

热塑性碳纤维复合材料界面研究

林志勇¹, 曾汉民²

(1 华侨大学材料科学与工程学院, 泉州 362011;

2 聚合物复合材料及功能材料教育部重点实验室, 广州 510275)

摘要:综述了热塑性碳纤维复合材料界面研究的新进展。指出由于热塑性复合材料基体树脂是高聚物, 熔体粘度很大, 很难均匀地分布在增强纤维之中并与纤维形成良好浸渍, 存在界面结合不良的问题, 因此对其界面优化设计要有一个新的认识。界面上没有化学键结合, 界面结合不良, 但只靠短化学键的连接, 界面结合也不良, 必须有一个强韧结合的界面, 既有强结合又具有界面松弛能力, 同时又能与高聚物基体融合的界面缓冲层的优化设计。对于 Plueddemann 偶联剂的概念中偶联剂“必须成为树脂的一部分”, 作者认为最好的方法就是树脂本身, 即它既与纤维化学键键合, 又与树脂良好相容, 界面匹配, 这将是热塑性复合材料界面层设计的一种新方法。

关键词:热塑性; 碳纤维复合材料; 界面匹配设计

引言

热塑性纤维复合材料可以直接在温度和压力作用下模压或挤出、注射等快速成型, 具有制造周期短, 制品断裂伸长率较大, 吸水性小, 损伤容易修补、零部件之间的连接可以采用各种焊接方法, 且其废料和边角料可回收使用等优点。高性能的热塑性树脂具有较高的热形变温度, 有的可高于 260℃, 而且还可以在成型后采用电子束、 γ 射线、等离子体辐射等方法使它们交联, 从而进一步提高其耐热性。因此上个世纪 70 年代开始, 热塑性纤维复合材料的研究便引起人们的广泛重视。围绕着如何提高纤维复合材料性能方面, 人们从以下四个方面开展了大量的研究工作: (1) 合理的复合工艺; (2) 纤维的合成与选择; (3) 高性能树脂的发展; (4) 界面层与界面层设计^[1]。在固定了纤维与基体的体系中, 界面层的作用便显得非常重要。

1 界面层的提出与研究

纤维复合材料有机地结合了纤维和基体材料的优点, 外界的载荷通过基体与纤维界面的剪切作用而传递给纤维, 纤维承担起主要的载荷, 使复合材料整体呈现出高强度、高模量的特征^[2,3]。在纤维增强树脂基复合材料中, 界面层在复合材料中所占的比例很大, 纤维(5~7 cm)复合材料每 100 cm³ 体积中, 界面面积为 3~7×10⁶ cm², 因此研究纤维与基体之间应力传递桥梁的界面作用, 研究界面层优化设计及其与复合材料性能之间的关系, 即复合材料界面工程, 是复合材料研究的一个重要领域, 其重要性也得到了广泛的承认^[4]。

基金项目:国家自然科学基金(59602007); 福建省自然科学基金(E9910023, E0110023, E0210022)和聚合物复合材料及功能材料教育部重点实验室访问学者基金(1999-2-01)

作者简介:林志勇(1964—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为复合材料, E-mail: linzy@hqu.edu.cn

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

对于界面,普遍的认同是纤维与基体之间不是一个简单的面,而是介于两相之间有一定厚度的区域,其组成、能量、结构和性能是连续地从一个相向另一个相过渡变化的。以 Teocaris 等^[5]及 Drzal 等^[6]首先定义界面相(Interphase)这一术语为标志,纤维复合材料的研究进入了一个迅速发展的阶段。以充分认识纤维处理过程和复合材料加工工艺对界面层结构的决定作用,以及三维的界面相物质与复合材料性能之间关系为目的的界面研究,成为材料科学与工程学科的一个重要研究领域^[4]。Drzal 提出复合材料界面结合的模型图^[6],认为复合材料界面作用力主要靠三种力,即化学键力、范德华力、机械嵌合力,同时认为纤维增强复合材料界面应包括:(1)与增强纤维本体性能不同的纤维表面过渡区;(2)具有一定形貌及化学特性的纤维表面层;(3)纤维表面吸附层;(4)纤维表面上浆剂或涂层;(5)与本体基体性能不同的基体表面过渡区等众多层次,以上某一层次发生变化都将导致复合材料结构及性能的改变。对于热塑性碳纤维复合材料界面的研究主要分成两部分进行,其一:碳纤维表面结构与改性对纤维与基体相互作用的影响。两相界面层的范德华力比化学键力小得多,属于次价键力,两相界面之间的机械嵌合基于基体树脂流入和填充碳纤维表面存在的微孔孔隙和氧化刻蚀的微斑凹凸嵌合,固化后具有锚锭效应。碳纤维经表面处理后比表面积略有增加,粗糙度、表面活性官能团增加,有利于提高纤维与基体的相互作用,但强化锚锭效应必然要扩大碳纤维的比表面积和表面粗糙度,结果会导致碳纤维拉伸强度下降,这是不可取的。但是两相界面之间的粘接是一复杂过程,仍需进一步研究。其二:组成和热历史对界面层结构和性质的影响及对复合材料性能的影响。以下作者着重讨论第二部分内容。

2 热塑性纤维复合材料界面研究

异相物质表面结构和形貌对聚合物聚集态的影响是高分子领域长期研究的一项基础问题,主要分成非晶性热塑性及结晶性热塑性基体复合材料界面研究。

2.1 非晶性热塑性基体复合材料界面研究

对于非晶树脂为基体的热塑性纤维复合材料,Kardos 等^[7]报道了石墨纤维/聚碳酸酯复合材料退火后性能明显提高,原因是在接近 T_g 的温度下退火一段时间后,样品形态开始变化,包括逐渐形成层状结构,随后发展成球晶结构,进一步观察到聚砜也有相似的现象。Brady 和 Porter^[8]研究了碳纤维体积分数不同时,不同分子量聚碳酸酯界面层结构对 CF/PC 性能的影响,发现熔体温度和停留时间延长时,盘横向断裂韧性、横向拉伸强度和单缺口短裂韧性可以增大一倍,且分子量越高,熔体温度和停留时间的影响越显著。Porter 的研究表明,PC 分子链在碳纤维表面的吸附及吸附水平的界面粘结是决定 CF/PC 复合材料性能的关键因素。同时吸附程度的提高改变了 PC 界面层的结构和性质,增强了界面层物质与纤维的联结。Moginger 等^[9]研究 GF/PC 复合材料时发现,纤维表面附近出现一层因载荷历史与本体不同的物质,该层物质的出现也是吸附过程导致的与基体不同的界面层。因此,物理吸附及物理化学作用是非晶性热树脂复合材料界面层研究的一大内容。

2.2 结晶性热塑性复合材料界面研究

2.2.1 碳纤维表面对复合材料结晶效应的影响 对于结晶性热塑性基体,纤维表面对聚合物基体产生结晶成核效应,在纤维的表面附近形成横晶,从而改变复合材料的界面结构对复合材料的界面应力传递行为及破坏产生很大影响,是研究界面形成与界面效应最丰富的内容之一。

许多科学工作者在不同研究体系中分别研究了横晶的形成与产生机理^[10~38]。Bessell 等^[10]首先观察到碳纤维/尼龙 6 的横晶现象,曾汉民等^[25~33]发现结晶性热塑性高聚物作为树脂基体时,纤

维对结晶性高聚物基体呈现明显的界面结晶成核效应,形成横晶,不同结晶高聚物基体在不同结晶条件将呈现不同的界面结晶效应特征,不同纤维诱发横晶的能力不同,相同纤维诱发不同树脂产生横晶的能力也不一样,结晶形态会影响界面效应,并用 TEM 证明了横晶与球晶的基本结构是相同的,同时纤维与结晶性高聚物基体形成横晶使其纤维-树脂之间有良好的界面粘结。但是,在纤维表面的高聚物横晶和远离纤维表面的基体高聚物球晶之间往往又出现新的界面区域,而且此界面区域很容易在一定过冷度时的结晶过程出现裂纹,从而导致容易出现基体本身的断裂破坏,而不是出现纤维与高聚物基体之间的界面脱粘破坏行为^[39]。

2.2.2 基体树脂改性对复合材料界面的影响 曾汉民等发现^[25~27],一方面改变基体树脂 PPS 的结晶形态,有助于消除结晶效应所引起的内应力,也会明显影响复合材料的界面粘结,固相交联的结晶性 PPS 本身的内聚强度小,即使其与碳纤维之间的界面粘结很好,但其复合材料的层间剪切强度很小,并且出现基体近似于脆性断裂破坏的特征。然而使 PPS 转变为无定形,则使复合材料的层间剪切强度大大提高,而且出现基体延性断裂特征。另一方面,通过树脂基体的改性和改进复合工艺条件,同样可以有效地改善复合材料的界面粘结状态和改变其断裂破坏行为。如通过弹性体对环氧树脂的改性可提高其与纤维的界面粘结及抗冲击韧性,通过对热塑性树脂的共混改性,特别是形成半互穿网络(SIPN)结构,可有效地提高界面粘结性能^[40~43],聚砜树脂与碳纤维的界面粘结差,其破坏是界面粘脱破坏,然而采用双乙炔端基砜(ESF)与聚砜树脂(PSF)共混改性在复合工艺过程中形成 SIPN,就可提高碳纤维复合材料界面粘结性能,使断裂破坏出现在树脂基体层而非界面粘结。

2.2.3 热-力历史对复合材料界面的影响 在复合材料中纤维和树脂之间界面出现横晶时,具有界面横晶层比球晶层界面的复合材料具有较高的模量,而且在屈服点前断裂,其拉伸强度、剪切强度均高于球晶层,但却有较低的断裂伸长和断裂能^[44]。因此,界面横晶的形成提供了一个给定的基体和纤维复合体系,通过热处理可以有效地提高其剪切屈服强度,使复合材料所受的应力有效地从基体传递到纤维,从而提高复合材料性能的途径。改变热-力历史会明显影响复合材料的力学性能:(1)产生横晶界面有助于消除复合材料的剩余热应力行为,如碳纤维/PET 和碳纤维/尼龙 66 在加热后的冷却过程,因 PET(或尼龙 66)的结晶而收缩出现残余热应力^[45],但碳纤维/J 尼龙共聚物复合材料在结晶完成的过程中并不立即出现残余热应力,这里虽然基体因结晶而收缩,但 J 尼龙共聚体在结晶后的热膨胀系数大于结晶的 PET 和尼龙 66。然而其最终的剩余热应力仍较高;(2)冷却速度变化改变基体与界面层结构,从而影响复合材料的力学性能,如冷却速率增大,球晶尺寸减小导致 GF/PET 基体韧性增大^[46]。界面粘结良好的 APC-2 混杂板,冷却速率从 30℃/min 提高到 63℃/min 时,发生由内聚型破坏的界面破坏模式转变^[47]。又如冷却速率变小或退火处理使球晶变大导致 GF/PET 球晶间微裂纹增多,使基体变脆,从而使复合材料层间剪切强度下降,APC-2 混杂板的界面破坏模式发生变化^[48]。退火处理在结晶度相同的情况下有助于基体在纤维表面的成核,Tregun^[49]的工作表明,在基体结晶度相同的情况下,等温结晶中形成的更为有序的形貌使静态和疲劳特性高于非等温时的性能。他们认为半结晶热塑性复合材料机械性能有关的两种微结构因素一般的结晶度与结晶有序程度,热历史对前者的影响要明显大于后者,结晶度会影响 CF/PEEK 的动态与静态机械力学性能,同时 CF/PEEK-400-IC(310)-RT 在等温结晶过程中呈现熔融双峰,这种行为一般被认为是动力学上稳定的结晶,但在相对较低的等温结晶温度下是不会形成熔融双峰的。熔融双峰行为一般是代表规整而有序的结晶。Li 等^[50~58]的工作进一步表明界面石墨-PEEK 相互作用的提高,是决定界面韧性本征值的首要原因,同时热固性聚合物复合材料的软、硬界面概念对

结晶聚合物材料不复适用;当微晶以纤维直接诱导方式开始增长,CF/PEEK 板材可表现为硬界面行为,同一组成和相近纤维分布的材料,在其它加工历史下,则倾向于因面向成核和热应力作用而呈现软界面特性。

以上工作表明,复合材料界面层与热塑性聚合物基复合材料的结构及性能有显著的关系,不仅影响到横晶的形成,而且通过热处理还会影响基体的结晶、熔融并影响到复合材料在不同的热历史下形成不同的软、硬界面特征。

2.2.4 热塑性复合材料界面匹配设计的影响 热塑性复合材料基体树脂是高聚物,熔体粘度极大,很难均匀地分布在增强纤维之中并形成浸渍良好的复合材料,而且还存在界面结合不良的问题。因为热塑性树脂基体如聚乙烯、聚丙烯、聚醚醚酮等大多缺乏活性官能团,很难与增强纤维或偶联剂进行界面反应形成化学键,因而难以得到性能良好的复合材料,而热固性复合材料界面研究清楚地表明了界面化学键键合对提高热固性复合材料综合性能起着至关重要的作用^[59,60]。因此近年来,国内外普遍的看法趋向于认为在界面上没有化学键不行,但只靠短化学键的连接也同样不行,必须有一个强韧结合的界面,既有强结合的一面,同时又具有界面松弛能力的一面,依靠它将增强材料和基体结合成一个整体,有效地传递应力,共同承受外界的载荷。研究表明,最有效的界面优化方式是在增强材料的表面接枝适当厚度的高分子链形成模量适度又易于与高聚物基体融合的界面缓冲层^[61]。

Plueddemann^[62,63]认为有效的偶联剂“必须成为树脂的一部分”,它可与纤维表面间形成“可逆水解”的二维界面的界面层结构,从一个方面揭示了界面润湿的重要性,另一方面也证明了界面化学键的重要性,为界面层设计提供了一条可行性路线。对于偶联剂“必须成为树脂的一部分”,作者认为最好的方法就是树脂本身,因为它既能与纤维化学键键合,又与树脂良好相容,界面匹配,它将成为热塑性复合材料界面层设计的一种新方法。

碳纤维表面引入化学键键合并具有长化学键的界面匹配设计对复合材料界面影响的结果表明^[64~66]:碳纤维表面阴离子接枝尼龙6导致界面匹配的CF/PA6复合材料中,两相界面相互作用增大,接枝碳纤维成核作用不如未接枝的碳纤维复合材料,但其结晶速率仍比纯尼龙6的大。碳纤维的加入和其表面接枝改性会导致PA6等温结晶所得晶体的结构,包括晶型、相对结晶度等的极大变化,该影响与结晶的温度有关。在较低的结晶温度时,CF表面的诱导作用有利于基体形成稳定的 α 晶,其次为 γ^* 晶,抑制 γ 晶,而CF表面阴离子接枝尼龙6后,CF与PA6的界面相互作用提高,阻碍形成稳定的 α 晶。在较高温度下,碳纤维表面的诱导作用减弱,CF/PA6与纯PA6一样主要形成 γ 晶型,而接枝改性CF使得基体形成亚稳定的 γ^* 型结晶,同时复合材料的表现相对结晶度也显著减小。界面匹配的CF/PA6复合材料具有较高的诱发横晶能力,同时诱发的横晶致密度及完整性高,其复合材料剪切破坏呈部分非界面脱粘破坏。

参考文献:

- [1] 曾汉民. 材料工程, 1a: 1989, 5; 6; 1c: 1990, 1; 6.
- [2] Agarwal B D, Broutman L J. Analysis and Performance of Fiber Composites (2nd Ed). New York: John Wiley and Sons. 1990.
- [3] Park S J, Seo M K, Rhee K Y. Mater Sci Eng, A; Structural Materials; Properties, Microstructure and Processing, 2003, A356(1-2); 219.
- [4] 曾汉民. 树脂基复合材料界面工程, 见: 材料表面与界面, 李恒德, 肖基美主编, 北京: 清华大学出版社, 1990; 271.
- [5] (a) Teocaris P S, Papanicolaou G C, Paipetis S A. Colloid Polym, Sci, 1978, 256(7); 625; (b) Teocaris P S, Spathis G, Kefalas B. *ibid.*, 1982, 260; 837.
- [6] (a) Drzal L T, Rich M J, Koenig M F, et al. J Adhes, 1983, 16, 133; (b) Drzal L T, SAMPE J, 1983, 19(Sep/Oct); 7.

- [7] Kardos J L, Cheng F S, Tolbert T L. *Polym Eng & Sci*, 1973, 13(6): 455.
- [8] (a) Brady R L, Porter R S, D'Onovan J A. *J Mater Sci*, 1989, 24: 4138; (b) Brady R L, Porter R S. *Dev Sci Techn Compos Mater*. (4th Eur. Conf. On Composite Materials, Sep 25~28, 1990, Stuttgart FRO), Fuller J, et al (Eds), London: Elsevier, 1990: 1873.
- [9] Moginger B, Muller U, Eyerer P. *Compos*, 1991, 22: 43.
- [10] Bessell T, Shortall J B. *J Mater Sci*, 1975, 10: 2035.
- [11] (a) Carvalho W S, Bretos R E S. *Eur Polym J*, 1990, 26: 817; (b) Folkes M J, Kalay, Ankara A. *Compos Sci Techn*, 1993, 46: 77.
- [12] Evaux E, Habert B. *Polym Comm*, 1991, 32: 464.
- [13] Thomason J L, Van Rooyen A A. *J Mater Sci*, 1992, 27: 889.
- [14] Thomason J L, Van Rooyen A A. *J Mater Sci*, 1992, 27: 897.
- [15] Chen E J H, Hsiao B S. *Polym Eng Sci*, 1992, 32: 2280.
- [16] Magdalena A, Maria D B W. *J Mol Struct*, 1994, 325: 137.
- [17] Klein N, Selivansky D, Marom G. *Polym Compos*, 1995, 16: 189.
- [18] Campbell D, White J R. *Angew Makromol Chem*, 1984, 122: 61.
- [19] Wang C, Liu C R. *Polymer*, 1997, 38: 4715.
- [20] Harel H, Marom G. *Acta Polym*, 1998, 49: 583.
- [21] Wang C, Li U C R. *Polymer*, 1999, 40: 289.
- [22] Lin C W, Du Y C. *Mater Chem Phys*, 1999, 58: 268.
- [23] Pompe G, Mäder E. *Comp Sci Techn*, 2000, 60: 2159.
- [24] Assouline E, Pohl S, Fulchiron R, et al. *Polymer*, 2000, 41: 7843.
- [25] 曾汉民. 科学通报, 1982, (2): 87 (中文版); 1982, 27(12): 1289 (外文版).
- [26] 曾汉民, 何国仁. 中国科学(B 辑), 1983, (4): 289 (中文版); 1984, 27(4): 333 (外文版).
- [27] Zeng H M, He G. *Angew Makromol Chem*, 1984, 127: 103.
- [28] 曾汉民, 冯力. 工程塑料应用, 1983, 2: 9.
- [29] 曾汉民, 孔柏林. 高分子学报, 1989, (1): 75.
- [30] 张志毅, 曾汉民. 中山大学学报(自然科学版), 1990, 29(2): 86.
- [31] Zhang Z Y, Zeng H M. *Eur Polym J*, 1993, 19: 1647.
- [32] Zhang Z Y, Zeng H M. *J Appl Polym Sci*, 1993, 48: 1987.
- [33] Zeng H M, Zhang Z Y, Peng W, et al. *Eur Polym J*, 1994, 30: 2354.
- [34] Lustiger A. *Polym Compos*, 1992, 13: 408.
- [35] Incardona S D, Di Maggio R, Fambri L, et al. *J Mater Sci*, 1993, 28: 4983.
- [36] Fambri L, Incardona S D, Migliaresi C, et al. *J Mater Sci*, 1994, 29: 4678.
- [37] Aaron J G, Paul J P. *J Adv Mater*, 1994, 7: 51.
- [38] 崔新宇, 周晓东. 纤维复合材料, 2000, 1: 3.
- [39] (a) Lustiger A. *SAMPE J*, 1989, 12(6): 39; (b) Lustiger A, Marzinsky C N, Mueller R R, et al. *Polym Mater Sci Eng*, 1997, 76: 170.
- [40] Mai K C, Zeng H M. *Polymers and Biomaterials* (Ed. by Feng H, et al.), Elsevier Science Publisher B V, 1991: 155.
- [41] Su H Z, Zeng H M. (SIPN). *Polymers and Biomaterials* (Ed. by Feng H, et al.), Elsevier Science Publisher B V, 1991: 161.
- [42] 苏浩志, 曾汉民. 宇航材料工艺, 1990, (3): 58.
- [43] 麦堪成, 曾汉民. 高分子材料科学与工程, 1991, (5): 41.
- [44] Voss H, Friedrich K. *Tribology International*, 1986, 19(3): 145.
- [45] Naim J A, Zoller P. *ICCM-V proceedings*, 1985: 931.
- [46] Davies P, Cantwell W J. *Compos*, 1994, 25: 869.
- [47] Vu-Khanh T, Denault J. *J Reinf Plast Compos*, 1993, 12: 916.
- [48] Ye L, Friedeich K. *Compos*, 1993, 24: 557.
- [49] Tregun A, Harel H, Marom G. *J Mater Sci Lett*, 1994, 13(5): 329.
- [50] 李铁骑, 广州中山大学博士学位论文(1997).
- [51] Li T Q, Zhang M Q, Zeng H M. *Composites Part A*, 2001, 32(12): 1727.

- [52] Li T Q, Zhang M Q, Zeng H M. *Prog Nat Sci*, 2001, 11(4): 241.
- [53] Li T Q, Zhang M Q, Zeng H M. *Compos Sci Techn*, 2000, 60(3): 465.
- [54] Li T Q, Zhang M Q, Zeng H M. *Polymer*, 2000, 41(1): 161.
- [55] Li T Q, Zhang M Q, Zeng H M. *J Mater Sci Lett*, 2000, 19: 837.
- [56] Li T Q, Zhang M Q, Zeng H M. *Polymer*, 1999, 40(15): 4307.
- [57] Li T Q, Zhang M Q, Zeng H M. *J Mater Sci Lett*, 1999, 18(22): 1861.
- [58] 李铁骑, 章明秋, 曾汉民. *材料研究学报*, 1999, 13(6): 606.
- [59] (a) Koenig J L, Shih P T K. *J Colloid Interface Sci*, 1971, 36: 247; (b) Ishida H, Koenig J L. *ibid*, 1978, 64: 555; (c) Ishida H, Koenig J L. *ibid*, 1978, 64: 565; (d) Hoh K P, Ishida H, Koenig J L. *ibid*, 1987, 9: 151.
- [60] (a) Garton A. *J Polym Sci, Polym Chem Ed*, 1984, 22: 1495; (b) *J Polym Prepr (Am Chem Soc, Dept Polym Chem)*, 1984, 25(2): 163; (c) Garton A, Daly J H. *Polym Compos*, 1985, 6: 195.
- [61] 胡福增, 郑安呐, 张群安. *聚合物及复合材料的表界面*, 北京: 中国轻工业出版社, 2001.
- [62] Plueddemann E P. *Silane Coupling Agents*, New York: Plenum Press, 1982.
- [63] (a) Erickson P W, Plueddemann E P. *Interfaces in Polymer Matrix Composites (Composite Materials, Vol. 6)*, Plueddemann E P (Ed), New York: Academic Press, 1974; (b) Plueddemann E P. *Ibid*, 1974: 173.
- [64] 林志勇. 广州中山大学博士学位论文(2002).
- [65] 林志勇, 蔡力锋, 钱浩, 等. *高分子材料科学与工程*, 2004, 20(2): 40.
- [66] 林志勇, 杨俊, 肖凤英, 等. *高分子材料科学与工程*, 2004, 20(2): 44.

Interphase in Thermalplastic/carbon Fiber Composites

LIN Zhi-yong¹ ZENG Han-min²

(¹. College of materials science and engineering, Huaqiao University, Quanzhou, 362011, China;

² Research Institute of Material Science, Zhongshan University, Guangzhou, 510275, China)

Abstract: The recent advance of research in the interphase of thermalplastics/carbon composites was reviewed in this paper. As matrix of composites, thermalplastics were hardly to disperse homogeneously in the reinforced fiber to achieve eximious soakage for the reason of high melting viscosity, the coalescent of interphase was not satisfying. Thus there should be a new cognition to the optimization of interphase. The interphases would show bad combination neither for the lack of chemical bonds, nor for the connection with short chemical bonds. Hence an interphase with not only strong combination but also excellent relaxation ability should be optimized, meanwhile, the good miscibility with matrix should also be achieved. As the concept from Plueddemann "coupling agent should be parts of matrix" was concerned. We think that the best one was polymer itself which acted as matrix in the composites. Namely, it not only bonded with fiber but also be miscible with matrix. Therefore, this would be a new method for the optimization of interphase in composites.

Key words: Thermal plastic; Carbon fiber composites; Matching design of interface