

Al₂O₃ 纤维增强 Al 合金复合材料界面孔隙率测定 及复合材料应力分布有限元计算

陈志武¹ 张喜燕² 张继红²

(1 厦门大学 厦门 361005)

(2 西南交通大学 成都 610031)

摘要 利用挤压铸造法制备了 Al₂O₃ 纤维增强 Al 合金复合材料, 对其界面孔隙率进行了测定, 结合拉伸强度数据, 讨论孔隙率对复合材料强度的影响; 并通过有限元计算, 分析了与拉伸轴平行、成 45° 及与拉伸轴垂直的 3 种纤维模型, 得出纤维、基体、界面处应力分布。

关键词 界面 孔隙率 强度 有限元 应力

中图分类号: TG146.2⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2001)01-0040-04

金属基复合材料(MMC)性能依赖于许多因素, 如基体的性能^[1]、不同的加入纤维^[2]、界面层相组成成分变化及界面区位错分布^[3,4], 而关于界面孔隙率对界面乃至整个复合材料性能影响, 目前尚无报道。本实验通过对各种复合材料及其基体进行密度测试, 进而求出界面孔隙率, 并结合拉伸强度数据, 讨论孔隙率对复合材料强度的影响。另外, 目前关于纤维增强金属基复合材料断裂机制并不十分清楚, 一般是通过断口分析或拉伸过程中各阶段中断加载, 取样观察基体或纤维破坏情况来考察断裂机制^[5], 对于加载过程中复合材料应力分布情况对断裂的影响却无此报道。本实验通过有限元计算, 分析了与拉伸轴平行、成 45° 及与拉伸轴垂直的 3 种纤维模型, 得出纤维、基体、界面处应力分布, 从而为分析各种情况下复合材料微观裂纹产生机理及其断裂过程奠定了基础。

1 Al₂O₃ 纤维增强 Al 合金复合材料界面孔隙率的测定

1.1 实验材料及过程

复合材料中 Al₂O₃ 纤维分别选用英国产的 Saffil 纤维和洛阳产纤维, 基体合金成分分别为 Al-5Cu, Al-5Mg, Zr109, 纯 Al。实验采用挤压铸造法制备复合材料, 采用定量金相的方法测定纤维的体积分数,

用 METFLERA E240 双量程天平测定各相关质量^[6]。

1.2 实验结果与讨论

试样综合数据如表 1, 从表 1 可看出, 对于同种基体而言, 加入洛阳纤维后得到的复合材料其界面孔隙率大于加入相近体积分数英国产 Saffil 纤维复合材料界面孔隙率, 而抗拉强度数据则与之相反。由此推出, 对于加入洛阳纤维的复合材料而言, 由于其界面孔隙率大, 造成界面结合强度下降。这里存在两种情况, 一种是复合材料基体塑性较好, 加载时基体流动, 使界面孔隙不易张开, 界面结合相对较好, 纤维能够参与承载, 但承载较小, 这样, 虽能起到增强复合材料的作用, 但作用不很明显(如纯 Al 基体, 加入洛阳纤维后, 强度提高幅度不大); 另外一种情况是基体塑性较差, 加载时, 界面孔隙容易张开, 形成应力集中并产生微裂纹, 这时纤维不能起到增强作用, 有时甚至复合材料拉伸强度低于基体(如 Al-5Cu 基复合材料)。而对于加入英国产 Saffil 纤维的复合材料而言, 由于其界面孔隙率小, 界面结合强度高, 使纤维能够有效参与承载, 起到增强的作用。

对于造成加入洛阳纤维和 Saffil 纤维其复合材料界面孔隙率大小不同的原因, 分析如下: 在挤压铸造过程中, 两种纤维中的 SiO₂ 与 Al 液和 Al 液中所含有的活性元素(如 Mg)等发生反应^[7], Si 被置换出来,

收到初稿日期: 1999-11-01; 收到修改稿日期: 2000-03-27

基金项目: 四川省应用基础研究重点项目资助

作者简介: 陈志武, 男, 1975 年生, 硕士, 厦门大学材料科学系, 厦门 361005, 电话: 0592-2099144

由于 Si 不属于活性元素, 其与 Al_2O_3 的粘附功比 Al 还小, 则 Si 与 Al_2O_3 的结合比 Al 差。对于洛阳纤维而言, 由于含有将近 20% 的 SiO_2 , 而 Saffil 纤维中只含有 3% ~ 4% 的 SiO_2 , 其余都是 Al_2O_3 , 于是造成洛阳纤维界面处还原出来的 Si 大大多于 Saffil 纤维界面处的 Si。洛阳纤维界面与 Saffil 纤维界面相比, 其

Si 量较大, 与 Al_2O_3 的结合差, 造成界面孔隙多, 界面结合强度差。此外, 由于洛阳纤维晶相是 $\alpha-Al_2O_3$ 和莫来石结构, 而 Saffil 纤维是 $\delta-Al_2O_3$ 结构, $\delta-Al_2O_3$ 与 Si 的共格对应更好, 故界面孔隙率更小, 界面结合更强。

表 1 试样综合数据

Table 1 Comprehensive data of the samples

Sample	Density of matrix	Theor. density of matrix	Density of MMC	Theor. density of MMC	Theor. vol. fraction of fiber, $V_f/\%$	Measured vol. fraction of fiber, $V_f/\%$	Porosity of matrix	Porosity of interface	Tensile strength of MMC σ_s/MPa	Tensile strength of matrix σ_m/MPa
Al-5Cu Saffil	2.820	3.010	2.886	3.100	10	11.25	6.3	0.60	252	200
Al-5Cu Saffil	2.820	3.010	2.920	3.130	15	16.50	6.3	0.40	290	200
Al-5Cu Saffil	2.820	3.010	2.950	3.150	20	20.75	6.3	0.10	301	200
Al-5Cu Luoyang	2.820	3.010	2.812	3.040	10	10.10	6.3	1.30	180	200
Al-5Mg Saffil	2.670	2.670	2.713	2.740	8~10	7.06	0	0.98	309	298
Al-5Mg Luoyang	2.670	2.670	2.665	2.718	10	9.77	0	1.98	214	298
Z1109 Saffil	2.747	2.747	2.805	2.845	10	11.55	0	1.40	230	*
Z1109 Luoyang	2.747	2.747	2.740	2.787	8~10	9.50	0	1.70	162	*
Al Saffil	2.698	2.698	2.733	2.790	10	10.10	0	2.00	118	60
Al Luoyang	2.698	2.698	2.673	2.731	8~10	7.00	0	2.20	71.9	60

2 有限元计算

2.1 模型 1

在模型 1 中, 取与拉伸轴平行的纤维为研究对象, 分析了其在平面应力作用下纤维、基体及界面处应力分布。为使模型简单化, 把纤维看成是一长条, 由于纤维埋在基体中, 上下左右对称, 为简化起见, 取 1/4 作为研究对象, 模型图如图 1 所示。把纤维及其附近基体分成许多单元, 并将每个单元、每个节点按照一定的顺序编号, 得到关于有限元分析的数据表, 将其

输入 SAP5 (一种有限元计算程序), 得到各单元应力数据 (见表 2, 表 3)。

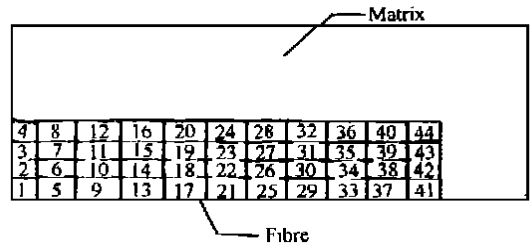


图 1 模型 1: 纤维与拉伸轴平行分布示意图

Fig. 1 Mode 1: illustration of fiber being parallel to tensile axis

表 2 纤维中各单元轴向应力

Table 2 Axial stress of units in fiber

Unit No.	4	8	12	16	20	24	28	32
Axial stress, σ/MPa	315.14	315.14	315.09	315.49	316.23	312.08	311.15	245.64

表 3 界面受力情况

Table 3 Stress at interface

Unit No.	4	8	12	16	20	24	28	32	
Fibre	Shear stress, σ_s/MPa	0	0.012	0.014	0.13	0.14	1.26	2.44	17.8
	Tensile stress, σ_t/MPa	0	0	0.031	0.47	0.94	1.39	14.6	-13.1
Unit No.	3	7	11	15	19	23	27	31	
Matrix	Shear stress, σ_s/MPa	0	0.032	0.03	0.13	0.14	1.2	3.04	17.8
	Tensile stress, σ_t/MPa	0	0.017	0.064	0.07	0.2	2.6	3.8	-2.1

由表 2 可看出, 纤维所受轴向应力是中间大, 端部小, 在 20 单元处(位于纤维端头 1/4~ 1/3 处)所受轴向应力最大, 如纤维受拉断裂, 则应断在此处, 这与混合法则计算结果符合较好。由表 3 可知, 界面所受应力在纤维中部位置处较小, 在纤维端部较大, 且在纤维端部, 基体受压应力(张应力为负值), 易发生界面脱粘; 但是其压应力值仅为 2.1 MPa, 而基体中受最大剪应力为 17.8 MPa, 纤维受最大轴向应力为 316 MPa, 由此可推出纤维断裂、界面剪切开裂将先于界面拉伸开裂, 这与实验情况相符。

2.2 模型 2

此模型与模型 1 相似, 仍是研究平面应力作用下纤维、基体及界面处应力分布情况。此模型纤维旋转

了 45°; 模型如图 2 所示, 有限元计算结果如表 4, 表 5 所示。

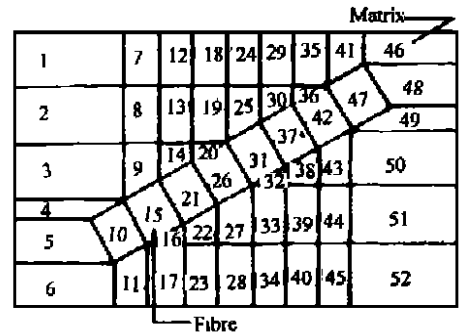


图 2 模型 2: 纤维与拉伸轴成 45°分布示意图

Fig. 2 Model 2: illustration of fiber at angle of 45° to tensile axis

表 4 纤维所受应力

Table 4 Stress in fiber

U nite No.	10	15	21	26	31	37	42	47
Tensile stress parallel to z axis, σ_z / MPa	144.04	171.94	153.6	189.26	182.41	162.74	179.98	138.78
Tensile stress parallel to fiber axis, σ_f / MPa	105.04	152.3	163.44	148.5	179.86	181	172.05	104.1
Bending stress in K-L plane, σ_{KL} / MPa	88.41	44.16	76.21	0.017	66.96	41.24	76.62	42.8

表 5 界面受力分析

Table 5 Stress at interface

U nite No.		4	9	14	20	25	30	36	41
Upper matrix	Interfacial shear stress, τ_{if} / MPa	59.79	25.25	26.59	39.42	20.55	23.49	37.61	23.83
	Interfacial tensile stress, σ_{if} / MPa	44.57	2.6	15.96	61.83	68.69	12.81	45.38	70.26
U nite No.		11	16	22	27	32	38	43	49
Lower matrix	Interfacial shear stress, τ_{if} / MPa	22.40	52.79	24.64	25.54	50.1	27.03	25.98	60.24
	Interfacial tensile stress, σ_{if} / MPa	68.13	72.12	13.24	0.66	66.26	11.57	- 4.2	43.37

考察平行纤维轴拉应力(由表 4 可知), 纤维受力最大处在离端部 $L/3 \sim L/4$ 。与模型 1 相比, 纤维轴向拉应力大大降低, 可见, 纤维偏转一定角度后, 承载减少, 增强作用减弱。由表 5 可知, 纤维两侧界面拉应力不同, 纤维上侧, 拉应力为正值, 说明界面不会产生脱粘现象, 而下侧 $L/3 \sim L/4$, 应力为负值, 易产生脱粘。纤维两侧界面剪应力也不同, 但都在纤维端部处值最大。由此推出, 如果面剪切破坏, 应发生在纤维端部位置。与模型 1 相比, 纤维偏转一定角度后, 纤维轴向力大大减小, 而界面剪应力、拉应力有所增加, 由此推出, 当纤维与拉伸轴平行或夹角较小时, 纤维承载较大, 起到了增强作用, 而与拉伸轴存在较大夹角时, 随着界面剪应力、拉应力的加大, 导致界面被剪切或拉伸破坏, 纤维增强作用没有发挥。

2.3 模型 3

此模型中, 纤维偏转 90°; 模型图如图 3 所示, 有限元计算结果如表 6, 表 7 所示。

由表 6 可知, 纤维偏转 90°后, 纤维轴向力大大减小, 几乎没有承载, 没有起到增强作用。由表 7 可知, 相对于模型 1, 界面拉应力大大增加, 剪应力没有发生多大变化, 可见, 对于此模型, 破坏形式为界面拉伸破坏, 这与实验结果相符。

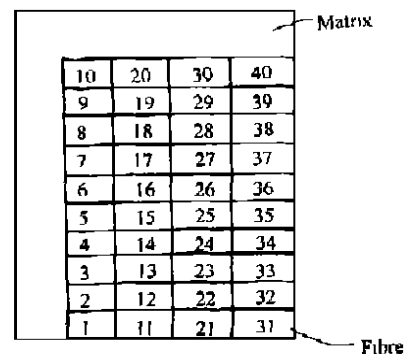


图 3 模型 3: 纤维与拉伸轴垂直分布示意图

Fig. 3 Model 3: illustration of fiber being perpendicular to tensile axis

表 6 纤维中各单元轴向应力
Table 6 Axial stress of units in fiber

Unit No.	3	4	5	6	7	8	9	10
Axial stress in fiber, σ/MPa	42.27	92.27	61.81	27.37	24.39	21.58	21.87	21.99

表 7 界面受力分析
Table 7 Stress at interface

Unit No.	13	14	15	16	17	18	19	20
Interfacial tensile stress, σ_r/MPa	113.71	110.95	107.2	108.5	107.42	110.28	109.8	110.13
Interfacial shear stress, σ_s/MPa	12.6	12.9	8.46	5.36	1	1	0.72	0

3 结 论

1) 对于同种基体而言, 加入洛阳纤维后得到的复合材料其界面孔隙率大于加入相近体积分数英国产 Saffil 纤维复合材料界面孔隙率, 而抗拉强度数据则与之相反。

2) 纤维按与拉伸轴平行、成 45° 及垂直这样的顺序, 其轴向应力逐渐减小, 表明纤维承受载荷越来越小, 增强作用也越来越弱。

3) 断裂模式比较

纤维与拉伸轴平行	纤维断裂或纤维端部界面剪切开裂
纤维与拉伸轴成 45°	界面剪切开裂
纤维与拉伸轴垂直	界面拉伸开裂

参考文献 References

- Zhang Jixi (张吉喜). Research on the Fracture and Strength Mechanism of Al Alloy Matrix Reinforced by Al_2O_3 Fibers (Al_2O_3 纤维增强 Al 合金复合材料断裂及强化机理研究) [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1994
- Yang Chuan (杨川) et al. Acta Material Composite Sinica (复合材料学报) [J], 1997; 14: 1
- Mei Zhi (梅志) et al. Description and Advancement of Interface of MMC [J]. Materials Science and Engineering (材料科学与工程), 1996; 14: 3
- Shu Bo (苏波). Past, Present and Future of Advanced Composites [J]. Materials Science and Engineering (材料科学与工程), 1993; 11: 21
- Clegg W T, Horsfall I, Mason J F et al. The Tensile Deformation and Fracture of Al-“saffle” Metal Matrix Composites [J]. Acta Metall, 1988; 33: 2 151
- Zhang Zhende (张振德), Wang Shijie (王世杰). Experimental Technology of Powder Metallurgy (粉末冶金实验技术) [M]. Beijing: Mechanical Industrial Press, 1979: 62
- Liu Zheng (刘政) et al. Acta Material Composite Sinica (复合材料学报) [J], 1991; 8: 4

Measurement of Interfacial Porosity and Finite Element Analysis of Stress Distribution in Al_2O_3 -Fiber-Reinforced Aluminum Alloy Composites

Chen Zhiwu¹, Zhang Xiyan², Zhang Jihong²

(1 Xiamen University, Xiamen 361005)

(2 Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract Al_2O_3 -fiber-reinforced aluminum alloy composites were prepared using squeeze cast method, and porosity of the composites was measured. The influence of the porosity on tensile strength of the composites is discussed. Three models of the composites (fiber being parallel, perpendicular and at an angle of 45° to tensile axis) are analyzed using finite element, and the stress distribution in fiber, matrix and at interface are discussed in detail.

Key words interface, porosity, tensile strength, finite element, stress

Biography: Chen Zhiwu, Ph. D., Department of Materials Science, Xiamen University, Xiamen 361005, P.R. China, Tel: 0086-592-2099144