文章编号:1674-2869(2025)01-0059-05

多不饱和脂肪酸油脂微胶囊制备工艺研究进展

雷俊华,李翔宇*
嘉必优生物技术(武汉)股份有限公司,湖北 武汉 430000

摘 要:综述了包括喷雾干燥、流化床造粒和包衣、喷雾冷冻干燥以及静电喷雾干燥等工艺应用于含有多个不饱和双键而导致容易被氧化变质的多不饱和脂肪酸油脂微胶囊领域。系统地介绍了上述5种干燥工艺的原理与特点以及制备的多不饱和脂肪酸油脂微胶囊的特点:传统喷雾干燥具有容易工业化的优势,但由于较高的干燥温度对热敏物质有一定的影响;流化床造粒和包衣虽然不如传统喷雾干燥应用广泛,但其独有的工艺可以对微胶囊芯材产品进行更好的保护;喷雾冷冻干燥以及静电喷雾干燥由于较低的温度有利于保护微胶囊产品,但目前工业化受到一定的限制,需要开发附加值更高的产品。通过介绍包括传统喷雾干燥、流化床造粒和包衣、喷雾冷冻干燥以及静电喷雾干燥等工艺的应用研究现状,旨在为人们开发多样性多不饱和脂肪酸油脂微胶囊提供新思路。

关键词:多不饱和脂肪酸油脂;喷雾干燥;流化制粒;包衣;喷雾冷冻干燥;静电喷雾干燥;进展
中图分类号:TS202.3 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202206041

Research progress on preparation technology of polyunsaturated fatty acid oil microcapsules

LEI Junhua, *LI Xiangyu**
Cabio Biotech(Wuhan) Co., Ltd, Wuhan 430000, China

Abstract: This paper reviews the application of spray drying, fluidized bed granulation and coating, spray freeze drying and electro spray drying in the field of microcapsulation of polyunsaturated fatty acid oil which are easily oxidized and deteriorated due to the presence of multiple unsaturated double bonds. The principle and characteristics of these five drying processes and the characteristics of the prepared polyunsaturated fatty acid oil microcapsules are systematically introduced. The traditional spray drying has the advantage of easy industrialization, but its high drying temperature has a certain impact on the heat-sensitive substances. Although fluidized bed granulation and coating are not as widely used as traditional spray drying, their unique process can better protect microcapsule core products. The low temperature of spray freeze drying and electro spray drying is beneficial to protecting microcapsule products, but their industrialization is limited to a certain extent, so it is necessary to develop products with higher added value. By introducing the current application and research status of these techniques, this paper aims to provide new ideas for developing diverse polyunsaturated fatty acid oil microcapsules.

Keywords: polyunsaturated fatty acid oil; spray drying; fluidized bed granulation; coating; spray freeze drying; electro spray drying; progress

多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acid, PUFA)如亚油酸、亚麻酸、花生四烯酸(arachidonic acid, AA)和二十二碳六烯酸(docosahexaenoic,DHA)等是含有2个及以上双键

收稿日期:2022-06-28
基金项目:武汉市科技计划项目(2020020602012122)
作者简介:雷俊华,硕士,工程师。Email:junhua_lei@cabio.cn
***通信作者**:李翔宇,博士,高级工程师。Email:neal_lee@cabio.cn
引文格式:雷俊华,李翔宇.多不饱和脂肪酸油脂微胶囊制备工艺研究进展[J].武汉工程大学学报,2025,47(1):59-63,112.

的脂肪酸，根据距羧基最远端的双键的位置不同又可将多不饱和脂肪酸分为ω-3和ω-6系列[1]，见图1。

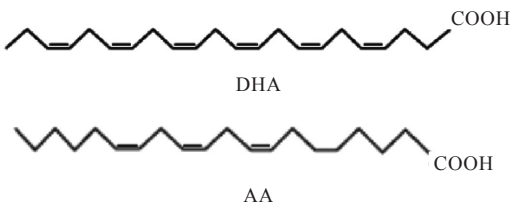


图1 ω-3和ω-6系列PUFA代表

Fig. 1 Representatives of ω-3 and ω-6 PUFA

PUFA和其他长链脂肪酸都是细胞膜的基本组成物质并参与到免疫系统的信息交流和炎症因子的形成[2-5]；ω-3脂肪酸和ω-6脂肪酸能长期影响血液的流动和凝固的情况，进而影响血管腔的宽窄、血压以及血脂水平；PUFA在人体的新陈代谢中也起到至关重要的作用[6]。据此，人们已经确定某些PUFA是生命必需的营养素[7-8]。二十二碳六烯酸油脂和花生四烯酸油脂作为ω-3和ω-6系列PUFA油脂的代表是一种无色至淡黄色油状液体，在光照、氧气以及金属离子的作用下容易氧化变质并产生令人不愉快的风味甚至可能危害人体健康，此类不稳定的特性限制了PUFA油脂在多个领域的应用[9-13]。

1 微胶囊技术

微胶囊技术[14-16]可以将目标物包裹成壁材厚度为0.2~10.0 μm、粒径为1~1 000 μm的颗粒，可以起到掩味、提高水溶性、保护目标物质、延长保质期甚至定点释放的目的，微胶囊技术是在20世纪70年代兴起的一种包埋方式并广泛应用于食品加工中。多孔聚合物系统、微胶囊和脂质体作为3大控制释放系统，其中微胶囊是目前普遍被运用到实际生产中的技术，该技术利用天然或合成的高分子成膜材料作为壁材，把分散的固态物质、液体甚至包括气体在内的芯材完全包埋起来，使之形成具有密封或半透性囊膜的微型颗粒。微胶囊粒子的大小和形状由于制备工艺条件不同而有所不同，可分为球型、米粒状、块状或不规则状[17-19]。微胶囊技术也可广泛应用于医学、农药、化妆品、金属切削、涂料、油墨等多个领域[20-21]。

通过微胶囊处理的多不饱和脂肪酸油脂，不仅可以有效地保护容易被氧化物质，同时可以扩大油脂的应用领域，例如将PUFA油脂粉以干混的形式添加到奶粉中，或以直接压片的方式添加到片剂中等。目前常用的制备PUFA油脂微胶囊的方法有喷雾干燥、流化床、冷冻干燥等。

2 制备工艺

2.1 喷雾干燥

喷雾干燥(spray drying)制备微胶囊的原理是将芯材物质分散于壁材溶液中均匀分散，再在热气流中进行喷雾雾化成小雾滴，使得溶解芯材的溶剂迅速蒸发，将流体形式的产品蒸发转化为固态的过程，最终得到微胶囊粉末产品。简而言之，料液雾化、雾滴与热空气接触，最后分离干燥的产品[22]。喷雾干燥的主要特点是速率高、时间短、物料温度低、产品具有良好的分散性和溶解性，喷雾干燥的进出风温度、料液固形物含量、进料温度、进料流量及雾化器转速等都会直接影响微胶囊产品的质量[23-26]，由于设备的可获得性和易于工业化，喷雾干燥封装通常用于制药和生物化学领域以及食品工业。目前，大多数微胶囊化油脂的生产都在使用喷雾干燥技术，如大豆油、玉米油、花生油等大宗型食用油，也包括猕猴桃籽油、苏子油、松籽油和鱼油等[27-28]。喷雾干燥的特点是温度一般在180 ℃左右，可以快速蒸发溶剂，但不利于热敏物质的保护。

由于喷雾干燥的高温使溶剂迅速蒸发的特点，喷雾干燥制备的微胶囊多呈现表面有塌陷的不规则形态，见图2。

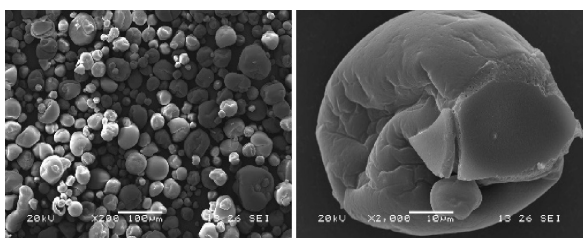


图2 喷雾干燥制备的产品的扫描电子显微镜图片

Fig. 2 Scanning electron microscope images of powder made by spray drying

2.2 流化床造粒

流化床造粒(granulation)的步骤是将处方量的原料投放入密闭的流化床中进行流化，实现粉体混合，然后启动喷雾功能，将黏合剂雾滴在粉体上发生凝聚和长大过程，喷雾结束后继续在同一装置内进行流化干燥，从而得到制粒的最终产品。制粒的原理大概为：喷枪在一定雾化压力和喷速条件下喷入的雾化液滴润湿原料粉末并聚集在其周围形成粒子核，持续喷入的液滴在粒子核表面形成液桥，粒子核和粒子核之间不断相互结合促

进其颗粒长大，干燥后液桥之间的水分蒸发从而进一步形成固体桥，即得到外形圆整的多孔颗粒；随着液体饱和度的增加，颗粒的粒径逐步增大，孔隙率会进一步减小。得到的颗粒大小均匀、圆整、流动性和可压性好；设备密闭可有效避免细粉飞扬，自动化程度高，易于放大重现[29-32]。Anwar等[33]采用10%大豆可溶性多糖和65%辛烯基琥珀酸淀粉钠通过流化制粒得到载油率为25%的鱼油微胶囊，在21 ℃条件下保存5周；李翔宇等[34]用酪蛋白酸钠等壁材，控制进风温度为120 ℃，物料温度60 ℃，通过流化床制粒制备DHA油脂微胶囊，并应用于火腿肠中。

通过流化床造粒的微胶囊产品有明显的小颗粒和大颗粒，表面有颗粒之间的粘连，见图3。

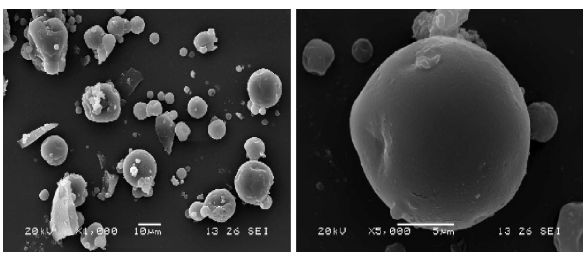


图3　流化造粒制备的产品的扫描电子显微镜图

Fig. 3　Scanning electron microscope images of powder made by granulation

2.3　包　衣

包衣（coating）是通过在流化床内放置一个上下两端开口的可以调节高度的直筒隔圈以及具有不同开孔率的筛板，以控制物料运动形成有序的流化状态。喷液通过安装于筛板中心的气动喷嘴加入系统中，其方向与微丸运动方向相同。隔圈与筛板之间有一定的间距，以保证物料能顺畅地从隔圈外流向隔圈内，形成循环往复的流动状态。被包衣的物料经过隔圈在扩展室开始减速，当微丸上升到扩展室时多余的介质被蒸发掉，当气流速度无法推动微丸运动时，物料重新回落到隔圈与料斗之间的间隙内，此外的气流量能使得颗粒向下运动且保持失重的悬浮状态，通过调节隔圈底部与筛板之间的间隙，颗粒从隔离圈与料斗壁之间的区域内水平地运动到包衣区域内，微丸在几秒钟内通过包衣区域，完成1个运动循环[35-36]。在工艺过程中，重要的参数包括流化床空气的流量、直筒隔离圈的高度、雾化空气压力、进液流速以及流化床温度。底喷包衣工艺是包衣液的喷液方向和微丸运动方向一致，属于同向喷液，因此具有流化运动快速、持续且均一的特点。由于包衣液喷射在喷嘴附近运动有序的粒子表面，故喷液从喷嘴口到被包物的距离很近，能得到连续紧密的衣膜。物料在底喷装置中，往复循环运动，其流化状态具有很强的规律性，物料流化经过喷射雾液时间间隔有规律，雾液铺展均一，得到的微丸包衣衣膜厚度均匀且孔隙率低。流化床包衣的微胶囊的扫描电子显微镜（scanning electron microscope，SEM）图显示外层包裹一层至多层厚厚的膜，对芯材进行多层保护，见图4。

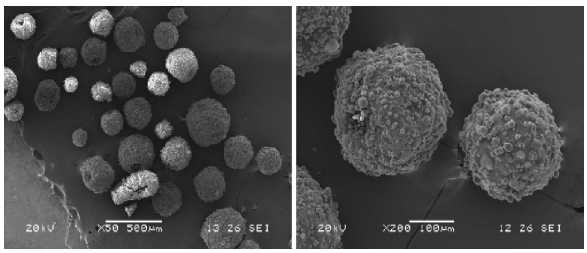


图4　包衣工艺制备的产品的扫描电子显微镜图

Fig. 4　Scanning electron microscope images of powder made by coating

2.4　喷雾冷冻干燥

喷雾冷冻干燥（spray freeze drying）技术是一种将液体产品进行雾化，并通过与冷介质（液氮等）充分接触后冻结成冰粉或冰粒，再将冻结的冰粉或冰粒减压冷冻干燥成粉体粒子的过程，一般包括雾化、冷冻和干燥3个步骤，是近年发展起来的新型干燥技术，其结合了喷雾干燥和冷冻干燥两项技术优点。干燥后的物料为粉状固体，产品原有的生物、化学特性基本不变，易于长期保存，特别适用于热敏性、黏稠性、活性物料及含糖量高的产品的低温干燥，但该技术仍然存在较多的局限性，还不能实现规模化生产[37-41]。张萌等[42]对比了以阿拉伯胶和海藻酸钠为囊材通过喷雾干燥、冷冻干燥以及喷雾冷冻干燥3种干燥方式制备的鱼油微胶囊的特性，结果显示，后两者红外吸收特征峰峰强较大，说明喷雾冷冻干燥的低温对含有大量不饱和脂肪酸的鱼油具有保护作用，通过热力学分析显示喷雾冷冻干燥热稳定性最佳。Elik等[43]利用羧甲基化果胶、麦芽糊精、葵蜡和含有胡萝卜素以及Ω-3脂肪酸的亚麻籽油进行剪切乳化后进行干燥，发现虽然喷雾冷冻干燥包封率低于喷雾干燥的产品，但是氧化稳定性更好，认为喷雾冷冻干燥可以延长产品货架期。

由于温度较低，喷雾冷冻干燥和喷雾干燥制备的微胶囊有明显的区别，颗粒表面没有明显的因高温导致的凹陷以及不规则的形态，见图5。

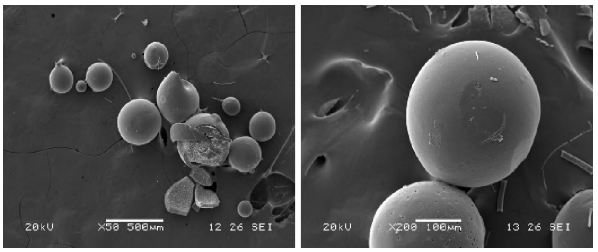


图5 喷雾冷冻干燥制备的产品的扫描电子显微镜图

Fig. 5 Scanning electron microscope images of powder made by spray freeze drying

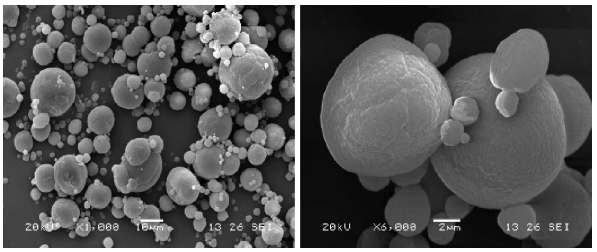


图6 静电喷雾干燥制备的产品的扫描电子显微镜图

Fig. 6 Scanning electron microscope images of powder made by electrostatic spray drying

2.5 静电喷雾干燥

静电喷雾干燥是以独特的技术将乳化液在喷头处进行静电离子处理，将极性的水分和溶剂聚集在乳化液表面而非极性的被包埋物质向核心复聚，即降低了蒸发水分所需的温度，仅需较低的进风温度（90 ℃）和较低的出风温度（40~45 ℃）进行干燥形成微胶囊粉末，同时整体处于惰性气体氮气的环境下进一步保护被包埋物质不被高温和氧气破坏，因此也称之为低温喷雾干燥。姜甜等[44]通过静电喷雾干燥制备微囊化益生菌，进风温度为80 ℃，微囊化益生菌用模拟胃液作用2 h，存活率超过80%；在模拟肠液中4 h，存活率达到75%；25 ℃下储存12个月，活菌数存活率超过70%，说明静电喷雾干燥微囊化方法适合包埋热敏的益生菌。陈莹[45]对比传统喷雾干燥和静电喷雾干燥两种干燥方式得到以葵磷脂、酪蛋白酸钠以及麦芽糊精为载体的高二十二碳六烯酸（docosahexaenoic acid，DHA）鱼油微胶囊，结果显示两种干燥方式在包封率和水分含量方面没有明显差异，但静电喷雾干燥制备的高DHA鱼油微胶囊在复水性方面明显优于传统喷雾干燥；在脂质氧化保护方面，传统喷雾干燥制备的高DHA鱼油微胶囊的过氧化值由原油＜2 mmol/kg大幅上升为13.18 mmol/kg，静电喷雾干燥制备的微胶囊过氧化值小幅上升至4~5 mmol/kg。多数研究证明，静电喷雾干燥可以明显降低热敏性材料的氧化，提高产品复水性，但目前静电喷雾干燥生产效率较低且需要氮气作为保护气体，在工业化中会增加一定的成本。

静电喷雾干燥制备的产品也由于较低的运行温度，与喷雾冷冻干燥得到的产品的外形相似，没有明显凹陷且形态规则，同时静电喷雾干燥工艺具有复聚的功能，因此产品大多是大小颗粒相互粘连，最终在粉状产品的复水性上有较好的帮助，见图6。

3 结论与展望

目前针对PUFA油脂微胶囊制备工艺的研究很多，主要聚焦在喷雾干燥、流化制粒和包衣、喷雾冷冻干燥和静电喷雾干燥等，但很少有针对PUFA油脂微胶囊的不同制备方法进行系统的分析与比较的研究。喷雾干燥作为传统的干燥技术具有生产连续、规模大等特点，尽管因为较高的温度对活性物质有一定的影响仍被当作工业化的首选，在后续的过程中可以通过微胶囊配方的优化以及喷雾干燥参数的调整，提高PUFA油脂微胶囊的特性。喷雾冷冻干燥作为一种较新型的微胶囊制备工艺技术，制备的产品具有活性物质保留度高、速溶、流动性好等优点，但喷雾冷冻干燥技术存在过程不连续以及规模化程度不高等问题，目前多被应用在实验室水平，因此优化喷雾冷冻干燥工艺或将该技术应用于附加值更高的领域将会是该技术未来的发展方向。流化制粒与包衣技术更多地被应用于制药领域，在特定的设备中按特定的工艺在药物外表粘连或者包被一层或多层不同厚度的功能保护层起到增加产品流动性、保护产品以及缓释等功能，该工艺虽然具有以上功能也有别于传统的喷雾干燥技术，但由于PUFA油脂目前的用途主要在食品领域甚至奶粉领域，也常常因为颗粒原因与其他喷雾干燥制备的原料不能很好地混合而被诟病，也因为流化制粒与包衣工艺控制更为复杂，所以市面上采用流化制粒与包衣技术进行多不饱和微胶囊制备的厂家并不多，这一问题可能需要通过扩大PUFA微胶囊的应用领域而得以解决。静电喷雾干燥作为一项新颖的技术被应用到干燥工艺中，具有温度低、产品复水性能好等特点，但伴随着产能有限同时运行成本过高的缺点，目前仅在附加值更高、需求量较低、对热更敏感的益生菌等领域进行了工业化，而应用于需求量更大、对热相对较不敏感的PUFA油脂

微胶囊的制备现仅处于实验室阶段的研究，后续静电喷雾干燥发展的重点可能是降低自身运行成本的同时提供可以应用于更高附加值领域的PUFA微胶囊。

参考文献

[1] 吴洪号，张慧，贾佳，等. 功能性多不饱和脂肪酸的生理功能及应用研究进展[J]. 中国食品添加剂，2021，32(8)：134-140.

[2] LAURITZEN L. The essentiality of long chain n-3 fatty acids in relation to development and function of the brain and retina[J]. Progress in Lipid Research，2001，40(1)：1-94.

[3] MCCANN J C，AMES B N. Is docosahexaenoic acid，an n-3 long-chain polyunsaturated fatty acid，required for development of normal brain function? An overview of evidence from cognitive and behavioral tests in humans and animals[J]. The American Journal of Clinical Nutrition，2005，82(2)：281-295.

[4] SIMOPOULOS A P. Omega-6/omega-3 essential fatty acids：biological effects[J]. World Review of Nutrition and Dietetics，2009，99：1-16.

[5] GLEISSMAN H. Omega-3 fatty acid supplementation delays the progression of neuroblastoma in vivo[J]. International Journal of Cancer，2011，128(7)：1703-1711.

[6] DEMAISON L，MOREAU D. Dietary n-3 polyunsaturated fatty acid and coronary heart disease-related mortality：possible mechanism of action[J]. Cellular & Molecular Life Sciences，2002，59(3)：463-477.

[7] ADEYEMI W J，LAWAL S I，OLATUNJI D B，et al. Omega 3 fatty acids favor lipid and bone metabolism in orchidectomised rats[J]. Clinical Nutrition Open Science，2021，35：67-76.

[8] 朱升龙. ω-3多不饱和脂肪酸对两种抗癌药物在乳腺癌细胞中抗肿瘤效果的增强作用及其机制研究[D]. 无锡：江南大学，2018.

[9] 曹少谦，孙程，秦伟力，等. 鱼粉加工压榨液中EPA和DHA富集工艺优化及其特性分析[J]. 食品工业科技，2021，42(2)：154-160.

[10] 刘灵莉，刘妍妍，于长青. 响应面法优化花生四烯酸微胶囊工艺的研究[J]. 食品工业科技，2009，30(10)：220-223.

[11] GRATTARD N，SALAUN F，CHAMPION D，et al. Influence of physical state and molecular mobility of freeze-dried maltodextrin matrices on the oxidation rate of encapsulated lipids[J]. Journal of Food Science，2002，67(8)：3002-3010.

[12] 齐金峰. 微胶囊化藻油DHA的稳态化研究[D]. 南昌：南昌大学，2008.

[13] 沈雷，唐俊，张云霞，等. 花生四烯酸油微胶囊配方优化及稳定性研究[J]. 油脂加工，2016，41(4)：14-18.

[14] SALAUN F. Active coating for smart textiles[M]. Cambridge：Woodhead Publishing，2016.

[15] NELSON G. Advances in the dyeing and finishing of technical textiles[M]. Cambridge：Woodhead Publishing，2013.

[16] 王慧敏，范艳敏，王连艳. 基于微胶囊技术对油脂包埋的研究进展[J]. 现代食品科技，2018，34(10)：271-280.

[17] DEASI K G，HYUN J P. Recent developments in microencapsulation of food ingredients[J]. Drying Technology，2005，23(7)：1361-1394.

[18] 甘晓露，孟丹丹. 微胶囊技术及其在食品加工中的应用[J]. 现代食品，2016，5(3)：83-85.

[19] 许时婴. 微胶囊技术[M]. 北京：化学工业出版社，2006.

[20] 杨佳，张君慧，谢天，等. 微胶囊化油脂的壁材及应用进展[J]. 粮食与饲料工业，2017(9)：33-36，43.

[21] DRUSCH S，SERFERT Y，SCAMPICCHIO M，et al. Impact of physicochemical characteristics on the oxidative stability of fish oil microencapsulated by spray-drying[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2008，55(26)：11044-11051.

[22] JAFARI S M，ASSADPOOR E，BHANDARI B，et al. Nano-particle encapsulation of fish oil by spray drying[J]. Food Research International，2008，41(2)：172-183.

[23] 王世豪. 喷雾干燥法制备粉末油脂及数值分析[D]. 大连：大连理工大学，2019.

[24] 丁洁，李博生. 微胶囊技术及其在食品工业中的应用[J]. 中国食品与营养，2010(3)：29-31.

[25] 杨晓慧. 喷雾干燥制备非全氢化植物油咖啡伴侣粉末油脂的研究[D]. 无锡：江南大学，2013.

[26] SAMATHA S C，BRUNA A S M，MARTIN A R，et al. Drying by spray drying in the food industry：micro-encapsulation，process parameters and main carriers used[J]. African Journal of Food Science，2015，9(9)：462-470.

[27] 葛昕. 微胶囊化茶油的制备技术及工艺优化[D]. 北京：中国林业科学研究院，2013.

[28] 葛毅强，孙爱东，倪元颖，等. 天然维生素E微胶囊技术的研究[J]. 中国油脂，2000，25(3)：37-40.

[29] 高丹丹，刘哲鹏，陈岚，等. 流化床一步制粒法的工艺优化[J]. 应用化工，2011，40(1)：176-181.

（下转第112页）