

# $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}/\text{ZL109}$ 金属基复合材料的强度性能研究

张若棋<sup>a</sup> 杨广<sup>a</sup> 王诚洪<sup>a</sup> 赵国民<sup>a</sup> 张万甲<sup>b</sup>

(<sup>a</sup> 国防科技大学 长沙 410073)

(<sup>b</sup> 中物院流体物理研究所 成都 610003)

**摘要** 介绍了硅酸铝短纤维增强 ZL109铸铝合金 ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}/\text{ZL109MMC}$ ) 的静态实验和冲击实验结果, 给出了这种复合材料的静态强度、动态屈服强度和层裂强度并对实验结果进行了分析讨论。<sup>\*</sup>

**关键词** 金属基复合材料 动态屈服 层裂

**中图法分类号** TB33 O346.4

## 1 引言

金属基复合材料是由一种增强材料与另一种金属基体复合组成的。增强剂可以是碳、硼或碳化硅等高强度材料制成的连续纤维或丝, 也可以是氧化铝、碳化硅或碳化硼等短纤维或颗粒。与未增强的金属材料相比, MMC 具有独特的力学、物理性能, 因而在高技术领域和军事部门有重要的应用前景。例如, 铝基复合材料是非常令人瞩目的航空、航天用的高温材料, 它可用于飞机涡轮发动机和火箭发动机热区和超音速飞机的气动表面。

随着 MMC 应用领域的日益扩大, 研究 MMC 的动态力学性能也日益活跃和深入。例如, B. T. Altman 等研究了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒增强 2014 铝的均匀变形特性<sup>[1]</sup>。U. V. Rajendra 等研究了铝锂合金中 SiC 颗粒的分布取向对屈服强度等性能的影响<sup>[2]</sup>。Los Alamos 的 R. S. Hixson 等对不同体积百分比的多角形  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒增强 6061-T6 铝的冲击硬化和层裂特性作了研究<sup>[3]</sup>。近年来, 他们又开展了连续纤维增强金属基复合材料的动态力学性能研究。上述的实验研究结果从不同侧面指出, 影响 MMC 力学性能的因素远比金属材料复杂。可以说有关 MMC 的动态力学性能研究才开始不久, 有待进一步深入下去。我们用静态和冲击加载两种方法, 对硅酸铝 ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ ) 短纤维增强 ZL109 铸铝合金 ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}/\text{ZL109MMC}$ ) 的静态强度、动态屈服强度和层裂强度进行实验研究并对实验结果作一些分析讨论。

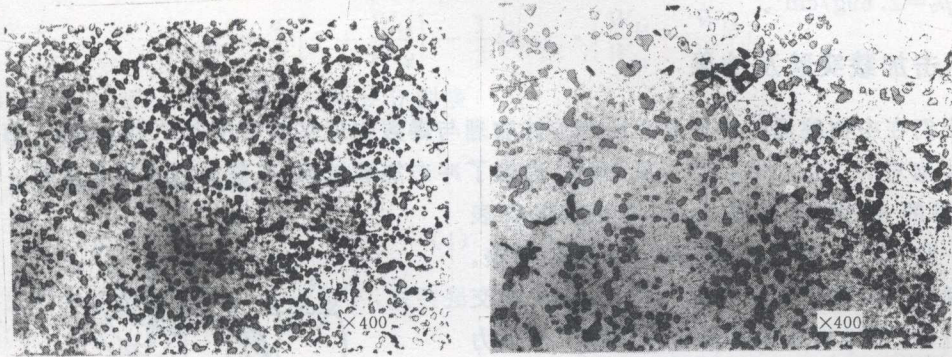
## 2 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}/\text{ZL109MMC}$ 的静态力学性能

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}/\text{ZL109MMC}$  的基体是铸铝合金 ZL109 基体的合金成分 (重量百分比) 为: Si 12%, Mg 1.2%, Cu 0.9%, Ni 0.8%。增强相是颗粒状的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$  短纤维, 尺寸在 2~8 $\mu\text{m}$  之间, 体积分数为 15%。纤维分布情况用光学显微镜观察, 如图 1 所示。可以看出, 短纤维在基体

<sup>\*</sup> 张若棋: 男, 1935年生, 教授, 博导。

1996-10-18日收到原稿, 1997-03-12收到修改稿。

中呈杂乱走向,分布比较均匀。因此,这种复合材料可以近似看成一种各向同性材料。



(a)横断面的形貌 (b)纵断面的形貌  
(a)The perpendicular view (b)The parallel view

图1  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2/\text{ZL109}$  MMC 的显微形貌  
Fig. 1 Optical Micrographs of  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2/\text{ZL109}$  MMC

表1  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2/\text{ZL109}$  MMC 的静态力学性能

Table 1 Static Mechanical Performance parameters for  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2/\text{ZL109}$  MMC

试验	杨氏模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\nu$	压缩屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{GPa}$	拉伸强度 $\sigma_b/\text{GPa}$	延伸率 $\delta/(\%)$
压缩	71	0.31	0.24		
拉伸	71	0.31		0.12	0.22

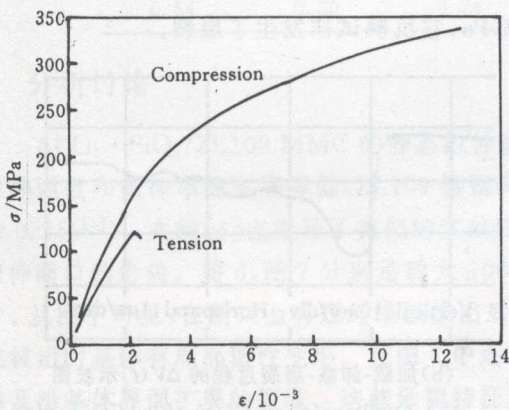


图2  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2/\text{ZL109}$  MMC 的静态工程应力-应变曲线

Fig. 2 Static engineering stress-strain curve for  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2/\text{ZL109}$  MMC

我们用 WDS-100B 型电子式万能试验机对  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2/\text{ZL109}$  MMC 的静态力学性能进行了测试。拉伸试验时的加载速度为 3mm/min,压缩试验时的加载速度为 2mm/min。主要的试验结果列入表 1 中。图 2 是实测的静态工程应力-应变曲线。从图 2 中的拉伸曲线看出,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2/\text{ZL109}$  MMC 是一种脆性材料。

利用上述实验结果,可以计算  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2/\text{ZL109}$  MMC 的体积模量  $K$ 、剪切模量  $G$ 、弹性体波速度  $c_b$  和弹性纵波速度  $c_L$ ,分别为

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} = 62.2\text{GPa}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = 27.1\text{GPa}$$

$$c_b = \sqrt{K/\rho_0} = 4813\text{m/s}$$

$$c_L = \sqrt{(K + 4G/3) / \rho_0} = 6050 \text{ m/s}$$

式中:  $\rho_0 = 2.69 \text{ g/cm}^3$

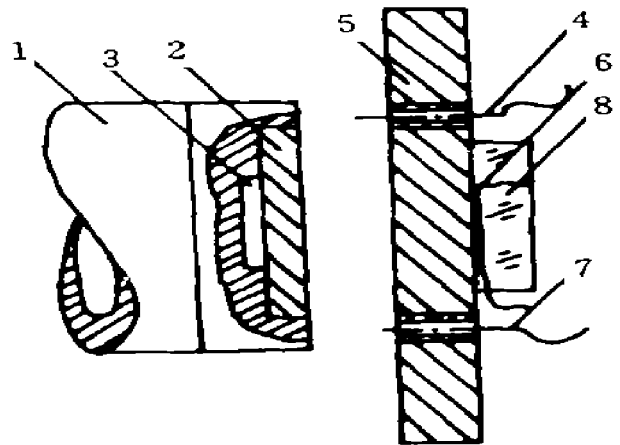
### 3 冲击加载实验及结果

我们在中物院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室用内径为 100mm 的一级压缩气体炮对 A1O<sub>3</sub> SD<sub>2</sub>/ZL109MMC 进行了冲击加载试验, 实验原理如图 3 所示。飞片为 2mm 厚的 45 钢, 试件厚 4mm。在试件的背表面贴一块 12mm 厚的有机玻璃 (PMM A) 衬垫。二个锰铜压阻应力计埋入试件与 PMMA 的交界面处, 用双通道示波器同时记录这二个应力计的输出信号。另外, 由时间间隔测量仪测得的时间差和实验前预先测出的两个探针的间距算出飞片速度。

图 4 是两个锰铜压阻应力计输出的电压波形  $\Delta V(t)$ 。实验测得飞片速度为 324m/s (a) 是加载-卸载过程的  $\Delta V(t)$  示波图, (b) 是加载-卸载-层裂过程的  $\Delta V(t)$  示波图。由  $\Delta V(t)$  利用 (1) 式可算出应力  $\sigma(t)$ 。

$$\sigma(t) = \frac{1}{A} \frac{\Delta V(t)}{V_0} \quad (1)$$

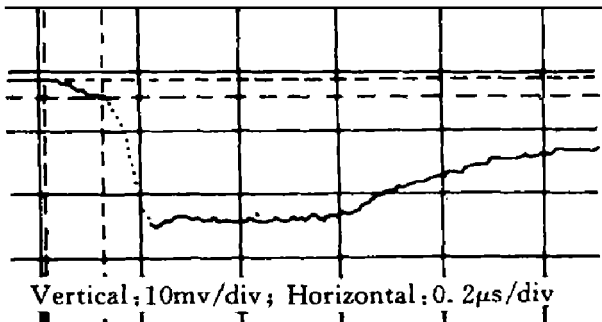
式中:  $V_0$  为锰铜计输出端的初始电压;  $A$  为锰铜计的压阻系数 ( $2.4 \times 10^{-2} \text{ GPa}^{-1}$ )。图 (5) 是用 (1) 式由图 (4) 算得的试件与 PMMA 交界面处的应力历史。  $\sigma_A$  是弹性前驱波的应力 (0.20GPa);  $\sigma_B$  是应力峰值 (1.52GPa);  $\sigma_C = 0.75 \text{ GPa}$ , 它反映试样发生了层裂。



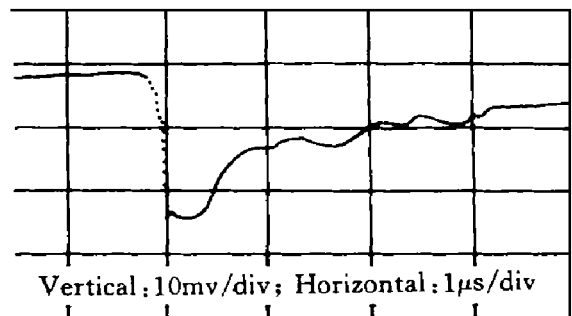
1 Projectile; 2 Impactor; 3 Gap; 4 Velocity pins  
5 Target specimen; 6 Manganin gauge  
7 Trigger pins; 8 PMMA backing

图 3 实验装置原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup



(a) 加载-卸载过程的  $\Delta V(t)$  示波图  
(a) Oscilloscope of  $\Delta V(t)$  of loading and unloading



(b) 加载-卸载-层裂过程的  $\Delta V(t)$  示波图  
(b) Oscilloscope of  $\Delta V(t)$  of loading and unloading spallation

图 4 电压变化  $\Delta v(t)$  示波图

Fig. 4 Oscilloscope of electric voltage variation  $\Delta V(t)$

为了从  $\sigma_A$ 、 $\sigma_B$  和  $\sigma_C$  求出试件中的塑性波峰值应力  $\sigma_m$  和试件的 Hugoniot 弹性限  $\sigma_{HEL}$ 、动态屈服强度  $Y_d$  及层裂强度  $E$ , 我们用线弹性-理想塑性材料模型及弹塑性波理论导出相应的计算公式。在我们的实验条件下, 因试件和 PMMA 中传播的都是弹塑性双波, 所以

$$\epsilon_M = \epsilon_{HEL} + \frac{\epsilon_B}{2} \left[ 1 + \frac{W_{bt}}{W_{bp}} \right] - \frac{\epsilon_A}{2} \left[ 1 + \frac{C_{bt}}{C_{bp}} \right] \quad (2)$$

$$\epsilon_{HEL} = \frac{\epsilon_A}{2} \left[ 1 + \frac{W_{Lt}}{W_{Lp}} \right] - \frac{1}{2} (\epsilon_{HELp} \cdot \left[ \frac{W_{Lt}}{W_{bp}} - \frac{W_{Lt}}{W_{Lp}} \right]) \quad (3)$$

式中:  $W_L = d_0 C_L$ ,  $W_b = d_0 c_b$ , 下标 t 和 p 分别表示试件和 PMMA。

$Y_d$  可用熟知的公式求得

$$Y_d = \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \epsilon_{HEL} \quad (4)$$

在忽略弹性前驱波影响的近似下, 层裂强度  $E$  为<sup>[4]</sup>

$$E = \frac{1}{2} \left| \epsilon_B \left[ \frac{W_t}{W_p} - 1 \right] - \epsilon_C \left[ \frac{W_t}{W_p} + 1 \right] \right| \quad (5)$$

式中:  $W = d_0 c$ ,  $c = 2c_b c_L / (c_b + c_L)$ , 称为组合波速

由 (2) 式算得  $\epsilon_M = 4.65 \text{ MPa}$  用 (3)、(4) 和 (5) 式计算的  $\epsilon_{HEL}$ 、 $Y_d$  和  $E$  列在表 2 中。表中也列出了 A lO<sub>3</sub>·SD<sub>2</sub>/ZL109MMC 的静态压缩屈服强度  $\epsilon_{0.2}$ 、静态拉伸强度  $\epsilon_b$  和延伸率  $W$  以资比较。

表 2 A lO<sub>3</sub>·SD<sub>2</sub>/ZL109MMC 的某些力学性能参数

动态性能参数			静态性能参数		
$\epsilon_{HEL} / \text{GPa}$	$Y_d / \text{GPa}$	$E / \text{GPa}$	$\epsilon_{0.2} / \text{GPa}$	$\epsilon_b / \text{GPa}$	$W / (\%)$
0.54	0.30	0.74	0.24	0.12	0.218

### 4 分析讨论

A lO<sub>3</sub>·SD<sub>2</sub>/ZL109MMC 的静态拉伸试验表明, 硅酸铝短纤维加入后, 复合材料的常温拉伸强度和延伸率都显著降低 (ZL109 铸铝合金在人工时效后的拉伸强度为 0.2 GPa, 延伸率为 0.5%<sup>[5]</sup>)。文献 [6] 也报导了类似的实验结果。为了分析这种现象, 我们用扫描电镜观察了拉伸断口的形貌。图 6 图 7 分别是放大 1000 倍和 2000 倍的拉伸断口的扫描电镜 (SEM) 照片。从图中可见, 在断口上有短纤维被拔出后所留下的窝和沟槽。断口上云状的韧窝表明短纤维拔出时基体有局部塑性变形。在图 7 中还可以看到因纤维基体脱粘后裸露在断口上的短纤维及沿基体界面扩展的裂纹。这些形貌特征表明, 由于纤维和基体之间的结合比较脆弱, 当试件拉伸时, 在纤维末端产生的应力集中首先使纤维和基体的界面开裂并进一步导致脱粘。所以, 纤维的增强作用不仅得不到发挥, 反而形成大量缺陷, 这是 A lO<sub>3</sub>·SD<sub>2</sub>/ZL109MMC 常温拉伸强度显著降低的主要原因。

A lO<sub>3</sub>·SD<sub>2</sub>/ZL109MMC 的动态断裂特征与静态断裂相比有明显差别。图 8 图 9 是试件动态碎裂断口的 SEM 照片, 放大倍数分别为 1500 和 2000。可以看出, 断口处的韧窝比较大。这表明在动态断裂过程中, 纤维端部处的基体发生较大的局部塑性变形。这种局部塑性变形在高

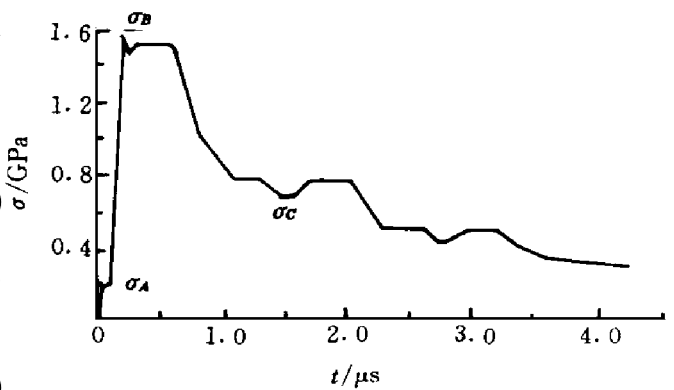


图 5 试件 /PMMA 界面处的应力历史  $\epsilon(t)$  (飞片速度: 324m/s)

Fig 5 The stress history at the specimen /PMMA interface of a typical experiment at impacting velocity of 324m/s



图 6 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub>/ZL109 MMC 的拉伸断口

Fig. 6 Fractograph of tensile sample

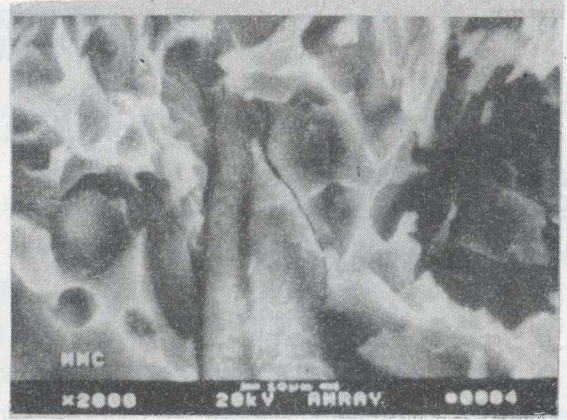
图 7 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub>/ZL109 MMC 的拉伸断口

Fig. 6 Fractograph of tensile sample

形在高应变率下增大的现象是与一般认识相矛盾的。对此我们没有进一步研究。但是 S. Pickard 等<sup>[7]</sup>为了找到能说明 SiC<sub>w</sub>/2124Al 的断裂应变随应变率增加而增加的原因,对回收样品作了 TEM 观察,他们发现高应变率加载后试样中的位错密度比同样试样在静载条件下的位错密度低。这个实验结果对解释本文的实验现象会有所启示。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub>/ZL109 MMC 动态断裂的另一个特征是在断口上有较多交叉分布的微裂纹(图 8、图 9),有的微裂纹沿纤维与基体的界面,有的穿过短纤维,也有的穿过基体晶粒或切窝的边缘。正是这些微裂纹的萌生、发展和会聚,造成了试件碎裂。

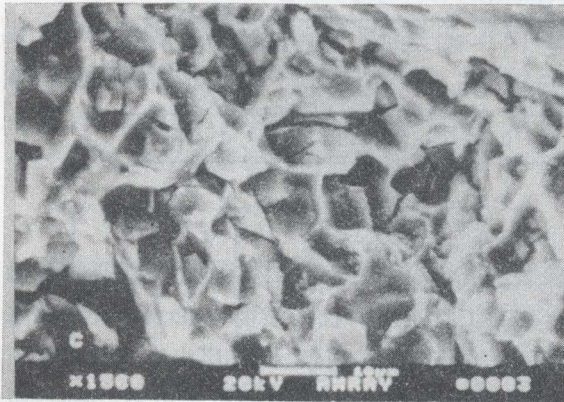
图 8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub>/ZL109MMC 的动态断裂断口

Fig. 8 Fractograph of dynamic fractured sample

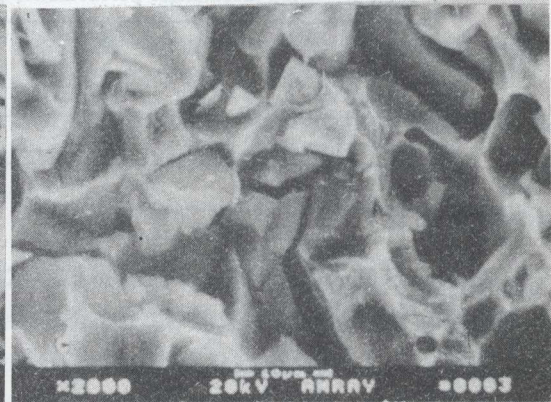
图 9 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub>/ZL109MMC 的拉伸断口

Fig. 6 Fractograph of dynamic fractured sample

最后,我们要指出,研究 MMC 的动态强度性能是一件很复杂的工作。这是因为 MMC 中基体的性能,增强相的性能及其几何形貌、体积分数和在基体中的分布状况,以及 MMC 的成型和热处理工艺等都对 MMC 的强度性能有重要影响,因此必须进行系统研究。我们得到的结果,只是这样一类研究工作中的一部分。

试件由上海交大复合材料研究中心李贤淦教授提供,断口形貌分析得到杨德明教授的帮助,特此致谢。

## 参 考 文 献

- 1 Altman B S, et al Homogeneous of Deformation of a Particulate Reinforced Metal Matrix Composite. In Schmidt S C, et al ed Shock Compression of Condensed Matter-1991 North-Holland [series] 1992 543-546
- 2 Rajendra U V, Anna K Z. Dynamic Mechanical Deformation of a SiCp/Al-Li(8090) Composite. In Schmidt S C et al ed High-pressure Science and Technology-1993 New York: AIP press, 1994 773-776
- 3 Hixson R S, et al Effects of Interfacial Bonding on Spallation in Metal Matrix Composite. In Schmidt S C, Tao W C, ed Shock Compression of Condensed Matter-1995 New York: AIP press, 1996 555-558
- 4 曾元金, 经福谦, 张万甲. 钨合金的层裂强度研究. 高压物理学报, 1992, 6(1): 58-67
- 5 袁成祺. 铸造铝合金: 镁合金标准手册. 北京: 中国环境科学出版社, 1994 44
- 6 刘世楷, 杨 川. 纤维质量、基体成分、粘结剂对  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 短纤维增强铝基合金复合材料强度的影响. 见: 李顺林, 主编. 复合材料进展. 北京: 航空工业出版社. 1994 402-407
- 7 Pickard S, Derby B, Harding J et al Scripta Metal 1988 22 601

## STUDY ON THE STRENGTH BEHAVIOR OF $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SD}_2/\text{ZL109}$ METAL-MATRIX COMPOSITE

Zhang Ruoqi<sup>a</sup>, Yang Guang<sup>a</sup>, Wang Chenghong<sup>a</sup>, Zhao Guomin<sup>a</sup>, Zhang Wanjiab<sup>b</sup>

(a National University of Defense Technology, Changsha, 410073)

(b Institute of Fluid Physics, CAEP, Chengdu, 610003)

**ABSTRACT** Short fiber or particulate reinforced Metal Matrix Composites (MMC) are a class of advanced materials. These composites have extensive potential for use in aerospace and automotive industries due to their lower densities and superior mechanical properties. It is imperative therefore to study the strength behavior of such MMC. In this paper, we describe the results of quasi-static tensile and compression test, or of plate impact experiments conducted on a  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SD}_2$  short fiber reinforced ZL109 cast aluminum alloy. The tensile strength, compressive yield strength, dynamic yield and spall strength are presented. Discussion of the mechanical characterization of the Composite is given.

**KEY WORDS** Metal Matrix Composite, dynamic yield, spallation