

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2013.08.023

气辅挤出成型中气垫膜层稳定性影响因素研究进展*

任银娥,柳和生,黄兴元

(南昌大学机电工程学院聚合物成型实验室,南昌 330031)

摘要:综述了聚合物气辅挤出成型过程中影响气垫膜层稳定性的一些因素:工艺参数(气体压力、气体温度、气体流量)、口模结构参数(口模有气辅段长度、环形缝隙)及气阀和挤出螺杆的开启顺序。要使气辅挤出过程中形成稳定的气垫膜层,气体的压力和温度与熔体的压力和温度应接近一致,并应先开启气阀,再打开螺杆进行挤出等。对未来的发展趋势进行了展望。

关键词:气辅挤出成型;气垫膜层;稳定性;气体压力;聚合物

中图分类号: TQ320.66+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2013)08-0103-04

Research Progress of the Influence Factors on the Stability of Gas Layer in Gas-Assisted Extrusion Molding

Ren Yin'e, Liu Hesheng, Huang Xingyuan

(Polymer Processing Research Lab., School of Mechanical and Electric Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: The research progress of some stability influence factors of gas layer in the gas-assisted extrusion molding process, such as technological parameters(gas pressure, temperature and flow rate), die structure parameters(die length with gas-assisted and gas inlet size)and the turning sequence between gas valve and extrusion screw are summarized. For forming stable gas layer in the gas-assisted extrusion molding process, the gas pressure and temperature should be according with melt pressure and temperature, and extrusion screw turning followed with the gas valve opening when extruding.

Keywords: gas-assisted extrusion molding; gas layer; stability; gas pressure; polymer

挤出成型加工具有生产过程连续、生产效率高等优点,是聚合物成型的重要方法之一。在传统的挤出成型过程中,由于聚合物熔体具有黏弹特性等物理性质,当挤出速度较低时,挤出过程较为平稳,挤出物的表面光滑,但随着挤出速度的增加,当超过某一极限值时,挤出物的表面会出现鲨鱼皮现象或挤出物发生翘曲变形及挤出胀大等质量缺陷^[1]。这是由于传统挤出过程中,熔体与壁面形成的非滑移黏着剪切流动而导致的流动不稳定。

自20世纪30年代M. Mooney^[2]提出壁面滑移概念以来,人们对挤出过程中的壁面滑移现象进行了各种实验研究和理论分析,其中,气辅挤出就是将高压气体引入到口模内,在口模内壁与挤出熔体之间形成气体润滑层即产生壁面滑移现象。

气体辅助挤出技术是由英国的R.F.Liang等^[3]在2000年首次提出的一项新型聚合物挤出技术,其创新之处在于通过气体辅助挤出控制系统和气体辅助挤出口模,在挤出加工过程中使聚合物熔体和口模壁面之间形成气垫膜层,使传统的非滑移黏着剪切口模挤出方式完全转化为气垫完全滑移非黏着剪切口模挤出方式,从而使模内熔体的速度场趋于均匀一致,口模出口处的剪切速率趋近于零,熔体呈柱塞状挤

出,可取得明显的口模减粘降阻的效果^[4]。消除了传统挤出成型过程中由于剪切速率不同所造成的各种质量缺陷,挤出物截面同口模的形状基本一致。聚合物熔体在口模内流动的速度分布如图1所示^[5]。

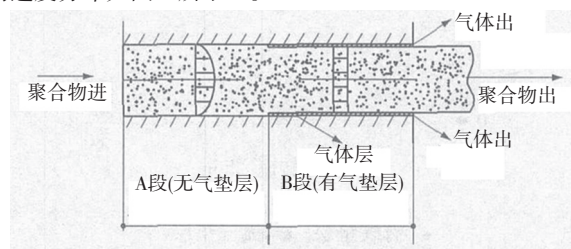


图1 聚合物熔体在口模内流动的速度分布

气辅挤出的关键是在口模和挤出熔体间形成稳定的气垫膜层,气垫膜层的建立既不能干涉到熔体的流动,又要防止熔体和口模壁面直接接触,使挤出过程由非滑移黏着剪切流动方式转化成完全滑移非黏着剪切流动方式,以实现成功的气辅挤出。因此,研究气体辅助挤出过程中影响气垫膜层稳定性的因素,使这项技术能够在生产中推广应用具有重要

* 国家自然科学基金资助项目(51163011)

联系人:柳和生,博士,教授,博士生导师,主要从事聚合物成型设备和理论研究

收稿日期:2013-05-31

意义。而影响气垫膜层的主要因素有气体压力、气体流量、气体温度、口模结构和挤出时的操作等。笔者对影响气垫膜层稳定性的主要因素进行分析。

1 气体压力的影响

气体压力的影响机理是:当气体压力过大时,气流干涉到熔体的流动,且气体会穿透熔体表面,在熔体内部迅速扩散、渗透,形成气泡,挤出物离模后,气泡迅速长大引起挤出胀大的异常现象;当气体压力过小时,气体不能完全从口模内壁排出来,气体沿着阻力较小的方向流动,导致有气体进入到熔体内部,使熔体挤出呈不连续的喷射状,并且熔体粘附于口模内壁,不能形成稳定的气垫膜层。

R. F. Liang 等^[3]通过实验证明,控制气体压力能够在口模内壁形成稳定的气垫膜层,气垫膜层对挤出口模压力降、挤出物胀大产生较大的影响。有气垫膜层时,口模压力降比没有气垫膜层时的口模压力降低得多。采用缝隙口模进行气辅挤出,气体压力对形成稳定的气垫膜层很关键。

此后,黄兴元等^[6-8]对气垫膜层的稳定性进行了详细的实验研究,实验装置如图2所示,实验原料为高密度聚乙烯(PE-HD),以压缩空气作为气源。实验时螺杆上分三段控制的加热圈温度分别设置为150,160,170℃,机头温度为180℃,机头和口模之间的弯管加热温度设置为180℃,气辅挤出口模外的加热圈的温度也设定为180℃,实验中螺杆温度和口模温度保持不变。用高温熔体压力传感器测量的熔体压力和气体加热系统前的气体压力来研究口模内环形缝隙处的熔体压力和气体压力。

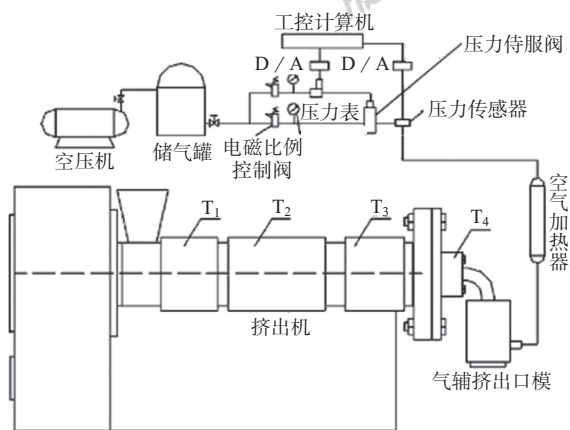


图2 气辅挤出实验装置示意图

在挤出过程中,将气体压力先调到0.3 MPa,待达到稳定的气辅挤出后,逐步升高气体压力到0.7 MPa,结果发现,当气体压力和熔体压力接近一致时,气体/熔体两相流的界面稳定,在熔体与模壁之间产生稳定的气垫膜层,当气体压力高于熔体压力后,挤出物表面逐渐出现突起现象,随着气体压力的增加,突起现象越来越严重。当气体压力从

0.3 MPa 逐渐降到0.1 MPa时,挤出过程仍能稳定,挤出物表面光滑,未见挤出胀大现象产生;而当气体压力减为零时,此时挤出过程还保持稳定,但出现了明显的挤出胀大现象。当气体压力降为零后再开始升高时,挤出过程不稳定。实验说明,当气体压力和熔体压力接近一致时,才能建立稳定的气垫膜层。Liang Jizhao^[9]研究证实,气体压力太高,对挤出制品的表面质量会产生不良影响;气体压力过低,不能使熔体和壁面分离,所以控制气体压力的大小是一个重要的环节,一般情况下,选择气体压力稍高于熔体压力。R. F. Liang 等^[3]的研究表明,在熔体挤出时通入气体,在挤出熔体和口模壁面间确实可以形成稳定的气垫膜层,稳定的气垫膜层产生的条件是:首先将气辅口模内气体的压力调至略大于熔体的压力,然后再调至熔体的压力。B. Hallmark 等^[10-12]主要探索研究了稳定挤出条件,当口模中气体压力与熔体压力接近时,可获得稳定挤出,气体压力大于熔体压力会导致不稳定挤出。

气体压力对在口模内建立气垫膜层进行气辅挤出具有非常大的影响,而实验测量的气体压力是气体加热装置前的压力,并且气垫膜层内的压力从有气辅段的环形缝隙处到口模出口逐渐减小,所以可能对实验结论有影响,以后应研发更先进的装置,直接测量口模内每一处气体压力。

2 气体温度的影响

气体温度对挤出稳定性的影响可用熔体黏度的影响来解释,因为气体温度的高低影响和气体直接接触的熔体表面温度,当气体温度低于熔体温度时,熔体的温度就会被降低,导致熔体的黏度增加,使熔体更易粘附于口模内壁,从而使其平衡状态遭到破坏,在口模中产生波动,进而导致气流不稳定。气体温度越低,对熔体表面的冷却作用越大,气辅挤出的稳定性越差。反之,气体温度升高时,熔体的黏度降低,容易形成稳定的气流,达到稳定挤出,但当气体温度过高时,会使熔体的局部发生降解,同时气体容易进入熔体内部,形成气泡,影响挤出制品的质量。

黄兴元等^[6-7]在实验时,设定口模温度为190℃,气体压力及气体流量固定不变,使气体温度由常温逐渐提高到200℃,然后再逐渐降低到常温,结果发现,当气体温度与熔体温度一致时,容易形成稳定的气垫膜层,实现稳定的气辅挤出;当气体温度低于熔体温度时,有时也可形成稳定的气垫膜层,但稳定性很难保持。气体温度与熔体温度差别越大,越不容易形成稳定的气辅挤出;古大治^[13]的研究认为,聚合物具有发泡温度,当气体温度高于发泡温度时,气体会穿透挤出物表面而使它发泡。但当温度过低时,会影响熔体的流动,所以气辅挤出中气体温度要低于聚合物的发泡温度,这样才能形成稳定的挤出。

M. Zatloukal 等^[14]对气辅挤出中影响气垫膜层稳定性的因素进行了实验研究。结果表明,气体压力、温度等多种因素对气垫膜层都有影响。在气辅挤出中,聚合物熔体与气体在口模内呈气-液两相分层流动,在挤出过程中,由于气体和挤出熔体相接触,气体温度的变化会使熔体温度发生变化,导致熔体的黏度发生变化,进而影响气辅挤出的稳定性。

3 有气辅段长度的影响

R. Brzoskowski 等^[15]通过多孔金属管将压缩空气引入口模内,形成气垫膜层,实现了气辅挤出,但实验中没有具体验证气垫膜层的稳定性和气体压力、气体温度以及有气辅段长度等因素的关系。此后,钱百年等^[5]通过多孔金属管将压缩空气引入口模内,形成气垫膜层。研制了有气膜润滑段的短纤维剪切取向机头,用来挤出短纤维增强胶管。实验结果表明,气体润滑口模不仅能减小口模压降,通过选取合适的有气辅段长度可以形成稳定的气垫膜层。但是,这种通过多孔金属管引入气体的气辅挤出口模,最大的问题是金属管孔隙容易被熔体堵塞,堵塞后不容易清理,影响气垫膜层的形成和稳定性。

肖建华^[16]实验认为,有气辅段越长越容易引起气体流速、压力、温度等参数的变化,造成熔体和口模壁面粘连,影响气垫膜层的稳定性;黄兴元^[6]认为,有气辅段长度的设计非常关键,有气辅段越长,气垫膜层的稳定性越差,但该段越短,熔体经过它的时间就会缩短,熔体在有气辅段的松弛时间也越短,气辅挤出的作用发挥就越不充分。P. Santelids^[17]研究发现,在恒定剪切速率下,挤出物的挤出胀大比随口模长径比的增大而减小,当长径比超过某一值时,挤出胀大比趋于一定值,但长径比太大不利于气垫膜层的形成。

P. Jay 等^[18]实验认为,在低 We (We (Weissenberg) 数 (韦森堡效应,即黏弹性交叉效应) 下,挤出加工可选用较短的滑移段 (有气辅段) 口模即可达到精密挤出的效果;在高 We 数下,滑移段的长度越长,挤出胀大比越小,挤出物的外形尺寸越精确。在塑料挤出生产过程中,在低 We 数下,易选用较短滑移段口模;在高 We 数下,采用较长滑移段口模可获得稳定的气辅挤出。

有气辅段长度作为气辅挤出口模设计的一个重要参数,其设置的合理性直接影响到气垫膜层的稳定性,但是,在没有其它因素影响的情况下,一般有气辅段越长,其气垫膜层越不稳定。

4 气阀和螺杆开启顺序的影响

黄益宾等^[19-21]对气体辅助共挤过程的气垫膜层形成和稳定性进行了详细分析,实验用两台挤出机为螺杆直径分别为 65 mm 和 50 mm 的单螺杆挤出机,螺杆直径大的称为主机,螺杆直径较小的称为共挤机,螺杆加热采用电热圈加热,

沿螺杆长度方向由三段电加热圈加热。螺杆温度用热电偶测量并反馈到温度控制仪,温控仪控制接触器的通断来控制加热电路通断,最终实现螺杆的温度控制。实验所用材料分别为聚丙烯 (牌号为 RB2.0HC)、聚丙烯 (牌号为 T300) 和高密度聚乙烯 (牌号为 HDPE6908)。研究发现,气体压力和温度对气垫膜层有影响时,先开启挤出机螺杆,待共挤出稳定后,再开启气阀,然后,调整气体的压力和温度,当进入口模的气体温度、压力与熔体的温度、压力很接近或完全一致时,在通气初期气辅共挤出不稳定,但挤出一段时间后,能逐渐达到稳定的气辅共挤出状态。实验表明,在气辅共挤出过程中先开启螺杆再打开气阀,在气体具有合适的温度和压力的情况下,依然能形成稳定的气垫膜层。

卢臣^[8]在进行异型材气辅挤出实验时发现,若先启动挤出机螺杆进行挤出再打开气体,不能实现气体辅助挤出。这是由于先开启挤出螺杆进行挤出时,部分聚合物熔体粘附于口模壁面上,当再通入高压气体时,粘附于口模壁面的熔体就会在气体和口模壁面间形成一不规则的粘附层,影响到气垫膜层,进而影响挤出过程。但此时将气体温度升到高于聚合物的熔体温度,使挤出逐渐恢复到稳定的气辅挤出状态,再将气体温度降到和口模温度一致,才可形成稳定的气垫膜层。而当先打开气阀、后启动挤出机螺杆时,只要气体压力、气体温度及有气辅段长度在合适的范围内,就会形成稳定的气垫膜层。

5 气体流量的影响

肖建华^[16]通过实验研究了气体流量大小和稳定气辅挤出的关系,运用气体运动理论和气体紊流响应解释了实验结果。在实验过程中,将气体流量由 $0.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 增加到 $0.8 \text{ m}^3/\text{h}$ 以上时,气体流量计中的转子开始出现有规律的上下波动,即气体流量出现了不稳定的波动现象,同时挤出物表面成波纹状。实验结果表明,在气辅挤出过程中,增大气体流量容易引起气垫膜层厚度波动或气体产生紊流,使挤出物表面以波纹形式挤出,不能实现稳定气辅挤出;气体流动对熔体的作用是一种非常复杂的现象,从空气动力学的角度来看,气体产生紊流流动,是由于气流的作用力强迫熔体产生强烈的紊流响应 (又称抖振),而熔体的抖振反过来又将改变气流的作用力,产生附加的气动力,形成气体与熔体的相互作用体系,使气辅挤出产生不稳定现象^[22]。

黄兴元等^[7]的实验表明,气体流量的大小影响气垫膜层的厚度和气垫膜层内气体的速度,由于气体流量大时,气垫膜层的移动速度快,对挤出熔体有一定的拉动作用,使熔体截面尺寸减小,所以,可通过调整气体流量控制挤出物的截面尺寸。M. R. Mackley^[1]实验证明,在气辅挤出过程中,熔体流量的大小影响气辅的稳定挤出,当熔体流量较小时,

才能成功地形成气辅挤出,消除鲨鱼皮现象和挤出不稳定。

实质上,气垫膜层的稳定性与气体紊流有关,而气体紊流又与气体流速有关,影响气体流速的因素通常有压力、流量、温度等,由于对气垫膜层内气体流速的测量十分困难,目前的实验中仅仅研究了气体流量对挤出流量、挤出速度和挤出物直径的影响,未见有研究关于气辅挤出中气垫膜层的稳定性与气体流量之间关系的报道。

6 环形缝隙的影响

R. F. Liang 等^[3]采用缝隙口模对高密度聚乙烯进行了气辅挤出研究,口模由上下两部分组成,上口模和下口模之间有 0.1 mm 的环形缝隙,下口模有一气室,高压气体进入下口模的气室中,再沿环形缝隙进入到口模内,在口模内壁和熔体之间形成气垫膜层。当气体压力、气体温度等在合适的范围内时,利用缝隙口模进行气辅挤出时,可以通过调节缝隙间隙来控制气垫膜层的厚度,而通过调节缝隙间隙对气垫膜层的稳定性几乎没有影响。

黄兴元等^[6,8]在实验中分别使口模中的环形缝隙为 0.1 mm 和 0.2 mm 进行气辅实验。实验结果表明,环形缝隙对气垫膜层的建立和稳定性没有明显的影响。但是,气辅挤出设备的密封性对实现稳定的气辅挤出有影响,密封不好,就会有漏气现象,从而使得气流不稳定,不能形成稳定的气辅挤出。

7 展望

目前的研究成果为研究人员在以后的实验中建立稳定的气垫层提供了基础。今后,应在研究气体压力、气体温度、气阀和螺杆开启先后顺序等影响因素的基础上,考虑实验过程中其它因素的影响,因此,今后的研究方向为:

(1) 已有的实验研究大多是针对单面气辅挤出,而对于内部空心异型材在气辅挤出过程中要形成内外两面气辅,所以,研究人员应考虑如何使内外壁面同时建立稳定的气垫膜层,并分析影响两面气辅挤出中气垫膜层稳定性的因素,以成功地实现异型材气辅稳定挤出。

(2) 目前,关于气体流量对形成稳定气垫膜层影响的研究,仅研究了气体流量的大小影响挤出物的截面尺寸和稳定的气辅挤出,并未研究气体流量和气垫膜层稳定性的直接关系,今后应考虑研究气体流量和气垫膜层稳定性的关系。

参考文献

- [1] Mackley M R. Rheol Acta, 2005, 44(4):352-359.
- [2] Mooney M. Rheol Acta, 1931, 2(6):210-223.
- [3] Liang R F. et al. Journal of Rheology, 2001, 45(1):211-226.
- [4] Arda D R, et al. Rheol Acta, 2005, 44(4):252-259.
- [5] 钱百年,等. 橡胶工业, 1997, 44(6):323-326.
Qian Bainian, et al. China Rubber Industry, 1997, 44(6):323-326.
- [6] 黄兴元. 聚合物气体辅助口模挤出成型的理论及实验研究[D]. 南昌:南昌大学, 2006.
- [7] 黄兴元,等. 塑性工程学报, 2005, 12(5):101-104.
Huang Xingyuan, et al. Journal of Plasticity Engineering, 2005, 12(5):101-104.
- [8] 卢臣. 塑料异型材气辅挤出模流动的理论与实验研究[D]. 南昌:南昌大学, 2007.
Lu Chen. Theoretical and experimental study on polymer melt flow within the die in plastic profile gas-assisted extrusion[D]. Nanchang:Nanchang University, 2007.
- [9] Liang Jizhao. Polymer Testing, 2004, 23(4):441-446.
- [10] Hallmark B. Polymer Engineering and Science, 2007, 48(1):37-51.
- [11] Hornung C H, et al. Micromech and Microeng, 2006, 16(7):434-447.
- [12] Hallmark B, et al. AdvEng Mater, 2005, 7(6):545-547.
- [13] 古大治. 高分子流体动力学[M]. 成都:四川教育出版社, 1998.
Gu Dazhi. Polymer fluid dynamics[M]. Chengdu:Sichuan Education Publishing House, 1998.
- [14] Zatloukal M, et al. Plastics, Rubber and Composites, 2007, 36(6):248-253.
- [15] Brzokowski R, et al. Rubber Chemistry and Technology, 1987, 60(5):945-956.
- [16] 肖建华. 用于精密挤出成型的气辅挤出口模设计数值模拟和实验研究[D]. 南昌:南昌大学, 2008.
Xiao Jianhua. Numerical simulation and experimental study of gas-assisted die design for precision extrusion[D]. Nanchang:Nanchang University, 2008.
- [17] Santelids P. Advances in Polymer Technology, 1994, 32(1):1 885-1 889.
- [18] Jay P, et al. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1998, 79(2):599-617.
- [19] 黄益宾. 聚合物气体辅助共挤成型的理论和实验研究[D]. 南昌:南昌大学, 2011.
Huang Yibin. Theoretical and experimental study on polymer gas-assisted co-extrusion[D]. Nanchang:Nanchang University, 2011.
- [20] 戚宁. 气辅共挤成型界面稳定性数值模拟及实验研究[D]. 南昌:南昌大学, 2009.
Qi Ning. The numerical simulation and experimental study of instability for gas-assisted co-extrusion[D]. Nanchang:Nanchang University, 2009.
- [21] 黄益宾. 高分子材料科学与工程, 2013, 29(4):113-116.
Huang Yibin. Polymer Materials Science & Engineering, 2013, 29(4):113-116.
- [22] 潘祖仁. 高分子化学[M]. 北京:化学工业出版社, 2006.
Pan Zuren. Polymer chemistry[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2006.