

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2013.06.001

纳米二氧化硅杂化粒子的结构设计及可控合成^{*}

王慧,周晓东,林群芳,郭兵兵,赵婧婧,邓双辉,蔡伦

(华东理工大学化学工程联合国家重点实验室,上海 200237)

摘要:采用分步原子转移自由基聚合(ATRP)法合成接枝了聚丙烯酸羟乙酯(PHEA)和聚苯乙烯(PS)链段的纳米SiO₂杂化粒子,PHEA具有丰富的活性羟基官能团,可以与碳纤维形成化学键结合,PHEA和PS可分别与不同性质的基体形成良好的缠结和扩散,实现碳纤维与不同性质基体自适应构建强相互作用,改善界面粘结性能。用元素分析、傅立叶变换红外光谱、动态热机械分析、热重分析等手段对合成的纳米SiO₂杂化粒子进行表征,确保合成的目标产物与设计的分子结构相吻合。

关键词:碳纤维;纳米SiO₂;表面处理;原子转移自由基聚合;自适应界面

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2013)06-0005-05

Structure Design and Controllable Synthesis of Hybrid Nano-SiO₂ Grafted to Carbon Fiber

Wang Hui, Zhou Xiaodong, Lin Qunfang, Guo Bingbing, Zhao Jingjing, Deng Shuanghui, Cai Lun

(1.State Key Laboratory of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Nano-SiO₂ hybrid particles segment with grafted 2-phenoxy ethyl acrylate(PHEA) and polystyrene(PS) were synthesised using step by step atom transfer radical polymerization(ATRP) method. PHEA had active hydroxyl group of rich, and it could combine with carbon fiber to form a chemical bond, PHEA and PS could form a good entanglement and diffusion and matrix of different properties of the matrix, to realize adaptive fiber with different properties to construct the strong interaction, to improve the interfacial bond strength. The nano-SiO₂ hybrid particles was characterized by the element analysis, Fourier transform infrared spectroscopy, dynamic mechanical thermal analysis, thermogravimetric analysis and other means which ensured that the molecular structure of the target product could match with molecular structure of the design.

Keywords: carbon fiber; nano-SiO₂; surface modification; ATRP; self-adaptable interface

碳纤维由于其表面能低,与聚合物基体相容性较差,很难形成有效的界面粘结,需要对其进行一定的表面处理。常用的改性方法有氧化处理^[1-3]、涂层处理、化学接枝及在生产过程中涂覆上浆剂等^[4-5],但所有改性方法都有一定的局限性,即一种改性方法仅针对一种或一类树脂基体,且在处理过程中会对纤维的本身性能有所损伤^[6-7],因此,研制能适应不同性质树脂基体的纤维表面处理方法,以解决变换表面处理剂及一系列后处理对纤维带来的损伤问题具有重要意义。

纳米SiO₂廉价易得,有着优异的物理、化学性能,得到了广泛的应用^[1-6],但因其具有极易团聚、难以在基体中分散等问题限制了其用途,故对纳米SiO₂进行表面处理,改善其分散性能一直备受关注^[8-12]。目前,最常用的改性方法是在纳米SiO₂表面接枝聚合物,Zhao Hui等^[13]成功地将具有丰富末端羟基的超支化聚合物接枝到纳米SiO₂表面,改性

后的纳米SiO₂能在聚氯乙烯(PVC)基体中分散良好,复合材料的力学性能得以提高。接枝聚合物的方法有很多,原子转移自由基聚合(ATRP)由于其反应可控性,分子结构可设计等优点应用较多。Mu Bin等^[14]结合对氯甲基苯乙烯的乙烯基自缩合反应与甲基丙烯酸甲酯(MMA)的ATRP反应,在纳米SiO₂接枝了超支化聚合物和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)嵌段共聚物。Zhao Bin等^[15-17]通过Y型引发剂的合成,一端引发聚苯乙烯(PS)的氮氧自由基活性(NMRP)聚合,一端引发PMMA的ATRP聚合,成功在纳米SiO₂表面接枝了二元聚合刷。

为了解决变换表面处理剂及后处理给纤维带来的损伤问题,笔者采用分步ATRP法^[18]合成接枝

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51073055)

联系人:周晓东,教授,主要从事通用聚合物材料的高性能化、功能化改性,热塑性聚合物复合材料的制备及成型等方面的研究

收稿日期:2013-03-18

了聚丙烯酸羟乙酯(PHEA)和PS链段的纳米 SiO_2 杂化粒子,并将其用于碳纤维的表面处理中,PHEA具有丰富的活性羟基官能团,可以与纤维形成化学键结合,PHEA和PS可分别与不同性质的基体形成良好的缠结和扩散,实现纤维与不同性质基体自适应构建强相互作用的目的,改善界面粘结性能。采取了元素分析(EA)、傅立叶变换红外光谱(FTIR)、动态热机械分析(DMA)、热重(TG)分析等手段对合成的纳米 SiO_2 杂化粒子进行表征,确保合成的目标产物与设计的目标分子结构相吻合。

1 实验部分

1.1 原材料及其处理

纳米 SiO_2 :直径12 nm左右,在 110°C 下真空干燥24 h后使用,赢创德固赛特种化学(上海)有限公司;

溴化亚铜(CuBr):化学纯,上海振兴化工一厂,精制后使用;

苯乙烯(St):化学纯,上海凌峰化学试剂有限公司,精制后使用;

丙烯酸羟乙酯(HEA):分析纯,Alfa Aesar,精制后使用;

甲苯、1,4-二氧六环,三乙胺、*N,N*-二甲基甲酰胺(DMF)等试剂均精制后使用;

γ -氨丙基三乙氧基硅烷(APTES)、溴乙酰胺、*N,N,N',N',N'*-五甲基二亚乙基三胺(PMDETA)和三正丁基氢化锡(TBH)均为市售,直接使用。

1.2 仪器

EA仪:EL III型,德国VARIO公司;

FTIR仪:Nicolet 5700型,美国Nicolet公司;

TG分析仪:Q600 SDT型,德国VARIO公司;

DMA仪:DMA2980型,美国TA仪器公司。

1.3 纳米 SiO_2 杂化粒子的合成

纳米 SiO_2 杂化粒子的合成流程图如图1所示。

AP-SN的合成:将一定质量比的纳米 SiO_2 与APTES加入装有无水甲苯的三口烧瓶中,于甲苯回流温度下反应8 h,离心并用无水乙醇洗涤, 40°C 真空干燥;

大分子引发剂1合成:将一定配比比的AP-SN和三乙胺(NEt₃)加入装有无水甲苯三口烧瓶中,冰浴至温度为 0°C 时,逐滴加入溴乙酰胺和无水甲苯的混合溶液,于室温下反应12 h,无水乙醇离心洗涤, 40°C 真空干燥;

引发St的ATRP:将一定配比的大分子引发剂

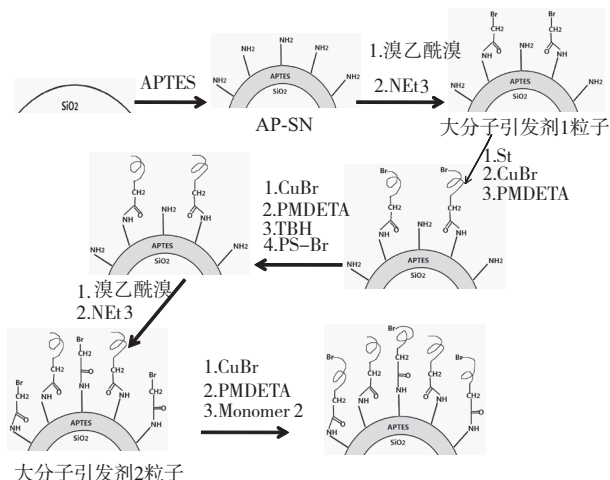


图1 纳米 SiO_2 杂化粒子的合成

1,PMDETA,CuBr和St,加入到装有DMF的三口烧瓶中,搅拌形成稳定的络合物,梯度升温至 100°C ,反应12 h,无水甲醇离心洗涤,二甲苯抽提48 h,除去表面吸附的PS-Br后, 40°C 真空干燥,得到接枝Br封端聚苯乙烯产物,记作PS-Br;

PS-Br脱卤:将一定配比的PS-Br、PMDETA、CuBr和TBH加入装有苯甲醚的三口烧瓶中,搅拌形成稳定的络合物,升温至 130°C ,反应6 h,无水甲醇离心洗涤, 40°C 真空干燥,得到接枝PS产物,记作脱卤产物;

大分子引发剂2合成:将一定配比的脱卤产物和三乙胺加到装有无水甲苯的三口烧瓶中,冰浴至温度为 0°C ,逐滴加入溴乙酰胺和无水甲苯的混合溶液,于室温下反应12 h,无水乙醇离心洗涤, 40°C 真空干燥;

引发HEA的ATRP:将一定配比的大分子引发剂2,PMDETA,CuBr和HEA加入到装有DMF的三口烧瓶中,搅拌形成稳定的络合物,梯度升温至 70°C ,反应12 h,无水甲醇离心洗涤,丙酮抽提48 h,除去表面吸附的PHEA-Br后, 40°C 下真空干燥,即得纳米 SiO_2 杂化粒子;

整个实验过程都在 N_2 氛围下进行。

1.4 纳米 SiO_2 杂化粒子的结构表征

EA分析:采用EA仪对纳米 SiO_2 表面接枝的 $-\text{NH}_2$ 进行测定;

FTIR分析:采用FTIR仪对纳米 SiO_2 杂化粒子的结构进行分析;

TG分析:采用TG仪对纳米 SiO_2 表面接枝情况进行分析,在 N_2 保护下,从室温升温至 800°C ,升温速率为 $10^\circ\text{C}/\text{min}$;

DMA 分析: 采用 DMA 仪对纳米 SiO_2 表面接枝情况进行分析。

2 结果和讨论

2.1 杂化粒子的结构设计

聚合物链段在不同的溶剂中会自组装成不同的形态,如图 2 所示。为了得到可针对不同性质基体自适应构建强相互作用的碳纤维表面改性方法,可以在碳纤维表面引入具有不同性质的二元聚合物链段,并在不同的基体中分别发挥作用,改善界面粘结性能,而通过纳米 SiO_2 杂化粒子的合成与引入,不仅解决了纳米 SiO_2 团聚问题,还增加了碳纤维的表面粗糙度,进一步增强界面粘结强度。

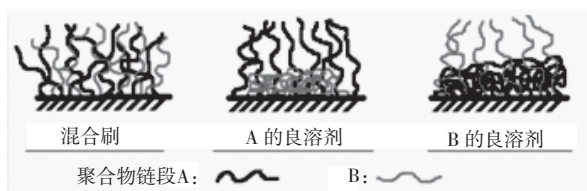


图 2 底物上聚合物链段在不同性质溶剂中的形态示意图

本体系中选用的二元聚合物链段分别为 PS 和 PHEA, PS 为非极性聚合物,可以与非极性基体如聚苯乙烯进行分子间扩散与缠结,形成较强的相互作用;PHEA 为极性聚合物,末端有丰富的羟基,可以通过化学键结合在碳纤维表面,并参与环氧树脂的固化反应,增强界面粘结强度,实现自适应界面的构筑。

2.2 纳米 SiO_2 杂化粒子的表征

(1) 元素分析。

表 1 为纳米 SiO_2 和 APTES 不同质量比的表面 N 元素含量。

表 1 纳米 SiO_2 与 APTES 不同质量比的表面 N 浓度元素含量

编号	质量比	N 元素质量分数 / %	氨基质量摩尔浓度 / $(\text{mmol} \cdot \text{g})^{-1}$
1 [#]	1 : 2	1.39	1.00
2 [#]	1 : 3	1.94	1.39
3 [#]	1 : 5	2.38	1.70
4 [#]	1 : 10	2.87	2.05

通过元素分析测定纳米 SiO_2 表面 N 元素质量分数,计算引入的活性位点即氨基的数量(如表 1)。为下一步的反应提供配比信息,考察其对接枝情况及对自适应界面构筑的影响。

(2) FTIR 分析。

图 3 为纳米 SiO_2 、纳米 SiO_2 杂化粒子及其中间产物的 FTIR 图谱。从图 3 可看出,471 cm^{-1} 处是纳米 SiO_2 中的 Si—O 的剪切振动吸收峰,在 1108 cm^{-1} 和 806 cm^{-1} 附近的吸收峰宽且尖锐,是

Si—O 的不对称和对称伸缩振动吸收峰,1634 cm^{-1} 和 3442 cm^{-1} 附近是—OH 的伸缩振动吸收峰;接枝了 APTES 之后,在 1527 cm^{-1} 和 1627 cm^{-1} 附近是 N—H 的振动吸收峰,2975 cm^{-1} 和 2931 cm^{-1} 处新的吸收峰为烷基中 C—H 的伸缩振动;合成大分子引发剂 1 的时候,氨基与酰氯基团反应,故在 1545 cm^{-1} 的位置出现了酰胺基团的特征吸收峰,1629 cm^{-1} 是 C=O 的伸缩振动吸收峰;引发 St 的 ATRP 反应后,在 3000 cm^{-1} 出现了新的吸收峰,归属为苯环骨架 =C—H 的伸缩振动,752 cm^{-1} 处是 =C—H 单取代芳香化合物的面外弯曲的吸收峰;而合成大分子引发剂 2 时,没有新的特征峰出现;在引发 HEA 的 ATRP 聚合后,在 1732 cm^{-1} 处的酯基中羰基的吸收峰及 3410 cm^{-1} 处的伯醇羟基的缔合峰与 Si—OH 的伸缩振动吸收峰重叠,2975 cm^{-1} 和 2931 cm^{-1} 处的烷基中 C—H 的伸缩振动吸收峰得到了增强。这均说明 PS 和 PHEA 链段已经成功地接枝到纳米 SiO_2 表面。

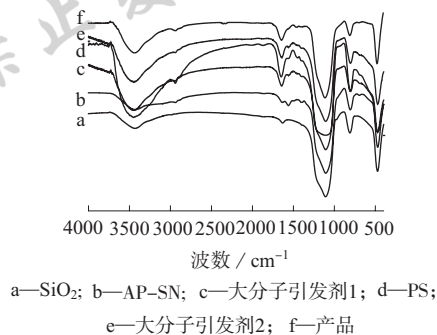


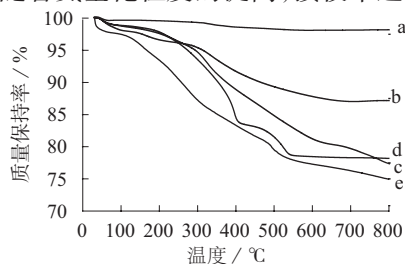
图 3 纳米 SiO_2 、纳米 SiO_2 杂化粒子及其中间产物的 FTIR 图谱

(3) TG 分析。

采用 TG 对纳米 SiO_2 、纳米 SiO_2 杂化粒子及其中间产物表面的接枝情况进行分析,如图 4 所示。纳米 SiO_2 表面富含羟基,容易吸附空气中的水分及其它物质,故整个过程质量保持率为 97.5% 左右;AP-SN 中,在低于 150 $^{\circ}\text{C}$ 损失的 2.5% 质量可视作吸附的物质,APTES 的快速分解温度为 450 $^{\circ}\text{C}$,在 600 $^{\circ}\text{C}$ 之后趋于平稳;由于大分子引发剂 1 表面极性基团减少,低于 150 $^{\circ}\text{C}$ 的质量保持率比 AP-SN 有所增加,同样的现象也出现在脱卤产物中,引发剂的分解区间在 300 ~ 600 $^{\circ}\text{C}$ 左右,可视作生成的酰胺键的降解温度;脱卤产物中出现了两个降解区间,在 250 ~ 400 $^{\circ}\text{C}$ 推测为 PS 及溴乙酰溴的降解温度,在 400 ~ 600 $^{\circ}\text{C}$ 推测为 APTES 的降解温度;从目标产物纳米 SiO_2 杂化粒子 TG 曲线中可以看到, PHEA 链段富含羟基,容易吸附水分、气体及溶剂等物质,

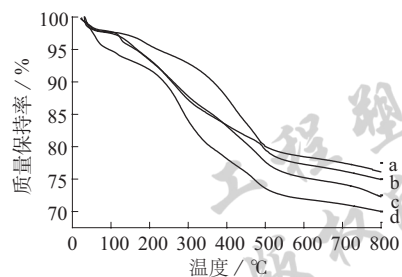
低于 150℃ 时,有约 2.6% 的失重,其失重速率明显要快得多,在 200℃ 左右推测为 PHEA 羰基脱落的热降解温度,在 350℃ 左右的降解峰,推测为聚苯乙烯及溴乙酰溴的降解,在 450℃ 左右的降解峰,推测为 APTES 的降解。

为研究不同氨基化程度对目标产物纳米 SiO₂ 杂化粒子接枝情况的影响,将所得产物也进行了 TG 分析,如图 5 所示。不同比例的产物有着相似的降解过程,随着氨基化程度的提高,接枝率逐渐上升。



a—SiO₂; b—AP-SN; c—大分子引发剂; d—脱卤; e—目标

图 4 纳米 SiO₂、纳米 SiO₂ 杂化粒子及其中间产物的 TG 图谱



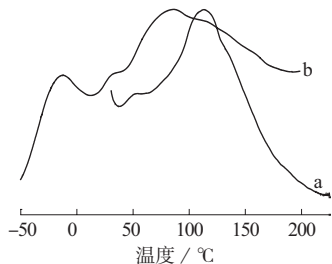
纳米 SiO₂ : APTES 质量比: a—1 : 2; b—1 : 3;

c—1 : 5; d—1 : 10

图 5 不同质量比的纳米 SiO₂ 杂化粒子的 TG 分析图谱

(4)DMA 分析。

采用 DMA 进一步验证纳米 SiO₂、纳米 SiO₂ 杂化粒子的合成及接枝情况如图 6 所示。从图 6 可以看出,曲线 a 只在 112.89℃ 处出现了一个 PS 的 T_g ; 而曲线 b 在 87.96 及 -13.88℃ 处出现了两个峰值,可分别归于 PS 及 PHEA 的 T_g ,在合成过程中,合成



a—纳米 SiO₂; b—纳米 SiO₂ 杂化粒子

图 6 纳米 SiO₂ 及纳米 SiO₂ 杂化粒子的 DMA 分析

PS 链段后经过了脱卤反应,排除了嵌段共聚物的生成,可认定在纳米 SiO₂ 接枝的是 PS 及 PHEA 的均

聚物链段,由于两种均聚物链段的互相影响,两者的 T_g 都有所偏移。

3 结论

采用分步 ATRP 在纳米 SiO₂ 的表面接枝了二元聚合链段 PHEA 和 PS, PHEA 分子链段中含有丰富的羟基,可以与酰氯化后的碳纤维进行反应,通过化学键结合到碳纤维表面,并使处理后的碳纤维可以分别与不同性质的基体自适应产生强相互作用。研究表明,合成的纳米 SiO₂ 杂化粒子的分子结构与设计相吻合。

参考文献

- [1] Fukunaga A, Ueda S, Nagumo M. Air-oxidation and anodization of pitch-based carbon fibers[J]. Carbon, 1999, 37:1 081-1 085.
- [2] Pittmann J C U, He G R, Wu B, et al. Chemical modification of carbon fiber surfaces by nitric acid oxidation followed by reaction with tetraethylenepentamine[J]. Carbon, 1997, 35(3):317-331.
- [3] Jiang Zaixing, Liu Li, Husng Yudong. Influence of coupling agent chain lengths on interfacial performances of carbon fiber and polyarylacetylene resin composites[J]. Surf Interface Anal, 2009, 41:624-631.
- [4] Ittipol J. Scanning tunneling microscopy (STM) and atomic force microscopy (AFM) studies of carbon fibers and interfacial bonding in polyimide composites[J]. A Dissertation Presented to the Graduate Faculty of the University of Akron UMI Company, 1996.
- [5] Dai Zhishuang, Shi Fenghui, Zhang Baoyan, et al. Effect of sizing on carbon fiber surface properties and fibers / epoxy interfacial adhesion[J]. Applied Surface Science, 2011, 257:6 980-6 985.
- [6] Sarraf H, Škarpová L, Louda P. Surface modification of carbon fibers[J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2007, 25(2):24-30.
- [7] Cao Hailin, Huang Yudong, Zhang Zhiqian, et al. Uniform modification of carbon fibers surface in 3-D fabrics using intermittent electrochemical treatment[J]. Composites Science and Technology, 2005, 65:1 655-1 662.
- [8] Park S J, Kim B J. Roles of acidic functional groups of carbon fiber surfaces in enhancing interfacial adhesion behavior[J]. Mater Sci Eng A, 2005, 408:269-74.
- [9] Lin S P, Han J L, Yeh J T, et al. Composites of UHMWPE fiber reinforced PU / epoxy grafted interpenetrating polymer networks[J]. Eur Polym J, 2007, 43:996-1 008.
- [10] Fukunaga A, Ueda S, Nagumo M. Air-oxidation and anodization of pitch-based carbon fibers[J]. Carbon, 1999, 37:1 081-1 085.
- [11] Johnsen B B, Kinloch A J, Mohammed R D, et al. Toughening mechanisms of nanoparticle-modified epoxy polymers[J]. Polymer, 2007, 48:530-541.

- [12] Yu Yang, Lu Chunxiang, Su Xiaolei, et al. Effects of emulsion sizing with nano-SiO₂ on interfacial properties of carbon fibers / epoxy composites[J]. J Mater Sci,2007,42,6 347-6 352.
- [13] Zhao Hui, Sun Ruimin, Luo Yunjun, et al. A novel method of hyperbranched poly(amine ester)modifying nano-SiO₂ and study of mechanical properties of PVC / nano-SiO₂ composites[J]. Polymer Composites,2008,29(9):1 014-1 019.
- [14] Mu Bin, Wang Tingmei, Liu Peng. Well-defined dendritic-graft copolymer grafted silica nanoparticle by consecutive surface-initiated atom transfer radical polymerizations[J]. Ind Eng Chem Res,2007,46:3 069-3 072.
- [15] Zhao Bin, He Tao. Synthesis of well-defined mixed poly(methyl methacrylate) / polystyrene brushes from an asymmetric bifunctional initiator-terminated self-assembled monolayer[J]. Macromolecules,2003(36):8 599-8 602.
- [16] Zhao Bin, Haasch R T, MacLaren S. Solvent-induced self-assembly of mixed poly(methyl methacrylate) / polystyrene brushes on planar silica substrates:molecular weight effect[J]. J Am Chem Soc,2004,126:6 124-6 134.
- [17] Zhao Bin, Zhu Lei. Mixed polymer brush-grafted particles:a new class of environmentally responsive nanostructured materials[J]. Macromolecules,2009,42:9 369-9 383.
- [18] Ionov L, Minko S. Mixed polymer brushes with locking switching[J]. ACS Appl Mater Interfaces,2012(4):483-489.

丙烯 / 1- 丁烯共聚方法获发明专利

近日,由中国石油石化研究院开发的一种丙烯 / 1- 丁烯无规共聚树脂的制备方法,获得国家发明专利授权。该发明突破了现有丙烯 / 1- 丁烯无规共聚物制备技术中,气相聚合方法只适用于气相法聚丙烯(PP)装置的局限性,同时弥补了采用惰性溶剂聚合产品后处理过程繁琐的不足,适用于本体聚合聚丙烯装置生产共聚产品。

均聚 PP 低温冲击强度、热封温度和透明性相对较差,限制了其在包装材料方面的应用。通过丙烯与 α - 烯烃无规共聚可有效提高 PP 透明性,降低树脂的起始热封温度。共聚产品同时还具有高透明度和柔软性等优点,可与其它一些透明树脂相媲美。

使用 MgCl₂ 负载的齐格勒-纳塔催化剂,通过本体法聚合工艺条件优化以及外给电子体的筛选及复合,使丙烯与 1- 丁烯的共聚反应催化剂活性与丙烯均聚反应相当。得到的共聚产物具有良好的颗粒形态和适宜的粒度分布,较低的熔点,高透明性,低二甲苯可溶物,较高的冲击强度以及模量,可用于 BOPP 薄膜或 CPP 薄膜的生产。(工程塑料网)

塑料门窗——世界公认的最佳节能门窗

根据北京市住房和城乡建设委员会、北京市发展和改革委员会联合发布的《北京市“十二五”时期民用建筑节能规划》,自 2012 年起,新建居住建筑和公共建筑全部按照规定的建筑节能设计标准建造,2012 年城镇新建居住建筑率先执行节能 75% 的设计标准,围护结构传热系数、热源和管网热效率指标达到世界同等天气条件地区先进水平。

为响应该标准,中国建筑金属结构协会塑料门窗委员会、北京市建筑五金门窗幕墙行业协会日前联合在北京举办了“塑料门窗保温节能技术交流会”。会上,通过与专家的技术交流以及展出的 18 个外窗传热系数限制值小于 2.0 W / m² · K 的集保温性、装饰性为一体的塑料门窗,人们进一步了解到塑料门窗的各种特性。

(1) 塑料门窗是世界公认的最佳节能门窗

塑料门窗俗称塑钢门窗,是由聚氯乙烯(PVC)树脂加

10 余种助剂,通过挤出机和模具挤出成型为杆件(型材);杆件经过切割、装进增强型钢、焊接成框再配装上密封条、五金件、配件以及玻璃等组装成的门窗。

中国建筑金属结构协会塑料门窗委员会、北京市建筑五金门窗幕墙行业协会与相关塑料门窗生产企业积极响应北京市居住建筑节能 75% 的设计标准,此举既是塑料门窗行业积极态度的体现,更是塑料门窗行业技术实力的承诺。有关资料显示,塑料门窗的节能主要体现在 3 个方面。一是生产过程的节能。据悉,生产同样质量的 PVC 型材的能耗是钢材的 1 / 4、铝材的 1 / 8。二是回收再利用的节能。长期以来,人们只片面地认为金属门窗是可以回收再利用的,殊不知,塑料门窗的回收更节能、环保。由于,塑料门窗无须像回收金属门窗需要通过熔炼、铸锭、轧制等工序,只需将废旧料粉碎,或者掺进新料挤出型材,再生的材料可用于制作地板、公园长凳等制品。三是塑料门窗的保温性好且价格实惠。金属的传热系数较高,欲达到相关标准要求的外窗传热系数限制值需要加断桥,仅这一道工序即会大大增加铝门窗的成本。塑料门窗特有的材质使其具有优良的保温性,在外窗传热系数限制值为 2.0 W / m² · K 的情况下,塑料窗与铝窗的价格比是 1 : 1.8。基于塑料门窗的以上优势,目前,塑料门窗在相关国家(地区)的市场占有率分别为:中国 50% 左右、德国 56%、美国 48%、俄罗斯 50%、韩国 62%、欧洲 45%。

(2) 建筑节能外窗传热系数值是节能关键

2012 年底北京市住房和城乡建设委员会、北京市质量技术监督局、北京市规划委员会、北京市市政市容治理委员会联合向北京市提出“关于进一步提高住宅节能标准的请示”。在谈到北京市住宅节能标准与国内外水平的对比时着重夸大了我国《严寒与严冷地区居住建筑节能设计标准》(JGJ 26—2010)规定中的外窗传热系数限值为 2.8~1.8 W / m² · K,而伦敦为 2.0 W / m² · K,柏林为 1.5 W / m² · K,提出的提高北京市新建住宅节能指标重点措施的第一条就是采用高性能节能门窗,提高住宅围护结构传热系数指标。由此可见门窗在建筑节能方面的重要性。(中国色母粒网)