第2卷第4期　　复合材料学报　　Vol. 2 No. 4

1985年12月　　ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINCA　　December 1985

长时间高温热处理对碳一铝复合材料的影响

上海交通大学　李賢淦　張汉林　吴人洁

摘　　要

本文研究了经长时間（100小时）高温热处理之后碳-鋁复合材料的拉伸強度和碳化鋁（Al_4C_3）量变化的情况。观察到碳一鋁复合材料在495℃长时間热处理其強度降低，在540℃长时間热处理其強度明显下降。碳化鋁的数量和強度值在某一温度对应某一时間之后变化趋于平緩。

前　　言

由于碳-铝复合材料具有高比强度和高比模量，因此，这种复合材料是一种有吸引力的轻型结构材料。然而以金属为基体的复合材料通常需高溫成型，并且与树脂基复合材料相比，可以使用在较高的溫度。而材料可保持其强度的溫度和时间对于选用材料是很重要。目前，关于长时间处理对碳-铝复合材料性能的影响方面的报导还不多。文献[1]报导了在465℃下无载荷长时间（1000小时）保溫复合絲强度不降低。文献[2]报导了在空气中热处理碳-铝复合材料，结果表明在350℃保溫100小时复合材料强度不下降，在400℃保溫24小时以上，强度下降。文献[3]也提碳-铝界面形成碳化铝的溫度在500℃以上，且使复合材料强度下降，并认为这种反应是由扩散控制的，碳化铝的生成量与保溫时间的$\frac{1}{2}$次方成比例。另外该文作者还做了石墨纤维增强铝复合材料600℃保溫114小时的试验，结果是在24小时后强度下降已平緩，到了96小时后强度下降了62%。文献[4]对文献[3]所提供的数据进行了处理，认为石墨纤维-铝复合材料强度的下降与时间的$-\frac{1}{4}$次方成比例。

由于试验的基体和纤维的种类的不同以及制造复合材料的工艺方法不同，得到的结果有差异。我们曾做过450℃下100小时长时间热处理碳-铝复合絲的试验，结果复合絲的强度不下降[5]。本文在上述试验结果的基础上，对碳素纤维-铝复合絲进行长时间热处理试验，并对其结果进行讨论。

本文1985年3月收到，7月收到修改稿

試 驗 方 法

试样是作者利用化学气相沉积钛-硼涂层和液态铝浸渍技术制造的碳-铝复合絲。选择495℃、540℃、580℃作为热处理溫度。在保溫时通入氩气以减少复合絲的氧化。经热处理后的复合絲测定其拉伸强度，用扫描电鏡观察拉伸断口形貌。用气相色谱仪分析碳化铝（Al_4C_3）含量。

結 果 和 討 論

经495℃、540℃和580℃的溫度和不同时间热处理后碳-铝复合絲的拉伸强度列于下表：

表1 不同温度经不同时间热处理后碳一铝复合丝的拉伸强度

温度（℃） \ 时間（小时） / 強度和η*		0	0.5	2	10	20	40	60	80	100
495	拉伸強度(Kg/mm^2)	92.1	95.8	89.5	77.2	76.8	68.8	65.7	72.1	70.7
	η*(%)		-4	3	16	17	25	29	22	23
540	拉伸強度(Kg/mm^2)	82.9	65.6	55.5	51.8	50.9	46.3	45.9	49.6	49.7
	η*(%)		21	33	37	38	44	44	40	40
580	拉伸強度(Kg/mm^2)	74.1	—	—	—	31.7	28.8	31.3	28.4	24.9
	η*(%)					58	61	58	62	66

η*是拉伸强度下降率，$\eta=\dfrac{\text{未处理的强度}-\text{某一时间的强度}}{\text{未处理的强度}}\times 100\%$

在450℃长时间热处理的试验结果表明复合絲的拉伸强度沒有变化，而另一组的试验结果，强度略有下降，这种降低出现在保溫时间约10小时之后，随后又趋于平缓。但当溫度超过495℃，碳-铝复合絲的拉伸强度随溫度的升高有明显的下降。从上表可以看出，与未处理状态相比，495℃、540℃、580℃经100小时热处理后，碳-铝复合絲拉伸强度分别下降了23%、40%和66%。实际上，当溫度选到540℃时溫度对拉伸强度的影响已经很大了。

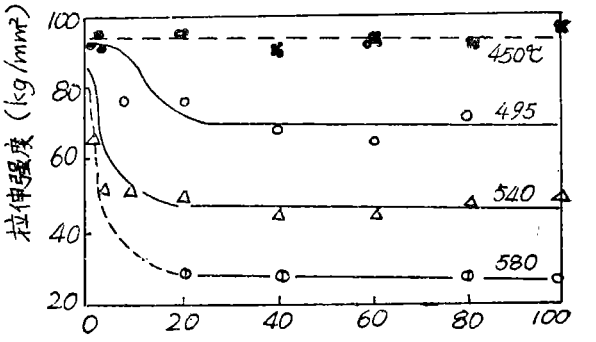


图1 不同溫度下拉伸强度与热处理时間的关系曲綫

碳-铝复合絲拉伸强度与热处理溫度及保溫时间的关系如图1所示。碳-铝复合絲的拉伸

损失通常发生在热处理的某一临界保温时间 τ_c 之后。当时间超过了 τ_c，复合絲的拉伸强度开始明显下降。但下降到某一程度后又趋于平缓。不同的溫度有不同的 τ_c 和不同的趋于平缓的时间（τ_c'）及强度。热处理溫度越高，τ_c 和 τ_c' 越短，趋于平缓的强度亦越低。τ_c 值与溫度有关，在某一溫度以下，τ_c 值很大（>>100小时）；而在该溫度以上，τ_c 值随度溫的上升而显著减小。如果上述现象在材料承受外载荷的情况下也同样存在的话，则可以对某种特定的服役条件（主要是工作溫度）的构件优先考虑选用此种材料。因此阐明这些现象对于碳一铝复合材料的应用是有意义的。

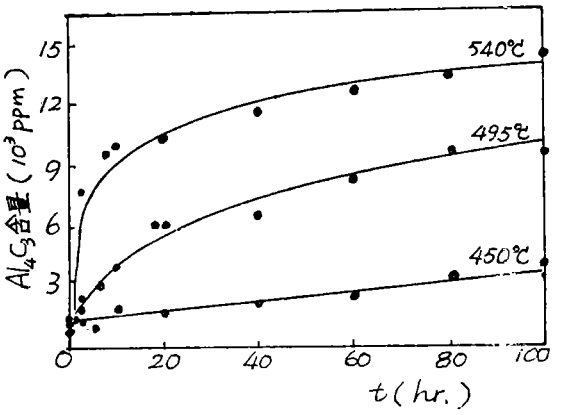
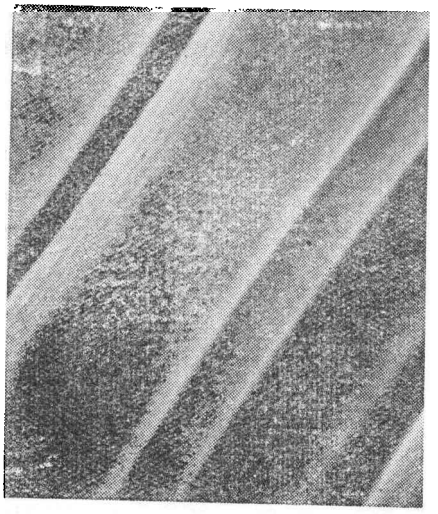


图2 不同溫度下复合絲中碳化鋁量对热处理时間的关系曲綫

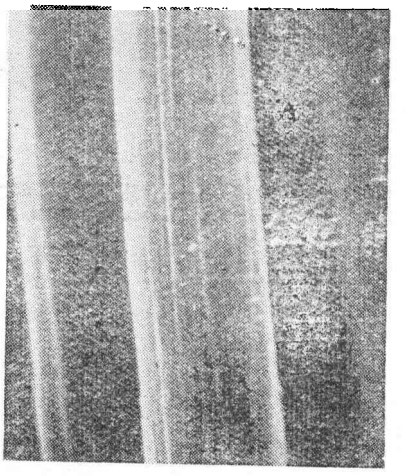
图 2 是经过450℃、495℃和540℃热处理之后，碳化铝（Al_4C_3）量与保溫时间的关系曲线。从图中可以看到，碳化铝（Al_4C_3）量随着热处理时间的延长而增加，在495℃以上的溫度热处理，碳化铝含量在开始阶段明显上升，到一定程度之后又趋于平缓。如果与拉伸强度变化曲线相对照可以看出复合絲中碳化铝含量的变化对拉伸强度的影响。在强度开始下降的区域，碳化铝含量也以较大的料度增加。随着处理时间的延长，碳化铝量和强度值的变化都有趋于平缓的倾向。在碳纤维和基体界面处，碳化铝脆性层形成并完全覆盖于纤维表面，阻碍着碳原子向铝基体扩散，从而使碳化铝的增长变慢。

从图 2 还可以看出，经热处理的复合絲中碳化铝的生成量受溫度的影响大，而受处理的时间影响较小，这也正表明了界面反应过程受扩散控制。

图 3（a、b、c）分别为未经高溫热处理、540℃60小时和580℃40小时热处理后的复合絲经脫铝后的碳纤维表面的形貌。可以看出，经 540℃ 热处理的纤维表面比起未处理的



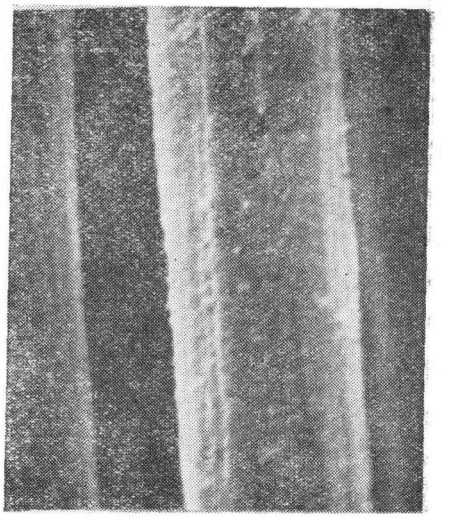
(a) 未处理



(b) 540℃，60小时

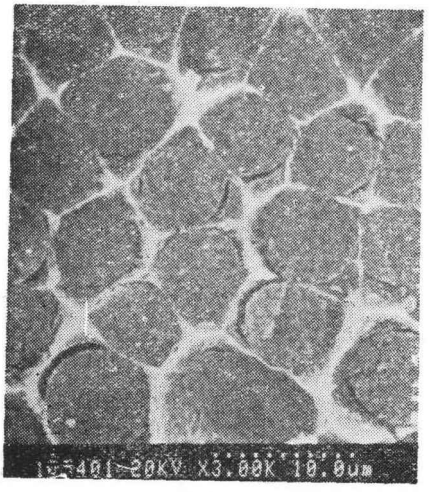
粗糙，而经580℃热处理的纤维表面有明显的凹坑。碳纤维表面受到损伤，则复合材料强度下降。热处理条件对碳-铝复合材料界面反应的影响可以从拉伸断口形貌上看出。图4是不同热处理条件下碳-铝复合絲拉伸断口照片。

未热处理（图4，*a*）和450℃100小时热处理后的断口形貌基本相同，基体表现出良好的塑性变形。540℃ 1 小时（图4，*b*）的热处理，断口形貌上仍保持原来状态，虽然拉伸强度已开始降低，而540℃100小时热处理后的断口则表现出界面的反应，界面结合增强，基体塑性变形减小，一些弱的纤维产生了劈裂。580℃ 10 分钟（图4，*c*）热处理的断口则表现出严重的界面反应，与此相对应的拉伸强度下降了58%左右。强度的急烈下降与碳化铝的大量生成有关。界面反应使界面结合力增强造成了拉伸时纤维劈裂现象。

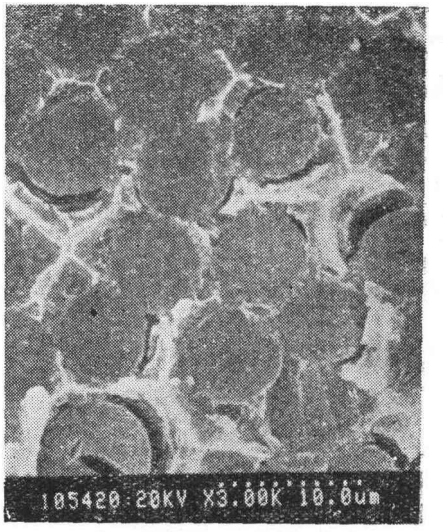


（*c*） 580℃，40小时

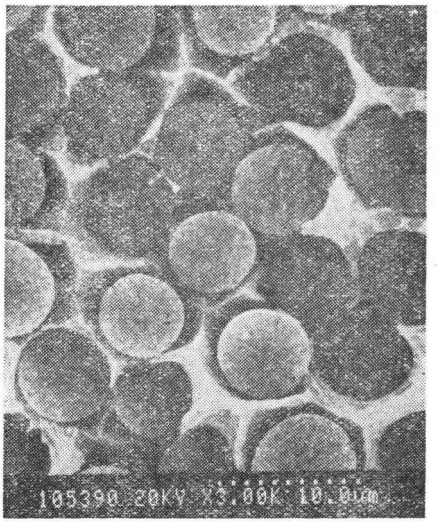
图3 脱铝后碳纤維表面形貌



（*a*） 未处理



（*b*） 540℃ 1 小时



(*c*) 580℃，10分钟

图4 不同热处理条件碳-鋁复合絲拉伸断口形貌

結　　論

根根我们的试验结果，可以得出如下结论：

1) 450℃长时间热处理之后，碳-铝复合絲强度不下降，495℃长时间热处理之后，强度下降，而540℃时强度显著下降。

2) 界面碳化铝的增加是造成碳-铝复合材料强度下降的一个重要原因。碳化铝量随溫度增加和热暴露时间的延长而增加。当碳化铝达到一定量后，增加趋于平缓，强度值的变化也具有与之相同的倾向。

3) 在580℃下热处理对纤维表面明显损伤。

参　考　文　献

1) W.C.Harrigan, J.TR-0075 (9250—03) —1, The Aerospace Corp, 31 guty 1974

2) 大藏明光等，日本金属学会志47 (1983) 249

3) I.H.Khan, Metall Trans 7A (1976) 1281

4) S.Ochiaief etal, Z. Metallkde, 74 (1983) H2, P68

5) 张国定等，上海交通大学87周年校庆学术报告会論文摘要　材料科学及工程专輯 (1983)

敬　告　读　者　　本刊編輯部

本刊85年前三期因各种原因拖期，86年将有所改进。86年各期均为每季末出版，仍由本刊编辑部发行。凡未得到订单者，請致函本刊编辑部，函索即寄，随时可以订阅。85年各期有余，可以补订。

reaction, and the interface was influenced by sorts of the fiber and composition of the matrix.

THE EFFECT OF LONG PERIOD HEAT-TREATMEMT ON C/Al COMPOSITE

Li Xiangan, Zhang Hanlin amd Wu Renjie

Department of Material Science and Engineering

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China

(Received March 1985)

Abstract

The change of the tensile stiength of the C/Al composite wires and the content of the aluminum carbide in the interfaces have been studied. The authors note the strength of composite wires was damaged after long period heat-treatment at 495°C and was damaged remarkably above 540°C , and the content of the aluminum carbide increases with increaasing the temperature and the time of treatment.

A FAILURE THEORY PREDOMENATED BY MATRIX AND INTERFACE FOR FIBROUS COMPOSITES

Zhang Ruguang and Xu Shoubo

Shanghai GFRP Institute, Shanghai, China

(Received June 1984)

(Revised June 1985)

Abstract

Failure criteria for isotropic and anisotropic materials are briefly reviewed. They serve as a background for the criterion presented below. Based on the work of Reference [1] and [5], a failure theory which is predominted by matrix and interface failure is presented to predict the failure of composite materials under complex stress state. The criterion formula