

铸造 SiC_P/6061 Al 复合材料的冲击拉伸性能

尚嘉兰

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 在两种环境温度和三种冲击加载速率下, 对搅拌铸造法制备的碳化硅颗粒增强(wt 8%) 6061 Al 基复合材料的冲击拉伸性能进行了试验研究。实验结果表明, 该材料的断裂应变随加载率和环境温度的升高而下降, 模量随加载率和环境温度的升高而上升。材料的应力-应变曲线呈现脆性。

关键词 颗粒增强铝基复合材料、冲击拉伸试验、加载率和环境温度、应力-应变曲线

中图分类号 TB 331

金属基复合材料(MMC)以其高比强度、高比刚度、及较好的导电性、导热性和耐磨性等受到材料界的瞩目。非连续增强, 尤其是颗粒增强的MMC_P又以其可进行二次压力加工和其他机加工而逐渐受到青睐。但随着增强粒子含量的增加, 其可加工性能大为下降, 这又大大困扰着材料制造者。要解决MMC_P的商业化批量生产, 必须进行MMC_P铸件的挤压加工, 使其成为可进一步加工的型材。

挤压法是MMC_P研制和生产中不可缺少的加工方法。对铸件进行挤压加工时材料处于复杂的三向应力状态。由于坯件与筒壁的摩擦和坯件内外的温度差, 可能使坯件表层或中心附近的工作压力高于材料的抗拉强度而发生开裂。可见铸坯的拉伸性能对挤压加工的成败具有不可忽视的影响。因此, 研究这类材料的动态拉伸性能具有相当的现实意义。

对于MMC_P的动态拉伸性能的研究工作报导至今所见不多。为了探讨MMC_P的加工性能, 英国 Reading 大学的 Brad Dodd 研究组和法国 EN SAM 的 Jean-Luc LATALLADE 领导的 Impact 组等, 曾对粉末冶金制备并经热轧的SiC_P/2124 Al 和 SiC_P/8090 Al 两种材料进行了冲击拉伸试验^[1,2]。材料中粒子含量20wt% (17.8vol%), 粒径为3、13和37μm 三种。其应力 σ 应变 ϵ 和温度 T 之间满足 Johnson-Cook 本构方程。 $\sigma(\epsilon)$ 为幂级数关系。在250 °C 附近存在一个临界点 T^* 。当 $T > T^*$ 时, 材料的弹性极限 σ_0 和强度极限 σ_b 随温度上升而迅速下降; 当 $T < T^*$ 时, σ_0 和 σ_b 随 T 的上升而上升。

国内曾有饶世国等^[3]对SiC_P/LY12板材进行四组冲击拉伸试验, $\dot{\epsilon} = 10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$; 上海交大王松等^[4]对碳纤维、SiC_P 和二者混杂增强的ZL104复合材料(真空负压浸渍法制备)进行了静态和二种高应变速率的冲击拉伸试验。所得结果表明, MMC_P与基体材料相比较, 初始模量大为提高, 屈服强度和断裂强度降低; MMC_P的初始模量对应变率不敏感, 动态破坏强度和破坏应变比静态高。

收修改稿、初稿日期: 1998-05-21, 1997-12-18

本工作得到国家自然科学基金和中国科学院力学研究所所长择优基金资助

本文将对搅拌熔铸法制备的SiC_P/Al材料进行冲击拉伸试验研究。旨在揭示SiC_P/Al复合材料制备工艺与性能的关系，也为其服役状态下的力学行为积累数据。这将为探讨MMC的失效行为及其控制提供依据。

1 实验

1.1 试验材料

试验使用的材料为有色金属研究总院国家金属基复合材料研究中心提供。材料为用搅拌熔铸法制备的SiC_P/Al铸锭，基体为6061 Al合金，其主要合金成份为：

合金元素	Si	Mg	Cu	Mn
含量/%	0.81	1.62	0.33	0.20

增强物为SiC颗粒，名义粒径10μm，最大20μm，含量w t 8%。

试件的几何形状如图1所示。试件由铸锭用线切割加工而成。

1.2 冲击拉伸试验装置及其原理

试验在中国科学技术大学近代力学系研制的旋转盘冲击拉伸试验装置上进行。试验装置示于图2中。

当旋转盘加速到一定速度时，控制器解除对锤头的约束状态，锤头3伸出，撞击到撞块1上。撞块向x方向运动，同时在与之相连接的LY12塑性金属短杆中传播一个沿x方向的拉伸波。拉伸波通过短杆后，继续沿输入杆向右传播。由于短杆材料近于理想弹塑性，短杆受拉伸到断裂卸载，实际上在输入杆中传播的是后沿略高的近似方波。方波的幅度和长度由金属短杆的直径、长度和锤头的打击速度决定。

入射方波到达试件6时，在输入杆和输出杆7中分别传播反射波 ϵ_r 和透射波 ϵ_t 。由于输入杆和输出杆的材料和直径相同，根据一维应力波理论，试件上的应力 σ 、应变 ϵ 和应变速率 $\dot{\epsilon}$ 可由入射波 ϵ_i 、反射波 ϵ_r 和透射波 ϵ_t 计算：

$$\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t) = \epsilon(t); \quad \sigma(t) = \frac{EA}{2A_s} [\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t) - \epsilon(t)] = \frac{EA}{A_s} \epsilon(t) \quad (1, 2)$$

$$\epsilon(t) = \frac{C_0}{l_s} \int_0^t [\epsilon(\tau) - \epsilon_i(\tau) - \epsilon_r(\tau)] d\tau = \frac{2C_0}{l_s} \int_0^t [\epsilon(\tau) - \epsilon_i(\tau)] d\tau \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{C_0}{l_s} [\epsilon(t) - \epsilon_i(t) - \epsilon_r(t)] = \frac{2C_0}{l_s} [\epsilon(t) - \epsilon_i(t)] \quad (4)$$

其中E和A为杆的杨氏模量和截面积， C_0 为杆的声速， A_s 和 l_s 为试件的截面积和长度。试验使用的加卸载杆是冷轧轴承钢，直径13.96mm， $E = 216$ GPa， $C_0 = 5.26$ mm/ μ s。使用的三种前置短杆的直径为4.7和9mm。加载时旋转盘角速度为2种，实现2种撞击速度：12.5和25m/s。试验的两种环境温度为25°和100°。高温试验是将试件置于高温箱内的圆柱形工作腔（Φ6×114mm）中用电阻丝加热。控温系统控制温度，其表观温度与实际温度的最大综合误差小于±3°。

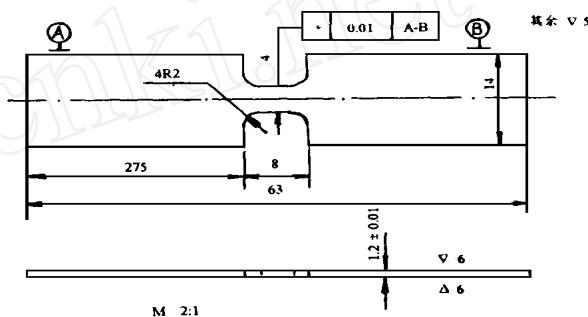


图1 冲击拉伸试件

Fig. 1 Sample for impact tensile test

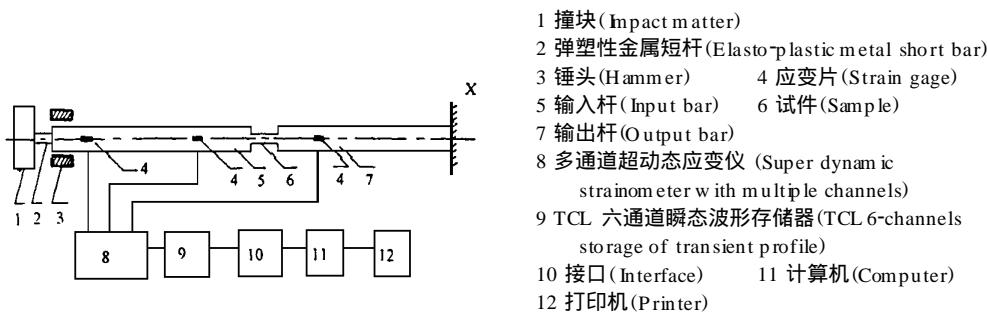
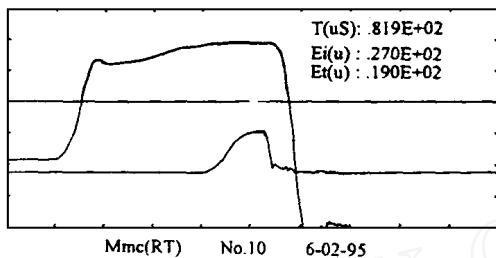


图2 旋转盘冲击拉伸试验装置 (Test assembly of impact tensile rotator disk)



横坐标为时间 t , 每格 $0.819 \times 10^2 \mu\text{t}$
 (abscissa is time t , grad in $0.819 \times 10^2 \mu\text{t}$)
 上面曲线为输入波 ϵ_i , 每格 $0.127 \times 10^2 \mu\epsilon$
 (the upper is input wave ϵ_i , grad in $0.127 \times 10^2 \mu\epsilon$)
 下面曲线为透射波 ϵ_t , 每格 $0.1907 \times 10^2 \mu\epsilon$
 (the lower is transmitted wave ϵ_t , grad in $0.1907 \times 10^2 \mu\epsilon$)

图3 典型的实验记录波形 (A set of typical testing recorded profiles)

2 实验结果和初步分析

实验共进行21次, 其中得到完整结果的18次。每种环境温度均有3个试验结果。实验情况和结果列于表1中。其中割线模量对应于应力 σ_0 。

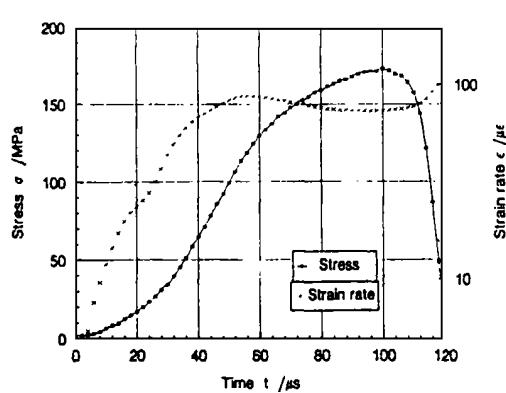
表1 铸造状态的SiC_P/6061 Al复合材料冲击拉伸试验情况一览表Table 1 Schedule of impact tensile test for SiC_P/6061 Al composite

No	环境温度 /	加载率 等级	应力峰值 σ_0/MPa	应变峰值 $\epsilon_0/\mu\epsilon$	初始弹模 E/GPa	割线弹模 E/GPa	最大应变率 $\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$
7	—	低	172	5887	66.7	51.5	73.6
8	—	低	175	5872	66.6	51.4	74.0
9	—	低	176	5761	68.7	52.7	72.4
1	—	中	174	4600	112.4	60.7	578.3
2	—	中	171	4479	115.6	61.2	572.1
3	—	中	171	4533	114.6	61.2	579.1
20	—	高	179	4675	132.9	69.5	502.2
23	—	高	178	3620	99.7	70.1	607.4
24	—	高	179	4008	125.5	68.3	547.1
10	—	低	151	4819	79.6	48.9	130.3
11	—	低	152	4853	79.3	48.6	132.0
12	—	低	151	4937	77.5	47.7	134.4
4	—	中	157	3668	94.9	61.4	335.7
5	—	中	155	3632	94.6	61.2	332.4
6	—	中	158	3683	95.3	61.6	337.1
21	—	高	165	2995	132.3	65.3	484.9
22	—	高	163	3201	139.7	67.3	557.5
26	—	高	167	3204	151.3	71.5	484.2

注: 1) 环境温度: —, $T = 25^\circ\text{C}$; —, $T = 100^\circ\text{C}$; 2) 加载率等级: 低 $\dot{\epsilon} = 70\text{s}^{-1}$; 中 $\dot{\epsilon} = 470\text{s}^{-1}$; 高 $\dot{\epsilon} = 1000\text{s}^{-1}$;

3) 表中 ϵ_0 和 σ_0 是当应力达到峰值 σ_0 时的应变和应变率。

图4是经过计算处理得到的试件上的应力 $\sigma(t)$ 和应变率 $\dot{\epsilon}(t)$ 。从图4中可以看到, 在加载过程中应力有一个较长的上升过程, 在应力达到约50M Pa之后, 应变率才达到大致稳定的阶段。当应力达到峰值后, 便迅速卸载。



其中No. 20和No. 21为高加载率试验, No. 1和No. 4为中加载率试验, No. 9和No. 10为低加载率试验, 以及No. 20、No. 1和No. 9在 σ_0 处的割线

No. 20 & No. 21 under high loading rate, No. 1 & No. 4 under middle loading rate,

No. 9 & No. 10 under low loading rate, and the secants of No. 20, No. 1 and No. 9

图4 试验段所经历的应力 $\sigma(t)$ 和应变率 $\dot{\epsilon}(t)$
(stress history $\sigma(t)$ and the strain rate history $\dot{\epsilon}(t)$)

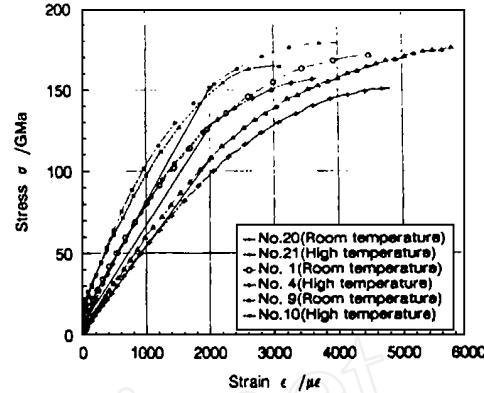


图5 冲击拉伸试验的应力-应变曲线
The stress-strain curve in the test

图5给出两种不同温度、三种加载率的应力-应变曲线以及No. 20、No. 1和No. 9在 σ_0 处的割线。图中可见, 该材料的 $\sigma(\epsilon)$ 曲线无明显的弹性段、屈服点和塑性流动段。加载率低的No. 9和No. 10断裂强度较低而断裂应变较大, 割线模量较小。加载率最高的No. 20和No. 21断裂强度较高, 断裂应变较小, 割线模量较大。由此可以认为, 铸态 SiC_P/6061 Al 在加载率升高时断裂强度略有上升, 断裂应变下降, 模量提高。本工作关于断裂强度和断裂应变的变化趋势与文献^[1]相同, 关于模量的结果不同于文献^[4]。无论哪一种加载速率, 环境温度100 和25相比较, 温度高则断裂强度、断裂应变和模量均较低。

图6给出冲击拉伸断口的扫描电镜照片。观察表明, 断口上有粒子拔出和粒子断裂, 更多的是基体断裂。基体上有大量河流状花样的脆性断口, 如图6a; 也常见玻璃状(图6b)和贝壳状断口(图6c)。在图6c左上部的隆起部分, 有直径1~3 μm 的小而浅的凹坑, 是基体金属发生韧性断裂的韧窝。此外还观察到长达数十 μm 的基体滑移面(图6d)。断口观察表明, 该金属基复合材料的断裂失效以脆性为主, 但基体仍存在韧性断裂现象。这些特征与静态试验结果类似^[5]。

本工作材料为待进行挤压加工的铸造状态 SiC_P/6061 Al 复合材料, 经搅拌铸造而成。该材料在热挤压时易于发生张性断裂的主要原因是其具有脆性应力-应变关系, 强度和延伸率不高, 且随加载率和温度的升高而下降。因此作者认为, 解决挤压开裂问题一方面需参考本实验结果选定适当的挤压速度, 以避免加载率过高引起强度和延伸率下降。另一方面需改进制备工艺, 如提高粒子与基体的粘结强度, 改善粒子在基体中的分散程度, 减少枝晶和胞状组织等, 以改善铸锭性能, 提高其拉伸强度和延伸率。



(a) 河流状花样, 左边中部有粒子团, 试件No. 10

(a) River pattern with a cluster of particles at the left middle part, sample No. 10

(b) 玻璃状断口, 试件No. 8 (b) Glassy fracture, sample No. 8

(c) 贝壳状断口, 中部有粒子拔出的孔洞, 左上部有直径1~3μm 的韧窝, 试件No. 10

(c) Clam shell fracture with holes formed by pulled particles in the middle

and dimples of 1~3μm diameters at the upper left, sample No. 10

(d) 基本上长达数十微米的滑移面, 试件No. 4 (d) The matrix slip band (1×10μm in length), No. 4

图6 材料冲击拉伸断口的扫描电镜观察

Fig. 6 SEM micrographs showing the fracture surface in impact tensile test

3 结 论

由现有实验结果得到对 SiC_P/6061 A1 材料性能的认识为:

(1) 在应变率为 $2 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ 以下, 环境温度25 和100 范围内, 铸造状态 w t8% SiC_P/6061 A1 材料的拉伸强度为172 MPa ($\pm 12\%$), 对加载率不太敏感。

(2) 应变峰值低, 且随加载速率的升高而降低, 室温时降低为0.59% ~ 0.36%, 高于静载值0.33%; 100 时降低为0.49% ~ 0.32%。

(3) 应力-应变曲线为二次曲线, 无明显屈服点和塑性流动段, 表现出较典型的脆性。

(4) 断口观察表明材料细观组织中存在一些 SiC_P 颗粒聚团、铸造胞状组织造成的原始缺陷和枝晶。冲击拉伸试验的断口以脆性断裂为主, 也有韧性断裂表现, 与力学实验结果吻合。

致 谢 中国科学技术大学夏源明教授和周元鑫同志在冲击拉伸试验中给予了大力支持, 中国科学院力学研究所李端义高工在断口观察中积极协助, 凌中副教授参加了实验工作, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 Workability of metal and metal matrix composite, in particular Al-Li alloy and based composites, Annual Report, 1st June 1992-31 May 1993 BE-4500-90(Brite-Euram-CT91-0398)
- 2 Jichuan Fu, Jean-Luc LATTA LLADE, Contribution to the study of structure-property relationships of the metal matrix composite materials based on Al In: Wang Tzu Chiang, Tsu-Wei Chou, ed Proc in Advanced Materials and Mechanics, ICAM '96 Beijing, Peking Univ. Press, 1996, 991~ 1001
- 3 饶世国, 涂志华, 夏源明 $\text{SiC}_\text{P}/\text{Al}$ 复合材料的动态拉伸力学性能实验研究. 见: 李顺林主编 复合材料进展- 全国第八届复合材料会议文集 北京: 航空工业出版社, 1994 957~ 961
- 4 王松等 $\text{C}(\text{Gr})/\text{Al}$ 动态力学性能研究. 见: 95' 金属和陶瓷基复合材料学术研讨会论文集 上海: 同济大学出版社, 1995, 62~ 66
- 5 孔常静, 尚嘉兰, 汪海英 铸态 $\text{SiC}_\text{P}/\text{Al}$ 复合材料原位拉伸细观损伤的研究. 复合材料和工程学报, 已接受, 待刊

BEHAVIOR OF IMPACT TENSION IN A CAST $\text{SiC}_\text{P}/6061 \text{Al}$ COMPOSITE MATERIAL

Shang Jialan

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract The behavior of the cast (wt 8%) $\text{SiC}_\text{P}/6061 \text{Al}$ composite material under impact tensile loading was reported in this paper. The tests were conducted in two environmental temperatures and three loading rates. The results showed that the broken strain of the material decreased with raising the loading rate and environmental temperature. The modulus increased when the loading rate and environmental temperature increased. The stress-strain curve presented a brittle character.

Key words alum inum based particulate reinforced composites, impact tensile tests, loading rates, environmental temperature, stress-strain curves