第8卷 第2期　　复合材料学报　　Vol.8 No.2
1991年 4月　　ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA　　April 1991

纤维长径比对环氧复合材料动态力学性能的影响

柯毓才　李振福*　潘平来　崔增普

(北京中国科学院化学研究所，100080)

摘要：本文研究不同纤维长径比对碳纤和玻纤环氧复合材料动态力学性能的影响。结果表明，随长径比的增大，材料的力学内耗下降而模量增加；在低长径比，碳纤复合材料的内耗值比玻纤复合材料的高。达到一定长径比后，内耗值和模量值趋于连续纤维复合材料的值。温度越高，基体模量下降，达到相同纤维刚度的使用效率所需要的长径比就越大。用材料在外载荷或热缩应力作用下，纤维及其界面上沿纤维方向上的应力大小和分布随长径比的变化规律解释上述现象。

关键词：长径比，内耗，界面，热缩应力

引　言

短纤维热塑性复合材料由于可以用注射成型方法进行加工，给生产上带来很多方便和发展。近年来，新型的反应性增强热固性注射成型（RRIM）工艺的发展和超高强氧化铝或碳化硅晶须热固性复合材料的发展，使短纤维热固性复合材料的研究和制造愈来愈被人们所重视。

短纤复合材料的性能除受到组分性能、含量和成型工艺等的很大影响外，纤维长径比对它的影响也是很大的。Anderson[1]等人曾研究了长径比对硼纤维复合材料模量的影响。发现模量随长径比的增大而增加，在一定长径比后，材料的模量趋于平衡。由此可见，研究短纤维长径比对材料性能的影响，对于选择最佳的纤维长度，取得与长纤复合材料性能接近的短纤复合材料，且便于加工，降低成本具有重要的实际意义。但Anderson等人在实验中采用了以钨为底丝，直径为102微米的硼纤维。当长径比为50时，纤维长度已达5.1mm。短切这种长度的纤维并不难。倘若采用直径较细的碳纤维和玻璃纤维时则要困难多了。因为当长径比为50时，碳纤维长度只有0.35mm左右。要获得大量这么短的纤维，并保证其长径比均一确实要费时间和采取一定的办法的。另外，有关纤维长径比对复合材料阻尼特性的影响也

本文1990年4月20日收到，*北京航空学院八六年毕业论文学生

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

很少报道。因此，为搞清常用纤维尺寸对内耗和模量的影响，本文研究了碳纤与玻纤环氧复合材料体系。并考虑温度对模量趋于平衡时长径比的影响。

实验部分

样品：采用市售玻璃纤维，其直径d＝10微米，杨氏模量$E_{f.G}=5.35\times10^4$兆帕。碳纤维采用电沉积碳纤，d＝7微米，$E_{f.C}=1.95\times10^5$兆帕。环氧648为基体。环氧树脂与固化剂三氟化硼单乙胺的重量比为100:3。将纤维、树脂和固化剂等混合后，在80℃抽真空1小时，然后在150℃压制固化1小时，170℃固化2小时。采用两个或两个以上单面刀片叠合起来将纤维进行切割，来获得不同长径比的纤维。即通过两个刀片中间夹入一定厚度的薄片控制短纤维的长度。这种切割法所得的纤维长径比较均一。如图1所示。

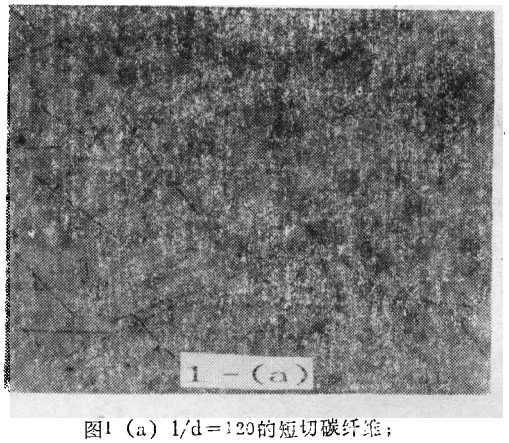
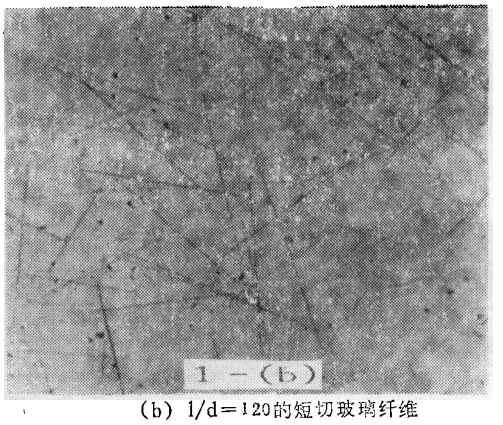


图1 (a) l/d＝120的短切碳纤维；



(b) l/d＝120的短切玻璃纤维

玻纤复合材料的纤维体积含量为40%。碳纤复合材料体积含量为30%。

采用振簧仪[2]测定复合材料的动态力学性能。测温范围从25℃至220℃左右。升温速率为1.5℃/分。

结果与讨论

(一) 纤维长径比对复合材料力学损耗的影响

从复合材料动态内耗温度谱图2和图3看出，无论是碳纤维还是玻璃纤维，在转变区温度以下，其复合材料的内耗均随长径比的增大而下降。在转变区，由于玻璃化转变温度各不相同，曲线相互交错较为复杂。但从总的趋势看，除玻纤长径比为200的样品外，其余也有同样的规律。在图2中，还画出了单向连续碳纤环氧复合材料的温度谱。它的内耗值比任何长径比样品都小，可看作是l/d趋于∞。若将31℃复合材料的内耗值与长径比作图，分别可得到图4和图5。图中的虚线表示31℃时，复合材料中基体对内耗的贡献，即$tg\delta'_c=tg\delta_m(1-V_f)$。由此看出，两种复合材料在转变区温度以下，出现了附加的内耗值。达到一定长径比以后，内耗值趋于平衡，与单向连续复合材料的内耗值接近。为讨论方便，称这一纤维

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

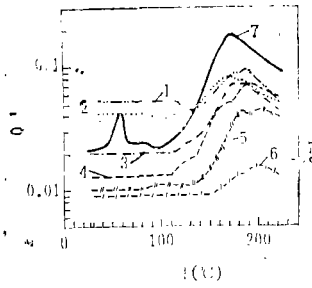


图2　碳纤复合材料动态内耗温度谱
长径比l/d：1-50；2-120；3-270；4-400；5-1400；6-连续单向板；7-环氧基体

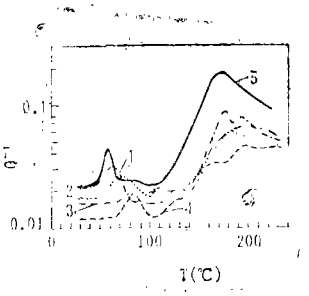


图3　玻纤复合材料动态内耗温度谱
长径比l/d：1-50；2-120；3-200；4-400；5-环氧基体

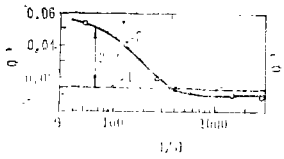


图4　碳纤复合材料内耗与长径比的关系（31°C）
1-复合材料中树脂的内耗值$tg\delta_m(1-V_f)$；
2-复合材料附加内耗
3-单向连续碳纤复合材料的内耗值

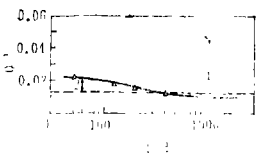


图5　玻纤复合材料内耗与长径比的关系（31°C）
1-复合材料中树脂的内耗值$tg\delta_m(1-V_f)$；
2-复合材料附加内耗

长径比为平衡长径比。之所以出现上述规律，可能是与外界载荷作用下，纤维及其周围基体在材料内部所受应力和应变的变化[3]有密切关系。如图6所示。这时纤维上承受的拉应力由末端处为零增加到中间处为最大。而纤维与基体界面处的剪应力则从最大值衰减到零。超过临界长径比$(l/d)_c$后，纤维中间区承受了纤维的最大应力值而不再变化，除末端附近对模量贡献小些，其他区域由于几乎承担了外界的负荷，而充分发挥了纤维刚度的性质。相反，剪应力在末端处达到最大值而不再变化，中间大部分区域为零。于是，由末端到中心处的平均剪应力随长径比的增大而下降。因此，由剪应力的作用，纤维／基体和基体／基体间产生相对滑动或摩擦引起材料力学内耗增加的贡献，将随长径比的增加，平均剪应力的下降而下降。达到平衡长径比时，平均剪应力已经很小，内耗的贡献主要由基体的拉应力为主。于是，材料的内耗值也趋于恒定，并在单向连续纤维复合材料中内耗达到最小值。在转变区以下的温度区，这一内耗值趋于$tg\delta(1-V_f)$值。碳纤维与树脂的粘接性能比玻纤／树脂间的差，在固化时热缩应力作用下会有一部分脱粘，在这种剪应力作用下可能还会进一步脱粘并产生较大的滑动和摩擦，结果，在长径比不大时，内耗值比玻纤复合材料的大。如图4和图5所看到的附加内耗值大。

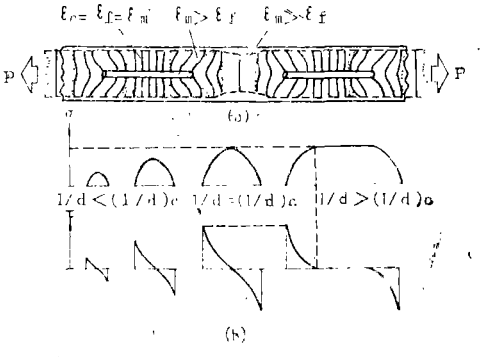


图3　(a) 短纤维附近基体应变的情况
(b) 短纤维受力时沿纤维方向上的应力分布情况

长径比较小时，材料的内耗相对高些，还有可能与相邻纤维末端间的应力集中有关。在这一区域基体的应变值比其他区域大，应变振幅大会提高内耗值。同体积含量者相互比较，长径比小的纤维末端数多，对内耗的贡献也大。但与剪切产生摩擦对内耗的贡献相比，这种对内耗的贡献可能是次要的。

在转变区，由于树脂的链段运动，基体模量的变化等改变了纤维及其周围的应力，使情况变得复杂些。尽管材料的内耗值仍随纤维长径比的增加而降低，在平衡长径比时也趋于恒定，但其内耗值比复合材料中基体相的内耗值要小，即$tg\delta_c<tg\delta_m(1-V_f)$。

在图2和图3中，还可以看到在转变区除环氧基体的主转变峰外，在其高温侧还出现了界面峰[4]。但在本研究体系中，仅当长径比超过一定值后，界面峰才十分明显。如玻纤长径比

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

要大于50以上，而碳纤在这一长径比则已明显看出。随长径比的增加，界面峰高度增加，而主转变峰下降。到平衡长径比后，由于纤维含量较高，主转变峰已不明显了[4]。这一界面峰的产生可能与热缩应力在纤维与树脂界面上产生具有一定取向的界面层有关[4]. 在高温固化后冷却时，碳纤与基体间的界面上产生的热缩应力比玻纤复合材料的大，更易形成界面层。故在低长径比时，易出现界面峰。这里热缩应力在纤维方向上的分布形式与上述在外载作用下纤维及其界面上的应力分布是类似的，只是大小和方向有所不同。因此，随长径比的增加，热缩应力增加，界面层增大，界面峰将升高而主转变峰下降。当然，热缩应力的影响因素很多，其变化也是复杂的。因而主转变峰和界面峰高度的变化也极其复杂。

（二）纤维长径比对复合材料实数模量的影响

图7和图8表示不同长径比碳纤和玻纤环氧复合材料的模量温度谱。可以看到在很宽的温度范围内，复合材料的实数模量随长径比的增大而增加。图 9 表示31℃时两种复合材料的模量E_c与长径比的关系。由图看出，在低长径比时，由于纤维上承受的平均拉应力较小，它的刚度性质被使用的效率较低，因此，复合材料的模量较低。随长径比的增大。纤维承受的平均拉应力增加，因而，材料的模量也提高。达到一定长径比之后，由于这一平均拉应力趋于最大值，纤维承担了外载荷的绝大部分，因而，纤维的刚度性质被充分发挥出来，材料模量的增加也慢慢趋于平衡，或愈来愈接近于连续纤维复合材料的模量值。另外，从图中还看出，由于本样品中的碳纤含量（40%）少，且它与基体的粘接性能较差，甚至在热缩应力作用下，还会引起脱粘，因此，在低长径比时不能充分发挥碳纤维刚度的性质，造成其复合材料在一定长径比以前不如玻纤复合材料的模量高。而在此之后，纤维大部分区域承受最大拉应力的作用，它的刚度性质被充分发挥出来，才比玻纤复合材料的模量高。

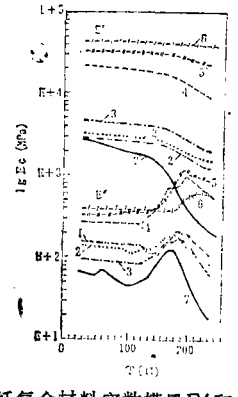


图7 碳纤复合材料实数模量E′和虚数模量E″的温度谱
长径比l/d：1-50；2-120；3-270；4-400；5-1400；6-单向连续复合材料；7-环氧基体

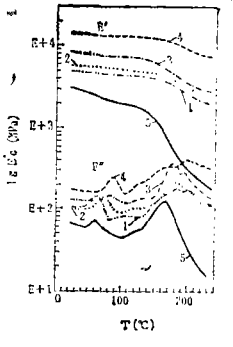


图8 玻纤复合材料实数模量E′和虚数模量E″的温度谱
长径比l/d：1-50；2-120；3-200；4-400；5-环氧基体

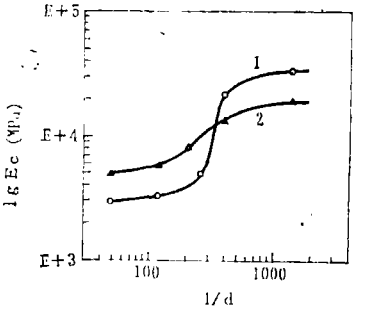
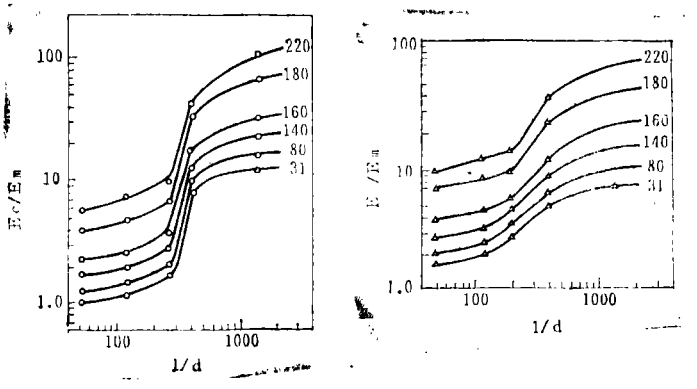


图9 31°C时两种复合材料模量E_c与长径比l/d的关系
1-碳纤复合材料；2-玻纤复合材料

图10表示碳纤和玻纤复合材料不同温度下，相对模量E_c/E_m与长径比间的关系。尽管不同温度的曲线形状相似，并在转变区（140℃—180℃）相对模量随温度的变化都较大. 但可以发现两种材料在高长径比时的曲线随温度增加略微往上翘，即温度越高复合材料模量趋于平衡或趋于连续纤维复合材料模量所需要的纤维长径比要高。因此，温度越高，基体模量下降，纤维使用效率降低，达到同效率所需长径比就越大。

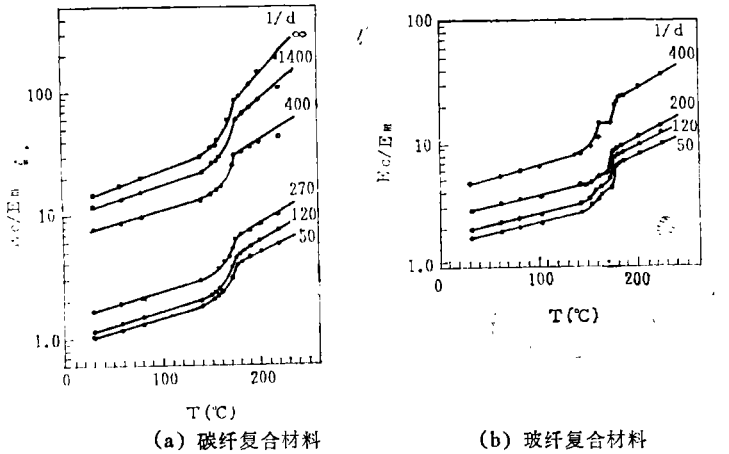
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) 碳纤复合材料　　(b) 玻纤复合材料

图10　不同温度下，复合材料相对模量Ec/Em与长径比1/d的关系
曲线上的数字表示温度值（°C）

图11表示不同长径比两种复合材料相对模量与温度的关系。由图看出，在转变区相对模量骤然增强，高于转变区相对模量—温度斜率比低于转变区的大；随长径比增大高温区的斜率也有所增大；碳纤复合材料的斜率比玻纤复合材料的高。相对模量在转变区的骤然增加与基体泊松比的增加，尤其与热缩应力的释放有关[5]。随长径比增加热缩拉应力增加，在它释放后，不仅高温区的斜率比低温区高，且随长径比而增加。碳纤复合材料的热缩应力比玻纤复合材料大，其斜率自然比玻纤复合材料高些。



(a) 碳纤复合材料　　(b) 玻纤复合材料

图11　不同长径比复合材料相对模量Ec/Em与温度的关系
曲线上的数字表示长径比值

总之，外界载荷作用及热胀系数不匹配引起纤维和界面上不同的应力大小和分布和纤维／基体的界面特性，使材料的内耗、模量等与长径比有关。要得到与连续纤维复合材料刚度接近的短纤复合材料，长径比要适当的高一些。要取得高阻尼材料，长径比尽可能低一些。温度高基体模量降低，纤维使用效率也要降低。为了得到高温高刚度性能短纤复合材料，就要适当提高长径比或采用高模量的树脂。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

结 论

1.随纤维长径比增大，短纤复合材料的力学内耗值下降而模量增加。达到一定长径比后，内耗和模量值趋于连续纤维复合材料的值。纤维刚度被充分地发挥出来。碳纤复合材料在低长径比时的内耗比玻纤复合材料的高。

2.温度越高，基体模量降低，纤维刚度的使用效率下降。达到相同纤维刚度的使用效率所需要的长径比就越大。

本文曾于1988年11月在西安召开的第五届全国复合材料学术会上宣读。

参 考 文 献

〔1〕R.M.Anberson and R.E.Lavengood, SPE J., 24 March 20 (1968).
〔2〕柯毓才，苏炳辉，田秀兰，吴人洁，塑料，4，1 (1980).
〔3〕D.M.Schuster and E.Scala, AIAA/ASME, 8th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, March 29-31 (1967).
〔4〕柯毓才，孙志和，苏炳辉，田秀兰，玻璃钢/复合材料，3，30 (1986).
〔5〕柯毓才，苏炳辉，王建平，田秀兰，吴人洁，复合材料学报，1，1 (1984).

EFFECTS OF FIBER ASPECT RATIO ON THE DYNAMIC MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES

Ke Yucai, Li Zhenfu, Pan Pinglai, Cui Zengpu

(Institute of Chemistry, Academia Sinica, Beijing 100080, China)

ABSTRACT

The effects of fiber aspect ratio on the dynamic mechanical properties for both the glass/epoxy and carbon/epoxy composites have been investigated. The results show that the mechanical internal friction of materials reduces and the modulus enhances with fiber aspect ratio. After a certain aspect ratio both the internal friction and modulus begin to level off and to approach the values of continuous fiber composites. Therefore, the fiber utilization efficiency is fully played. The internal friction of carbon fiber composite is higher than that of glass one. The higher the test temperature and the lower the matrix modulus, the fiber efficiency will be lower. Hence, the aspect ratio for the same fiber efficiency will be higher. The phenomenon mentioned above could be accounted by that the stresses in the fibers and at the fiber/resin interface along the length of the fibers would change with aspect ratio under the external loading or the thermal shrinkage stresses are applied.

Key words: aspect ratio, internal iriction, interface, shrinkage stress

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net