

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.03.013

铺层结构对 EP/GF 复合材料沉头螺栓连接失效的影响^{*}

黄学优^{1,2}, 张彦飞^{1,2}, 杜瑞奎^{1,2}, 王智^{1,2}, 刘亚青^{1,2}

(1. 山西省高分子复合材料工程技术研究中心, 太原 030051; 2. 中北大学材料科学与工程学院, 太原 030051)

摘要:以环氧树脂(EP)为基体,单层玻璃纤维(GF)布为增强体,利用真空辅助树脂传递模塑工艺制备了具有 $[0^\circ]_{6s}$, $[45^\circ/-45^\circ]_{3s}$, $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$, $[90^\circ]_{6s}$ 铺层结构的EP/GF复合材料层合板,通过拉伸失效实验研究了铺层结构对复合材料层合板沉头螺栓连接承载能力的影响,并进一步分析了4种铺层结构的沉头螺栓连接层合板在拉伸时的失效行为。结果表明, $[45^\circ/-45^\circ]_{3s}$ 与 $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$ 铺层结构的层合板均发生了承载失效,具有较高的螺栓连接承载能力,其中 $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$ 铺层结构的层合板最大拉伸载荷最高,为6.7 kN, $[45^\circ/-45^\circ]_{3s}$ 铺层结构的层合板具有最大的失效位移,为14.17 mm; $[0^\circ]_{6s}$ 铺层结构的层合板发生了剪切开裂失效,其螺栓连接承载能力低于上述两种铺层结构; $[90^\circ]_{6s}$ 铺层结构的层合板发生了净张力失效,其螺栓连接承载能力最低。

关键词:环氧树脂;玻璃纤维;层合板;沉头螺栓连接;失效;铺层结构

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)03-0065-05

Effects of Stacking Structures on Countersunk Bolt Joint Failure of EP/GF Composites

Huang Xueyou^{1,2}, Zhang Yanfei^{1,2}, Du Ruikui^{1,2}, Wang Zhi^{1,2}, Liu Yaqing^{1,2}

(1. Research Center for Engineering Technology of Polymeric Composites of Shanxi Province, Taiyuan 030051, China;

2. School of Materials Science and Engineering of North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Glass fiber (GF) reinforced epoxy resin (EP) composite laminates with four stacking structures including $[0^\circ]_{6s}$, $[45^\circ/-45^\circ]_{3s}$, $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$, $[90^\circ]_{6s}$ were fabricated by vacuum assisted resin transfer molding process with EP as resin matrix and unidirectional GF cloth as reinforcement. Based on the tensile failure testing methods, the influences of the stacking structures on countersunk bolt joint bearing abilities of the composite laminates were studied. In addition, the tensile failure models of the laminates jointed by countersunk bolt with the four stacking structures were also analyzed. The results show that the laminates with $[45^\circ/-45^\circ]_{3s}$ and $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$ result the bearing failure and have higher countersunk bolt joint bearing abilities, among them, the laminate with $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$ owns the largest maximum tensile load (6.7 kN) and the laminate with $[45^\circ/-45^\circ]_{3s}$ owns the largest failure displacement (14.17 mm). The laminate with $[0^\circ]_{6s}$ results shear-crack failure which has less bolt joint bearing ability than those of laminates with $[45^\circ/-45^\circ]_{3s}$ and $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$. The laminate with $[90^\circ]_{6s}$ results net-tension failure which has the weakest bolt joint bearing ability.

Keywords: epoxy resin; glass fiber; laminate; countersunk bolt joint; failure; stacking structure

复合材料机械连接具有环保、可拆卸性强、连接强度高、便于维护等特点,成为树脂基复合材料结构连接中最重要的方法^[1]。最常用的一种机械连接方式为螺栓连接,几乎遍布航空飞行器的各个部位,其连接强度直接决定和影响航空飞行器的整体性能。树脂基复合材料所具有的脆性、力学性能各向异性等特点,使得传统的凸头多钉针状螺栓连接载荷存在分配不均的现象^[2],而且传统的针状螺栓连接往往难以满足飞行器某些部位外形光滑度的要求,因此在这些部位常采用沉头螺栓连接形式改善其外形的光滑度。而且由于沉头螺栓压头的压紧作用,不仅可以改善多个螺栓的载荷分布不均匀性,同时,还可以消除边缘螺钉(或螺栓)载荷过大的现

象,提高连接的承载能力^[3]。

影响树脂基复合材料螺栓连接性能的因素有很多,如螺栓直径、螺栓孔距离端面的距离、铺层结构等,大量的研究表明,铺层结构对螺栓连接的失效影响较为明显。I. D. G. A. Subagia等^[4]测试了碳纤维复合材料层合板销钉连接的拉伸挤压载荷,分析了4种铺层结构的连接载荷,研究结果表明,将 90° 铺层放置在表面或者表面层的下方,可以提高针状螺栓的连接载荷。F. Taheri-Behrooz等^[5]研究了 $[0^\circ/90^\circ]_s$ 铺层结构对针状螺栓连接承载载荷的

^{*} 山西省科技创新项目(2009101004)

联系人: 刘亚青,教授,主要从事高分子及其复合材料研究

收稿日期: 2015-12-13

影响,结果表明,表面为 90° 铺层的层合板的载荷要优于表面为 0° 的铺层。P. Može 等^[6]研究了铺层角度对针状螺栓连接失效的影响,结果表明,只有 0° , 90° 或者 $\pm 45^\circ$ 铺层可以增强螺栓连接的拉伸载荷,适当增加 90° 铺层纤维的含量,可以增强螺栓连接的拉伸载荷。目前,铺层结构对沉头螺栓连接失效的影响研究还很少,笔者采用真空辅助树脂传递模塑(VARTM)工艺,制备了具有 $[0^\circ]_{6s}$, $[45^\circ/-45^\circ]_{3s}$, $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$, $[90^\circ]_{6s}$ 等4种铺层结构的环氧树脂(EP)/玻璃纤维(GF)复合材料,对这4种铺层结构的承载能力进行了测试,并对其拉伸失效形式进行了分析,从而为EP/GF复合材料沉头螺栓连接的铺层结构设计提供理论依据。

1 实验部分

1.1 主要原料

EP: CYDF-175, 岳阳巴陵华兴石化有限公司;

EP 固化剂: CYDHD-501, 岳阳巴陵华兴石化有限公司;

单向 GF 布: E-BX800, 振石集团恒石纤维基业有限公司。

1.2 主要仪器与设备

VARTM 模具: 自制;

旋片式真空泵: 2XZ-4 型, 台州市椒江宏兴泵设备厂;

微机控制电子万能试验机: WDW-E300 型, 美斯特工业系统有限公司;

真空烘箱: CT-C-1 型, 南京索特干燥设备厂;

扫描电子显微镜(SEM): SU-1510 型, 日本日立公司。

1.3 试样制备

根据设计好的铺层角度, 将裁剪好的单向 GF 布依次按顺序铺设到玻璃模具上, 按 EP 与固化剂质量比为 100/30 配制好树脂体系并进行浸胶, 在压力 0.09 MPa 下采用 VARTM 工艺固化成型 24 h, 成型脱模后, 在 80°C 真空烘箱中后固化 12 h, 依据文献[7]与标准 ISO F/77H10-2013, ASTM D5961-2013 的尺寸进行打孔和装配, 连接几何尺寸如图 1 所示。沉头螺栓的材料为结构钢^[8], 拉伸弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3。

1.4 测试与表征

(1) 拉伸失效实验。

为了防止由于预紧力作用使得连接件在厚度方向上提前发生失效, 同时, 降低预紧力对螺栓连接



图1 螺栓连接的几何尺寸

载荷的影响, 在拉伸失效实验过程中, 将层合板 C1 和层合板 C2 之间的螺栓预紧采用手动拧紧^[9], 连接件的一端固定, 另一端施加 2 mm/min 的动态载荷。连接件的预紧以及边界约束如图 2 所示。

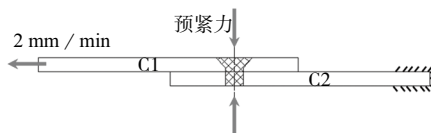


图2 螺栓连接件的预紧及边界约束

拉伸失效实验按 ASTM D5961/D5961M 进行, 当载荷下降为最大载荷的 30% 时, 实验停止, 记录复合材料沉头螺栓连接拉伸过程中的位移载荷曲线和螺栓孔周围的失效现象。

(2) SEM 表征。

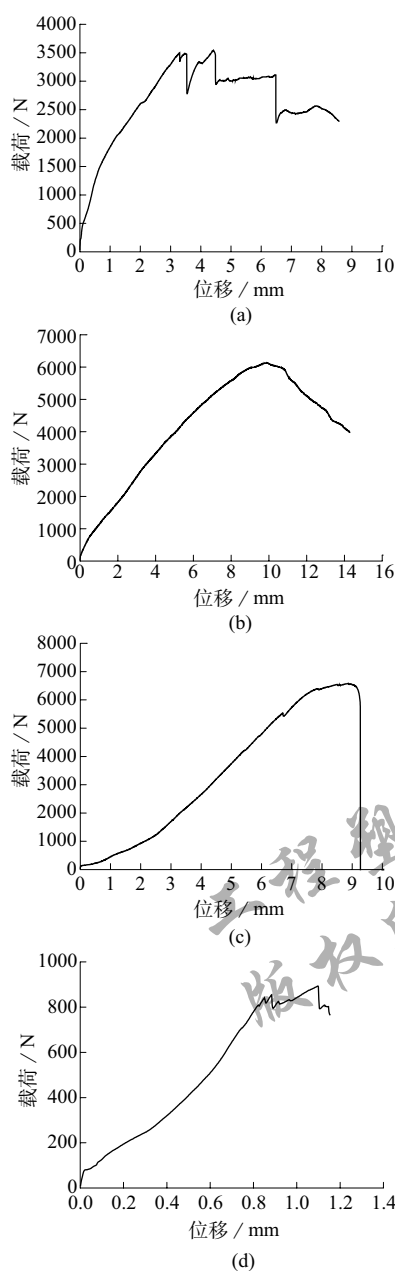
将螺栓孔周围的失效面进行喷金, 采用 SEM 观察铺层结构为 $[0^\circ]_{6s}$, $[45^\circ/-45^\circ]_{3s}$, $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$ 的层合板 C2 和 $[90^\circ]_{6s}$ 的层合板 C1 螺栓孔周围纤维和基体的失效形式并拍照。

2 结果与讨论

2.1 位移-载荷曲线

图 3 示出具有 $[0^\circ]_{6s}$, $[45^\circ/-45^\circ]_{3s}$, $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$ 和 $[90^\circ]_{6s}$ 4种铺层结构的由沉头螺栓连接的 EP/GF 复合材料层合板的位移-载荷曲线。由图 3 可知, 在起始阶段, 随着拉伸位移的增加, 螺栓连接的 4 种铺层结构层合板载荷呈近似线性的增大。随着位移的进一步增加, 载荷出现明显的非线性变化: 由图 3a 可知, $[0^\circ]_{6s}$ 铺层结构在达到螺栓连接线性最大承载能力后, 随位移的增加, 载荷呈现出阶梯式的减小趋势; 由图 3b 可知, $[45^\circ/-45^\circ]_{3s}$ 铺层结构在达到线性最大承载能力后, 随位移的增加, 载荷呈近似线性减小; 由图 3c 可知, $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$ 铺层结构达到线性最大承载能力后, 载荷呈现“断崖式”下降趋势, 几乎在瞬间降为 0; 由图 3d 可知, $[90^\circ]_{6s}$ 的铺层结构在达到线性最大承载能力后, 随着位移的增加, 载荷先近似线性增大而后呈下降趋势。

由图 3 的位移-载荷曲线, 可以得出 4 种铺层结构的螺栓连接层合板的最大拉伸载荷和失效位移, 如图 4 所示。由图 4 可知, $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$ 铺层结构的层合



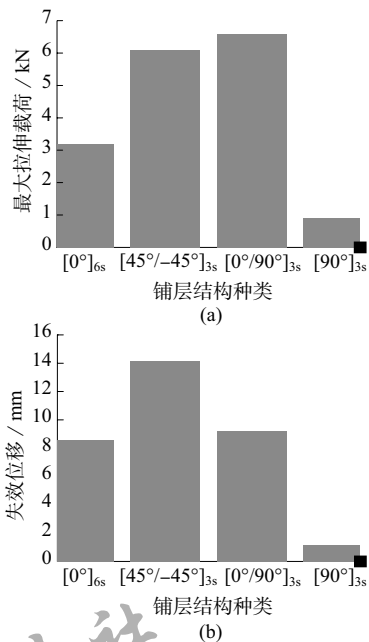
铺层结构: a— $[0^\circ]_{6s}$; b— $[45^\circ/-45^\circ]_{3s}$; c— $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$; d— $[90^\circ]_{6s}$

图3 4种铺层结构的螺栓连接层合板位移-载荷曲线。由图3可知, $[45^\circ/-45^\circ]_{3s}$ 铺层结构的层合板最大拉伸载荷最高, 为 6.7 kN; $[45^\circ/-45^\circ]_{3s}$ 铺层结构的层合板最大拉伸载荷也相对较高, 而其失效位移最大, 为 14.17 mm; $[0^\circ]_{6s}$ 铺层结构的层合板最大拉伸载荷和失效位移均低于上述两种铺层结构, 而 $[90^\circ]_{6s}$ 铺层结构的层合板最大拉伸载荷和失效位移均最小, 螺栓连接承载能力最低。

2.2 失效形式

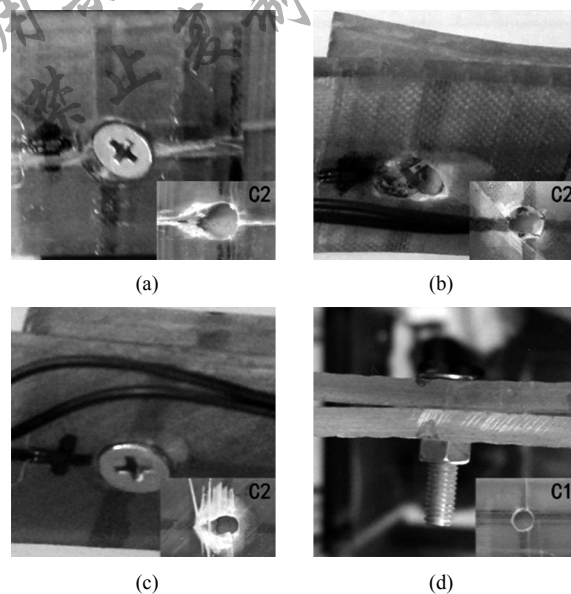
4种铺层结构的螺栓连接层合板拉伸失效情况如图5所示。

由图5a可知, $[0^\circ]_{6s}$ 铺层结构的层合板在拉伸过程中发生了剪切开裂失效, 层合板 C1 和 C2 在沿



a—最大拉伸载荷; b—失效位移

图4 4种铺层结构的螺栓连接层合板的最大拉伸载荷及失效位移



铺层结构: a— $[0^\circ]_{6s}$; b— $[45^\circ/-45^\circ]_{3s}$; c— $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$; d— $[90^\circ]_{6s}$

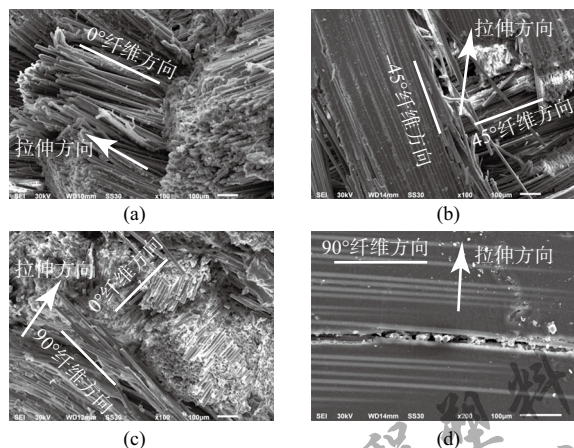
图5 4种铺层结构的螺栓连接层合板的拉伸失效情况

拉伸方向上出现明显的白色裂纹, 且随着载荷的增加, 螺栓发生了沿拉伸方向的倾斜, 层合板 C2 的孔周围在螺栓倾斜的地方有凹陷, 螺栓孔周围没有发生明显的翘曲现象; 由图5b可知, $[45^\circ/-45^\circ]_{3s}$ 铺层结构的层合板在拉伸过程中发生了承载失效, 其沉头螺栓发生明显的倾斜, 且在螺栓孔周围层合板 C1 和 C2 同时发生了以挤压点为凹陷中心的翘曲变形, 同时层合板 C2 的孔周围出现了沿纤维铺设方向的“剥离型”裂纹区, 且裂纹区面积较大; 由图5c可知, $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$ 铺层结构的层合板在拉伸过程

中发生了承载失效,层合板 C1 和 C2 的孔周围都发生了翘曲,在孔周围出现了粉末状的基体,且在层合板 C2 的螺栓孔周围出现明显的“月牙形”裂纹区;由图 5d 可知, $[90^\circ]_{6s}$ 铺层结构的层合板在拉伸过程中发生了净张力失效,层合板 C1 在孔的周围发生短时间的翘曲变形,并在垂直于拉伸方向上,伴随有明显的裂纹。

2.3 SEM 分析

采用 SEM 分别对 4 种铺层结构的层合板螺栓孔周围失效情况进行了分析,如图 6 所示。



铺层结构: a— $[0^\circ]_{6s}$; b— $[45^\circ/-45^\circ]_{3s}$; c— $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$; d— $[90^\circ]_{6s}$

图 6 4 种铺层结构的层合板螺栓孔周围失效情况的 SEM 照片

由图 6a 可知, $[0^\circ]_{6s}$ 铺层结构中 0° 纤维发生了沿宽度方向的倾斜,并伴随有纤维的逐层断裂,这说明,在拉伸过程中 0° 纤维承担了主要的载荷且该铺层结构发生了逐层失效,因此,当其承载能力达到最大后,载荷呈阶梯式的减小。

由图 6b 可知, $[45^\circ/-45^\circ]_{3s}$ 铺层结构中 -45° 层发生了纤维-基体界面失效,还伴随有少量的 45° 层纤维剪切断裂,这说明, -45° 层纤维和基体开裂引起的应力集中向 45° 方向扩展,使得 45° 层方向上的纤维发生断裂。 -45° 和 45° 纤维层交互承担载荷,增加了层间的剪切应力,使得该铺层结构的层合板有最大的失效位移^[11],因此,其连接的沉头螺栓失效的时间增大,增加了沉头螺栓连接的使用寿命。

由图 6c 可知, $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$ 铺层结构中 0° 纤维层受到了沉头螺栓沿拉伸方向的挤压, 90° 纤维层基体开裂并有部分纤维发生断裂。这说明, 0° 纤维层受到螺栓挤压产生的孔边应力集中向 90° 纤维层扩展, 90° 纤维层可减缓或者抑制失效面积的扩展,同时还可以吸收层间的剪切应力,阻碍了裂纹的扩

展,提高了整个结构承担载荷的能力,但当连接强度达到最大值时, 90° 纤维层发生断裂失效, 0° 层纤维失去了保护,导致螺栓连接的承载能力突然下降。

由图 6d 可知, $[90^\circ]_{6s}$ 铺层结构中有平行于纤维方向的裂缝且部分纤维伸出裂缝并伴随有大量的基体粉末,这说明, $[90^\circ]_{6s}$ 铺层结构的层合板在拉伸过程中基体与纤维发生了分离,因此该铺层结构中树脂基体承担主要的载荷,故其螺栓连接承载能力最低。随着施加载荷继续增大,沉头螺栓对层合板 C1 厚度方向的挤压力逐渐增大,使得孔周围应力分布多元化,阻碍了裂纹的扩展,因此,连接的承载能力出现了再增大。

3 结论

(1) 4 种铺层结构中, $[45^\circ/-45^\circ]_{3s}$ 和 $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$ 有较强的螺栓连接承载能力,其次为 $[0^\circ]_{6s}$, $[90^\circ]_{6s}$ 的螺栓连接承载能力最低。

(2) $[45^\circ/-45^\circ]_{3s}$ 铺层结构的螺栓连接层合板失效位移最大,为 14.17 mm; $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$ 铺层结构的螺栓连接层合板最大拉伸载荷最高,为 6.7 kN。

(3) 在拉伸失效实验过程中, $[45^\circ/-45^\circ]_{3s}$ 和 $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$ 铺层结构的层合板发生了承载失效, $[0^\circ]_{6s}$ 铺层结构的层合板发生了剪切开裂失效, $[90^\circ]_{6s}$ 铺层结构的层合板发生了净张力失效。

参考文献

- [1] 沈帆. 复合材料销钉连接的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011. Shen Fan. Study of composite on pinned-joint strength[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [2] 孙永波, 程小全, 张纪奎. 复合材料层合板沉头螺栓连接研究进展[J]. 航空制造技术, 2012(18): 75-78. Sun Yongbo, Cheng Xiaoquan, Zhang Jikui. Research on development of composites laminate countersunk bolt joint[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(18): 75-78.
- [3] 王耀先. 复合材料结构设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001. Wang Yaoxian. Structure design of composite materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001.
- [4] Subagia I D G A, Kim Y, Tijing L D, et al. Effect of stacking sequence on the flexural properties of hybrid composites reinforced with carbon and basalt fibers[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 58: 251-258.
- [5] Taheri-Behrooz F, Shokrieh M M, Yahyapour I. Effect of stacking sequence on failure mode of fiber metal laminates under low-velocity impact[J]. Iranian Polymer Journal, 2014, 23: 147-152.
- [6] Može P, Beg D. A complete study of bearing stress in single bolt connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 95: 126-140.

- [7] Gray P J, O' Higgins R M, McCarthy C T. Effect of thickness and laminate taper on the stiffness, strength and secondary bending of single-lap, single-bolt countersunk composite joints[J]. Composite Structures, 2014, 107:315–324.
- [8] Heimbs S, Schmeer S, Blaurock J, et al. Static and dynamic failure behaviour of bolted joints in carbon fiber composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013, 47:91–101.
- [9] Zhou Y, Nezhad H Y, Hou C, et al. A three dimensional implicit finite element damage model and its application to single-lap multi-bolt composite joints with variable clearance[J]. Composite Structures, 2015, 131:1 060–1 072.
- [10] McCarthy M A, Lawlor V P, Stanley W F, et al. Bolt-hole clearance effects and strength criteria in single-bolt, single-lap, composite bolted joints[J]. Composites Science and Technology, 2002, 62:1 415–1 431.
- [11] Guo H B, Wang B, Jia P R, et al. In-plane shear behaviours of a 2D-SiC / SiC composite under various loading conditions[J]. Ceramics International, 2015, 49:11 562–11 569.

我国塑料门窗发展存在的问题

我国的塑料门窗技术源于欧洲,相比较而言,国内塑料门窗发展相对落后,主要存在以下一些问题。

1 原材料问题

缺乏适宜的生产塑料窗的专用树脂以及相应的改性剂、助剂。原材料的品种、规格和性能尚不能很好地满足塑料窗生产的需要。

2 模具问题

为了适应我国今后各种不同用途、不同档次、不同类别的需求,模具的总需求量将是相当可观的。然而我国塑料门窗的模具设计才刚刚起步,目前水平尚较低,与国外的差距是:国产模具,挤出的型材产率低,一般仅及国外先进模具的2/3,甚至更低;国产模具挤出的型材质量不稳定。

3 组装能力

按一般要求,成窗组装能力与型材的挤出能力之比为1:(4~5),但目前我国型材的生产能力远远大于组装能力,由于组装能力不足,影响了挤出线生产能力的发挥。

4 产品设计

目前我国掌握型材截面、窗型、配套件的设计及应用与施工安装技术的能力和水平较低,采用国外代行设计及购进国外现行截面不一定符合国情,尚不能按市场需要设计系列化的产品。多数厂家只能靠引进时购进的几个基本规格组成整窗。由于型材设计的先天不足,尚难实现型材规格系列配套,因而缺乏市场的竞争力。

5 五金配件问题

在引进塑料异型材生产线时,对五金配件的引进重视不够,国内现有配件不耐腐蚀,在美观灵活、强度等方面性能也不尽理想,品种少,选择余地小,影响了塑料窗的推广和使用质量。

6 标准

产品标准工作跟不上,虽然型材标准目前已公布了国家标准草案,但成品窗标准仍然没有,部分企业套用国外标准,在测试手段、方法、测试设备上也跟不上需要。此外,安装验收标准与规范尚未制定,因而阻碍了产品的推广应用。

7 价格

塑料窗价格偏高是影响推广的重要因素。除原材料供应价格上涨因素外,还有成型工艺较复杂、开工率较低,产量达不到设计能力等原因,使单位产品的原材料消耗、能耗,折

旧摊销,人工费等支出相应增加,加上产品合格率低,再有各种税利等,从而加大了成本。

8 认识上的不足

塑料窗是一种新型建材,不少人对它的质量、性能、特点还不认识,不了解,例如对国外已定论的老化及燃烧问题仍有疑虑。设计、施工、使用部门缺乏使用新型建材的积极性,往往习惯于沿用传统常规作法,驾轻就熟,不愿担风险,生怕出问题。

(再生塑料网)

聚丙烯材料单独发泡令车门饰板大幅减重

在“Automotive World 2016”上,积水技术成型公司展出了质量减轻35%的车门饰板。通过使用聚丙烯材料单独发泡,实现了发泡前2倍的厚度,并获得了较高的刚性和强度。积水技术成型公司将尽快使其投入实用。

车门饰板从发泡前的890 g减轻到580 g,减轻了35%,同时还获得了内装品要求的外观和强度。

以往技术最多只能比非发泡品减轻20%,如果再提高发泡率,就会出现强度下降、残留发泡痕迹、影响外观等问题。

积水技术成型是积水化学工业的全资子公司,主营业务是树脂成型品的制造及销售。积水技术成型公司利用聚丙烯及添加剂等的材料配比技术,以及向模具内填充高压气体发泡的模具技术等,实现了发泡率的提高。

(环塑网)

质检总局抽查硬聚氯乙烯管材10批次不合格

2016年1月22日,质检总局公布了硬聚氯乙烯(PVC-U)管材产品质量国家监督抽查结果。结果显示,2015年第四季度,质检总局共抽查了河北、山西、内蒙古、上海、江苏、浙江、安徽、福建、山东、河南、湖北、湖南、广东、重庆、四川、陕西、甘肃、宁夏、新疆等19个省、自治区、直辖市108家企业生产的108批次PVC-U管材产品。

本次抽查依据GB/T 10002.1-2006《给水用硬聚氯乙烯(PVC-U)管材》等标准的要求,对PVC-U管材产品的规格尺寸(平均外径偏差、任意点壁厚偏差、平均壁厚偏差)、密度、维卡软化温度、纵向回缩率、落锤冲击试验、液压试验(20℃,1 h)、卫生性能(氯乙烯单体含量、铅含量、镉含量、高锰酸钾消耗量)等12个项目进行了检验。

抽查发现有10批次产品不符合标准的规定,涉及到平均外径偏差、任意点壁厚偏差、平均壁厚偏差、密度、纵向回缩率、维卡软化温度、落锤冲击试验、液压试验(20℃,1 h)项目。

(石油和化工网)