品品质劣变^[46]。在气候潮湿的南方地区,卷烟吸湿霉变风险更高,不仅会加速内部物质分解、降低产品品质、影响色泽与抽吸口感^[47],而且霉菌繁殖产生的有害物质还会威胁产品安全,从而造成巨大经济损失。因此,开发有效的抑菌技术对保障卷烟品质与安全至关重要。微胶囊技术在此领域的应用研究主要是对具有抑菌特性的精油进行包埋,减少其挥发损失,从而提升其抑菌稳定性与持久性^[48-49]。

王帅^[50]将丁香酚、肉桂醛、苯甲醇、苯甲酸4种微胶囊与混合霉菌孢子(巴西曲霉、黑曲霉、黄曲霉)喷洒于烟丝,发现4种微胶囊均显示出不同程度的抑菌效果,其中肉桂醛微胶囊对混合霉菌孢子的抑制率达100%,同时还证实了这些微胶囊具有良好的DPPH·和ABTS·清除能力及Fe³⁺还原能力。陈文怡^[51]的研究也发现,添加0.5%肉桂醛微胶囊即可使烟丝5d防霉效力达98.33%;中试卷烟样品高湿贮存实验也表明肉桂醛微胶囊可有效抑制成品卷烟在货架期的霉变。何爱民等^[52]通过壳聚糖与叶啉接枝共聚制备了叶啉化壳聚糖壁材,并用于封装水溶性烟用香精,发现所制微胶囊在改善香精缓释性能的同时,还可提升卷烟产品的抗菌抗氧化能力及安全性。

综上所述,微胶囊技术通过封装抑菌成分或选用功能性壁材,有效提升了烟草制品的抑菌水平和卫生安全性,但高湿度等特定气候条件下的湿度响应型壁材及高效天然抗菌材料仍待开发,且壁材安全性、工艺可行性等问题需同步解决。

1.4 降低毒害作用

卷烟燃烧是在高温下进行的不完全氧化过程,伴随蒸馏、干馏、热解及合成等复杂化学反应,产生的烟气是一种包含气态、液态及固态微粒的多相气溶胶体系,其中含有焦油、尼古丁、亚硝胺、CO、重金属等多种有害物质,对人体健康构成风险^[53-54]。降低烟气危害的策略包括改进滤嘴结构与材料、优化

叶组配方、提升卷烟纸透气度及引入微胶囊技术等^[55]。微胶囊技术的减害机理主要包括:1)吸附与催化减害,即将沸石、MCM-48、SBA-15、复合氧化物等多孔吸附剂或催化材料封装于微胶囊内,当烟气通过时,利用卷烟纸区域或滤嘴中相对较低的温度环境,促使壁材破裂释放芯材,实现对有害物质的吸附或催化降解^[56-58];2)功能性成分递送,即包埋具有潜在生理活性的天然提取物,在卷烟抽吸过程中释放,以降低烟气刺激性或改善呼吸感受^[59]。

王平等^[60]首次采用壳聚糖或淀粉壁材包埋固体吸附剂,并施加于卷烟纸,其利用卷烟纸外围较低的燃烧温度促使壁材破裂释放吸附剂,烟气中CO含量降幅>10%、亚硝胺含量降幅>15%,且避免吸附剂直接添加至滤嘴或烟丝中导致的孔道堵塞与活性中心毒化问题。除吸附剂外,微胶囊技术也被用于封装具有潜在减害保健功能的天然提取物如中草药、水果、茶叶、植物根茎等。冯守爱等^[59]采用相分离法,以乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)为壁材包埋天然绿茶提取物,并添加至烟用胶黏剂中,发现卷烟燃吸时释放的香叶醇等活性成分可改善感官品质的同时降低潜在危害。

综上所述,微胶囊技术为烟气减害提供了新的技术路径,但在实际应用中仍面临三大挑战:一是功能性芯材种类有限,难以覆盖烟气中复杂多样的有害成分;二是芯材释放对卷烟风味的影响缺乏系统评估,存在引入不良杂气的风险;三是高温下壁材稳定性不足。未来研究应聚焦于:1)开发多功能复合芯材,如兼具吸附与抗氧化功能等,拓宽减害范围;2)优化壁材设计,如引入耐高温聚合物等,提升壁材热稳定性与释放可控性;3)结合感官评价与化学成分分析,系统评估微胶囊对卷烟风味的影响,寻求其对卷烟减害效能与感官品质的平衡。

1.5 温控导热作用

加热不燃烧卷烟普遍存在烟芯材料热传递效率低、烟雾生成量不足及烟气温度过高等问题,而传统卷烟同样存在燃吸温度调控的需求^[61]。可通过调控微胶囊添加量影响卷烟纸的阴燃速率和最高温度,从而直接改变烟气温度^[62];还可利用微胶囊包埋油性溶剂、碳材料、相变材料等功能性芯材

并在特定条件下动态释放,实现温度调控。1)直接改善传热。将高导热材料(如碳材料-石墨烯、氮化碳、膨胀石墨)或吸/释热的相变材料(如聚乙二醇)封装后置于烟芯^[63-66],当环境温度达到微胶囊响应点,壁材熔融或破裂,释放芯材以增强热传导效率或缓冲温度波动。如张骥等^[67]公开了一种以导热材料(导热石墨、碳纳米管或石墨烯)和油性溶剂(辛癸酸甘油酯)为芯材的温控型导热烟用微胶囊,当温度超过160℃,该微胶囊壁材逐渐熔融破裂释放芯材增加传热效果,显著改善了加热不燃烧卷烟烟芯材料传热性能差、烟雾量不足等问题。2)间接调控烟气温度。溶解剂类芯材受烟气热量触发释放后,可改变滤嘴物理结构,增大烟气接触面积或改变流经路径,从而降低吸入烟气温度。如刘冰等^[68]设计了一种作用于滤棒的热敏型微胶囊,内含溶解剂(脂溶性溶剂,如粟米油、菜籽油、花生油、大麻油等)和烟用香精。在抽吸加热不燃烧卷烟的过程中,烟气温度导致壁材坍塌释放溶解剂,降低了降温层与壳体的黏性,诱导降温层部分脱落并产生褶皱或波浪纹结构等,增大烟气与降温层接触面积及改变烟气路径,有效降低吸入烟气温度。

综上所述,尽管温控导热微胶囊在卷烟领域的研究还相对有限,但其在优化热传递效率、调控烟气温度及提升消费者体验方面展现出一定的潜力,为解决加热不燃烧卷烟核心性能问题提供了新思路。未来可重点优化芯壁材体系及制备工艺,确保微胶囊在卷烟环境中的热稳定性、释放可控性及实际效能。

1.6 染色固色作用

相较于传统白色卷烟纸,彩色卷烟纸在保留基本功能的同时,通过引入色泽提升产品外观辨识度与品牌价值,并已延伸应用于新型烟草制品,其制备过程需添加天然染料且要求色素不溶出、色泽持久稳定^[69]。针对天然染料耐光性差等问题,微胶囊技术通过以下双重机制提升色素稳定性:一是物理隔离。利用壁材阻隔色素与光、O₂、水分等环境因素的直接接触,减缓色素光降解与氧化作用;二是化学保护。部分壁材自身或引入的稳定剂可淬灭自由基或抑制氧化反应,来维持色泽稳定。

王磊等^[70]制备的用于彩色卷烟纸的色素微胶囊,抗氧化性和色泽稳定性较天然色素都有所提高。孙德平等^[71]将含有色素的涂布液微胶囊化后再涂布到重组烟叶卷烟纸上,使其表面形成一层薄膜,具有固色能力强、不掉色和缓释保香的效果。此外,色素微胶囊还可为重组烟叶裹衣着色^[72]。

综上所述,当前卷烟用色素微胶囊技术仍面临制备工艺成熟度低,微胶囊的成膜性、透明度、与纸浆相容性及燃烧安全性等关键性能需进一步优化,工业化应用实例有限等挑战。未来需持续加强着色效果等技术研发与应用探索,以满足市场对高性能、多功能彩色卷烟纸的多样化需求。

1.7 烟气 pH 值调节作用

烟气 pH 值过高或过低都可能导致吸烟者感到不适,甚至增加潜在健康风险。研究者^[73]采用复凝聚法对挥发性和(或)非挥发性有机酸进行包裹,并于卷烟纸生产的施胶段添加,发现微胶囊化的有机酸不仅能显著降低挥发性有机酸在存放过程中的挥发速度,还能有效避免因有机酸添加量过高而与卷烟纸中 CaCO₃ 的反应缺陷。更重要的是,微胶囊化的有机酸在卷烟燃烧时才会被释放出来,从而有效调节烟气 pH 值,改善烟气的酸碱平衡,有助于提升香气质和抽吸品质。这一创新技术为卷烟纸的品质提升提供了新思路,并有望延伸至新型烟草制品。

综上所述,微胶囊技术为解决卷烟纸中有机酸易挥发、与填料反应等问题提供了有效方案,其通过物理屏障作用实现对有机酸的精准保护与控温释放,不仅保障了卷烟纸的物理性能,也为烟气 pH 值的主动调控及感官品质的优化开辟了新途径。尽管该技术尚处于起步阶段,现有成果多源于专利探索,但其展现出的应用潜力仍值得进一步探究。

尽管微胶囊技术在卷烟多功能化领域展现出广阔前景,但仍面临诸多共性挑战:1)释放精准性不足。现有技术主要依赖于环境触发或被动扩散/降解,对释放速率、时空分布的主动智能调控能力有限,难以满足新型烟草制品等复杂场景需求。2)壁材安全性和裂解产物研究缺乏。部分壁材在卷烟加工或高温燃烧条件下可能分解失效或产生

不良裂解物,如壳聚糖在 $>200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时会裂解生成醛酮类物质;明胶在 $>300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时会释放含氮杂环胺,均存在向主流烟气迁移的风险,亟待系统评估常用天然壁材及合成高分子化合物在燃烧/加热过程中的裂解行为、产物及其在烟气中的转移和毒理学影响。

3) 热稳定性不足。部分壁材难以耐受,卷烟加工条件(如烘丝)或高温燃烧,易导致芯材提前释放、功能失效或产生不良物质。4) 功能单一。现有微胶囊体系多针对单一功能,如仅缓释香味、吸附有害物质、保温增润等设计,难以实现集香味缓释、高效抑菌、精准减害复合功能的协同增效。5) 传统制备工艺存在缺陷。复凝聚法、喷雾干燥法等主流微胶囊制备方法普遍存在包埋率波动大、粒径均一性差、热敏芯材易损伤等缺陷,制约了微胶囊的性能优化。6) 载体-微胶囊界面稳定性不足。微胶囊在滤嘴丝束、卷烟纸、烟丝等卷烟载体表面的附着牢固度与分散均匀性直接影响其释放效率。现有研究多忽视载体界面特性与微胶囊表面的相容性设计,导致加工或抽吸过程中微胶囊脱落、迁移,显著降低功能性成分的利用率。7) 部分功能领域研究基础薄弱:如抑菌、染色固色、烟气 pH 值调节等方面公开、深入的研究稀缺,现有成果主要基于专利,缺乏详细的实验数据支撑其普适性。8) 工业化应用壁垒高,尤其在涉及新兴技术或复合功能的体系,规模化生产面临工艺复杂、成本高昂、效率低下及质量稳定性控制困难等问题。

2 新兴微胶囊制备技术

当前,卷烟微胶囊技术的功能化研究已取得重要进展,但传统制备方法的局限性制约了其进一步发展,例如尚难实现复杂核壳结构、多层包覆或高度均一纳米/微米球微胶囊的可控制备,难以满足卷烟多功能集成要求;规模化生产中微胶囊粒径、形貌和包封率的精确控制仍难以实现。近年来,Pickering 乳液模板法、微流控技术等新兴制备技术凭借其精准控释设计、低温绿色工艺、智能化生产等优势,在医药、食品等领域展现出一定的应用潜力,为卷烟微胶囊的功能强化和工业化升级提供了技术借鉴,例如超临界流体可低温封装热敏性香精、微流控芯片技术有望解决

卷烟功能性添加剂引入的难题等^[74-76]。

2.1 Pickering 乳液模板技术

Pickering 乳液模板技术是一种新兴的微胶囊制备技术,其核心机理是利用固体纳米颗粒作为乳液稳定剂,再通过物理或化学手段增强油水界面处固体颗粒间的相互作用,使颗粒相互连接形成具有一定机械强度的微胶囊^[77]。该技术在药物递送、催化及仿生材料等领域应用广泛,通过改变交联剂用量或反应温度等反应条件可实现对微胶囊渗透性的精准控制,还能通过选择不同壁材制备结构和功能各异的微胶囊^[78-79]。此外,该技术可在较宽温度和 pH 值范围内保持乳液稳定,适合易氧化香精或控释功能物质的封装,且低温制备条件有助于保护热敏成分。在卷烟工业中,可考虑选用 SiO_2 纳米颗粒稳定后的 Pickering 乳液封装香精和保润剂,以提高芯材的稳定性和释放效果。

2.2 微流控技术

微流控技术制备微胶囊,是指借助微流控芯片的微米级通道网络,精准操控两相或多相流体,通过乳化、凝胶化、聚沉或界面聚合等反应,在芯片内原位形成微胶囊的技术^[80]。通过调节流速、通道几何结构和流体性质,可以实现对微胶囊尺寸的精确调控,制备出粒径均匀的微胶囊^[81]。相比于传统的制粒方法(喷雾干燥法、研磨法、冷冻干燥法等),该技术制备的微胶囊粒径小且分布均匀,但该方法的通量较低,难以满足卷烟大规模生产的需求,目前主要适用于前期研究、原型开发或小批量高附加值产品。

2.3 超临界流体技术

超临界流体是一种温度和压力均高于其临界值的特殊状态下的流体溶剂,兼具气体的扩散性和液体的溶解能力。在超临界流体技术中,通常将药物或活性成分溶解在超临界流体中,通过喷雾、相分离或溶剂挥发等方法将目标物包裹在囊壁材料中,形成微胶囊^[82-83]。超临界流体法的优势在于其温和的制备条件,能够避免高温对香料和保润剂的损伤,确保其在卷烟中的高效封装和均匀释放。此外,超临界 CO_2 等流体在常温下可以快速挥发,确保微胶囊中无有机溶剂残留,有助于提升微胶囊的

安全性和稳定性。

2.4 层层自组装(LBL)技术

层层自组装技术是采用逐层交替沉积的方法,将核心颗粒依次浸入带正电或负电的聚合物溶液中,通过静电吸附、氢键、共价键、化学交联等作用使聚合物在颗粒表面形成一层薄膜,多次重复此步骤,可在颗粒表面逐层沉积多层薄膜,形成具有特定结构和功能的微胶囊^[84]。这种技术能够精确控制微胶囊的层数、厚度和组成,实现对微胶囊结构和功能的精细调控,避免了高温、高压等极端条件对活性成分的损伤,且使用的材料通常是水溶性聚合物,对环境友好。此外,该技术可定制性高,可根据具体需求选择不同的聚合物和功能性分子,制备具有特定性能的微胶囊^[85]。

然而,这些新兴技术虽可在实验室精密操控,但微观尺度上的液滴生产、逐层沉积等往往伴随着低通量、高成本、工艺放大困难等问题,难以满足卷烟工业对高效率、低成本、连续化大规模生产的要求。未来需通过简化工艺、开发高通量设备等技术适配性改良,使新兴技术成为卷烟功能化微胶囊的工业制备新路线。

3 结论与展望

本文重点从香味缓释、保湿增润、抑菌、降低毒害、温控导热、染色固色、烟气 pH 值调节 7 个方面梳理了国内微胶囊技术在卷烟工业中的多功能化研究进展,并阐述了新兴微胶囊制备技术的发展现状。卷烟微胶囊技术已从传统的香味缓释拓展至保湿增润、抑菌、降低毒害、温控导热、染色固色及烟气 pH 值调节等多元功能体系,这些功能的实现不仅需要芯材与壁材的理性设计与协同优化,也依赖微胶囊技术在卷烟多功能开发中的持续创新与发展。然而,当前研究仍面临释放精准性不足、壁材安全性与热稳定性评价缺失、功能集成度低、载体界面稳定性弱、部分功能领域研究基础薄弱等问题,制约了其工业化进程与规模化应用。鉴于此,未来研究可聚焦于以下几方面:

1) 释放行为智能调控。构建环境响应型智能释放系统,开发温度/pH 双重响应及光/磁触发等

新型释放机制,适配新型烟草制品的复杂场景。

2) 芯壁材优化设计。针对挥发性香精油与非香味功能物质特性,分别侧重壁材热稳定性/相容性与功能导向适配,保障微胶囊稳定性与功能性;针对壁材高温裂解产物及其迁移风险的核心挑战,系统研究不同壁材的裂解动力学、裂解产物的迁移行为及毒理学评估,建立壁材安全性分级标准与筛选规范。

3) 多功能集成。通过复合材料与多层包覆技术,整合吸附、缓释、催化等模块,实现卷烟品质、安全性与个性化功能的协同提升;同时,系统对比不同功能导向下的芯壁材组合、制备方法及性能优势,有助于阐明微胶囊技术在卷烟多功能开发中的核心价值。

4) 载体界面稳定性强化。开发表面改性 with 界面增强技术,提升微胶囊在卷烟纸、滤嘴等载体的附着牢度与功能持久性。

5) 制备工艺改良。优化传统工艺参数,引入新兴制备技术精准调控微胶囊粒径与形态;推进技术适配性改良、成本控制与质量标准化,支撑规模化应用。

参考文献:

- [1] 张瀛丹,盛良杰,吴澎.微胶囊技术在食品中的应用研究[J]. 饮料工业,2024,27(2):268-275.
ZHANG Y D, SHENG L J, WU P. Research on the application of microcapsule technology in food [J]. Beverage Industry, 2024, 27(2): 268-275.
- [2] 陈潇濂.微胶囊技术在纺织品整理中的应用现状分析[J]. 纺织报告,2023,42(1):35-37.
CHEN X M. Analysis of the application status of microcapsule technology in textile finishing [J]. Textile Reports, 2023, 42(1): 35-37.
- [3] 张妮娜,张媛,张新庄,等.微胶囊的合成及应用研究进展[J]. 石油化工应用,2025,44(3):10-13,36.
ZHANG N N, ZHANG Y, ZHANG X Z, et al. Research progress in the synthesis and application of microcapsules [J]. Petrochemical Industry Application, 2025, 44(3): 10-13, 36.
- [4] 杨蕾,李立鹏,刘远上,等.香草精油微胶囊的制备及其在卷烟纸中的应用研究[J]. 中国造纸,2025,44(5):47-53.
YANG L, LI L P, LIU Y S, et al. Preparation of Vanilla essential oil microcapsules and their application in

- cigarette paper[J]. *China Pulp & Paper*, 2025, 44(5): 47-53.
- [5] 章智华,钟舒睿,彭飞,等.微胶囊壁材及制备技术的研究进展[J].*食品科学*,2020,41(9):246-253.
ZHANG Z H,ZHONG S R,PENG F, et al. Progress in microcapsule wall materials and preparation techniques [J]. *Food Science*,2020,41(9):246-253.
- [6] 张玲,蔡昊城,张晶儒,等.生物质基微胶囊在烟草中的研究进展[J].*中国造纸*,2025,44(7):39-46.
ZHANG L, CAI H C, ZHANG J R, et al. Research progress on biomass-based microcapsules in tobacco [J]. *China Pulp & Paper*,2025,44(7):39-46.
- [7] 吴酉芝,李保国,卢超.香精微囊化壁材特性及其控制释放机理[J].*食品工业科技*,2009,30(7):363-366.
WU Y Z, LI B G, HU C. Property of flavor microcapsule wall material and its mechanism of control release [J]. *Science and Technology of Food Industry*,2009,30(7):363-366.
- [8] 艾亦旻.烟用材料加香方法研究进展[J].*科技视界*,2021,11(17):141-142.
AI Y M. Research progress on flavoring methods of tobacco materials [J]. *Science & Technology Vision*,2021,11(17):141-142.
- [9] 余振华,詹建波,杨丽萍,等.一种具有保湿功能卷烟纸的研发[J].*中国造纸*,2017,36(4):42-45.
YU Z H,ZHAN J B,YANG L P, et al. Research on a kind of cigarette paper with moisture keeping function [J]. *China Pulp & Paper*,2017,36(4):42-45.
- [10] 吴艾瑾,叶世著.壳聚糖及其改性材料在降低卷烟烟气有害成分上的应用[J].*广东化工*,2019,46(15):125-126,129.
WU A J, YE S Z. Application of chitosan and its modification on reducing harmful contents from cigarette smoke [J]. *Guangdong Chemical Industry*,2019,46(15):125-126,129.
- [11] 徐庆,陈波,文武,等.基于卷烟制丝加料施加效果改善的系统优化[J].*中国新技术新产品*,2023(12):46-49.
XU Q, CHEN B, WEN W, et al. System optimization based on the improvement of feeding effect in cigarette shredding [J]. *New Technology & New Products of China*,2023(12):46-49.
- [12] 何红梅,杨静,张文灿,等.一种薄荷味卷烟纸增香用微胶囊的制备及应用[J].*中华纸业*,2023,44(10):35-38.
HE H M, YANG J, ZHANG W C, et al. Preparation of microcapsules for flavoring peppermint cigarette paper [J]. *China Pulp & Paper Industry*,2023,44(10):35-38.
- [13] 吴彦,熊亚妹,孟丹丹,等.苯乙醛纳米微胶囊的制备及特性表征[J].*化学研究与应用*,2020,32(12):2199-2208.
WU Y, XIONG Y M, MENG D D, et al. Preparation and characterization of phenylacetaldehyde nano-microcapsules [J]. *Chemical Research and Application*,2020,32(12):2199-2208.
- [14] 李景权,何昱轩,孙文轩.卷烟薄荷香型微胶囊颗粒的制备及其应用研究[J].*食品工业科技*,2020,41(20):194-199.
LI J Q, HE Y X, SUN W X. Preparation of mint flavor cigarette microcapsule particles and its application [J]. *Science and Technology of Food Industry*,2020,41(20):194-199.
- [15] 许春平,梁佳欣,李世杰,等.柠檬精油亚微米微胶囊的制备及其在香味纸中的应用[J].*中国造纸*,2023,42(1):24-32.
XU C P, LIANG J X, LI S J, et al. Preparation of lemon essential oil submicron microcapsules and its application in scented paper [J]. *China Pulp & Paper*,2023,42(1):24-32.
- [16] 李振杰,熊亚妹,刘远上,等.复凝聚法制备甜橙油纳米微胶囊的研究[J].*轻工学报*,2022,37(2):44-50.
LI Z J, XIONG Y M, LIU Y S, et al. Study on the preparation of sweet orange oil nanocapsules by complex coacervation [J]. *Journal of Light Industry*,2022,37(2):44-50.
- [17] 肖永银,杜超,刘鑫,等.一种烟用复合载香芯线:111759002A [P]. 2020-10-13.
XIAO Y Y, DU C, LIU X, et al. A composite incense carrying core wire for cigarette: 111759002A [P]. 2020-10-13.
- [18] 周坤,赵婷怡,史清照,等.缓/控释型香料微胶囊制备技术及其应用研究进展[J].*河南大学学报(自然科学版)*,2022,52(6):710-720.
ZHOU K, ZHAO T Y, SHI Q Z, et al. Preparation technology and application research progress of sustained/controlled release fragrance microcapsules [J]. *Journal of Henan University (Natural Science)*,2022,52(6):710-720.
- [19] 姬小明,刘云,赵铭钦. β -紫罗兰酮与 β -环糊精包合物的制备及卷烟加香效应[J].*湖南农业大学学报(自然科学版)*,2011,37(1):94-96.
JI X M, LIU Y, ZHAO M Q. Ionone cyclodextrin preparation and the application of tobacco flavoring [J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*,2011,37(1):94-96.
- [20] 黄江锋,陈彬才,刘鸿,等.薄荷醇/ β -环糊精微囊化香精的制备及其性能研究[J].*当代化工*,2022,51(11):2622-2627.
HUANG J F, CHEN B C, LIU H, et al. Study on preparation and properties of menthol/ β -cyclodextrin microencapsulated essence [J]. *Contemporary Chemical Industry*,2022,51(11):2622-2627.
- [21] 白晓莉,龚荣岗,董伟,等.树花精油微胶囊的制备工艺及其在卷烟中的应用研究[J].*食品工业*,2013,34(7):28-31.

- BAI X L, GONG R G, DONG W, et al. Preparation and optimization on the controlled-release of gelatinsodium alginate compound based on essential oils from tea flower by subcritical water[J]. *The Food Industry*, 2013, 34(7): 28-31.
- [22] 卓浩廉, 罗福明, 伍锦鸣, 等. 红枣香精微胶囊的制备及其在卷烟纸中的应用研究[J]. *农产品加工*, 2015(7): 17-18, 22.
- ZHUO H L, LUO F M, WU J M, et al. Manufacturing microcapsules of *Zizyphus jujuba* oil and application in cigarette paper[J]. *Farm Products Processing*, 2015(7): 17-18, 22.
- [23] 沈妍, 徐兰兰, 尧珍玉, 等. 微胶囊在卷烟用纸上的应用评价[J]. *中国造纸*, 2017, 36(7): 36-43.
- SHEN Y, XU L L, YAO Z Y, et al. Application of complex coacervation microcapsules in cigarette paper[J]. *China Pulp & Paper*, 2017, 36(7): 36-43.
- [24] 许春平, 赵珊珊, 俞金伟, 等. 野菊花精油微胶囊的制备及在卷烟加香中的应用[J]. *香料香精化妆品*, 2016(2): 31-35.
- XU C P, ZHAO S S, YU J W, et al. Preparation of *Chrysanthemum* oil microcapsule and its application in tobacco flavoring[J]. *Flavour Fragrance Cosmetics*, 2016(2): 31-35.
- [25] 许春平, 黄家乐, 刘远上, 等. 烟草亚微米微胶囊的制备及在加热卷烟中应用研究[J]. *中国烟草学报*, 2025, 31(3): 12-22.
- XU C P, HUANG J L, LIU Y S, et al. Preparation of tobacco flavor submicron microcapsules and their application in heated cigarettes [J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2025, 31(3): 12-22.
- [26] 许春平, 俞金伟, 郑凯, 等. 肉桂醛微胶囊的制备及在卷烟中的应用[J]. *香料香精化妆品*, 2017(2): 23-27.
- XU C P, YU J W, ZHENG K, et al. Preparation of cinnamaldehyde microcapsules and its application in cigarette[J]. *Flavour Fragrance Cosmetics*, 2017(2): 23-27.
- [27] 郭洪辉, 张峰, 谢全灵, 等. 肉桂醇微胶囊的制备工艺及其在卷烟中的应用[J]. *河南农业科学*, 2022, 51(6): 172-180.
- GUO H H, ZHANG F, XIE Q L, et al. Preparation of cinnamyl alcohol microcapsules and their application in cigarette[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2022, 51(6): 172-180.
- [28] 郝辉, 梁佳欣, 张智轩, 等. 造纸法薄片料液的微胶囊化及其在加热不燃烧卷烟中的应用[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(5): 1081-1088.
- HAO H, LIANG J X, ZHANG Z X, et al. Microencapsulation of papermaking sheet casing solution and its application in HNB cigarette [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2023, 45(5): 1081-1088.
- [29] 农李政, 熊亚妹, 薛云, 等. 卷烟表香纳米香精微胶囊的制备及其在卷烟中的应用[J]. *香料香精化妆品*, 2023(2): 12-17.
- NONG L Z, XIONG Y M, XUE Y, et al. Preparation of tobacco top flavor nano-microcapsules and its application in cigarettes[J]. *Flavour Fragrance Cosmetics*, 2023(2): 12-17.
- [30] 李宏英, 王鸿博, 傅佳佳, 等. 明胶-海藻酸钠制备薄荷油微胶囊的工艺优化[J]. *高分子材料科学与工程*, 2019, 35(9): 142-149.
- LI H Y, WANG H B, FU J J, et al. Optimization of preparation technology of peppermint oil microcapsules in gelatin-sodium alginate[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2019, 35(9): 142-149.
- [31] 秦艳, 康林芝, 云帆, 等. 沉香精油微胶囊的制备及其在卷烟纸中的应用研究[J]. *农产品加工*, 2016(14): 9-13, 16.
- QIN Y, KANG L Z, YUN F, et al. Manufacturing microcapsules of eaglewood oil and application in cigarette paper[J]. *Agricultural Products Processing*, 2016(14): 9-13, 16.
- [32] 吴彦, 俞金伟, 马扩彦, 等. 芒果香味物质提取及其微胶囊在卷烟加香中的应用[J]. *香料香精化妆品*, 2018(4): 6-11, 16.
- WU Y, YU J W, MA K Y, et al. Extraction of mango flavor and the application of its microencapsule in cigarette flavoring[J]. *Flavour Fragrance Cosmetics*, 2018(4): 6-11, 16.
- [33] 徐世涛, 张虹娟, 魏杰, 等. 微胶囊玫瑰精油的制备及其卷烟加香评价[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2013, 35(S1): 293-295.
- XU S T, ZHANG H J, WEI J, et al. Preparation for microcapsule rose essential oil and its evaluation for cigarette flavoring [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2013, 35(S1): 293-295.
- [34] 左满兴, 刘哲, 徐兰兰, 等. 摩擦释香微胶囊在卷烟纸上的研究与应用[J]. *中国造纸*, 2021, 40(5): 63-68.
- ZUO M X, LIU Z, XU L L, et al. Application of friction-releasing fragrance microcapsule on cigarette paper[J]. *China Pulp & Paper*, 2021, 40(5): 63-68.
- [35] 潘曦, 刘华臣, 罗诚浩, 等. 一种含有加香型纤维毡的新型加热不燃烧卷烟: 109645556A[P]. 2019-04-19.
- PAN X, LIU H C, LUO C H, et al. A new type of heated non combustible cigarette containing scented fiber felt: 109645556A[P]. 2019-04-19.
- [36] 晏群山, 彭瑞, 童宇星, 等. 一种加热非燃烧薄荷醇缓释材料及其制备方法与应用: 113951538B[P]. 2022-01-21.
- YAN Q S, PENG R, TONG Y X, et al. A heated non combustible menthol sustained-release material and its preparation method and application: 113951538B [P]. 2022-01-21.

- [37] 姚建武,高颂,舒灏,等.一种含有槟榔成分的烟草咀嚼片、微胶囊和烟草制品:119908515A[P].2025-05-02.
YAO J W,GAO S,SHU H,et al. A tobacco chewable tablet,microcapsule,and tobacco product containing betel nut ingredients;119908515A[P].2025-05-02.
- [38] 巩效伟,张霞,陆欣宇,等. β -环糊精微胶囊的制备及其在电子烟烟液中的应用[J].烟草科技,2019,52(4):33-43.
GONG X W,ZHANG X,LU X Y,et al. Preparation of β -cyclodextrin microcapsules and their application in electronic cigarette liquids [J]. Tobacco Science & Technology,2019,52(4):33-43.
- [39] 郭林青,梁坤,黄玉川,等.薄荷型微胶囊在加热卷烟中的应用研究[J].轻工科技,2021,37(11):17-19.
GUO L Q,LIANG K,HUANG Y C,et al. Research on the application of mint type microcapsules in heated cigarettes [J]. Light Industry Science and Technology,2021,37(11):17-19.
- [40] 尚善斋,雷萍,王昆森,等.卷烟保润技术研究进展[J].应用化工,2014,43(3):535-538.
SHANG S Z,LEI P,WANG K M,et al. Progress in the research of tobacco humectant technology [J]. Applied Chemical Industry,2014,43(3):535-538.
- [41] 贾云祯,王宜鹏,秦亚琼,等.烟草保润剂研究现状与发展趋势[J].轻工科技,2018,34(1):26-29,33.
JIA Y Z,WANG Y P,QIN Y Q,et al. Research status and development trend of tobacco humectants [J]. Light Industry Science and Technology,2018,34(1):26-29,33.
- [42] 蔡波,常晟,周博,等.天然保润剂的开发及其在卷烟中的应用[J].食品工业,2023,44(10):45-49.
CAI B,CHANG S,ZHOU B,et al. Development of natural moistening agent and its application in cigarette [J]. The Food Industry,2023,44(10):45-49.
- [43] 余振华,詹建波,杨丽萍,等.一种具有保湿功能卷烟纸的研发[J].中国造纸,2017,36(4):42-45.
YU Z H,ZHAN J B,YANG L P,et al. Research on a kind of cigarette paper with moisture keeping function [J]. China Pulp & Paper,2017,36(4):42-45.
- [44] 叶荣飞,赵瑞峰,黄艳,等.微胶囊保润剂的制备及其在卷烟中的应用[J].食品工业,2014,35(6):48-51.
YE R F,ZHAO R F,HUANG Y,et al. Preparation and application of microcapsule humectant in cigarette [J]. The Food Industry,2014,35(6):48-51.
- [45] 刘强,李智宇,侯春,等.一种微胶囊保润剂的制备及其在卷烟中的应用:102217795A[P].2011-10-19.
LIU Q,LI Z Y,HOU C,et al. Preparation of a microcapsule moisturizing agent and its application in cigarettes;102217795A[P].2011-10-19.
- [46] 罗云,陈斌,郭绍坤,等.仓储烟叶霉变防治研究进展[J].昆明学院学报,2021,43(3):11-15.
LUO Y,CHEN B,GUO S K,et al. Research progress on molding control of tobacco storage [J]. Journal of Kunming University,2021,43(3):11-15.
- [47] 郭春雷,王龙柱,仇锦,等.烟草热湿区域结露发霉原因分析及解决对策[J].施工技术,2018,47(S1):1031-1033.
GUO C L,WANG L Z,QIU J,et al. Solution and cause analysis of condensation and mold in the hot and wet region of tobacco [J]. Construction Technology,2018,47(S1):1031-1033.
- [48] 丁威,谈详明,吴小燕,等.一种具有防潮抑菌功能的铝箔衬纸及其制备方法:112127212A[P].2020-12-25.
DING W,TAN X M,WU X Y,et al. A moisture-proof and antibacterial aluminum foil backing paper and its preparation method;112127212A[P].2020-12-25.
- [49] 张保华,张成省,吕佳静,等.一种抗紫外线的微生物菌剂及应用:113736693A[P].2021-12-03.
ZHANG B H,ZHANG C S,LY J J,et al. An anti ultraviolet microbial agent and its application;113736693A [P].2021-12-03.
- [50] 王帅.四种不同香料微胶囊的制备及在烟草中的应用[D].郑州:河南农业大学,2024.
WANG S. Preparation of microcapsules of four different flavours and their application in tobacco[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University,2024.
- [51] 陈文怡.云产卷烟霉变微生物的分离鉴定及肉桂醛的抑菌作用研究[D].无锡:江南大学,2020.
CHEN W Y. Isolation and identification of Yunnan cigarette molds and study on the antifungal effect of cinnamaldehyde [D]. Wuxi: Jiangnan University,2020.
- [52] 何爱民,陈伟华,崔冰,等.烟用香精微胶囊和烟用香精微胶囊的制备方法:117942887A[P].2024-04-30.
HE A M,CHEN W H,CUI B,et al. Preparation of tobacco flavor microcapsules and tobacco flavor microcapsules;117942887A[P].2024-04-30.
- [53] 吴艾璟,叶世著.壳聚糖及其改性材料在降低卷烟烟气有害成分上的应用[J].广东化工,2019,46(15):125-126,129.
WU A J, YE S Z. Application of chitosan and its modification on reducing harmful contents from cigarette smoke [J]. Guangdong Chemical Industry,2019,46(15):125-126,129.
- [54] 王金棒,池哲翔,邹珺,等.多孔炭材料在卷烟领域的研究现状与展望[J].中国烟草学报,2023,29(3):104-114.
WANG J B,CHI Z X,ZOU J,et al. Research status and prospects of porous carbon materials in the field of cigarettes [J]. Acta Tabacaria Sinica,2023,29(3):104-114.
- [55] 陈明曦,卢永明,王健,等.卷烟燃烧过程减害降焦研究进展[J].环境卫生工程,2024,32(5):77-86.
CHEN M X,LU Y M,WANG J,et al. Research progress

- on reducing harm and tar generation during cigarette combustion [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2024, 32(5): 77-86.
- [56] 李宝志, 崔成哲, 佟亚楠, 等. 一种多功能滤嘴棒及其制备方法和卷烟: 117064099A [P]. 2023-11-17.
LI B Z, CUI C Z, TONG Y N, et al. A multifunctional filter rod and its preparation method and cigarette: 117064099A [P]. 2023-11-17.
- [57] 宋旭艳, 李冉, 魏敏, 等. 一种带有缓释微胶囊的卷烟: 202842325U [P]. 2013-04-03.
SONG X Y, LI R, WEI M, et al. A cigarette with slow release microcapsules: 202842325U [P]. 2013-04-03.
- [58] 孙绍彬, 代进鹏, 陈飞, 等. 含有表没食子儿茶素没食子酸酯的滤棒颗粒及其制备方法: 113491346A. [P]. 2021-10-12.
SUN S B, DAI J P, CHEN F, et al. Filter rod particles containing epigallocatechin gallate and preparation method: 113491346A [P]. 2021-10-12.
- [59] 冯守爱, 周俊, 霍继臻, 等. 微胶囊化绿茶提取物改性卷烟胶 [J]. *中国胶粘剂*, 2018, 27(6): 24-27.
FENG S A, ZHOU J, HUO J Z, et al. Cigarette adhesive modified by microencapsulated green tea extract [J]. *China Adhesives*, 2018, 27(6): 24-27.
- [60] 王平军, 黄晓钢, 周明华. 一种功能卷烟纸及制备方法: 102242527A [P]. 2011-11-16.
WANG P J, HUANG X G, ZHOU M H. A functional cigarette paper and its preparation method: 102242527A [P]. 2011-11-16.
- [61] 郭新月, 杨占平, 宋晓梅, 等. 加热不燃烧卷烟烟气降温技术研究进展 [J]. *中国烟草学报*, 2020, 26(3): 24-32.
GUO X Y, YANG Z P, SONG X M, et al. Research progress of cooling technology of heat-not-burn cigarette smoke [J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2020, 26(3): 24-32.
- [62] 徐兰兰, 王建民, 刘朝富, 等. 微胶囊对卷烟纸阴燃速率和阴燃温度的影响 [J]. *中国造纸*, 2020, 39(5): 87-90.
XU L L, WANG J M, LIU C F, et al. Effects of microcapsules on smoldering rate and burning temperature of cigarette paper [J]. *China Pulp & Paper*, 2020, 39(5): 87-90.
- [63] 晏群山, 危培, 童宇星, 等. 一种高导热的加热非燃烧薄荷醇缓释材料的制备方法: 113951537A [P]. 2022-01-21.
YAN Q S, WEI P, TONG Y X, et al. Preparation of a high thermal conductivity non combustion menthol sustained release material: 113951537A [P]. 2022-01-21.
- [64] 胡伟兆, 汪俊岭, 汪碧波, 等. 一种具有优异控温效果的高分子基香烟滤嘴材料及其制备方法: 109674087A [P]. 2019-04-26.
HU W Z, WANG J L, WANG B B, et al. A polymer based cigarette filter material with excellent temperature control effect and its preparation method: 109674087A [P]. 2019-04-26.
- [65] 黄忠辉, 张莉强, 巫毅, 等. 一种微胶囊和制备方法及其应用: 118002038A [P]. 2024-05-10.
HUANG Z H, ZHANG L Q, WU Y, et al. A microcapsule and its preparation method and application: 118002038A [P]. 2024-05-10.
- [66] 张广平, 李远红, 陈俊豪, 等. 高热导率相变微胶囊的制备及性能 [J]. *功能材料*, 2023, 54(6): 6208-6214.
ZHANG G P, LI Y H, CHEN J H, et al. Preparation and performance of high thermal conductive phase change microcapsules [J]. *Journal of Functional Materials*, 2023, 54(6): 6208-6214.
- [67] 张骥, 张振涛, 杨俊玲, 等. 一种温控型导热多功能烟用微胶囊及其制备方法: 113170920A [P]. 2021-07-27.
ZHANG J, ZHANG Z T, YANG J L, et al. A temperature controlled thermal conductive multifunctional cigarette microcapsule and its preparation method: 113170920A [P]. 2021-07-27.
- [68] 刘冰, 陈义坤, 刘华臣, 等. 一种具有薄荷味道的低温加热卷烟: 109497610A [P]. 2019-03-22.
LIU B, CHEN Y K, LIU H C, et al. A low temperature heated cigarette with mint flavor: 109497610A [P]. 2019-03-22.
- [69] 常晟, 蔡波, 杨莹, 等. 洛神花花青素的提取及其在有色卷烟纸中的应用 [J]. *中国造纸*, 2025, 44(12): 192-196.
CHANG S, CAI B, YANG Y, et al. Extraction of roselle anthocyanin and its application in colored cigarette paper [J]. *China Pulp & Paper*, 2025, 44(12): 192-196.
- [70] 王磊, 王凤兰, 谢益民, 等. 彩色卷烟纸色素微胶囊制备的研究 [J]. *中国造纸*, 2015, 34(9): 27-30.
WANG L, WANG F L, XIE Y M, et al. Preparation of microcapsule for color cigarette paper [J]. *China Pulp & Paper*, 2015, 34(9): 27-30.
- [71] 孙德平, 王凤兰, 毛耀, 等. 涂布液微胶囊化制备彩色重组烟叶卷烟纸的方法: 103451999A [P]. 2013-12-18.
SUN D P, WANG F L, MAO Y, et al. Method for preparing colored recombinant tobacco cigarette paper by coating liquid microencapsulation: 103451999A [P]. 2013-12-18.
- [72] 王凤兰, 姚元军, 王磊. 一种天然色素微胶囊化的重组烟叶裹衣的制备方法: 105155348A [P]. 2015-12-16.
WANG F L, YAO Y J, WANG L. Preparation method of recombinant tobacco coating with natural pigment microencapsulation: 105155348A [P]. 2015-12-16.
- [73] 任周营, 罗海涛, 何力, 等. 一种调节烟气 pH 值卷烟纸及其制备方法: 112227110A [P]. 2021-01-15.
REN Z Y, LUO H T, HE L, et al. A cigarette paper for adjusting the pH value of smoke and its preparation method: 112227110A [P]. 2021-01-15.
- [74] 刘金金, 雷红, 邓瑜, 等. 基于 Pickering 乳液模板法的芝麻素结肠靶向微胶囊的制备 [J]. *中国食品学报*, 2025, 25(3): 265-274.

- LIU J J, LEI H, DENG Y, et al. Preparation of sesamin colon-targeted microcapsules based on Pickering emulsion template method[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2025, 25(3): 265–274.
- [75] 张钦林. 微流控技术构建藻油纳米微囊及其软糖产品开发[D]. 南昌: 南昌大学, 2024.
- ZHANG Q L. Construction of algal oil nanocapsules through microfluidic approach and their soft candy product development[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.
- [76] 王栋, 苏婷, 吴庆喜. PEC 载药微胶囊的自组装及缓释性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2021, 37(8): 25–32.
- WANG D, SU T, WU Q X. Self-assembly and sustained release properties of drug loaded PEC microcapsules[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2021, 37(8): 25–32.
- [77] 陈林林, 王玲, 宋佳琪, 等. Pickering 乳液模板法制备植物精油微胶囊的影响因素及活性研究进展[J]. *中国调味品*, 2023, 48(8): 208–214.
- CHEN L L, WANG L, SONG J Q, et al. Research progress on influencing factors and activity of plant essential oil microcapsules prepared by Pickering emulsion template method[J]. *China Condiment*, 2023, 48(8): 208–214.
- [78] 朱孝婷, 王强, 胡琬君, 等. 采用 Pickering 乳液模板制备杂化微胶囊及其药物控释应用的研究进展[J]. *华西药理学杂志*, 2021, 36(5): 593–599.
- ZHU X T, WANG Q, HU W J, et al. Research progress on hybrid microcapsules fabricated from Pickering emulsion templates and their applications in controlled drug release [J]. *West China Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2021, 36(5): 593–599.
- [79] MENG W H, SUN H N, MU T H, et al. Future trends in the field of Pickering emulsions; Stabilizers, spray-dried microencapsulation and rehydration for food applications [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2024, 150: 104610.
- [80] SU W G, HAN B, YEBOAH S, et al. Fabrication of monodisperse droplets and microcapsules using microfluidic chips: A review of methodologies and applications[J]. *Reviews in Chemical Engineering*, 2024, 40(3): 401–434.
- [81] DINH N D, KUKUMBERG M, NGUYEN A T, et al. Functional reservoir microcapsules generated *via* microfluidic fabrication for long-term cardiovascular therapeutics[J]. *Lab on a Chip*, 2020, 20(15): 2756–2764.
- [82] SOH S H, LEE L Y. Microencapsulation and nanoencapsulation using supercritical fluid (SCF) techniques[J]. *Pharmaceutics*, 2019, 11(1): 21.
- [83] 张亮, 韦阳, 高彦祥. 超临界流体制粒在类胡萝卜素微粒中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(6): 181–188.
- ZHANG L, WEI Y, GAO Y X. Application on the preparation of carotenoid particles by supercritical fluid granulation[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(6): 181–188.
- [84] LIN H Y, YANG Y, LI Y X, et al. Bioenhanced degradation of toluene by layer-by-layer self-assembled silica-based bio-microcapsules[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1122966.
- [85] YAO M F, LU Y M, ZHANG T, et al. Improved functionality of *Ligilactobacillus salivarius* Li01 in alleviating colonic inflammation by layer-by-layer microencapsulation[J]. *NPJ Biofilms and Microbiomes*, 2021, 7: 58.

Research progress of multifunctionalization of cigarette microcapsule technology

YE Hui^{1,2}, WANG Yu², WU Junzhang², HU Wenhao¹, PANG Yuxia¹, LOU Hongming¹

1. *College of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;*

2. *Technology Center, China Tobacco Guangdong Industrial Co., Ltd., Guangzhou 510310, China*

Abstract: To comprehensively assess the development and application potential of microcapsule technology in the tobacco cigarette industry, this paper systematically reviews the research progress on multifunctionalization of cigarette microcapsule technology from seven dimensions: aroma sustained-release, moisture retention and humectation, antibacterial activity, harm reduction, temperature control and heat conduction, dyeing and color fixation, and mainstream smoke pH adjustment. Meanwhile, the development status of novel microcapsule preparation technologies is elaborated. With technological innovation and advancement, cigarette microcapsules have expanded from a single aroma sustained-release function to a diversified functional system. For aroma sustained-release, mechanisms including capsule shell diffusion, wall material degradation, and pressure-induced rupture can effectively regulate the release rate of cigarette flavoring. Regarding moisture retention and humectation, the low volatility of oily core materials and the multifold protective effects of composite wall materials can stably improve the moisture content of cut tobacco. In terms of antifungal activity, natural antibacterial flavor

1. Technology Centre, Henan China Tobacco Industry Corporation, Zhengzhou 450000, China;

2. College of Tobacco Science and Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

3. College of Tobacco Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China

Abstract: [Objective] This study aimed to screen pectinase-producing strains and mine the key genes involved in tobacco pectin degradation. **[Methods]** Pectinase-producing strains were screened using the 3, 5-dinitrosalicylic acid (DNS) method with tobacco pectin as the sole carbon source. Transcriptomic analysis was performed to examine differential gene expression during tobacco pectin degradation, and key genes were verified and identified by real-time quantitative PCR (RT-qPCR). **[Results]** A tobacco pectin-degrading strain designated GB3 was obtained, and its enzyme activity against tobacco pectin in the fermentation broth reached 32.95 U/mL. The strain was preliminarily identified as *Klebsiella variicola* based on morphological characteristics and 16S rDNA sequence analysis. During the degradation of common pectin, 1076 genes were upregulated in strain GB3, whereas 1100 genes were upregulated during tobacco pectin degradation. Differentially expressed genes (DEGs) related to tobacco pectin degradation were mainly enriched in galactose metabolism, glycolysis/gluconeogenesis, and other glycan degradation pathways. A total of nine candidate enzyme genes potentially associated with tobacco pectin degradation were screened. RT-qPCR analysis further revealed that *rlpA*, *lacZ*, *ogl*, *rhaA*, and *P48843* were the key genes involved in tobacco pectin degradation. **[Conclusion]** This study confirmed that gene1209, gene1526, gene310, and gene4941 are the key tobacco pectin hydrolase genes, providing a reference for investigating pectinase genes, regulating pectin content in tobacco leaves, and improving tobacco leaf quality.

Key words: tobacco pectin; DEGs; tobacco pectin hydrolase; transcriptome; RT-qPCR

[责任编辑: 王晓波 刘春奎]

(上接第 87 页)

microcapsules can inhibit the growth and proliferation of molds. For harm reduction, porous adsorbent microcapsules are predominantly adopted to reduce the contents of carbon monoxide (CO) and nitrosamine carcinogens in mainstream cigarette smoke. In terms of temperature control and heat conduction, preliminary research on temperature-responsive microcapsules offers a promising approach to optimizing the heat transfer efficiency of heat-not-burn (HNB) cigarettes. For dyeing and color fixation, via the dual mechanisms of physical isolation and chemical protection, microcapsule technology remarkably improves the oxidation resistance and color stability of natural pigments in cigarette paper. For mainstream smoke pH adjustment, encapsulating organic acids via microcapsule technology and incorporating the encapsulated products into cigarette paper enables effective control of smoke pH. Novel microcapsule preparation technologies, with the merits of precise controlled-release design and low-temperature green processes, offer novel solutions to the inherent drawbacks of conventional methods, including unstable encapsulation efficiency, wide particle size distribution, and susceptibility to damage of heat-sensitive components. Nevertheless, their large-scale application in the cigarette industry is still hindered by challenges such as low throughput, high production cost, and difficulties in process scale-up. Future research should integrate the merits of novel preparation technologies, focusing on intelligent regulation of release behavior, optimized design of core-wall materials, and multifunctional integration, so as to accelerate the development of cigarette microcapsule technology toward precision, intelligence and greenization.

Key words: cigarette; microencapsulation technology; multifunctionalization; aroma sustained-release; cigarette moisture retention; antifungal and harm reduction

[责任编辑: 王晓波 贾学伟]