DOI:10.16262/j.cnki.1000-8217.1997.01.010

·成果简介·

纤维补强微晶玻璃基复合材料中的匹配及其性质

郭景坤* 张玉峰

(中国科学院上海硅酸盐研究所，上海 200050)

关键词 复合材料，微晶玻璃，热膨胀系数，界面结合

1 纤维补强复合材料的设计原则

纤维和基体本身的力学性能固然是影响纤维补强复合材料力学性能的重要因素，但并不是唯一因素。往往使用性能优良的纤维和基体，得到的却是力学性能下降的复合材料，甚至产生开裂，这说明除了纤维和基体本身的性能外，还有其它的因素影响着纤维补强复合材料的力学性能。研究发现，纤维与基体的界面结合和热膨胀系数匹配也是影响纤维补强复合材料的重要因素。

纤维与基体的热膨胀系数差异会在复合材料内部引起内应力，内应力的存在势必会影响到复合材料的力学性能。当纤维的热膨胀系数大于基体材料的（$\alpha_f \geqslant \alpha_m$）时，复合材料从高温冷却下来后，纤维受拉应力、基体受压应力作用。当纤维受到较小的拉应力时会有利于高性能纤维强度的发挥，而基体受到压应力又会使其表面的裂纹愈合，因此，这可提高复合材料的力学性能。但当纤维与基体的热膨胀系数相差太大时，纤维因受到的拉应力过大而会发生断裂，从而起不到增韧补强作用。另一种情况是，纤维的热膨胀系数比基体的小（$\alpha_f \leqslant \alpha_m$），这时纤维受到的是压应力，而基体受到拉应力。对于作为基体的玻璃、陶瓷等脆性材料，其抗拉强度远低于抗压强度，受到较大的拉应力后便会产生裂纹甚至开裂，使复合材料的力学性能大幅度下降。因此，从热膨胀系数匹配考虑，应使基体材料的热膨胀系数略低于纤维的。

纤维之所以能够对基体材料进行补强，是因为基体材料能够把它所受到的力通过界面传递给具有较高力学性能的纤维，这就要求纤维与基体间有一定的界面结合强度。但是，当纤维与基体间的结合太强时，基体中的裂纹扩展到纤维后，纤维与基体间就不能发生解离，复合材料仍会出现脆性断裂，其力学性能不但不会升高反而会降低，纤维对基体起不到补强作用。因此，要想使复合材料具有优良的力学性能，还必须使纤维与基体间有适当的界面结合强度。

* 中国科学院院士。

本文于1996年5月23日收到。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2　复合材料的界面结合

纤维与基体的界面结合过强或过弱都不利于复合材料力学性能的提高。对于我们选用的SiC纤维（Nicalon）/LCMAS 微晶玻璃复合系统，通过对其纤维与基体在烧结条件下形成的界面进行观察发现，尽管纤维与基体间有一玻璃相界面层，但两者仍有较强的界面结合，如图 1 所示。用单根纤维压出法测出纤维从基体中拔出时的剪切强度接近 200 MPa，这样大的界面剪切强度阻碍了纤维从基体中的拔出和与基体间的解离，不利于复合材料力学性能的改善。为此，我们对复合材料进行了热处理，热处理后，由于 SiC 纤维（Nicalon）与基体作用，在界面上形成一富碳层；而且界面层的玻璃相会部分析晶，使纤维与基体间的结合强度有所降低，从而更容易从基体中拔出和与基体发生解离。同时，界面层和基体的进一步晶化，又有利于复合材料高温力学性能的提高。表 1 是 Nicalon SiC 纤维/LCMAS 微晶玻璃基复合材料热处理前后的力学性能，可以看出，热处理后复合材料的常温和高温力学性能都有明显改善。

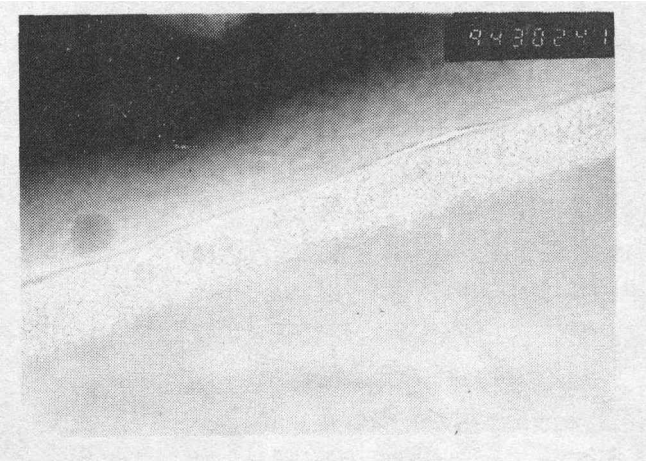

图 1　SiC 纤维/LCMAS 微晶玻璃基复合材料的界面结合

表 1　热处理前后 SiC 纤维/LCMAS-Ⅰ复合材料的力学性能

	抗折强度（MPa）	断裂韧性（MPa・$m^{1/2}$）	900℃抗折强度（MPa）
热处理前	520	16.1	480
热处理后	730	22.4	690

3　纤维与基体间的热膨胀系数匹配

根据纤维补强复合材料的设计原则，纤维与基体间应有相近的热膨胀系数。我们选用的 SiC 纤维（Nicalon）的热膨胀系数为 3.0×10^{-6}/℃；而选用的微晶玻璃 LCMAS-Ⅰ的热膨胀系数为 1.7×10^{-6}/℃，与纤维比较，它的热膨胀系数较低。在对该微晶玻璃进行相分析时发现，它所形成的主晶相为β-锂辉石，这种晶相具有较低的热膨胀系数，而含氧化镁的晶相一般具有较高的热膨胀系数。因此，为了得到具有较高热膨胀系数的微晶玻璃，我们在原来的微晶玻璃组成中引入了氧化镁，晶化后在微晶玻璃中有热膨胀系数比锂辉石较高的堇青石（$2MgO\cdot2Al_2O_3\cdot5SiO_2$）相生成；继续增加 MgO 的含量，还有热膨胀系数更高的斜顽辉石（α-$MgO\cdot SiO_2$）和镁橄榄石（$2MgO\cdot SiO_2$）相生成。微晶玻璃的热膨胀系数是其内部各相热膨胀系数的综合反映。这样，通过在微晶玻璃中添加氧化镁，得到了一系列具有不同热膨胀系数的微晶玻璃。图 2 表示出微晶玻璃的热膨胀系数随 MgO 含量的增加可从 1.7×10^{-6}/℃

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

调整到 $4.1\times10^{-6}/℃$。

把得到的具有不同热膨胀系数的微晶玻璃与绝对数 Nicalon SiC 纤维复合，所得复合材料的力学性能见表2所示。可以看出当微晶玻璃的热膨胀系数较小时，复合材料具有较高的力学性能，随着基体材料的热膨胀系数增加，复合材料的力学性能逐渐降低。这种现象并不和复合材料的设计原则相矛盾，而是由该复合材料本身的特性引起的。在这个复合系统中，纤维与基体间有着较强的界面结合，当基体的热膨胀系数小时，复合材料从高温冷却下来后，纤维在径向上受拉应力作用，使得纤维与基体间的界面结合力减弱，有利于纤维从基体中拔出和与基体解离。如果基体的热膨胀系数较高，内应力就会加强复合材料的界面结合，阻碍纤维与基体的解离和纤维从基体中拔出，反而不利于复合材料力学性能的改善。

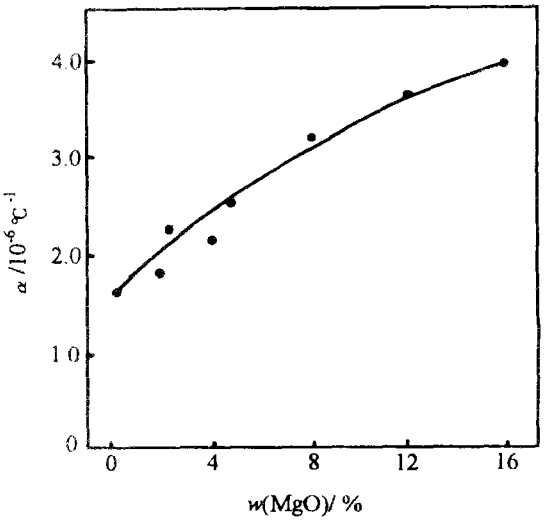

图2 微晶玻璃的热膨胀系数随 MgO 含量的变化曲线

表2 不同热膨胀系数的基体与 SiC 纤维复合后的力学性能

基体材料编号	热膨胀系数 ($10^{-6}/℃$)	抗折强度 (MPa)	断裂韧性 ($MPa\cdot m^{1/2}$)
LCMAS Ⅰ	1.7	730	22.4
LCMAS Ⅱ	2.5	702	21.2
LCMAS-Ⅲ	3.2	462	16.4

THE COMPATIBILITY AND PROPERTIES OF FIBRE-REINFORCED GLASS-CERAMIC COMPOSITES

Guo Jingkun Zhang Yufeng

(*Shanghai Institute of Ceramics, CAS, Shanghai* 200050)

Key words composite, glass-ceramic, thermal expansion coefficient, interface bonding

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net