

PC的结构性能调控及其在航空透明件上的应用

许雪婷^{1,3}, 王韬^{2,3}, 王博伦^{2,3}, 孙琦伟^{2,3}, 葛勇^{2,3}, 郎建林^{2,3}, 陈宇宏^{1,3}, 颜悦^{2,3}

(1.北京航空材料研究院,北京 100095; 2.北京航空材料研究院股份有限公司,北京 100095;

3.北京市先进运载系统结构透明件工程技术研究中心,北京 100095)

摘要: 针对具有高抗冲性能、高透明性、工程应用广泛的芳香族聚碳酸酯(PC)展开了综述,梳理了PC制备方法,系统分析了PC制备工艺、分子量及其分布、长链支化结构对性能的影响规律与作用机制,基于研究现状提出了PC选材方向。PC凭借其性能优势正逐步应用于航空航天等高端工业领域,详细介绍了PC作为航空透明件材料的性能特点,简述了国外战斗机单层和复合PC座舱盖应用现状,提出了我国PC一体化注射成型座舱盖的发展新趋势。

关键词: 聚碳酸酯;聚碳酸酯制备;聚碳酸酯结构;聚碳酸酯性能;航空座舱盖

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)04-0160-05

Structure and Property Control of PC and Its Application in Aerospace Transparent

Xu Xueting^{1,3}, Wang Tao^{2,3}, Wang Bolun^{2,3}, Sun Qiwei^{2,3}, Ge Yong^{2,3}, Lang Jianlin^{2,3}, Chen Yuhong^{1,3}, Yan Yue^{2,3}

(1. Beijing Institute of Aeronautical Material, Beijing 100095, China; 2. Baimtec Material Co., LTD, Beijing 100095, China;

3. Beijing Engineering Research Center of Advanced Structural Transparency for the Modern Traffic System, Beijing 100095, China)

Abstract : Aromatic polycarbonate (PC) with high impact resistance, high transparency and wide engineering application was reviewed. The preparation methods of PC were summarized. The regulation and mechanisms of PC preparation process, molecular weight and its distribution, long-chain branching structure on performance were systematically analyzed. Based on the research status, the direction of PC material selection was proposed. Polycarbonate is gradually applied to high-end industrial fields such as aerospace due to its performance advantages. The performance characteristics of PC as an aviation transparent material was introduced in detail. The application status of single-layer and composite PC cockpit covers of foreign fighters was briefly described, and the new development trend of PC integrated injection molding cockpit covers in China was proposed.

Keywords : polycarbonate ; preparation of polycarbonate ; polycarbonate structure ; polycarbonate performance ; aviation cockpit

聚碳酸酯(PC)是一种无色、无味的热塑性材料,也是五大工程塑料中唯一的透明产品。PC集刚性、硬性、韧性为一体,密度为1.18~1.22 g/cm³,玻璃化转变温度为145~150℃,热变形温度135℃,具有优异的冲击性能、延展性^[1]、阻燃性、耐高低温性^[2]、耐蠕变性能等^[3-4],近几年其生产能力和市场需求均以较快速度发展。依据分子主链结构特征,PC可以分为三大类,其中脂肪族PC和脂肪-芳香族PC力学性能较差,在结构承载方面的应用受限。芳香族PC(后文PC均为芳香族)结构式如图1所示,苯环为刚性基团,异丙基增大了位阻,羰基使链段柔性增强,在多级分子结构的相互作用下,PC具备均衡的刚性和韧性,凭借其优良的综合性能在工业、

农业、高科技领域^[5]以及日常生活中得到广泛应用^[6-7]。

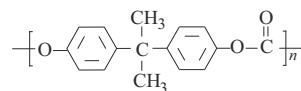


图1 芳香族PC结构式

PC材料在飞速发展的航空科技领域也发挥着重要的作用,仅1架波音747型飞机上所用PC部件多达2500个,单机耗用PC数量近2t^[8]。同时,因其优异的冲击性能、耐温性和透明性,PC在航空座舱盖透明件上正逐步取代传统无机玻璃和有机玻璃,具有极大应用潜力^[9-10]。座舱盖的主要功能是为飞行员提供清晰且不失真的视野并保护飞行员不受高速气流的吹袭及外物的撞击,要求其具备良好的光学性能和

通信作者: 颜悦,研究员,博士研究生,研究方向为航空透明材料。

收稿日期: 2023-03-11

引用格式: 许雪婷,王韬,王博伦,等. PC的结构性能调控及其在航空透明件上的应用[J]. 工程塑料应用,2023,51(4):160-164.

Xu Xueting, Wang Tao, Wang Bolun, et al. Structure and property control of PC and its application in aerospace transparent[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(4): 160-164.

一定的强度、刚度及冲击性能;同时,座舱盖还需在危急情况下为飞行员提供应急救生通道。国内外现役的第四代、第五代战斗机座舱盖多采用单层或层合PC材料制成,但相关材料性能、制造工艺技术和试验数据等资料被高度保密,无从获得。

近年来,国内外学者对PC材料进行了大量研究,但涉及多个领域,研究方向较为分散,特别是针对PC在航空透明件领域的应用,少有系统性的归纳总结。笔者从PC的结构出发,综述了PC的制备工艺、分子量和支化结构等因素对性能影响的共性规律,概述了其在航空透明件领域的应用情况,并提出了总结与展望。

1 PC制备工艺及其对性能的影响

1.1 PC的制备工艺

随着生产技术的发展,PC材料先后经历了4种合成工艺:溶液光气法、界面缩聚光气法(光气法)、酯交换熔融缩聚法(酯交换法)和非光气酯交换熔融缩聚法(非光气法)。其中溶液光气法工艺成本高,且对环境有较大污染,不符合可持续发展战略,该工艺已完全淘汰,其它三种工艺特点总结归纳见表1。

表1 PC生产工艺

生产工艺	光气法	酯交换法	非光气法
原料	光气、双酚A (BPA)	BPA,碳酸二苯酯(DPC)	BPA, DPC
DPC制备方法	/	光气、苯酚 (PH)	碳酸二甲酯(DMC)与PH酯交换
反应介质	碱性水溶液与二氯甲烷溶剂界面	本体熔融状态	
反应条件	低温低压	高温、高真空、微量催化剂	
反应过程	一步生成	先酯交换后缩聚	
反应特点	不可逆反应	平衡反应	
后处理过程	洗涤、沉淀、干燥成粉	熔体直接挤出造粒	
安全性评价	使用剧毒原料光气,相对危险	非光气法获得DPC,相对安全	
环保特性	使用大量溶剂,有“三废”产生,需要专用设备回收	不使用溶剂,副产物直接回收,基本无“三废”产生	

(1)光气法。

光气法是现有PC制备工艺中应用较为广泛的,其反应方程式如图2所示。双酚A (BPA)^[11]与氢氧化钠溶液反应生成BPA钠盐[图2方程式(1)],以此为水相,惰性溶剂为有机相,恒定速率通入光气,室温下聚合反应于两相的界面上进

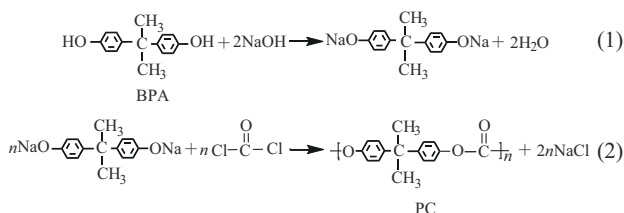


图2 光气法合成PC反应方程式

行,生成低分子量PC[图2方程式(2)],再缩聚分离得到高分子量产物,通过加入中和剂与过量的碱液分离有机相中的产物,再经过洗涤、沉淀、过滤、干燥和造粒后得到PC产品。

(2)酯交换法。

酯交换法是一种间接光气法,其反应方程式如图3所示。苯酚(PH)和光气反应制得碳酸二苯酯(DPC)[图3方程式(1)],DPC和BPA在高温、高真空反应体系中,微量催化剂的作用下进行酯交换反应[图3方程式(2)],再经缩聚生成PC。在上述制备工艺中,酯交换和缩聚都是可逆平衡反应^[12],及时去除副产物PH才能制得相对分子量较高的PC。随着反应的进行,分子量和黏度逐渐变大,需要设计合理反应器,才能保证搅拌充分并提高反应物比表面积,使PH得以顺利从反应器中分离出来。

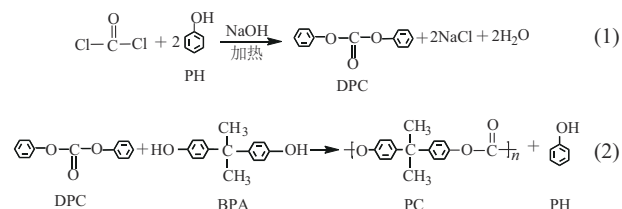


图3 酯交换法合成PC反应方程式

(3)非光气法。

非光气法是在酯交换法基础上发展起来的一种工艺,反应方程式如图4所示。非光气法的聚合阶段和酯交换法是相同的过程^[13],不同在于DPC的生产过程,非光气法使用DMC和PH反应制得DPC[图4方程式(1)],DPC与BPA进行酯交换,缩聚生成PC[图4方程式(2)]。非光气法为“绿色工艺”,生产工艺为封闭体系,环境污染少,不使用剧毒光气作为原料,PH可循环利用,将成为未来合成PC的主要工艺。

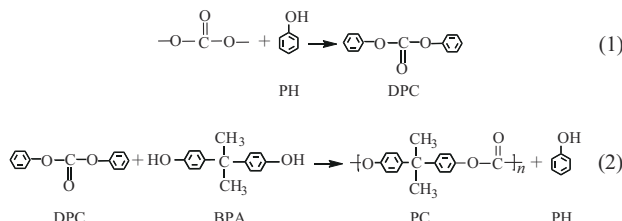


图4 非光气法合成PC反应方程式

1.2 PC制备工艺对性能的影响

PC对可见光的透光率高达91%,在光学特性相关领域的应用范围日益扩大,对其产品色度、透明度等要求也在不断提高,生产工艺直接影响PC的光学性能。光气法所采用原料可不经干燥,聚合反应在低温、常压下进行,反应对杂质不敏感,产品性能(尤其是透明度)优良,更适合应用于高端市场。对于酯交换法,随着反应进行,真空度、反应温度均逐步提高,但在高温熔融状态下,PC大分子链易发生热裂解,副产品PH的存在导致PC产品分子量较低,得到的PC色度降低,对光学性能产生不利影响。BPA合成过程中均存在副反应,产品中Fe、PH、水等降低了BPA产品的纯度及色度,进

而影响PC产品色度。酯交换过程需加入碱性催化剂,产品数均分子量增大,但催化剂用量超过一定范围时会增大副反应的发生概率,影响PC产品色度。非光气法在反应过程中,BPA在高温下不稳定易分解,可能导致PC品带有黄色或棕红色,若在碱性催化剂下进行PC合成,还容易发生Kolbe-Schmitt副反应^[14]。同时,必须及时将副产物PH移出以增长PC聚合体分子链,随着反应进行,真空度、反应温度均逐步提高,在高温熔融状态下,PC大分子链易发生热裂解,对光学性能产生不利影响。

PC合成阶段产生的支化交联结构可能引发熔体增黏,此类凝胶化反应对强度和冲击性能会产生不利影响,导致光学性能大大降低,造成光学薄膜“鱼眼”等问题。光气法所需的反应温度较低,不易发生副反应,用封端剂调控后端羟基含量只有不到0.4%;酯交换法高温缩聚易引发Fries重排等副反应,难以实施封端调控,端羟基含量比较高,在1%~2%之间。端羟基形成的酚氧自由基能够形成联苯交联结构,能够进一步引发各种自由基连锁反应,非光气法与酯交换法类似,均比光气法易发生异构化反应,形成更多的支化和交联结构,发生凝胶化效应^[15]。PC凝胶形成机制如图5所示。

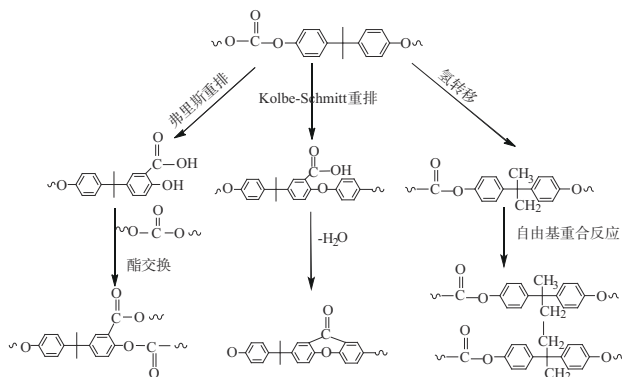


图5 凝胶形成机制^[15]

PC在制备中通常需经过材料改性、挤出/注射成型和回收再利用^[16]等工艺,加工过程中会发生热氧、光氧^[17]和物理老化^[18],酯交换法和非光气法制备的PC存在较多支化链,随着加工次数增加,断裂伸长率和冲击性能下降,反复加工稳定性较差,限制了应用范围。因此,光气法制备的PC在力学、光学和稳定性方面都更有优势。

2 PC分子量对性能的影响

PC分子量和分子量分布是影响其物理、力学和流动性的关键参数。例如,低分子量的PC适合作为数字存储介质的基板,分子量约为30 000的PC可作为低红外吸收固体发射器和探测器的光纤芯材料,分子量为50 000~100 000的高透明PC被广泛应用于车辆、建筑窗户和防弹窗^[19]的制备。

分子量是影响PC力学性能、流动性能和韧性的重要因素。Nishitsuji等^[20]研究发现PC裂纹成核应力随分子量的增加而增加,不受退火的影响。冲击强度同样随着分子量增加,在退火后降低^[21]。剪切模量和体积模量不存在分子量依赖性,但退火使剪切模量略有增加,体积模量略有降低。PC

应变硬化模量随温度的升高和分子量的降低而降低^[22]。分子量的增加会提高缠结分子链的滑移力,增强PC的韧性;分子量降低即分子链变短,分子间作用力变弱,流动性能提升,断裂强度、断裂应变等力学性能下降,裂纹数量增加,裂纹区特征变得更加明显^[23]。Ohara等^[24]针对在130℃下退火数均分子量为9 100,10 900,12 800的PC样品进行应力-应变曲线分析,发现分子量为9 100的PC样品在退火0.33 h后变脆,分子量较大的PC在退火168 h内都表现为屈服而非脆性,恒温退火时PC的脆化时间随着分子量的增大而延长。

研究人员采用粗粒化分子动力学模拟的方法,研究发现分子量对应力-应变曲线有显著影响。其中小应变范围内,分子量对屈服应力的影响很小。大应变的情况下,分子量大的屈服后应力大幅增加,阻碍了小区内产生集中变形情况的发生,表现为韧性断裂;低分子量PC屈服后应力降低,形变将集中在屈服起始区域,导致脆性断裂。通过观察高分子量和低分子量PC的变形行为,如图6所示,发现分子量大的模型链缠结较多,形成了能够抑制局部断裂的牢固分子网络结构,使得屈服后应力增加,分子链的缠结有助于脆性向韧性断裂的转变。通过 γ 射线照射引发PC分子链断裂,分子量降低,材料会产生从韧性向脆性的明显转变^[25],说明分子量在PC脆韧性转变过程中起主要作用^[26]。

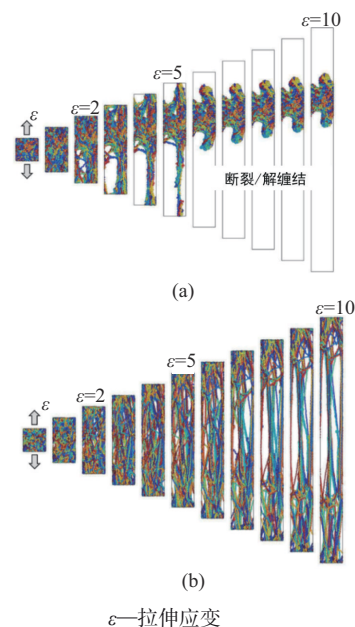


图6 约束拉伸变形的模拟单元快照
数均分子量:a—8 200;b—65 000^[26]

分子量分布会直接影响PC的加工行为和性能。分子量分布宽,熔体黏度低,加工能耗小,但制品的强度等性能下降。分子量分布窄,低分子量的部分含量越少,活泼羟端基或羧端基的含量越低,减少了高温条件下羟基引起的酯类醇解和羧基促进的酯类酸性水解,降低了游离基连锁降解,进而稳定了PC性能。为提高PC的热稳定性和加工性能,分子量小于10 000的部分含量应尽量低,即分子量分布应该较

窄。同时,在具有相同的化学结构、数均分子量和力学性能的前提下,分子量分布越窄的玻璃化转变温度越高。

3 PC长链支化结构对性能的影响

PC因性能优异被广泛应用于塑料工业,但其存在加工条件严格、成本高等缺点,为进一步拓宽应用领域,行业做了许多尝试,主要集中于共混改性与表面接枝改性等方面,但 these 方法大多会降低韧性,限制了其在工程上的应用。长链支化聚合物不会影响本身的韧性和透明性^[27],在熔体加工改性方面具有重要作用^[28-31]。根据自由基反应机理,在多官能度单体存在条件下,利用反应共混^[32]、高能射线辐照^[33-34]等方式可以引入长链支化结构,使聚合物的拓扑结构发生变化^[35],具有更长的分子链松弛时间、明显的拉伸应变硬化行为^[36-40],在聚乙烯、聚丙烯、聚乳酸等聚合物的实验研究中得到了证实^[41-42]。长链支化使得熔体静态黏度上升,剪切变稀行为明显,内部产生了类似交联的物理网络结构。长链支化结构的引入在一定程度上提高了分子链的运动性,聚合物内部出现了化学支化位点且分子间缠结程度明显上升,对冲击性能具有一定的提升作用。Zhai等^[43]通过正电子湮没研究发现,与直链BPA型PC相比,两种支化PC的自由体积分数分别提高了13.1%和11.8%,链段流动性增加,降低了PC结晶的能垒,结晶速率更快。Lyu等^[44]通过对线性及支化PC共混物热力学、形态学、流变学及力学性能等方面的研究发现,通过共混引入的支化结构在改善熔体性能的同时,不损伤其力学性能。Liu等^[45]通过对已经商业化的线性及支化PC研究,证实了支化结构在提升熔体弹性,延长其分子链松弛时间,增强聚合物熔体剪切变稀行为以及提升熔体流动活化能等方面的作用,在吹塑应用中尤为显著。

环境应力开裂(ESC)是热塑性聚合物在服役使用中经常发生的事件,PC在应力和溶剂作用下易发生环境应力开裂,ESC失效成为其应用的瓶颈之一。长链支化结构的引入使PC的自由体积分数增加,抗环境应力开裂的性能显著提高。长链支化结构可在减小裂纹尺寸的同时降低裂纹数量,随着长链支化程度的增加,这种现象更加明显。长链支化PC独特的拓扑结构为加工力学性能优异的产品提供了指导,可作为航天员在外太空佩戴头盔的窗口材料^[46]。

4 PC在航空透明件的应用

随着国防科技的发展,航空材料的性能指标也不断提高,对航空透明件的光学性能、耐温性、冲击性能和服役寿命等都提出了更高的要求。因其自身特点,PC在航空透明件上的应用逐渐得到关注^[47],PC的透光率约为90%,与传统无机玻璃相当;其密度仅为传统无机玻璃的一半,可以实现较大程度的减重^[48],降低油耗;PC隔热性能优异^[48],与相同厚度的传统无机玻璃相比,热量的损失可以降低40%~60%;此外,PC的冲击性能优异,比传统无机玻璃高250多倍,当发生鸟撞等事故时^[49]安全性能更高。作为航空透明件的关键材料,还需考虑PC在实际应用环境中的局限性,如易吸湿、溶剂应力开裂^[50]、物理老化^[24,51-53]、受紫外光辐照降解^[54]、脆切

转变导致产品失效^[55]。针对以上问题,可以通过优化产品设计、增加保护涂层和改性处理^[56]等方式制造满足不同要求的高质量航空透明件。在航空透明件领域中座舱盖是PC的主要应用产品,除此之外,PC还用于直升机导轨、飞机透明盖板等部件的制造。

座舱盖需要平衡飞机内外压差、空气动力效应和装配结构等应力,还应具备优异的光学性能,为飞行员提供最佳视野,可以是单个整体座舱盖(F-16)、前后两个组成(T-38)或者并排两个组成(F-111)。在F-22和F-35等第四代战斗机中,为了提高雷达的隐身功能,座舱盖设计成整体结构。F-22战斗机座舱盖的一体化座舱盖为3 m×1 m×0.76 m的超大尺寸,重达163 kg,采用厚度约20 mm的PC制造,可承受1.8 kg的鸟以1 018 km/h速度的撞击^[57]。PC座舱盖可以由单层或多层复合组成^[58-59],Su-57为单层PC,F-15,AH-64,F-16,F/A-18,EMB-314等均采用多层复合结构。座舱盖多层结构中,一般PC层提供优异的冲击性能^[60],可承受更高的载荷;聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)层表面硬度高且更耐磨^[61];中间黏接层多选择聚氨酯、PVB或者有机硅等材料;必要时还会在内外表面增加防护涂层,提供额外的表面保护,如抵抗雨水侵蚀等。F-16座舱盖为典型的多层复合座舱盖结构,选择两到四层PC和丙烯酸酯作为芯层材料,聚氨酯等为夹层材料。

航空透明件需PC材料在各个方向保持良好的光学性能,对飞机座舱盖和挡风玻璃的材质和制作工艺有极其严格的要求。截至目前,航空PC座舱盖大多以板材热弯成型为主,其生产过程复杂、周期长、成本高,许多工序会降低材料的性能和使用寿命。随着战斗机的不断发展,逐步采用注射成型技术生产航空座舱盖,已在F-16等机型应用。注射成型具有生产周期短、批量生产成本低、产品外形复杂、尺寸精度高等优点。美国Enviro Tech定制注射模公司采用注射成型技术制造了F-22,T-38座舱罩。还有许多学者对PC工艺进行了探索研究,Xu等^[62]通过优化注射工艺参数提高PC冲击性能,Barimani等^[63]采用PC板材渐进成形工艺,获得了高透光率和高尺寸精度制件,有望实现快速成型整体座舱盖。

5 结语

介绍了PC制备工艺、长链支化结构和分子量的性能调控,在实际应用选材中提出以下建议。

(1) PC制备工艺以产品综合性能最好的光气法为主,绿色环保的非光气法将是未来发展趋势;

(2) 长链支化结构PC在保持光学性能不变的同时提高力学性能,链结构的改变可以进一步拓宽应用领域;

(3) 较高分子量的PC力学性能更好,较窄的分子量分布加工特性更优,可根据具体应用场景针对性调控分子量。

PC凭借其优异的光学性能、冲击性能和耐温性等,在航空透明材料领域起着不可替代的作用。国外在PC座舱盖方面的研究已经积累了大量实验数据和服役经验,在多个机型中获得了成熟的应用。目前最先进的是大尺寸一体化PC注射成型座舱盖^[57],综合性能优异、制备周期短,但技术难度

高。而随着国内注射成型技术的日益进步,国产PC航空透明件必将迎来突破性进展。

参考文献

- [1] Zhang Z S, et al. *International Journal of Fatigue*, 2021, 154. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106567.
- [2] Krausz T, et al. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 45: 4 211–4 215.
- [3] Diawara B, et al. *Journal of Membrane Science*, 2020, 607. DOI: 10.1016/j.memsci.2019.117630.
- [4] Pietro P, et al. *Materials Research*, 2022, 25. DOI:10.1590/1980-5373-MR-2021-0342.
- [5] Wang J, et al. *Polymer Engineering & Science*, 2018, 58(12): 2 237–2 248.
- [6] Yu D, et al. *Macromolecular Rapid Communications*, 2017, 38(19). DOI:10.1002/marc.201700357.
- [7] Mehr Y, et al. *Optical Materials*, 2014, 37:155–159.
- [8] 史国力,等. *材料导报*, 2006(20):404–407.
Shi Guoli, et al. *Materials Reports*, 2006(20):404–407.
- [9] Mishra V, et al. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(11):25 130–25 138.
- [10] Yan C G, et al. *Polymer Testing*, 2016, 56:364–368.
- [11] Choi Y H, et al. *Macromolecular Research*, 2020, 28(4):299–309.
- [12] Jehanno C, et al. *ACS Macro Letters*, 2020, 9(4):443–447.
- [13] Krystyna W, et al. *Polymers (Basel)*, 2021, 13(24). DOI: 10.3390/polym13244437.
- [14] Gross S M, et al. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2002, 40(1):171–178.
- [15] 姜雷,等. *高等学校化学学报*, 2021, 42(3):884–893.
Jiang Lei, et al. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2021, 42(3):884–893.
- [16] Antonakou E V, et al. *Waste and Biomass Valorization*, 2012, 4(1): 9–21.
- [17] Weibin G, et al. *Polymer Degradation and Stability*, 2009, 94(1): 13–17.
- [18] Senden D J A, et al. *Journal of Materials Science*, 2012, 47(16): 6 043–6 046.
- [19] Baick I H, et al. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52:17 419–17 431.
- [20] Nishitsuji S, et al. *Polymer*, 2019, 178. DOI: 10.1016/j.polymer.2019.121571.
- [21] Soma H, et al. *Polymer*, 2012, 53(4):895–896.
- [22] Govaert L E, et al. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2004, 42(11):2 041–2 049.
- [23] Gong H Y, et al. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 423–426:307–311.
- [24] Ohara A, et al. *Polymer*, 2019, 181. DOI:10.1016/j.polymer.2019.121720.
- [25] Lin P P, et al. *Macromolecules*, 2017, 50(6):2 447–2 455.
- [26] Umeno Y, et al. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, 109. DOI:10.1016/j.tafmec.2020.102699.
- [27] Katajisto J, et al. *Journal of Molecular Structure: Theochem*, 2006, 758(3):189–194.
- [28] Stadler F J, et al. *Macromolecules*, 2011, 44(13):5 401–5 413.
- [29] Kessner U, et al. *Macromolecules*, 2010, 43(17):7 341–7 350.
- [30] Kim J, et al. *Polymer*, 2009, 50(21):4 998–5 001.
- [31] Hyun K, et al. *Journal of Rheology*, 2007, 51(6):1 319–1 342.
- [32] Corre Y-M, et al. *Rheologica Acta*, 2011, 50(8):613–629.
- [33] Wang Y B, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, 122 (3):1 857–1 865.
- [34] Auhl D, et al. *Macromolecules*, 2012, 45(4):2 057–2 065.
- [35] Sur S, et al. *Rheologica Acta*, 2019, 58(9):557–572.
- [36] Maroufkhani M, et al. *Iranian Polymer Journal*, 2015, 24(9): 715–724.
- [37] Härth M, et al. *Macromolecules*, 2014, 47(13):4 471–4 478.
- [38] Golriz M, et al. *Thermochimica Acta*, 2014, 590:259–265.
- [39] Zulli F, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 127(2): 1 423–1 432.
- [40] Li S Z, et al. *European Polymer Journal*, 2012, 48(2):362–371.
- [41] Othman N, et al. *Journal of Rheology*, 2011, 55(5):987–1 005.
- [42] Takamura M, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 123 (3):1 468–1 478.
- [43] Zhai W T, et al. *Macromolecules*, 2007, 40(1):73–80.
- [44] Lyu M, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2001, 80:1 814–1 824.
- [45] Liu C Y, et al. *Polymer*, 2004, 45(8):2 803–2 812.
- [46] Han X H, et al. *Polymer Chemistry*, 2016, 72(1):3 551–3 561.
- [47] Zhang L H, et al. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 204. DOI:10.1016/j.ijmecsci.2021.106563.
- [48] YataĠAn M S. *Journal of Scientific Perspectives*, 2019, 3(4): 271–284.
- [49] Mohagheghian I, et al. *International Journal of Solids and Structures*, 2017, 109:46–62.
- [50] Yan C, et al. *Polymer Testing*, 2017, 60:6–11.
- [51] Redjala S, et al. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2019, 19(2):536–542.
- [52] Jiang C, et al. *Polymer Engineering & Science*, 2015, 55(10): 2 215–2 221.
- [53] Redjala S, et al. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 47:3 073–3 076.
- [54] Redjala S, et al. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2020, 20(6):1 907–1 916.
- [55] Aranda R J, et al. *Mechanics of Materials*, 2020, 140. DOI: 10.1016/j.mechmat.2019.103242.
- [56] Kausar A, *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 2017, 34(1):60–97.
- [57] 冯海兵. *科技导报*, 2021, 39(9):24–35.
Feng Haibing. *Science & Technology Review*, 2021, 39(9):24–35.
- [58] Mekalina I V, et al. *Glass and Ceramics*, 2018, 74(9-10):367–371.
- [59] Melis D, et al. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2016, 8(1):49–54.
- [60] Yu P, et al. *Polymer Engineering & Science*, 2016, 56(10):1 160–1 168.
- [61] Kojio K, et al. *Polymer*, 2019, 181. DOI: 10.1016/j.polymer.2019.121773.
- [62] Xu Y, et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 76(9-12):2 199–2 208.
- [63] Barimani V A, et al. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2021, 43(59):1–15.