第9卷 第1期 复合材料学报 Vol.9 No.1
1992年 1月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA January 1992

1150669

SiCw/Al复合材料的偏轴拉伸断裂行为

马宗义 刘钧* 姚忠凯* 毕敬

(中国科学院金属研究所，沈阳110015)

摘要：应用扫描电镜对挤压SiCw/6061Al复合材料的拉伸断裂过程进行了动态观察，并详细讨论了偏轴角θ对复合材料强度和断裂行为的影响。结果表明，微裂纹起源于晶须周围基体中，其萌生与扩展受晶须偏轴角的控制。复合材料由正向断裂向剪切断裂转变的特征角θ_0约为45—50°。

关键词：复合材料，碳化硅，铝合金，偏轴拉伸，断裂

一、引 言

SiCw/Al复合材料由于具有良好的室温比强度和比模量，以及优异的热稳定性而有希望在航天、航空中得到应用[1、2]。然而这种材料低的塑性和断裂韧性却限制了它的广泛应用。本文对这种复合材料的拉伸断裂过程进行了研究，以进一步加深对其性能特性的认识。

二、试验方法

试验材料为挤压态SiCw/6061Al复合材料，晶须体积份数为22%。动态拉伸试样用线切割加工成型后进行机械抛光。动态拉伸试验在有加载台的 Hitachi S-570 扫描电镜上进行。试样偏轴角（外加载荷与挤压方向的夹角）分别为0°、20°、45°、60°、70°和90°，应变速率约为1.5×10^{-5}/S。

三、结果与讨论

1. 复合材料的强度和晶须取向分布

SiCw/6061Al复合材料在经过挤压之后，晶须由压铸态的随机取向变为沿挤压方向排列，复合材料的强度也由各向同性变为各向异性，随偏轴角的增大而降低(图1)，即晶须沿挤压方向的择优取向造成了挤压复合材料的各向异性。图2给出了晶须分布密度—偏轴角曲线，可见大部分晶须分布在0—15°偏角范围内，即晶须的取向尚有一定的分散性，这种分散

本文1990年6月9日收到，*哈尔滨工业大学

性是挤压SiCw/Al复合材料的纵横向强度差没有长纤维复合材料那样大的原因之一。

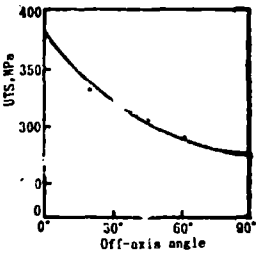

图1 挤压态SiCw/6061Al复合材料强度—偏轴角曲线

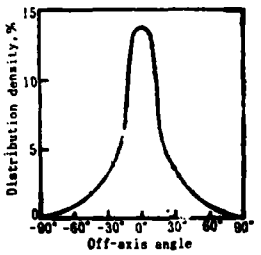

图2 晶须分布密度—偏轴角曲线

2. 断裂过程观察

(1) 裂纹的萌生

考虑到晶须取向的分散性，对大部分与挤压方向基本一致的晶须，试样偏轴角即可代替晶须偏轴角，而对偏离挤压方向的晶须，或是特别说明的晶须，则一律称为晶须偏轴角。

在SiCw/6061Al复合材料拉伸过程中，观察发现，在宏观应力水平还比较低（远低于材料的屈服强度）的情况下，在SiC晶须附近就有微裂纹产生。对于小偏轴角试样，微裂纹优先在晶须端部产生（图3中E）；而对大偏轴角试样，微裂纹则起源于晶须侧面，一般是由于晶须和基体的界面脱粘（图4中I）或者基体开裂（图4中M）所造成的。观察表明，晶须端部微孔萌生向晶须侧面开裂的转变在晶须偏轴角为45°—50°时发生。图5、图6分别为45°偏轴角晶须端部微裂纹萌生和50°偏轴角晶须侧面开裂的SEM照片。此外，微裂纹还在夹杂物处产生（图5中L）。

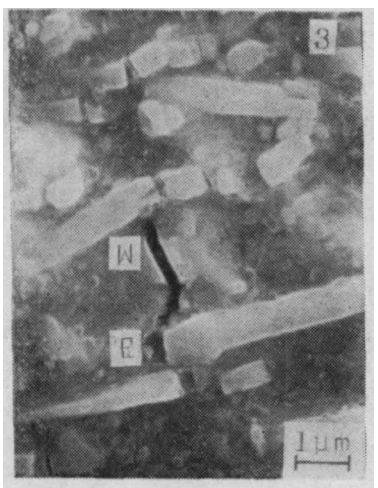

图3 微裂纹在小偏轴角晶须端部产生

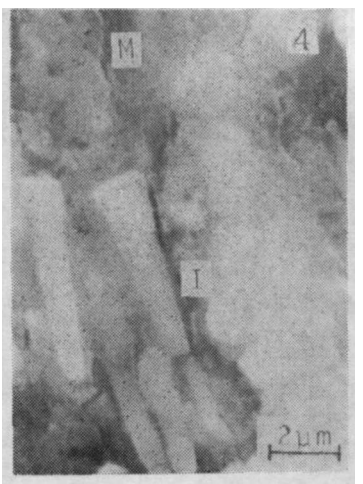

图4 微裂纹在大偏轴角晶须侧面产生

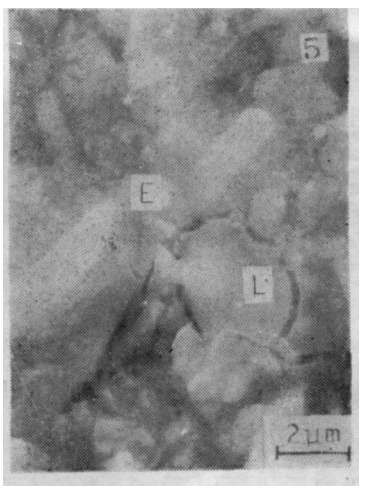

图5 微裂纹在45°偏轴角晶须端部产生

(2) 裂纹的扩展和连接

随外加载荷的增加，微裂纹开始加宽并扩展，同时又萌生大量新的裂纹。由于晶须的阻碍作用，裂纹的扩展并不是很明显，经常中止于晶须处（图3中W）。这种阻碍作用是复合材料强化的主要机制。当外加载荷达到一定水平，大量微裂纹同时扩展并连接，导致复合材料的突发性断裂。裂纹的扩展是在基体中或沿晶须与基体的界面进行的。对于小偏轴角试样，裂纹通常垂直于拉力轴扩展，扩展方式有两种：(1) 裂纹绕过晶须（图7）；(2) 晶须被拔出（图8）。对于大偏轴角试样，裂纹的扩展一般沿晶须排列方向以界面脱粘或基体开裂的方式进行（图9），断裂试样的宏观裂纹走向也基本上平行于晶须的取向（图10），这说明SiCw/

图6　微裂纹在50°偏轴角晶须侧面产生

图7　裂纹绕过晶须

图8　晶须被拔出

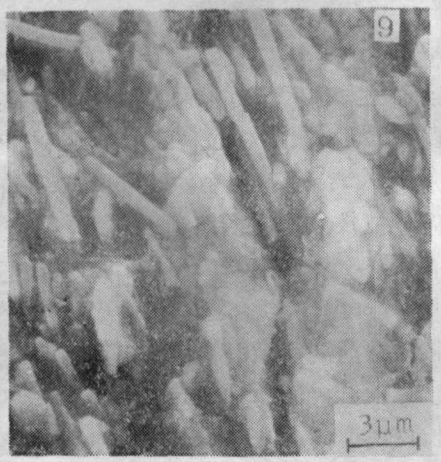

图9　裂纹沿晶须与基体的界面扩展

图10　70°偏轴角断裂试样为SEM照片

Al复合材料在大偏轴角拉伸时主要以界面剪切的形式破坏。当偏轴角为45°时，裂纹的扩展路径呈现锯齿型，或沿晶须排列方向以界面脱粘和基体开裂的方式扩展；或沿垂直于晶须取向方向绕过晶须或拔出晶须（图11），断裂试样的宏观裂纹走向也呈锯齿状（图12）。这说明在偏轴角为45°左右时，沿着晶须长度方向和垂直于长度方向上裂纹萌生的几率和扩展的阻力大致相同。

3．SiCw/Al复合材料的断裂模型

在长纤维复合材料中，作用于纤维上的拉应力和剪应力取决于纤维的偏轴角。在小偏轴角情况下，作用在纤维上的正向拉应力起主导作用，材料表现为纤维断裂的正向断裂；在大偏轴角时，作用在纤维上的横向拉应力和剪应力起主导作用，材料表现为界面脱粘或纤维劈裂的剪切断裂[3]。在某一最优偏轴角（θ_0），材料的断裂方式由正向断裂转变为剪切断裂，θ_0计算公式如下[4]：

$$\theta_0=\arctan(\sigma_T/\sigma_L)^{\frac{1}{2}}$$

其中，σ_T、σ_L分别为复合材料的纵向强度和横向强度。上述公式是根据Tsai—Hill破坏准

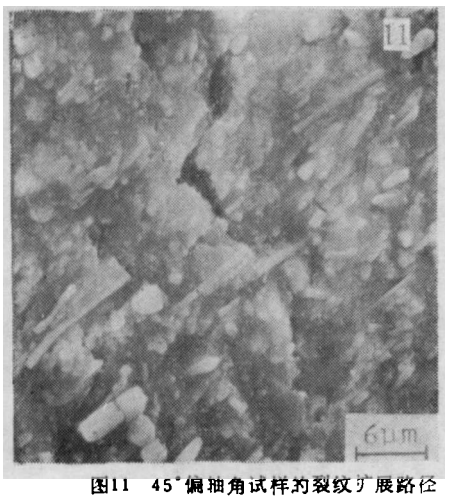

图11 45°偏轴角试样的裂纹扩展路径

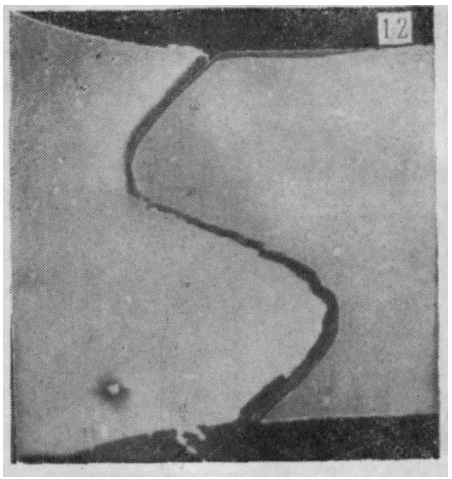

图12 45°偏轴角断裂试样的SEM照片

则针对单向连续纤维复合材料推导出来的，θ_0值只取决于σ_T和σ_L的比值。如果采用挤压SiCw/6061Al复合材料σ_T和σ_L的实验值，则θ_0的计算值约为40°，远高于单向连续纤维复合材料[3]。这是因为SiCw/6061Al复合材料经过挤压变形之后，大部分晶须的长径比已低于临界长径比，晶须所传递的最大应力达不到晶须的平均强度，因而挤压SiCw/6061Al复合材料的纵向强度相对不是很高；而晶须沿挤压方向取向的分散性又使其横向强度保持在较高水平，这使得该复合材料的纵横向强度差并不是很大，即σ_T/σ_L较大，因而所计算出来的θ_0值要远高于连续纤维复合材料。从图1可以看到挤压SiCw/6061Al复合材料的强度随试样偏轴角的增大而降低，这是因为随偏轴角的增大，晶须传递载荷的有效长度降低，同时晶须对基体塑性变形的约束作用和对微裂纹扩展的阻碍作用也降低，界面剪切破坏的几率增大，因而复合材料的强度降低。可以想象，如果晶须的平均长径比远高于临界长径比，并且严格沿挤压方向取向，这种复合材料的强度性能有可能接近于连续纤维复合材料，即纵向强度增加，横向强度降低，因而具有较低的θ_0值。然而，SiCw/6061Al复合材料拉伸断裂过程的SEM观察表明，该复合材料由正向断裂向剪切断裂转变的θ_0值约为45—50°，比采用SiCw/6061Al复合材料σ_T、σ_L的实验值计算出来的θ_0值还要高，造成这一现象的主要原因是晶须端部存在严重的应力集中，它提高了该复合材料由正向断裂向剪切断裂转变的θ_0值，这同时也说明θ_0的计算公式对短纤维复合材料是不适用的。

在挤压SiCw/6061Al复合材料中，由于晶须长径比的较大降低，因晶须断裂而产生裂纹的几率是很小的，而在连续纤维复合材料中，这是一种常见的方式[3]。由于SiC晶须端部的尖角效应，在晶须端部存在很大的应力集中，因此，在宏观应力水平还很低的情况下，在晶须尖角处的应力集中水平就大到足以使附近基体产生塑性变形，围绕晶须端部形成塑变集中区，最后导致微孔的形核和微裂纹的萌生。晶须端部微孔萌生现象已被Nutt等人[5]的TEM观察所证实。晶须端部应力集中水平与晶须偏轴角有关，当偏轴角为90°时，其影响最小，在0—45°偏轴角范围内，应力集中系数为2.2—3.6[6]。因此，在晶须处的应力分布要比连续纤维复合材料复杂得多，除外加载荷所产生的拉应力和剪应力外，晶须端部的应力集中也必须被考虑。晶须偏轴角和晶须端部的应力集中直接决定复合材料的断裂行为和强度。

在上述观察与分析的基础上，我们提出如下的复合材料断裂模型。在小偏轴角情况下，作用在晶须上的正向拉应力和晶须端部的应力集中起主导作用，微裂纹在晶须端部产生，以绕过晶须和拔出晶须的方式扩展，材料表现为正向断裂（图13）。随偏轴角增大（<45°），作用于晶须上的正向拉应力逐渐减小，但晶须端部的应力集中系数却逐渐增大，材料仍表现为正向断裂。当偏轴角较大时（>50°），作用于晶须与基体界面上的横向拉应力和剪应力控制复合材料的断裂过程，晶须端部的应力集中已不占主导，微裂纹在晶须侧面产生，以界面脱粘和基体开裂的方式扩展，材料表现为剪切断裂（图14）。在45°偏轴角，作用于晶须与基

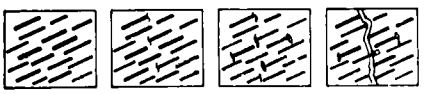

图13　SiCw/Al复合材料的正向断裂模型

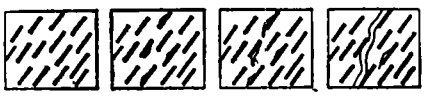

图14　SiCw/Al复合材料的剪切断裂模型

体界面上的剪应力和晶须端部的应力集中同时达到最大值，而横向拉应力也开始起主导作用，所以在45—50°偏轴角范围内，微裂纹在晶须端部和侧面同时产生，其扩展也表现为绕过、拔出晶须与界面脱粘、基体开裂的混合方式。从裂纹的走向可以看到，相对于晶须取向而言，在45°偏轴角时，材料的断裂方式表现为正向断裂和剪切断裂混合型(图11.12)。也就是说，复合材料由正向断裂向剪切断裂转变的θ_0值约为45—50°。由于晶须取向的分散性及试验条件的限制，θ_0的准确值还难以确定，还需要做进一步的工作。

四、结　论

1.偏轴角对挤压SiCw/6061Al复合材料的强度有很大的影响，随偏轴角的增大，复合材料的强度降低。

2.大量微裂纹在低应力水平下萌生，及随后的突发性扩展和连接导致了复合材料的低塑性断裂。

3.裂纹萌生方式有两种：(1) 对小偏轴角晶须，微裂纹在晶须端部产生；(2) 对大偏轴角晶须，微裂纹在晶须侧面产生。

4.裂纹的扩展受晶须偏轴角的控制，在小偏轴角情况下，裂纹以绕过和拔出晶须的方式扩展；在大偏轴角时，裂纹以界面脱粘和基体开裂的方式扩展。

5.挤压SiCw/6061Al复合材料由正向断裂向剪切断裂转变的特征角θ_0约为45—50°。

6.晶须对基体变形的约束作用和对微裂纹扩展的阻碍作用是复合材料强化的主要机制。

参 考 文 献

[1] T.G.Nieh, Metall. Trans., Vol.15A(1984), p.139.

[2] A.P.Divecha, S.G.Fishman and S.D.Dermarkar, J. Met., No.12(1981), p.33.

[3] G.H.Han, L.Cao, L.Geng and C.K.Yao, Compos., Vol.18(1987), p.409.

[4] 张汝光，许守勃，上海力学，No.11(1981)，p.55.

[5] S.R.Nutt, J.M.Duva, Scr. Metall., Vol.20(1986), p.1055.

[6] 曹利，蒋持平，姚忠凯，雷廷权，金属学报，Vol.25(1989)，p.B179.

OFF-AXIS TENSILE FRACTURE BEHAVIOR IN SiCw/Al COMPOSITE

Ma Zongyi and Bi Jing
Institute of Metal Research, Academia Sinica

Liu Jun and Yao Zhongkai
Harbin Institute of Technology

Abstract The dynamic tensile processes of silicon carbide whisker reinforced 6061Al composite (SiCw/6061Al)have been in situ observed by scanning electron microscope.The effect of off-axis angle on strength and fracture behavior has been studied in detail. The results show that microcracks are resulted from the matrix adjacent to whiskers.The initiation and propagation of crack depend on the off-axis angle of whisker,and the optimum off-axis angle (θ_0) at which the transition from forward fracture to shear fracture occurs is about 45–50°.

Key words composite, SiC, aluminum alloy, off-axis tension, fracture

会议消息

1.在八届复合材料国际会议期间，召开了第八届国际执委会会议，吴人洁教授、陈浩然教授和陈绍杰高级工程师代表我国代表团参加了会议，会议听取了第六届，第七届国际执委会主席蔡为伦教授工作报告；选举了美国斯坦福大学教授斯潘林博士为下届执委会主席；会议还就九届、十届会议会址进行了竞争，经执委会全体会议代表表决，九届会议将于1993年在西班牙马德里市召开；十届会议将于1995年在加拿大温哥华市举行。

2.第七届全国复合材料会议将于1992年6月10日在大连理工大学举行。全国复合材料会议每2年召开一次，会议期间，将就材料、工艺、性能、质量评估、无损检测、强度与应用及引进设备消化等方面进行交流。

3.美国AD复合材料研究所所长洛克希德系统复合材料发展中心高级研究与发展工程师Mr.Micheal C.Y.Niu（牛春匀）于1992年4月13日—17日在北京航空航天大学就《复合材料航空结构》进行专题讲学。（蔡）