

新型塑料管材加工方法研究进展

于贵营,李春海*,郭少云*

(高分子材料工程国家重点实验室,四川大学高分子研究所,四川省橡塑材料复合成型
技术工程实验室,成都 610065)

摘要:塑料管材综合性能优异,广泛应用于城乡建设的各个领域。随着管材行业的发展,对管材性能的要求也越来越高,塑料管材加工方式也在不断发展。本文说明了塑料管材应用领域,介绍了管材的挤出成型生产方法,概括了塑料管材行业现状,探讨了传统管材加工方式存在的不足,阐明了开发新型管材生产工艺的必要性和重要性,从定义、原理、结构、管材性能等方面综述了塑料管材振动挤出、旋转挤出、固相拉拔和缠绕成型加工工艺的研究进展,最后对管材加工未来的发展趋势进行了总结与展望。

关键词:塑料管材; 振动挤出; 旋转挤出; 固相拉拔; 缠绕成型

引言

塑料管材具有质轻、耐腐蚀、运输方便、易安装以及流体阻力小等优点^[1],在城市给排水、燃气输送、农业灌溉、医疗用品等领域取得重要应用,2019 年全国塑料管道总产量约为 1600 万吨,在全国各类管道市场的占有率超过 50%。随着塑料管材应用领域对管材性能要求不断提高,开发新的生产工艺,利用已有的原料生产出更高耐压等级、长期使用性能更为优异的高性能管材已成为管材研究领域的热点。本文就管材的成型加工及几种新型生产工艺展开了介绍。

1 挤出成型

挤出成型是管材生产最常见的生产方法,其原理是通过螺杆或柱塞的挤压作用,使塑化均匀的塑料通过特定形状的模口,进而成为具有恒定截面的连续制品。挤出成型具有连续化、效率高、质量稳定的特点,因此,绝大多数的热塑性及部分热固性管材采用挤出成型工艺,如 PE 管、PP 管、PVC 管等。传统挤出成型包括(1)挤出(动力)系统;(2)机头(口模);(3)牵引系统:冷却定型、牵引;(4)收卷系统。其中,挤出系统及机头(口模)是核心。挤出系统实现物料的塑化、输送,并提供一定的成型压力,对管材表面的光洁度、结构均一性及尺寸精度等均有重要的影响。机头是决定管材制品性能的另一要素。如图 1 所示,常见的机头组成部分一般为芯模(mandrel)、口模(die)、调节螺钉(adjusting screw)、分流器(spider)及分流器支架(spider cone)、模体(die body)和过滤板(screen plate)^[2]。熔体在螺杆的推动下,流经过滤板,运动状态由螺旋运动转为直线运动,未熔融物料及杂质被过滤,并在一定压力下变密实。随后熔体经过分流器转为环状流动,并在口模和芯棒控制下成型为固定截面形状及尺寸的管坯。机头压缩比、分流梭顶角度与加强筋厚度及分布等合理设计对管材的密实程度、力学强度也有着重要影响。此外,冷却牵引系统对未定型管材进行牵引,同时冷却管材及挤出设备。收卷系统对成型管材进行切割,卷曲。

2 新型加工方法研究进展

随着“十三五”计划的不断推进,塑料管道行业已经由“高速发展期”向“转型期”过渡,正面临高端产

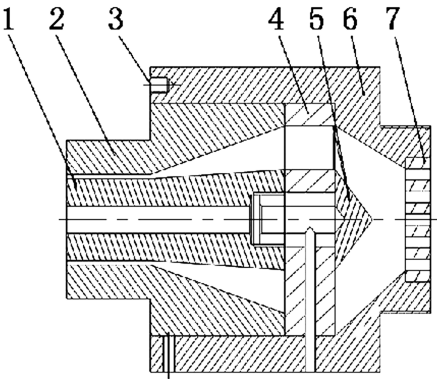


图 1 直通式机头示意图

1-芯模;2-口模;3-调节螺钉;4-分流器;5-分流器支架;6-模体;7-过滤板^[2]

Figure 1 Schematic of a straight-through die

1-mandrel; 2-die; 3-adjusting screw; 4-spider; 5-spider cone; 6-die body; 7-screen plate^[2]

品不足,低端产能过剩的处境,因此,开发性能更为优异的管材原材料,发展新型管材成型方法,已经成为提升塑料管道行业企业竞争力重要途径。目前,尽管国内原材料生产技术取得了很大进步,但仍然存在品种规格不全、质量不稳定、部分原料需要从国外进口的不足,因此,管材的新型加工技术研究显得尤为重要。针对传统管材加工中存在的管材环向强度低、熔接痕缺陷等问题,研究人员研发了一系列新型管材加工技术,如振动挤出法、旋转挤出、固相拉拔、缠绕成型等。

2.1 振动挤出

振动挤出将振动通过机械、声波、气体等形式引入管材的成型加工过程^[3],使熔体在受到原有剪切应力场的基础上再施加一个交变力场,在这种复合应力场的作用下,管材的凝聚态结构、结晶度、流变性、取向发生改变,以此获得更高性能的管材制品。华南理工大学瞿金平等^[4~7]研制了一种电磁动态塑化挤出机,如图 2(a)所示,该挤出机将挤出系统植入到驱动电机内腔中,利用脉振磁场带动转子做轴向振动和周向旋转,从而带动与转子相连的螺杆作轴向振动和周向旋转,其原理如图 2(b)所示,将振动力场引入挤出全过程,弥补了机械振动、液压振动、超声波振动等方法只在机头部分产生振动的不足,具有能耗少、产量高及制品性能优异等优势。

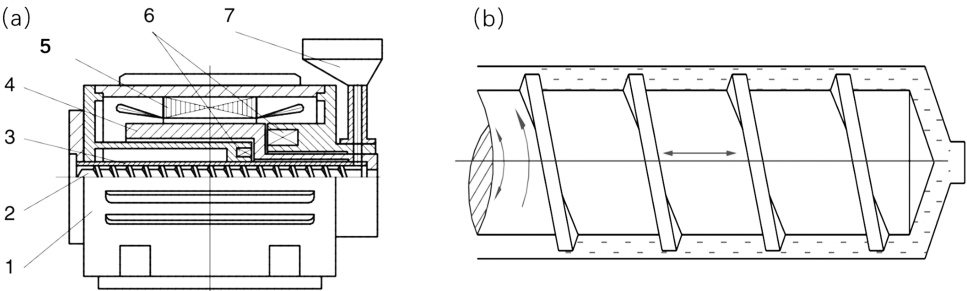


图 2 (a)塑料电磁动态塑化挤出机

(1-机座;2-螺杆;3-料筒;4-转子;5-定子;6-电磁支撑;7-料斗);

(b)螺杆轴向振动及周向旋转示意图^[6]

Figure 2 (a) Electromagnetic dynamic plasticating extruder

(1-base; 2, screw; 3-barrel; 4-rotor; 5-stator; 6-electromagnetic support; 7-hopper);

(b) schematic of the rotation and axial vibration of the screw^[6]

Chen 等^[6]利用该电磁动态塑化挤出机成功制备了双向自增强高密度聚乙烯(HDPE)管,振动力场的引入提高了管材结晶度,使晶体形态更加完善,同时增加了分子链沿管材轴向的取向程度,明显改善了 HDPE 管材的爆破压力与拉伸屈服强度,结果如图 3 所示,与未施加振动力场的管材相比,其爆破应力提升了 34.2%,周向拉伸屈服强度以及冲击强度分别提升了 5.3%和 20.2%,为耐压管材的生产工艺提供了一种新的思路。

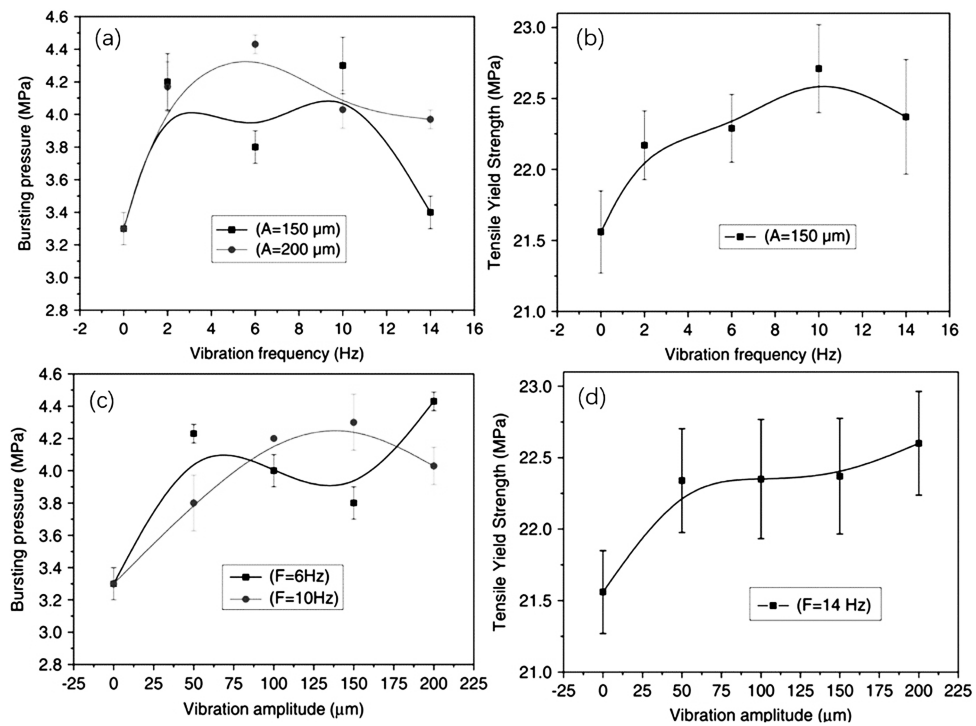


图 3 (a)HDPE 管材爆破压力与振动频率的关系;(b)HDPE 管材拉伸屈服强度与振动频率的关系;
(c)HDPE 管材爆破压力与振动振幅的关系;(d)HDPE 管材拉伸屈服强度与振动振幅的关系^[6]

Figure 3 (a) Bursting pressure of HDPE pipe as a function of vibration frequency; (b)tensile yield strength of HDPE pipe as a function of vibration frequency; (c) bursting pressure of HDPE pipe as a function of vibration amplitude; (d) tensile yield strength of HDPE pipe as a function of vibration amplitude^[6]

2.2 旋转挤出

振动挤出对于调控管材的分子取向以及改善管材结晶效果明显,但并未完全解决管材存在熔接痕的问题,在管材长期使用过程中存在安全隐患。为此,研究人员开发了旋转挤出技术。旋转挤出是在管材的挤出过程中添加环向旋转装置,旋转装置的旋转方式可分为芯棒旋转、口模旋转以及芯棒口模同时旋转三种,在管材受到常规挤出过程中拉伸应力场作用的同时叠加沿管材环向的剪切应力场,如图 4 所示,熔体流动方向由直线转为螺旋形流动^[8, 9]。环向剪切应力场施加不仅消除熔接痕,且将促使聚合物分子链、晶体及纤维增强相偏离管材轴向(挤出)方向,以一定的角度沿着管材环向方向取向,进而改善管材的环向性能。

传统的旋转挤出环向应力场施加方式单一且挤出压力大,挤出温度高,取向结构难以保持^[10]。针对以上不足,四川大学的王琪等^[1, 11~17]借鉴竹子纵向破裂易、横向破裂难的结构特点,自行研制了一种新型的聚合物管旋转挤出装置,其原理如图 5(a)所示,该装置芯棒和口模都可以单独或组合地向同一方向或相反方向旋转,中空的心轴内通空气、水等冷却介质对管道内表面进行冷却,从而对挤出的管材施加特殊的应力场以及温度场,进而实现调控管材的结晶、取向、分散相形态的目的^[18]。利用有限元仿真模拟

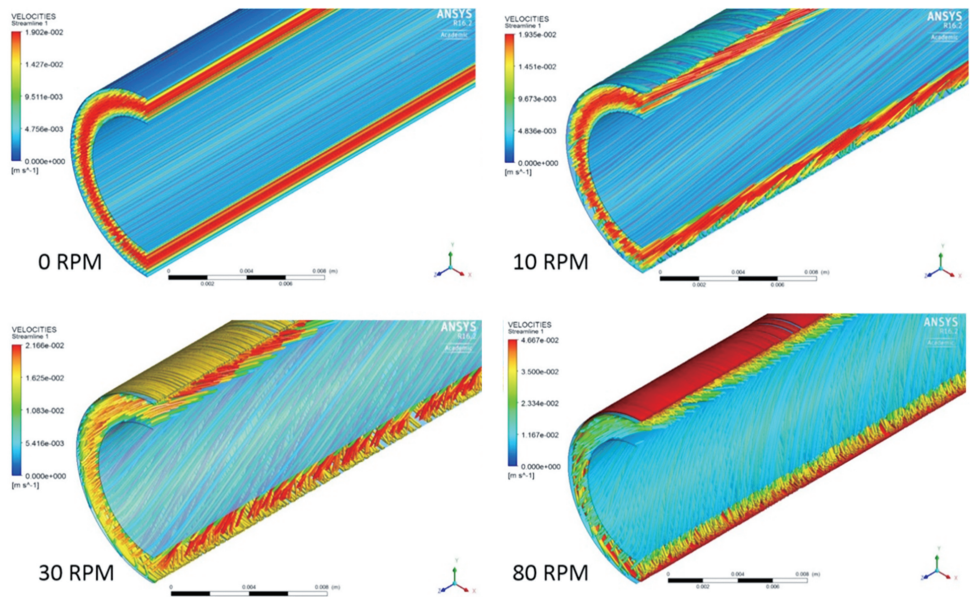


图 4 旋转剪切应力场作用于管材外壁时熔体呈螺旋形流动^[9]

Figure 4 The melt flows spirally when a rotating force field is applied to the outer wall of the pipe^[9]

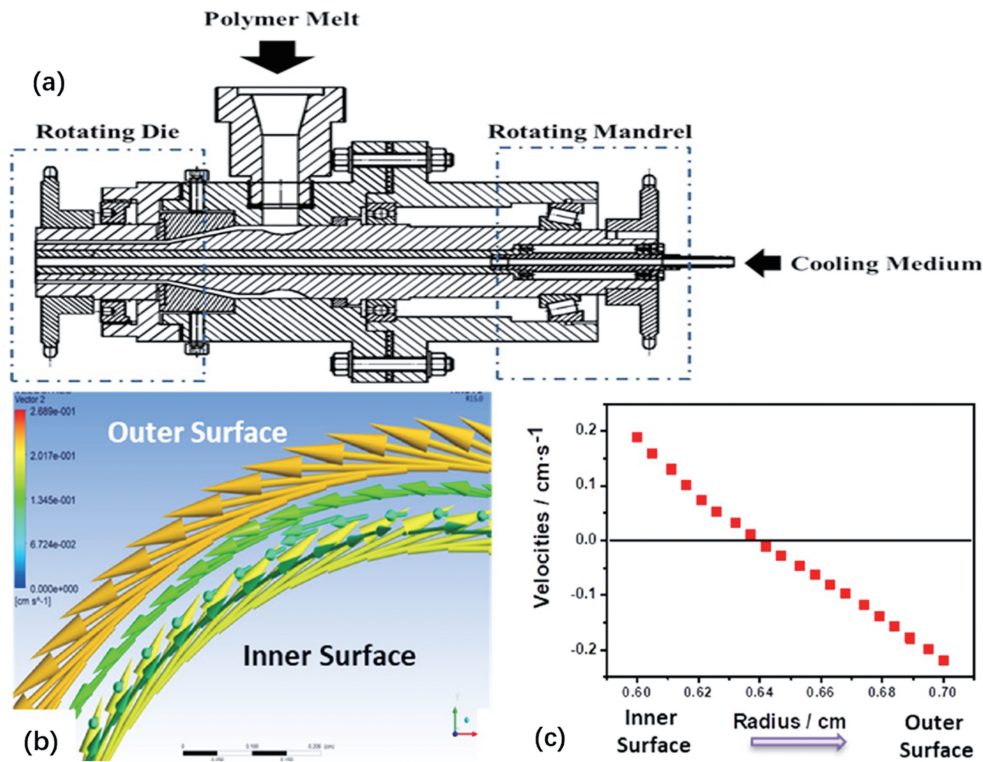


图 5 (a)聚合物旋转挤出装置示意图^[12];(b)反向旋转模式下转速 10 rpm 时流体模拟结果;
(c)沿厚度方向的相应速度分布^[15]

Figure 5 (a)Schematic diagram of polymer pipe's rotation extrusion equipment^[12]; (b) simulation results of the flow pattern in the reverse rotation extrusion with a rotation rate of 10 rpm; (c) the corresponding velocity distribution along the thickness direction^[15]

软件分析其流道行为发现,芯棒和口模的环向旋转以及轴向挤出的叠加作用使熔体呈螺旋流动,且沿厚度方向不同层面熔体螺旋运动方向存在一定夹角,速度大小呈梯度分布^[15],其原理如图 5(b)(c)所示。在聚乙烯、聚丙烯等品种管材的改性中,旋转挤出发挥了重要作用。例如,Li 等^[12]通过旋转挤出的加工方法以及成核剂(TMB-5)和结晶促进剂(等规聚丙烯,iPP)的协同作用,成功制备了高环向拉伸强度、高韧的无规共聚聚丙烯(PPR)管材,如图 6 所示,此方法改性后的 PPR 管的环向抗拉强度和冲击强度分别达到 28.9MPa 和 5.7kJ/m²,分别比常规方法挤出的 PPR 管材增加了 126%和 43%。此外,皮林等^[14]在 PE 基质中加入少量轻度交联聚乙烯,使得分子链的松弛时间大于串晶的固定时间,从而使旋转挤出产生的偏离轴向的串晶得以稳定,有效提高了 PE 管道的环向强度,改善了聚乙烯(PE)管道耐慢速裂纹扩张(SCG)性能,旋转挤出管材在静水压力为 6.6MPa 的实验条件下失效时间为 297h,比常规挤出管材的失效时间延长了 21267%,是目前耐压等级最高的 PE 管。

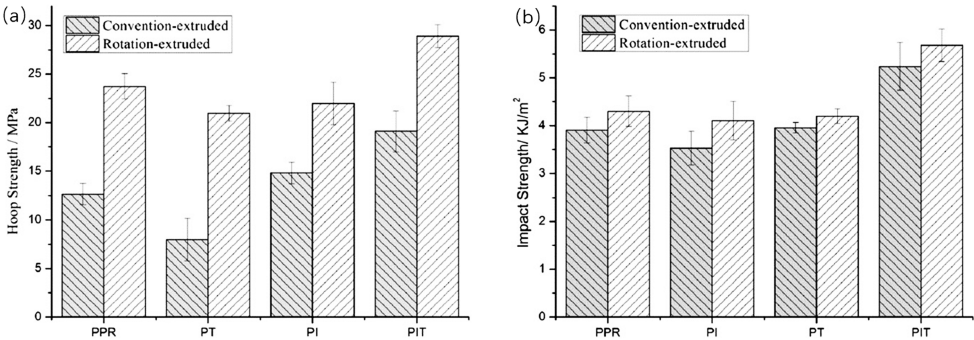


图 6 (a)传统挤出和旋转挤出制备不同组分的 PPR 管的环向拉伸强度;(b) 传统挤出和旋转挤出制备不同组分的 PPR 管的冲击强度^[12]

Figure 6 (a) Hoop tensile strength of the convention and rotation-extruded PPR pipes of different components; (b)impact strength of the convention and rotation-extruded PPR pipes of different components^[12]

2.3 固相拉拔

与振动法、旋转法等对熔体施加力场实现管材的增强不同,固相拉拔法是在聚合物玻璃化温度以上,熔点以下,强迫拉伸管坯通过与原横截面大小不等的口模与芯棒,过程中发生轴向与环向的双向形变,从而大幅提高管材轴向与环向的力学性能。如图 7 所示,固相拉拔法生产设备组成一般为口模、加热冷却装置、扩张装置、牵引设备及其它一整套拉伸装置,由于该方法生产线呈直线型、生产参数方便调整、生产效率,是目前较为常见的管材生产方法^[19~23]。

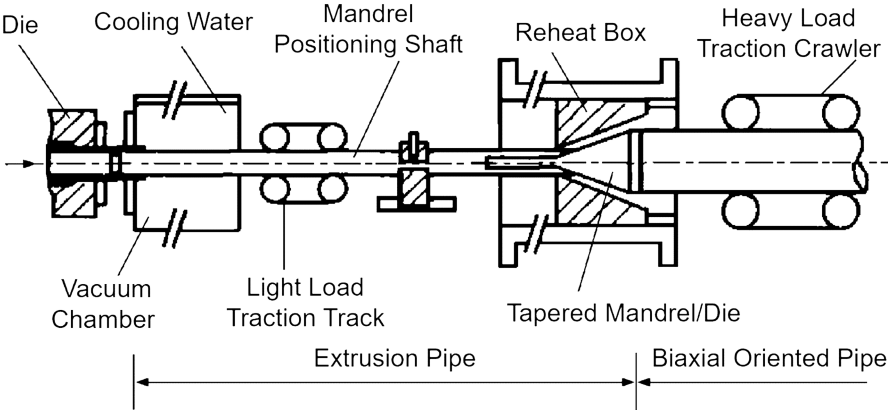


图 7 一种双轴取向管连续口模拉伸装置^[24]

Figure 7 A continuous die-drawing apparatus for the biaxial oriented pipes^[24]

Kong 等^[20]采用固相拉拔工艺制备了双轴取向的聚乙烯管道,研究发现,口模拉伸速率对管材的轴向及环向拉伸比有显著影响,提高拉伸速率,轴向拉伸比逐渐增加,而环向拉伸比则先增加后降低,拉伸温度对轴向及环向拉伸比影响不大。轴向拉伸比增加,管材分子结晶性提高,轴向强度提高,环向强度先增加后减小,其结果如图 8 所示,环向拉伸比/轴向拉伸比为 2.465/1.182 的管材,其沿周向和轴向的抗拉强度均有显著提高,分别达到各向同性试样的 1.75 倍和 1.3 倍,均比固相拉拔前试样的强度要高,同时在一定范围内管材内部形成了偏离轴向的双轴取向片晶结构,实现了管材的双向自增强。

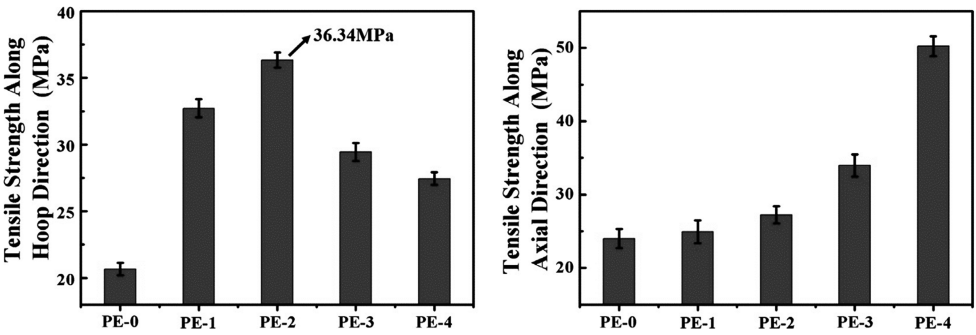


图 8 不同拉伸比下双轴取向 PE 管的拉伸强度^[20]
Figure 8 Tensile strength of biaxially oriented PE pipes with different draw ratio^[20]

除固相拉拔法外,非熔体状态下的加工方法还有准动态机械连续扩张法^[25~27]、管坯胀微缩法^[28, 29]等方法。

2.4 缠绕成型

相较于普通管材,大口径管材具有运输能力强、连续性好的优点,在埋地排污、燃气输送等领域有着广泛的应用,而缠绕成型技术是生产大口径管材的重要手段。管材的缠绕成型是由挤出机对物料熔融塑化,并通过特殊结构的机头口模挤出的具有一定截面的塑料条,在缠绕成型机上按照一定的排布方式缠绕到芯模上,并通过焊接或喷涂黏结剂、压合、冷却定型得到管材制品^[30]。增加了塑料条作为加强筋的螺旋缠绕管相较于实壁管,在具有相同耐压能力的前提下,生产所需原料减少了一半,且不易发生开裂。

陈毅明等^[31]发明了一种内肋增强外波纹型缠绕结构壁塑料管,该塑料管组成部分为管材本体、第一螺旋缠绕管和第二螺旋缠绕管,其中第一螺旋缠绕管为工字形,缠绕管中空腔内部设有工字形支撑钢带,用于支撑第一螺旋缠绕管,第二螺旋缠绕截面呈口字形,排列在两相邻第一螺线缠绕管之间,起到填补空隙、提高管材结构强度,延长管材使用寿命的作用。

3 结论

塑料管道行业目前正由高速发展阶段向高质量发展阶段过渡,同时海绵城市、旧房改造、装配式建筑等领域的迅速发展也对塑料管道的性能提出了更高的要求。相比于发展聚合新技术,调控分子链结构,振动挤出、旋转挤出等塑料新型管材成型方式有加工成本低、周期短的优势,为塑料管材性能提升开辟了新的途径。近年来,旋转挤出技术发展较快,初步实现产业化应用,其生产的 PE100 管 80℃ 静液压强度高达 6.6MPa。振动挤出与固相拉拔虽能制得高强度高模量的自增强管材,由于生产效率低,实用化仍存在困难,还需进一步优化便于实际生产。未来随着新型加工方法的不断发展完善,将推动更多高性能、多功能塑料管材的工业化生产及应用,以满足各种特殊领域的应用需求。

参考文献:

[1] Pi L, Nie M, Wang Q. J Vinyl Addit Technol, 2019, 25: E195~E202.
[2] 于玉真,王璐,李伟亮. 机械工程与自动化, 2019, 1: 225~226.

[3] 焦冬梅. 橡胶振动挤注流动机理及实验研究. 青岛:青岛科技大学, 2017.

[4] 瞿金平. 工程塑料应用, 2000, 11: 11~14.

[5] Qu J, Xu B, Jin G, He H Z, Peng X F. Plast Rubber Compos, 2002, 31(10):432~435.

[6] Chen K Y, Zhou N Q, Liu B, Wen S P. Polym Int, 2009, 58(2): 117~123.

[7] 陈开源. 聚烯烃管材脉动挤出制备及自增强机理研究. 广州:华南理工大学, 2010.

[8] Schneider T, Colton M F, Mccauley K M, Maia J. J Appl Polym Sci, 2020, 137(20): 43683~43699.

[9] Schneider T, Danda C, Ling G, Colton M F, Mccauley K M, Maia J. J Appl Polym Sci, 2020, 137(20): 48684~48689.

[10] 王琪, 聂敏, 白时兵, 郭岳, 张杰. 高分子通报, 2014, 2: 1~9.

[11] Guo Y, Wang Q, Bai S B. Polym-Plast Technol Eng, 2010, 49(9): 908~915.

[12] Li Y, Nie M, Wang Q. Polym Eng Sci, 2016, 56(8): 866~873.

[13] Han R, Nie M, Wang Q. J Polym Res, 2017, 24(11): 10.

[14] Pi L, Guo D, Nie M, Wang Q. J Polym Res, 2018, 25(8): 9.

[15] Yijun L, Min N, Qi W. Acs Appl Mater Inter, 2018, 10(1): 1005~1016.

[16] Fasen S, Jia G, Yijun L, Shibing B, Qi W. Roy Soc Open Sci, 2019, 6(5): 182095~182109.

[17] Zhang D, Nie M, Xiang Y, Yin W. Plast Rubber Compos, 2019, 48(6): 263~269.

[18] 王琪, 张杰, 郭岳, 白时兵, 华正坤. 中国, CN101337425. 2008-08-12.

[19] Wu P P, Yang Q, Zhao Z G, Sun H W, Zhang T Y, Huang Y J, Liao X. J Appl Polym Sci, 2018, 135(32): 11.

[20] Kong C, Wang Y, Ye L, Zhao X W. Polymer, 2019, 178: 121556~121566.

[21] Wu P P, Yang Q, Zhao Z G, Zhang T Y, Huang Y J, Liao X. Polymer, 2019, 161: 109~121.

[22] 缪呈上. 高性能双轴取向聚丙烯扩张工艺及技术改进研究. 镇江: 江苏科技大学, 2019.

[23] 王宇杰, 赵晓文, 牛振宇, 孔琛, 黄强, 陈商涛, 荔栓红, 胡杰, 叶林. 石油管材与仪器, 2019, 5(4): 57~60,5.

[24] 王静, 吴大鸣, 张博, 董维煜. 中国塑料, 2009, 23(6): 8~14.

[25] 上官洲鑫. 准动态扩张双轴取向 PVC 管材取向度的研究. 北京: 北京化工大学, 2012.

[26] Zhang X, Wu D M, Liu Y, Song G J. Appl Mech Mater, 2013: 410~415.

[27] 张欣. 准动态机械式管材扩张方法及装置的研究. 北京: 北京化工大学, 2014.

[28] 闫明. 基于管坯胀-微缩的聚烯烃双向拉伸管连续成型及结构性能研究. 广州: 华南理工大学, 2015.

[29] 高哲鑫, 李伟, 亢本昊, 闫明, 杨智韬, 瞿金平. 塑料, 2017, 46(2): 114~117.

[30] 刘斌, 谭景焕. 塑料科技, 2017, 45(6): 112~117.

[31] 陈毅明. 橡塑技术与装备, 2020, 46(2): 64.

Progress in Processing Methods of Plastic Tubes

YU Gui-ying, LI Chun-hai* , GUO Shao-yun*

(State Key Laboratory of Polymer Materials Engineering , Polymer Research Institute of Sichuan University, Sichuan Provincial Engineering Laboratory of Plastic/Rubber Complex Processing Technology, Chengdu 610065, China)

Abstract:The comprehensive performance of plastic pipes are excellent, widely used in urban and rural construction in various fields. With the development of the pipe industry, both the high-performance pipes and the advanced pipe processing methods are highly desired. This paper describes the application field of plastic pipe, introduces the extrusion molding production method of plastic pipe, reveals the necessity and importance of developing new pipe fabricating methods, give a brief review on the definition, principles, structure and performance of the vibration extrusion, rotation extrusion, solid-phase die-drawing and filament winding Finally, the development trend of pipe processing in the future is summarized and prospected.

Key words:Plastic pipe; Vibration extrusion; Rotation extrusion; Solid phase die-drawing; Filament winding