

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.08.027

硬质聚氨酯泡沫压缩性能增强研究进展^{*}

鲍铮, 刘钧, 张鉴炜, 边佳燕

(国防科学技术大学航天科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要:从纤维增强、粒子增强、混杂增强3个角度介绍了不同增强体对硬质聚氨酯泡沫压缩性能的增强改性效果,阐述了各类增强体的增强机理与特点,讨论了表面改性对增强效果的影响,并对不同增强体提高硬质聚氨酯泡沫压缩性能的发展趋势作出展望。

关键词:硬质聚氨酯泡沫; 增强体; 改性; 压缩性能

中图分类号: TQ328.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)08-0124-05

Research Progress on Reinforcement for Compressive Property of Rigid Polyurethane Foams

Bao Zheng, Liu Jun, Zhang Jianwei, Bian Jiayan

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense and Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The reinforced effects of different reinforcements, including fiber reinforcing, particle reinforcing and hybrid reinforcing, on the compressive properties of the rigid polyurethane foam were reviewed. The reinforcing mechanisms and characteristics for the different reinforcements were expounded, and the influences of the surface modification of reinforcements on the reinforcing effects were also discussed. Finally, an outlook for the developing trends of the reinforcements on improving compressive properties of the rigid polyurethane foams were given.

Keywords: rigid polyurethane foam; reinforcement; modification; compressive property

聚氨酯是一类由多元羟基化合物与多元异氰酸酯反应制备的主链具有氨基甲酸酯重复单元的聚合物,最早由德国 I. G. Farben 公司的 O. Bayer 合成而得^[1]。聚氨酯泡沫拥有力学性能优良、质轻、吸水率低、耐化学药品腐蚀等特点,在很多领域都有着广泛的应用^[2-4]。但是,由于聚氨酯泡沫制品的压缩性能较差,使其在作为深海浮力材料等结构材料的应用时受到了一定程度的制约,为了得到耐压性能优良,并满足相应设计要求的轻质聚氨酯泡沫,开展其压缩性能的增强研究十分必要。一般而言,硬质聚氨酯泡沫的压缩强度随密度的增加会显著提升,因此,提高泡沫密度是改善其压缩性能的一种较好的途径,但这同时也对泡沫的轻质化提出了挑战。为了获得质轻且压缩强度高的聚氨酯泡沫材料,向泡沫中添加增强体是非常有效的途径。

采用增强体提高硬质聚氨酯泡沫压缩性能的研究有很多,主要采用3种方式,分别为纤维增强、粒子增强以及混杂增强^[5]。这3种方式各有特点,在实际工艺中,也存在不同的难点,均可以在一定程度上改善泡沫的压缩性能。因此,主要围绕这3种增强方式的原理特点及增强效果对近期相关研究结果进行总结与评述。

1 纤维增强聚氨酯泡沫塑料

纤维增强泡沫塑料常称为增强泡沫塑料,一般选用短

切纤维作为增强体以提高泡沫塑料的力学性能。常见的有短切玻璃纤维、短切碳纤维以及短切有机纤维等,都可以用于硬质聚氨酯泡沫塑料力学性能的增强。使用短切纤维作为增强体时,需要考虑其物理性质对产品性能的影响。影响增强泡沫塑料制品力学性能的因素有很多,包括纤维的型号、长度、直径、模量以及分散情况等。根据制备泡沫的工艺、使用性能要求的不同,所选用纤维的性质也会有所调整。

在增强硬质聚氨酯泡沫的研究中,研究最多的纤维是短切玻璃纤维。通过短切玻璃纤维的使用,可以较好地提高泡沫的压缩强度,改善泡沫的力学性能。其机理主要为,随着具有高弹性模量和高强度短切纤维的加入,增强硬质聚氨酯泡沫塑料在承受准静态压力时,短切纤维在小应变压缩时承受较大的载荷,从而使泡沫的压缩强度和压缩弹性模量得以提高^[6]。

国内在增强硬质聚氨酯泡沫塑料的研究中积累了非常丰富的经验。卢子兴等^[7]早在1995年即开展了相关的研究,并通过分析两种玻璃纤维增强聚氨酯泡沫塑料在准静态压力下的力学性能,比较了玻璃纤维对不同密度泡沫材料压缩

^{*} 国家自然科学基金项目(51403235)

联系人: 刘钧,教授,主要从事聚合物基复合材料的研究

收稿日期: 2016-05-10

性能的增强效果。该小组采用长度 7.6 mm 的改性单丝玻璃纤维作为增强体,使增强聚氨酯泡沫塑料无论是在压缩弹性模量还是压缩强度上都得到了不同程度的提高。而在增强效果上,对于不同密度的泡沫材料,却有很大的差异,短切玻璃纤维对高密度材料压缩性能的提升明显强于低密度材料。这主要是由于低密度泡沫与纤维之间粘接较差,壁内纤维无法起到有效增强作用所致,这也使得对于较低密度聚氨酯泡沫而言,采用纤维增强的途径提高其压缩强度并不能很好地满足预期的要求。

使用短切纤维增强泡沫力学性能时,为了更好提升增强泡沫塑料的性能,最重要的就是确定纤维的最佳长度以及最佳添加量。当纤维长度过短时,在外力作用下,纤维无法有效阻止增强泡沫在与压力作用垂直方向上的变形;而纤维长度过长时,其自身更容易出现弯曲结团现象,最终分散性下降,导致局部应力集中,反而不利于泡沫力学性能的提高^[8],所以确定出合适的纤维长度及最佳含量是有效增强泡沫压缩性能的关键。

研究表明,当玻璃纤维长度在 3~12 mm 的范围内增加时,密度为 0.51 g/cm³ 的增强泡沫的压缩弹性模量依然可以随纤维长度的增加而增加^[9]。而在添加量上,采用 3 mm 短切纤维作为增强体,当其在聚醚多元醇中质量分数达 10% 左右时,压缩弹性模量与压缩强度达到最大值,进一步提高增强体的质量分数后,其对泡沫的增强效果影响不大。

闻获江等^[10]同样对短切玻璃纤维增强硬质聚氨酯泡沫塑料进行了研究,并得到了类似的结论。他们使用长度为 12 mm 的短切玻璃纤维进行实验,结果显示,随着纤维用量的增加,压缩强度与压缩弹性模量会同步提高,当短切玻璃纤维质量分数为 6% 时达到最大值,效果最好,压缩强度较未增强泡沫塑料提高约 25%,压缩弹性模量提高约 30%。而进一步加大添加量后,增强效果不明显。相比之下,采用的短切纤维长度不同,其最佳添加量也会有所改变,这主要是由于纤维长度的增加,加大了纤维之间的缠结,使得最适合的添加量相应减少。

随着研究的深入,国内纤维增强硬质聚氨酯泡沫塑料的研究成果也越来越丰富,除了进一步探究了玻璃纤维增强聚氨酯泡沫压缩性能的机理并摸索添加量对泡沫力学性能的影响外,近期也报道了其它纤维如碳纤维、Kevlar 纤维、木质纤维等对聚氨酯泡沫塑料力学性能的影响^[11-15]。大量的实验数据表明,采用纤维作为增强体可以使硬质聚氨酯泡沫压缩性能得到有效地改善。

虽然纤维增强聚氨酯泡沫塑料的压缩强度相对于未增强材料性能有所提升,但该方法仍存在几个明显的缺点。首先,采用纤维作为增强体会提高材料的密度,无法满足材料

的轻质化要求;其次,相比对泡沫压缩性能的提高,纤维对泡沫的拉伸性能提升的效率更高,而对压缩性能的提升并不十分显著;此外,对于密度较低的聚氨酯泡沫塑料,使用纤维增强的方法几乎不会有效提高泡沫的压缩强度,也限制了其应用。故相对纤维增强而言,采用粒子增强硬质聚氨酯泡沫塑料的压缩强度是更有效的方式。

2 粒子增强聚氨酯泡沫塑料

粒子增强泡沫塑料有时也称为复合泡沫塑料,相比纤维增强泡沫而言,所选用的增强体范围更广。常见的粒子增强体有空心玻璃微珠、二氧化硅、碳酸钙等,可称这类增强体为“传统粒子增强体”。除了这类增强体外,纳米材料作为研究热点也逐渐用于泡沫力学性能的增强,其中比较具有代表性的增强体有纳米二氧化钛、纳米二氧化硅、碳纳米管、石墨烯等,可称这类增强体为“纳米粒子增强体”。

使用粒子增强体增强泡沫压缩性能有很多优势,相对于纤维增强泡沫而言,最主要的优势在于粒子增强体可以较大程度提高泡沫压缩强度,却对其密度不产生较大的影响。粒子增强泡沫的机理不同于纤维增强,以空心玻璃微珠增强泡沫塑料为例,其增强机理为:随着空心玻璃微珠的加入,反应中产生的气体所占体积比例减小,密闭模具中压力增大,从而令发泡过程中溶于泡沫中的气体密度增加,使核化形成的气泡密度增大,气泡孔径减小;此外,由于空心玻璃微珠粒径较小,当被引入聚氨酯泡沫后,在核化过程中,一定程度上起到了成核剂的作用,增加了气泡的浓度,也致使气泡孔径减小。泡孔孔径的减小导致其进一步细化,最终减小了材料内部的缺陷,故空心玻璃微珠用量越大,其对于耐压性能的贡献也越大。然而,粒子增强体的含量同样并非越高越好。当它的含量高于一个临界含量时,其分散性显著降低,反而成为材料的缺陷,降低材料的性能,影响增强效果,所以依然需要优化增强含量以探索最佳的增强条件。

2.1 传统粒子增强聚氨酯泡沫塑料

空心玻璃微珠作为最常见的粒子增强体,在国内外的研究中最广泛深入。空心玻璃微珠是一种内部包含许多微小泡孔的白色粉末,直径范围一般为 20~150 μm,这种拥有完美球形形状的微珠可以提供很高的压缩强度,尤其在固体浮力材料领域,采用空心玻璃微珠增强环氧树脂泡沫压缩性能的方法尤为普遍,可以有效制备出低密度高强度的且能服役于深海的复合材料。

同样,将空心玻璃微珠应用于硬质聚氨酯泡沫也可以起到优异的增强效果,但对于不同的原料体系、发泡密度,空心玻璃微珠的最佳含量会有所差异。周秋明等^[16]研究了加入空心玻璃微珠对硬质聚氨酯泡沫塑料压缩性能的影响。研究表明,当使用粒径为 10~100 μm,密度约为 0.3 g/cm³

的空心玻璃微珠作为增强体时,相同密度的聚氨酯泡沫,随着空心玻璃微珠添加量的增加,压缩性能有了较大的提高。但当空心玻璃微珠与聚醚多元醇质量比超过 50:100 时,原料混合较为困难,产品内部不规则泡孔数量增加,性能也会受到影响。

王福玲等^[17]也研究了空心玻璃微珠对于硬质聚氨酯泡沫塑料压缩性能的影响,并指出当空心玻璃微珠与聚醚多元醇质量比约 30:100 时,在材料密度基本不发生变化的情况下,泡沫的压缩强度得到了显著的提高并达到最大值。此后,国内针对空心玻璃微珠增强聚氨酯泡沫压缩性能的提升有了更多的报道^[18-19],充分说明了利用空心玻璃微珠可以有效提高硬质聚氨酯泡沫的压缩性能,为实际应用提供了强有力的理论与实践基础。

除空心玻璃微珠外,还有很多传统粒子增强体,如碳酸钙、二氧化硅等也都可以用于对泡沫压缩性能的增强。如赵斌等^[20]采用 SiO_2 粒子作为聚氨酯泡沫增强体,同样实现了对于泡沫压缩性能的提升,其机理与空心玻璃微珠相似。该小组还采用短切玻璃纤维作为增强体对同种聚氨酯硬泡进行了增强改性,通过对比发现,在相同的泡沫材料中,粒子增强对于压缩性能的提升效果明显高于纤维增强,也说明对泡沫压缩性能的改性,使用粒子增强的方法更为高效。然而,由于传统粒子增强体在使用过程中添加量较大,提升效果有限,近期粒子增强研究热点主要集中于纳米增强材料,而传统粒子增强体的研究较为罕见。

2.2 纳米粒子增强聚氨酯泡沫塑料

近年来,纳米材料的飞速发展得到了学术界的广泛关注,针对碳纳米管、石墨烯等新材料的研究成果呈现出逐年快速增加的趋势。纳米材料之所以备受瞩目,与其自身特有的理化性能密切相关。一般而言,纳米材料具有小尺寸效应,比表面积大的特点,用于泡沫增强体时,可以在加入极少量的情况下,大幅提高材料的力学性能。与此同时,它们还可以赋予材料新的热、力、光、电、磁学等特殊性能,有着极强的研究价值及应用潜力^[21],故越来越多的粒子增强研究都集中于纳米粒子。当前应用于硬质聚氨酯泡沫的纳米增强体有很多,较为典型的有碳纳米管、石墨烯、纳米二氧化硅、纳米二氧化钛等,通过向聚氨酯中加入少量的上述纳米增强体,都可以有效提高泡沫的力学性能,并实现采用传统粒子增强体无法达到的增强效果。

(1) 碳纳米管增强聚氨酯泡沫塑料。

在纳米材料中,比较具有代表性的是碳纳米管。碳纳米管最早由 S. Iijima 于 1991 年发现^[22],随后由于其独特的力学性能迅速成为研究热点。实验表明,多壁碳纳米管的弹性模量可以达到 1 TPa,在密度仅为钢的 1/6 情况下,强度却

比钢大 100 倍,应用于泡沫性能增强时,极具研究与应用前景,可以为泡沫增强研究提供新的途径。碳纳米管作为增强体的增强机理为:当在泡沫中均匀分散碳纳米管时,由于碳纳米管和聚氨酯泡沫之间存在应力,施加压力后,泡沫压缩变形产生的裂缝因碳纳米管的连接得到抑制,外力通过泡沫与碳纳米管界面之间的作用得到有效的转移,从而实现了泡沫力学性能的提升。

与传统粒子增强体常用于提高泡沫压缩强度不同,当前对于纳米材料增强泡沫压缩性能的研究相对少见,而对泡沫拉伸、弯曲等性能增强的研究则较为广泛。通常来说,碳纳米管对于泡沫拉伸性能的提高明显强于压缩性能,但这并不能抹杀其对于压缩性能提高的贡献。M. Bandarian 等^[23]利用碳纳米管作为增强体对自由发泡的聚氨酯软泡性能进行了增强,通过向泡沫中加入质量分数为 0.1% 的经不同化学表面修饰的多壁碳纳米管,可以使聚氨酯软泡的压缩性能得到 15%~40% 的不同程度的提高。同样,碳纳米管也可以改善硬质聚氨酯泡沫的力学性能。Liang Kaiwen 等^[24]使用多壁碳纳米管作为增强体,对硬质聚氨酯泡沫的压缩强度进行了增强,他们向泡沫中加入了质量分数仅为 0.5% 的多壁碳纳米管,使泡沫的压缩强度提升了 24%。

Yan Dingxiang 等^[25]也采用了碳纳米管增强的方式,研究了其对密度为 0.2 g/cm^3 的聚氨酯硬泡压缩性能的增强情况。与 M. Bandarian 等不同的是, Yan Dingxiang 等并没有采用机械搅拌的方式实现增强体与泡沫的混合,而是使用超声辅助分散的方法分散碳纳米管。由于碳纳米管增强泡沫材料的力学性能优劣与增强体在泡沫中的分散状况直接相关,而较大的比表面积也使碳纳米管在机械搅拌下更容易团聚,无法在实际生产中以较大的量添加,所以,采用超声分散更有助于碳纳米管的分散,可以通过添加更多的碳纳米管以实现更好的增强效果。当采用超声辅助分散的方法时, Yan Dingxiang 等制备了碳纳米管质量分数高达 2.0% 的硬质聚氨酯泡沫。实验结果显示,利用超声分散得到的密度为 0.2 g/cm^3 的碳纳米管增强聚氨酯泡沫材料,其压缩强度较未增强的泡沫提高了近 30%,压缩弹性模量也提高了 31.9%。

(2) 石墨烯增强聚氨酯泡沫塑料。

石墨烯是目前世界上已知的最薄的材料,也是人类发现的自然界中强度极高的材料之一,因其拥有特殊的共轭结构及非常大的比表面积,在电学及力学等应用上都极具潜力。迄今为止,人们并未发现石墨烯片中存在碳原子缺失的情况,这也使得石墨烯中各碳原子之间的连接非常柔韧,当有外力施加时,碳原子面会产生弯曲变形,从而令碳原子不必通过重新排列来适应外力,因此保持了结构稳定,展现出

极佳的力学性能^[26]。石墨烯在增强泡沫性能的方面与碳纳米管有很高的相似性,但性能较碳纳米管提高很多。实际上,自然界并不存在自由状态的石墨烯片,在自由状态下,石墨烯会卷曲成为碳纳米管或石墨等单体,所以从某种意义上说,石墨烯可以认为是展开的碳纳米管,这就可以解释在很多方面,石墨烯几乎具备一切碳纳米管所具备的性质,在作为增强体时,增强效果更加优异。

同碳纳米管相同,使用石墨烯增强的硬质聚氨酯泡沫也可以在添加量极少的情况下,较大幅度地提高泡沫压缩性能,且增强效果优于碳纳米管。Yan Dingxiang 等^[27]比较了石墨烯与碳纳米管对硬质聚氨酯泡沫压缩强度的增强效果,他们向同种聚氨酯硬质泡沫中分别加入了质量分数为 0.3% 的石墨烯及碳纳米管,并测试了增强前后的压缩性能。实验表明,两种增强改性的硬质聚氨酯泡沫的压缩性能均得到了较大的提升。采用石墨烯作为增强体的泡沫塑料压缩强度提高了 32%,压缩弹性模量提高了 36%;而采用碳纳米管作为增强体的泡沫塑料压缩强度提高了 16%,压缩弹性模量提高了 25%。Yan Dingxiang 等同时尝试了纳米粘土、碳纳米纤维等其它纳米材料增强泡沫塑料的压缩性能,但提升效果均不如石墨烯。不难看到,选择石墨烯作为硬质聚氨酯泡沫塑料的纳米增强体更能有效地提高泡沫的压缩性能,在泡沫增强改性中具有更为广阔的应用前景。

对石墨烯增强泡沫压缩性能的探索,除了将其作为增强体研究增强泡沫材料准静态压缩性能外,近期也出现了对于动态压缩性能的研究,S. K. Khanna 等^[28]对石墨烯增强聚氨酯硬质泡沫动态压缩性能进行了一系列尝试,并发现当石墨烯的质量分数为 0.5% 及 1.0% 时,动态压缩性能较未改性的泡沫具有明显的改良,这也更说明石墨烯作为新型纳米材料,在对泡沫增强的领域中,仍具备极大的发展潜力,有待于进一步的研究。

(3) 其它纳米粒子增强聚氨酯泡沫塑料。

活跃在硬质聚氨酯泡沫塑料的纳米增强体,除了石墨烯与碳纳米管外,常见的还有纳米 SiO_2 ^[29-30]、蒙脱土^[31]、氮化硼纳米管^[32]等。这些纳米材料的加入,都可以在不同程度上提高泡沫的压缩性能,且由于纳米材料在使用过程中,添加量相对传统增强体较少,对泡沫工艺影响较小,能够在有效提升材料性能的同时,不明显提高材料的密度,对材料轻量化要求具有积极的意义。鉴于纳米增强体的诸多优点,未来的研究中,此类增强体已成为聚氨酯泡沫增强研究中新的热点,并得到了更广泛的关注。

3 混杂增强聚氨酯泡沫塑料

对比纤维增强泡沫塑料和粒子增强泡沫塑料的增强性能,不难看出,采用纤维增强泡沫塑料可以更有效地提高泡

沫材料的拉伸强度,而对于泡沫压缩强度的改进往往并不理想;传统粒子增强泡沫塑料则在提高泡沫压缩强度方面优势更加明显,而对拉伸强度并无建树^[33]。所以在早期的应用中,当要求泡沫同时满足具有较高拉伸与压缩性能时,采用单一的增强方法则显得捉襟见肘,这时候使用纤维、粒子增强体共同进行增强,可以同时泡沫的拉伸、压缩性能加以改进,有很强的应用意义,这类增强方式一般称为混杂增强。如 Yang Zhenguo^[34]等采用 SiO_2 颗粒与玻璃纤维共同作为增强体研究了其对聚氨酯泡沫力学性能的影响。实验结果表明,当向泡沫中加入质量分数为 20% 的 SiO_2 以及 7.8% 的玻璃纤维时,聚氨酯的多项力学性能均得到了最佳的增强效果。需要指出的是,虽然混杂增强可以全面提高材料力学性能,但对于特定力学性能的增强一般不会超过单一组分增强的效果,如赵斌等^[20]使用 SiO_2 粒子及玻璃纤维混杂增强硬质聚氨酯泡沫的力学性能,其增强效果介于两种增强体单独增强之间。

4 3 种增强聚氨酯泡沫压缩性能的方法比较

对比 3 种硬质聚氨酯泡沫的增强方法,虽然纤维增强可以起到不错的增强效果,混杂增强能全面提高材料的力学性能,但针对泡沫压缩性能而言,采用粒子增强的途径在实际应用中更具优势,且对于纳米粒子而言,更能够全方位提高泡沫的力学性能,所以当前针对增强体增强硬质聚氨酯泡沫,主要都集中于纳米粒子增强的研究。

5 增强体表面改性对泡沫材料压缩性能的影响

在使用增强体对聚氨酯硬泡进行力学性能改进时,无论使用哪种增强体,都需要对其表面进行化学改性。经过表面改性处理的空心玻璃微珠,可以明显改善微珠表面与泡沫之间的粘接状况,并提高界面的结合力,有助于更好地提高增强粒子的增强效果,较未经改性的空心玻璃微珠有着显著的提升。

用于表面改性的化学物质类别较多,最常见的是硅烷偶联剂,国内研究中以 KH550 居多,一般用于空心玻璃微珠、玻璃纤维等表面带有羟基官能团增强体的表面改性。以空心玻璃微珠为例,其改性机理为:当表面带有羟基的空心玻璃微珠用 KH550 处理后,会发生如图 1 所示化学反应,从而使玻璃微珠表面由界面性不佳的羟基修饰为界面性更好的氨基官能团,氨基通过氢键作用增强了空心玻璃微珠与泡沫之间的亲和作用,从而有效改善界面的结合性,提高了增强体的增强效果^[5]。

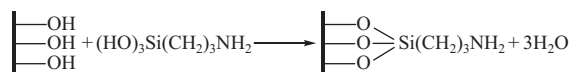
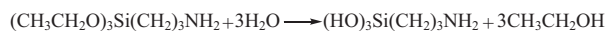


图 1 空心玻璃微珠表面羟基官能团与 KH550 反应示意图

同理,纳米粒子增强体也需要对表面进行化学修饰,方可提高其对泡沫力学性能的增强效率。相比之下纳米粒子增强体的表面改性更加丰富,通过采用不同的表面修饰手段,可以在表面修饰不同的化学基团,对于纳米粒子增强体的增强效果也有着重要的影响。M. Bandarian 等^[23]在采用碳纳米管作为纳米增强体增强硬质聚氨酯泡沫时,也同时分析了不同修饰方法对泡沫材料力学性能的影响。他们使用化学修饰手段分别制备了表面由羟基、羧基以及氨基修饰的碳纳米管,并将其应用于硬质聚氨酯泡沫的增强。研究发现,经过表面改性的碳纳米管,其对泡沫压缩性能增强的效果明显优于未经表面改性的碳纳米管,且以羧基改性增强效果最好。这主要是因为采用羧基改性方法处理碳纳米管表面时,经酸处理后的碳纳米管长度会有所减小,降低了碳纳米管的表面结合能,从而降低了团聚现象^[35];此外,由于羧基与异氰酸酯基反应更快,增大了表面与泡沫的结合性,使之增强效果最佳^[36]。

石墨烯由于存在自身易团聚、产量低等问题,很多情况下都会采用氧化石墨烯的形式作为增强体用于泡沫材料力学性质的增强,这依然有不错的增强效果。氧化石墨烯与石墨烯有着相似的结构,其边缘与面内拥有很多诸如羟基、羧基、羰基、环氧等官能团,这也使得它在水中具有更好的分散性,而在一些有机溶剂中分散性较差。为了使其能够有效溶解在有机溶剂中,也需要对其表面进行化学改性,从而提高增强效果。Jing Qifei 等^[37]即采用了异氰酸酯基修饰的方法,对氧化石墨烯的表面进行了化学改性,使聚氨酯的各项力学性能都得到了大幅提升。除此之外,使用硅烷偶联剂^[38]、三乙烯四胺^[39]等也都可以实现对氧化石墨烯的表面改性,并最终提升泡沫力学性能。需要指出的是,当前对于表面改性氧化石墨烯增强泡沫力学性能的研究中,绝大多数报道都重点研究了聚氨酯拉伸、弯曲性能的增强,而对压缩性能增强的关注度相对较小,针对改性氧化石墨烯对于硬质聚氨酯泡沫压缩性能影响的研究,仍有待进一步的探索。

6 问题与展望

随着纳米科技日新月异的发展,前沿科学的目光逐渐聚焦到了新材料领域,国内外相继出现了以碳纳米管、石墨烯等作为增强体,用于提高聚氨酯泡沫力学性能的研究报道。然而,由于使用石墨烯等纳米材料对泡沫拉伸性能的提升远高于其对压缩性能的提升,针对纳米材料增强硬质聚氨酯泡沫压缩性能的报道相对罕见,这也限制了其在提高泡沫压缩性能方面,尤其是对于固体浮力材料领域中的应用。

此外,以空心玻璃微珠为主的传统粒子增强体与纳米粒子在增强材料压缩性能方面原理不同,用量及分散特征也有差异。传统粒子在作为增强体时用量较大,压缩性能提升

显著,混合采用机械搅拌,分散方便;而纳米粒子则用量极小,增强效率高,易团聚,难以均匀分散。虽然这两种增强体在实际应用中各有所长,一同使用有一定的潜在价值,但在聚氨酯泡沫增强体的研究中,却少有相关的研究工作。相信随着材料学科的进一步发展,技术的进步将克服纳米材料诸多的瓶颈,更多有效的增强体系将被研究人员所了解,为未来硬质聚氨酯泡沫压缩性能的提升提供更高效的可行途径。

参考文献

- [1] Bayer O. Angewandte Chemie, 1947, 59(9):257-272.
- [2] 陈国伟等. 塑料科技, 2014, 42(3):124-129.
Chen Guowei, et al. Plastics Science and Technology, 2014, 42(3):124-129.
- [3] 阎羨功. 塑料工业, 2015, 43(11):108-110.
Yan Xiangong. China Plastics Industry, 2015, 43(11):108-110.
- [4] 刘国胜, 等. 中国塑料, 2011, 25(11):5-9.
Liu Guosheng, et al. China Plastics, 2011, 25(11):5-9.
- [5] 刘元俊, 等. 复合材料学报, 2006, 23(2):65-70.
Liu Yuanjun, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(2):65-70.
- [6] Rinde J A. Journal of Cellular Plastics, 1970, 6(6):280-287.
- [7] 卢子兴, 等. 实验力学, 1995, 10(1):45-50.
Lu Zixing, et al. Journal of Experimental Mechanics, 1995, 10(1):45-50.
- [8] 李国忠. 复合材料学报, 1996, 13(2):17-21.
Li Guozhong. Acta Materiae Compositae Sinica, 1996, 13(2):17-21.
- [9] 王建华, 等. 高分子材料科学与工程, 2001, 17(3):150-152.
Wang Jianhua, et al. Polymeric Materials Science and Engineering, 2001, 17(3):150-152.
- [10] 闻荻江, 等. 复合材料学报, 1999, 16(4):64-67.
Wen Dijiang, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 1999, 16(4):64-67.
- [11] 丁友江, 等. 建筑节能, 2010, 38(11):62-64.
Ding Youjiang, et al. Building Energy Efficiency, 2010, 38(11):62-64.
- [12] 盖广清, 等. 新型建筑材料, 2011, 38(12):78-79.
Gai Guangqing, et al. New Building Materials, 2011, 38(12):78-79.
- [13] 赵雨花, 等. 纤维复合材料, 2014(4):15-19.
Zhao Yuhua, et al. Fiber Composites, 2014(4):15-19.
- [14] 余训章. 玻璃钢 / 复合材料, 2015(2):28-31.
Yu Xunzhang. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2015(2):28-31.
- [15] 苏嘉豪, 等. 化工新型材料, 2016(2):52-54.
Su Jiahao, et al. New Chemical Materials, 2016(2):52-54.
- [16] 周秋明, 等. 聚氨酯工业, 2002, 17(2):13-15.
Zhou Qiuming, et al. Polyurethane Industry, 2002, 17(2):13-15.
- [17] 王福玲, 等. 国外建材科技, 2005, 26(6):1-3.

- [5] Nam L W, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42(9): 1110–1118.
 - [6] 李华展, 等. 功能材料, 2016, 47(4): 4006–4011.
Li Huazhan, et al. Functional Materials, 2016, 47(4): 4006–4011.
 - [7] 陈兆晨, 等. 功能材料与器件学报, 2011, 17(3): 258–261.
Chen Zhaochen, et al. Journal of Functional Materials and Devices, 2011, 17(3): 258–261.
 - [8] 吴广利, 等. 安全与电磁兼容, 2011(1): 41–43.
Wu Guangli, et al. Safety & EMC 2011(1): 41–43.
 - [9] 冀鑫伟, 等. 兵器材料科学与工程, 2012, 35(6): 35–38.
Ji Xinwei, et al. Ordnance Material Science and Engineering, 2012, 35(6): 35–38.
 - [10] Feng Yongbao, et al. J Alloys Compd, 2012, 513: 455–459.
 - [11] 李淑环, 等. 特种橡胶制品, 2009, 30(1): 19–23.
Li Shuhuan, et al. Special Rubber Products, 2009, 30(1): 19–23.
 - [12] 王志强, 等. 材料导报, 2010, 24 (14): 26–28.
Wang Zhiqiang, et al. Materials Review, 2010, 24 (14): 26–28.
 - [13] 马科峰, 等. 应用化工, 2011, 40(1): 38–40.
 - [14] Hunyek A, et al. Plastics, Rubber and Composites, 2013, 42(3): 89–92.
 - [15] Shafieizadegan-Esfahani A R, et al. Polymer Composites, 2012, 33(3): 397–403.
 - [16] Shafieizadegan-Esfahani A R, et al. Composites Science and Technology, 2012, 72(3): 382–389.
 - [17] Takano S, et al. Optimum design of wave absorbers using foamed polyimide containing carbon black based on genetic algorithm[C]// Proceedings of 2011 international conference on electromagnetics in advanced applications (ICEAA). New York: IEEE, 2011: 664–667.
 - [18] 吴红焕, 等. 材料导报, 2007, 21(5): 115–117.
Wu Honghuan, et al. Materials Review, 2007, 21(5): 115–117.
 - [19] 王应德, 等. 功能材料, 2011, 8(2): 20–24.
Wang Yingde, et al. Functional Materials, 2011, 8(2): 20–24.
 - [20] 张政权, 等. 炭素技术, 2011, 30(1): 32–34.
Zhang Zhengquan, et al. Carbon Techniques, 2011, 30(1): 32–34.
 - [21] 高霞, 等. 西南科技大学学报, 2015(2): 17–22.
Gao Xia, et al. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2015(2): 17–22.
 - [22] 李雅迪, 等. 岩土工程学报, 2016(S1): 83–86.
Li Yadi, et al. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016(S1): 83–86.
 - [23] 黄瑞娇, 等. 化工新型材料, 2015(1): 151–155.
Huang Ruijiao, et al. New Chemical Materials, 2015(1): 151–155.
 - [24] Ying Luhua, et al. Progress in Natural Science Materials International, 2013, 23(2): 170–173.
 - [25] 周成飞. 化工技术与开发, 2014, 43(6): 45–50.
Zhou Chengfei. Technology & Development of Chemical Industry, 2014, 43(6): 45–50.
 - [26] Yang Zhenguo, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 92(3): 1493–1500.
 - [27] Liu Jie, et al. Science, 1998, 280: 1253–1256
 - [28] Marotta E, et al. US, 7160209[P]. 2007-01-09.
 - [29] Jing Qifei, et al. Materials & Design, 2015, 85: 808–814.
 - [30] 崔立志, 等. 工程塑料应用, 2014, 42(5): 20–24.
Cui Xingzhi, et al. Engineering Plastics Application, 2014, 42(5): 20–24.
 - [31] 沙金, 等. 中国塑料, 2011, 25(8): 28–33.
Sha Jin, et al. China Plastics, 2011, 25(8): 28–33.
 - [32] Khanna S K, et al. Journal of Engineering Materials and