

泡沫塑料的微观结构与性能

马忠雷 张广成

(西北工业大学理学院,西安 710072)

摘要 综述了近年来泡沫塑料微观结构与宏观力学性能关系的研究新进展,阐述了泡沫塑料微观结构如泡孔形态、泡孔密度的最新表征技术和模拟方法,详细分析了微观结构对泡沫塑料的力学性能尤其是压缩和拉伸性能的影响,并对研究作了总结和展望。

关键词 泡沫塑料 微观结构 力学性能 模型

泡沫塑料又称多孔塑料,是一种以塑料为基本组分,内部含有大量气泡的轻质多孔材料,也可视为以气体为填料的复合材料。泡沫塑料具有优异的力学、热学和声学等性能,因而被广泛应用于航空航天、风力发电、体育器材、包装、建筑、冷藏、船舶制造等领域^[1-2]。

泡沫塑料的性能及其潜在应用主要取决于基体材料的物理、化学性能和泡沫的泡孔结构。自从泡沫塑料产生后就有了大量关于化学结构和加工条件对泡沫性能影响的研究,而对于泡沫塑料微观结构与宏观性能之间关系的研究较少^[3-4]。近年来,随着微观分析技术的不断进步,越来越多的科学家期望通过对已有泡沫塑料的微观结构进行研究,获取微观结构-性能之间的关系,从而进一步提高现有泡沫塑料的宏观性能并开发出新型高性能泡沫塑料。

1 泡沫塑料的微观结构

泡沫塑料从微观结构上可以分为闭孔泡沫和开孔泡沫两类。闭孔泡沫中泡孔之间相互独立且泡孔间由泡壁隔离,因此有很好的力学性能。开孔泡沫中泡孔之间相互贯通且有很多支架,具有更好的能量吸收性能。泡沫塑料主要是通过聚合物基体中形成气泡核并使气泡膨胀长大后稳定而形成的^[5],其微观结构特性主要通过泡孔密度、泡孔形状、泡孔尺寸、各向异性率和开孔/闭孔率等参数来表征。这些结构参数对泡沫塑料的宏观性能如压缩、拉伸和剪切等都有很大的影响。

1.1 泡孔形态与表征

(1) 传统理论模型

目前有很多关于泡沫塑料微观结构与力学性能关系的理论模型,传统理论模型的建立都是基于泡沫具有单分散泡孔形态的假设,典型的有菱形十二面体模型^[6]、Kelvin模型^[7]、Weaire-Phelan模型^[8]和Gibson-Ashby立体模型^[9]。

菱形十二面体模型由Plateau提出,认为泡沫是由形状为菱形十二面体的泡孔紧密排列构成的。这种排列可以实现,但并不是三维立体最有效的排列方式。Kelvin模型认为

泡沫的泡孔是由8个正六边形和6个正方形组成的十四面体结构,具有高度的对称性,因此泡沫结构更加容易达到平衡状态。一个多世纪以来,数学家们一致认可十四面体是单分散全等泡孔表面积最小的结构模型,但是这样最完美、最对称的理想结构一直没有得到数学上的理论证明。Weaire-Phelan模型认为泡沫由两种体积相同的泡孔结构即十四面体(12个五边形面和2个六边形面)和十二面体(每个面都是正五边形)构成。与Kelvin模型相比,Weaire-Phelan模型相对复杂,少了一些对称性,但表面积更小,是一种更加有效的空间分割方式。Gibson-Ashby立体模型将开孔泡沫模型简化为由长为1、厚为 t 的泡棱所组成的立方排列结构。泡沫的泡孔单元是由12条泡棱构成的立方体结构,而结构单元由1个泡孔单元和12条连接棱构成。这种结构模型使开孔泡沫的微观结构最简化,可以通过微观结构参数简单地计算宏观力学性能,是泡沫材料中一种极有影响力的理论模型。在开孔立体模型的基础上,Gibson和Ashby又建立了包含完整泡壁的闭孔泡沫立体模型,进一步推动了泡沫塑料的发展。Gibson-Ashby立体模型的不足之处是泡孔单元之间由连接棱相连接,不能实现密堆积,另外泡棱与连接棱在结构上并不等价,这与泡沫的实际情况有所不同。

泡沫塑料的力学性能可以通过上述的传统理论模型进行模拟预测,并且得到了许多与试验数据相一致的结果^[10]。但是这些模型都假设泡孔为均匀对称的均衡结构,并不能表征复杂泡孔结构的尺寸、形状变化等信息。

(2) 真实聚合物泡沫模型

在真实聚合物泡沫中,泡孔结构要比理想模型复杂得多,聚合物泡沫不仅有多分散的泡孔尺寸,并且有丰富多元的泡孔排列和泡壁形状,即使同一种泡沫塑料也具有不同的泡孔形状和泡孔尺寸,而且泡孔形状也并非完全是对称结构,因此这些理想的几何模型并不能真实反映聚合物泡沫的微观结构特征。

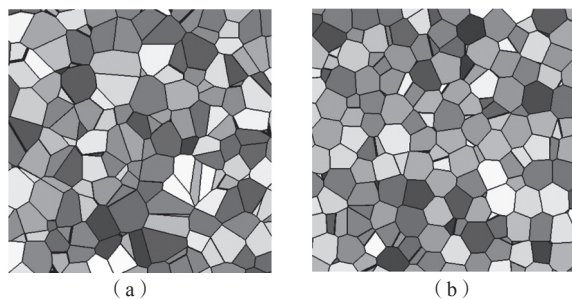
随着成像技术如微型计算机断层扫描技术和激光扫描显微镜的发展,越来越多的高质量三维图像被用于研究真实泡沫材料的空间信息^[11]。M.D.Montminy 等^[7]提出用三维成像技术如核磁共振成像和 X 射线层析照相法建立立体模型,并通过 Foam View 软件得到泡沫塑料微观结构的简化模型。他们对闭孔聚氨酯泡沫塑料研究发现,平均泡棱长度为 0.28 nm;平均泡棱夹角为 106.7°,接近但小于由 Plateau 提出的 109.5°;每个泡孔结构平均有 13 个侧面,在两个流行的理论假设十二面体和十四面体之间;各向异性率为 1.292;这种方法还可以近似测得固相分数、开孔率等信息。

这说明真实泡沫的模型建立和三维特征表征是可行的,并能得到有意义的结果。与传统的泡沫检测方法如视觉观察、光学显微、扫描电镜等相比,真实聚合物泡沫模型是一种无损检测方法,不需要对泡沫进行破坏,除了可以观察泡壁厚度、泡孔直径和泡棱长度等参数之外,还可以检测泡孔体积、泡壁面积、各向异性率、开孔率等性质,而且耗时短,效率高。这种方法可以在非理想条件下描述真实泡沫结构与性能、结构与加工的关系,可以模拟多层次性能如压缩、流体通过等行为,也可以用于检测由于配方变化引起的微妙泡孔结构变化等。

但是由于目前三维成像设备的分辨率有限(大于 1 μm),微观尺寸对比性较差,因此对于许多材料如微孔泡沫塑料(直径 1~10 μm)、超微孔泡沫塑料(直径 0.1~1 μm)和极微孔泡沫塑料(直径 0.01~0.1 μm)等并不适用。

(3) 随机镶嵌模型

在泡沫塑料发泡过程中,气泡在聚合物液体中成核并长大,开始为球形,随后由于泡孔相互靠近并挤压而形成多面体泡孔。如果气泡都于同一时间在空间自由成核,而且都以同一线性速率长大,则形成了 Voronoi 镶嵌结构,见图 1。



a—Voronoi 棋盘分布; b—Laguerre 棋盘分布

图 1 由泡孔结构的三维棋盘式分布模型得到的二维切片

实际上,连接任意相邻的随机成核点得到线段,再用平面等分线段,由这些平面所围成的多面体即为 Voronoi 泡孔^[9]。Voronoi 镶嵌模型适用于具有严重弯曲泡壁的泡沫材料,能够容易地分析计算泡孔结构参数。C.Redenbach^[12]通过 Voronoi 镶嵌模型获得了泡沫密度、泡壁面积和周长、泡孔

体积和表面积等参数的计算公式,可以快速准确模拟泡沫材料的结构。

对于泡壁为平面或接近平面的泡沫材料, Laguerre 随机镶嵌模型(见图 1b)受到了青睐。Laguerre 镶嵌分布由 Voronoi 镶嵌分布推广得到,是研究泡沫材料和多晶材料的一种新模型^[13]。其优点为:可以模拟具有凸面泡孔的正常规整泡沫,只需要少量的测量就能够计算泡孔参数的平均值,也可以推断并模拟泡孔之间的接触分布信息,由于泡壁为平面,所以泡孔的体积和表面积计算也更加简单^[14]。因此, Laguerre 镶嵌图形是多孔材料建模的一种有力工具。目前有很多关于通过 Laguerre 镶嵌模型研究泡沫塑料的微观结构拓扑形态和预测泡沫塑料宏观性能的研究^[15-16],这无疑对泡沫塑料科学与技术的发展具有举足轻重的意义。

1.2 泡孔密度

泡沫材料的性能主要取决于泡沫密度,其权重超出其他所有因素的影响。泡沫密度的表示方法有相对密度和泡孔密度两种。相对密度指泡沫塑料的密度与纯聚合物的密度之比,目前有大量关于相对密度的研究,且已经很成熟。泡孔密度是指泡沫塑料单位体积内的泡孔数,可用于建立更加精确的数学和力学模型,进一步研究泡沫的宏观力学性能,同时也可用于近似预测发泡过程中的泡核密度。与相对密度相比,关于泡孔密度的研究较少,但近年来也逐渐受到了科学家们的重视。在早期的泡孔密度研究中都假设泡沫具有各向同性分布的球形泡孔^[17-18],然而绝大多数泡沫的真实结构并非如此,因此在应用时具有较大的偏差。

R.Gosselin 等^[19]提出一种表征高密度泡沫泡孔密度的新技术,研究了计算表面泡孔数的方法和通过表面泡孔数计算泡孔密度的手段。计算表面泡孔数的方法主要有两种:一种是计算确定面积内所包含的未知泡孔数量;另一种是计算确定数量的泡孔所占有的未知面积。图 2 和图 3 分别为这两种不同测量方法的示意图。用这两种方法计算泡孔密度得到的结果都会有 20% 以内的误差,但结果相近。作者还分别用两种方法计算了泡沫塑料的泡核密度(N_0)和泡孔密度(N_F)。对比发现,在研究注射成型泡沫(泡孔为球形)时两种方法得到的结果相近,而在研究挤出成型泡沫(泡孔为椭圆形)时结果相差较大。通过表面泡孔数计算泡孔密度的方法可用于研究泡孔大小不同的泡沫,其缺点是只适用于泡孔之间没有相互影响的高密度泡沫,而不适用于研究泡孔之间紧密相连并互相挤压的低密度泡沫。

P.Buahom 等^[20]在研究泡孔密度时建立了一种临界泡孔网格模型,并定义临界泡孔为球形气泡扩张的理论极限。临界泡孔网格模型可用于简单区分高密度泡沫(泡孔为球形)和低密度泡沫(泡孔为多面体),高密度泡沫的孔隙率低

于临界泡孔,而低密度泡沫的孔隙率大于临界泡孔,如图4所示。

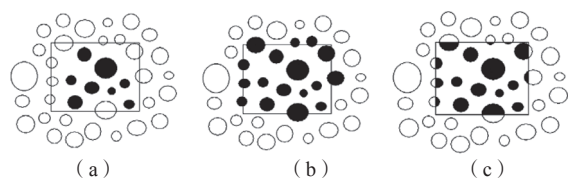


图2 计算确定面积内所包含的未知泡孔数量

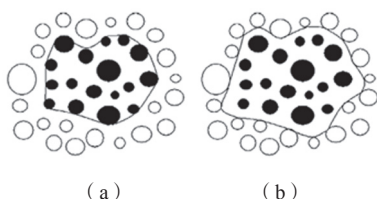


图3 计算确定数量的泡孔所占有的未知面积



图4 相同泡孔大小的不同泡孔形状

在计算泡沫的泡孔密度时,需将泡沫分为泡孔具有理想横截面和非理想横截面两种情况进行讨论。理想情况下泡壁为六边形,并完全包含临界泡孔(图5a),而非理想情况下泡壁通常为五边形、六边形或正方形,并且都有不同程度的扭曲(图5b)。结果表明,非理想泡孔截面模型和理想泡孔横截面模型能够分别可靠地预测各向同性低密度泡沫和高密度泡沫的泡孔密度,平均绝对离差(AAD)分别为39.2%和57.2%,而用传统模型预测泡孔密度时的AAD分别为59.4%和62.4%。因此,用这种方法计算泡沫的泡孔密度比传统模型更加可靠。

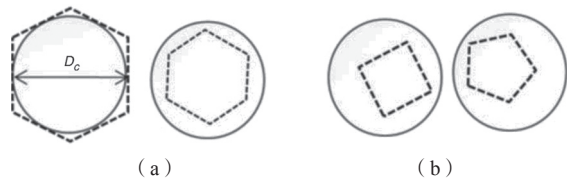


图5 泡孔横截面与临界泡孔

H.Tejada等^[21-22]也对泡沫的泡孔密度及力学性能进行了详细的研究。但由于泡沫中泡孔分布的复杂性,已有的泡孔密度表征方法在应用过程中都存在一定的误差。无论如何,这些探索都为今后的深入研究提供了很好的思路,随着三维成像技术和图像分析技术的提高,泡孔密度的检测以及

泡沫性能的预测将会越来越精确。

2 泡沫塑料的力学性能

泡沫塑料大量应用于包装和能量吸收用途,也作为夹芯结构复合材料的芯层用于结构材料中,可能会在局部或整体受到压缩和剪切等力学作用,因此研究泡沫塑料的力学性能对保证泡沫的安全使用具有重要意义。

2.1 压缩性能

泡沫塑料的压缩变形机理主要有四种变形方式:线弹性行为、非线性弹性行为、塑性塌陷以及各种破坏方式^[9]。开孔泡沫塑料和闭孔泡沫塑料在压缩载荷下的力学响应有很大的区别。开孔泡沫的线弹性主要由泡棱的弯曲变形引起,非线性弹性变形过程中开孔泡沫会在某一恒定的载荷下发生密实化或坍塌,并在应力-应变曲线上出现较长的平台。A.D.Brydon等^[23]通过X光断层扫描技术观察并模拟了泡沫塑料在压缩试验中的密实化过程,充分证明了这一点。L.J.Gibson等^[9]采用开孔立体模型并结合简单梁理论,建立了由微观尺寸计算开孔泡沫压缩模量和屈服强度的半经验公式,并在很多泡沫材料中得到了应用。

真实聚合物泡沫的泡孔结构往往存在着各种缺陷,主要有不规则的泡孔形状、不一致的泡棱横截面及泡孔破裂等,这些缺陷都会对泡沫的宏观性能产生不同程度的影响。

H.X.Zhu等^[24]研究了开孔泡沫中不规则的泡孔形状对泡沫压缩性能的影响。结果表明,高度不规则的泡沫比相对规则的泡沫具有更高的低应变压缩模量,且在高应变下具有更低的有效应力。对于不规则低密度泡沫,低应变压缩性能由泡棱的弯曲和扭转决定,而高应变压缩性能由泡棱的屈曲断裂决定。K.Li等^[25]的研究也表明,泡沫塑料的弹性模量随着泡孔不规则度的增大而增大,但随着泡棱横截面形状差异性的增大而下降。这两种缺陷对泡沫的性能影响是独立的,它们的相互作用对泡沫压缩性能影响很小。

Y.X.Gan等^[26]用Voronoi镶嵌模型模拟了开孔泡沫塑料在压缩载荷下的宏观力学行为。研究发现泡孔破裂对泡沫的压缩模量影响很大,而对压缩状态下的平台应力影响较小,泡棱的微屈曲是泡沫压缩变形的决定因素。作者还通过应力-应变曲线建立了泡沫的压缩破坏表面,符合最大压应力准则,且与已有实验结果相一致。

与开孔泡沫的压缩过程不同,闭孔泡沫的线弹性由泡壁的弯曲或延伸和泡棱的弯曲、拉伸或收缩引起。而在非线性弹性阶段,泡孔内的气体也受到压缩作用,同时泡壁上产生膜应力,使应力-应变曲线随应变增大而升高。在压实区,压缩应变增大,泡沫塑料发生塑性形变,脆性泡沫塑料由于泡壁破坏和泡孔粉碎而发生塌陷。L.J.Gibson等把开孔立体模型扩展到闭孔泡沫材料中,考虑了分配在泡壁上的材料、

泡壁的弯曲、诱导膜应力和泡孔中的气压,推导出闭孔泡沫材料压缩模量和屈服强度与微观结构参数之间的关系方程。对于大多数聚合物泡沫,由 Gibson-Ashby 立体模型得到的理论计算结果与实验数据基本一致。

但是 F.Fischer 等^[27]在研究聚氯乙烯(PVC)泡沫时发现, Gibson-Ashby 理论只适用于密度大于 100 kg/m^3 的 PVC 泡沫,而对低密度 PVC 泡沫,结果与实验数据存在较大的差异。他们提出用计算机断层扫描技术构建有限元立体模型并预测泡沫压缩性能的新方法。有限元模拟可以很好地预测真实聚合物泡沫的压缩性能,数值模拟结果与实验数据非常一致。S.Ribeiro-Ayeh 等^[28-29]等根据 Voronoi 镶嵌模型模拟计算了闭孔泡沫结构的弹性模量、泡沫密度和泊松比,计算结果与实验数据均有很好的吻合。

大多数泡沫塑料都是各向异性的,且泡孔通常为轴对称结构,因而泡沫的纵向(沿着泡孔的轴线方向)性能与横向(垂直于泡孔的轴线方向)性能一般不同。L.Gong 等^[30]测试了开孔聚氨酯(PUR)泡沫塑料的横向和纵向压缩性能。结果表明,纵向压缩呈现出与其他刚而韧泡沫材料相似的应力-应变响应,开始是线弹性段,当达到极限载荷后曲线有一个较长的应力平台,然后是第二次硬化。横向压缩在非线性弹性段并未表现出最大载荷,而是保持持续增大的趋势,模量也只有纵向压缩模量的 $1/3$ 到 $1/2$ 。

2.2 拉伸性能

S.Doroudiani 等^[31]研究了聚苯乙烯(PS)泡沫塑料泡孔结构对其拉伸性能的影响,分别对相同泡孔尺寸、不同泡沫密度以及相同泡沫密度、不同泡孔尺寸的 PS 泡沫塑料的拉伸性能进行测试。研究发现,随着相对密度的增大,泡沫塑料的相对拉伸强度呈幂指数关系显著增大;随着泡孔尺寸增大,泡沫塑料的相对拉伸强度略微有所下降。Z.Xiao 等^[32]对聚碳酸酯(PC)微孔泡沫塑料板微观结构和拉伸性能的关系进行了深入研究,也得到了类似的结果,与 M.A.Rodriguez-Perez 等^[33]对高密度聚乙烯泡沫塑料微观结构与压缩性能的研究结果相似。这充分表明,泡沫塑料的相对密度是影响其力学性能的主导因素,而泡孔尺寸对泡沫塑料拉伸性能的影响很小。

M.Ridha^[34]通过两种微观模型——菱形十二面体模型和十四面体模型分别研究了拉伸载荷下硬质 PUR 泡沫塑料的力学行为,并探索了泡沫相对密度、泡孔各向异性比对半硬质、软质 PUR 泡沫塑料拉伸性能的影响。将两种模型与真实聚合物泡沫对比发现,十四面体模型比十二面体模型更加接近真实泡沫泡孔结构。研究了基于十四面体泡孔模型时泡沫相对密度和泡孔各向异性比对拉伸强度的影响,发现对于泡孔各向异性比为 2 的 PUR 泡沫塑料,拉伸强度随着

相对密度增大而增大,而且纵向的拉伸强度比横向的大,半硬质泡沫的拉伸强度比软质的大。横向的拉伸强度小是因为泡棱更倾向于在纵向方向有序排列,使得泡棱在横向载荷下更加容易弯曲破坏,另外纵向拉伸需要破坏更多的泡棱;纵向与横向的拉伸强度不同,并且虽然拉伸强度随着泡孔各向异性比增大而增大,但增加的速率逐渐减小。同样,横向拉伸强度随着泡孔各向异性比增大而下降,但下降速率逐渐减小。

M.E.Kabir 等^[35]对交联 PVC 和硬质 PUR 的研究表明,泡沫中纵向存在的裂缝对拉伸强度的影响很小,且泡沫破坏为脆性破坏。I.Javni、P.Poapongsakorn 和 M.Hirokyuki^[36-38]等都对泡沫塑料的微观结构与拉伸性能关系做了大量的研究工作。

3 结语

随着科学技术的不断进步,泡沫塑料在国民经济各个领域所起的作用越来越显著,对泡沫塑料也提出了越来越高的要求。关于微观结构与模拟、微观结构与宏观性能、微观结构与加工性能关系的研究必将长期成为泡沫塑料研究的热点和前沿。目前研究工作得到的大多是发泡材料微观结构(如泡孔密度、泡孔形状、泡孔直径、泡壁泡棱等)与力学性能的关系,而微观结构与热性能、电性能和声性能之间的定量关系,还需要进一步研究。纳米增强、纤维增强等泡沫复合材料具有更好的力学性能,因而填充物如何改变泡沫的结构与性能也需要深入研究。微孔塑料作为一种新型泡沫材料,具有非常优异的性能和广阔的应用领域。但由于表征技术的限制,对其微观结构与性能的研究较少,这在一定程度上限制了微孔泡沫塑料的发展。相信在不久的将来,随着计算机技术、三维成像等各种表征技术的进一步提高,泡沫塑料微观结构与性能的研究将会取得更多突破性的进展。

参考文献

- [1] 刘培生. 多孔材料引论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 11.
- [2] Lee S T, et al. Polymeric Foams: Science and technology [M]. New York: Taylor & Francis Group, 2007: 8.
- [3] Redenbach C. Comp Mater Sci, 2009, 44: 1397-1407.
- [4] Klempner D. et al. Handbook of polymeric foam and foam technology [M]. 2nd ed. USA: Hanser, 2004.
- [5] Eaves D. Handbook of Polymer foams [M]. UK: Rapra Technology Limited, 2004.
- [6] Plateau J. Statique expérimentale et théorique des liquides soumis aux seules forces moléculaires [M]. Paris: Gauthier-villars, 1873.
- [7] Montminy M D, et al. Journal of Colloid and Interface Science, 2004, 280: 202-211.
- [8] Weaire D, et al. Philos Mag Lett, 1994, 69(2): 107.
- [9] Gibson L J, et al. Cellular Solids: Structure and properties [M]. 2nd

- ed.England : Cambridge University Press, 1997.
- [10] Lautensack C, et al.A random Weaire-Phelan foam [C]// Proceedings of the VIII international conference on stereology and image analysis in materials science.STERMAT 2008, Zakopane, 2008.
- [11] Dillard T, et al.Philosophical Magazine,2005,85 (19) : 2147-2175.
- [12] Redenbach C.Image Analysis & Stereology,2011 (30) : 31-38.
- [13] Hilhorst H J, et al.Journal of Statistical Physics,2007,132 (4) : 627-647.
- [14] Lautensack C.Random laguerre tessellations [D].TH:Universität Karlsruhe,2007.
- [15] Lautensack C, et al.Advances in pplied Probability,2008,40 (3) : 630-650.
- [16] Kanaun S, et al.International Journal of Fracture,2006,140 : 305-312.
- [17] Kumar V, et al.Polym Eng Sci,1990,30 (20) : 1323-1329.
- [18] Kumar V, et al.J Eng Ind,1994,116 : 413-420.
- [19] Gosselin R, et al.D Polym Test,2005,24 : 1027-1035.
- [20] Buahom P, et al.Journal of Cellular Plastics,2011,47 (2) : 133-152.
- [21] Tejada H, et al.J Cell Plast,2005,41 (5) : 417-435.
- [22] Xu J, et al.J Cell Plast,2003,39 (1) : 29-47.
- [23] Brydon A D, et al.Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005,53 : 2638-2660.
- [24] Zhu H X, et al.Acta Materialia,2002,50 : 1041-1052.
- [25] Li K, et al.Journal of the Mechanics and Physics of Solids,2006, 54 : 783-806.
- [26] Gan Y X, et al.International Journal of Solids and Structures, 2005,42 : 6628-6642.
- [27] Fischer F, et al.Journal of Cellular Plastics,2009,45 : 441-460.
- [28] Ribeiro-Aych S.Finite Element Modelling of the Mechanics of Solid Foam Materials [D].Stockholm : Kungliga Tekniska Högskolan,2005.
- [29] Roberts A P, et al.Acta Materialia,2001,49 : 189-197.
- [30] Gong L, et al.International Journal of Solids and Structures,2005, 42 : 1355-1379.
- [31] Doroudiani S, et al.J Appl Polym Sci,2003,90 : 1427-1434.
- [32] Xiao Z, et al.Express Polymer Letters,2007,1 (4) : 217-225.
- [33] Rodriguez-Perez M A, et al.Journal of Cellular Plastics,2009,45 : 389-403.
- [34] Ridha M.Mechanical and Failure Properties of rigid polyurethane foam under tension [D].National University of Singapore,2007.
- [35] Kabir M E, et al.Materials Science and Engineering A,2006,429 : 225-235.
- [36] Javni I, et al.Journal of Cellular Plastics,2011,47 (4) : 357-372.
- [37] Poapongsakorn P, et al.Journal of Cellular Plastics,2011,47 (4) : 323-336.
- [38] Hiroyuki M, et al.Materials Science and Engineering A,2008,77 : 168-178.

MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF FOAM PLASTICS

Ma Zhonglei, Zhang Guangcheng

(School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

ABSTRACT The research progress in the relationship between microstructure and macroscopic mechanical properties of the foams was reviewed.The newly characterization techniques and simulation methods of the microstructure such as cell morphology and cell density were represented.The influences of microstructure on the mechanical properties were analyzed in detail, especially the compression and tensile properties, as well as a summary of prospect research was presented.

KEYWORDS foam plastics, microstructure, mechanical properties, models

欢迎查询有关广告

对于在我刊刊登的所有广告,如读者需要查询更详细的资料或了解情况,请填写《读者查询广告资料服务卡》后寄回或来函。本杂志社将为您提供或转请有关单位提供资料,以满足您的要求。如需购买任何广告单位的材料、设备、仪器及配件等产品,我社将帮助您联系,以保证产品质量,争取优惠价格。欢迎各单位在我刊刊登广告。刊登办法函索即寄。

《工程塑料应用》读者查询广告资料服务卡

No. _____

读者姓名 _____ 单位 _____ 邮政编码 _____

通讯地址 _____ 电话 _____ E-mail: _____

欲获得《工程塑料应用》_____年第_____期第_____页 _____

广告中有关 _____ 的详细资料。

如空位不够,请另附纸。填好后请寄回。

山东省济南市天桥区田庄东路3号

邮政编码: 250031