

# 陶瓷纤维增强梯度铝基复合材料研究

朱秀荣 童文俊 费良军 王 荣

( 五二研究所宁波分所 宁波 315041 )

**摘 要** 采用挤压铸造法制造陶瓷纤维增强梯度铝基复合材料,通过观察其金相组织、测试其热学性能,并对梯度复合材料活塞顶的温度分布及隔热效果进行了计算。结果表明,采用挤压铸造法制造出的梯度铝基复合材料,梯度层间纤维分布逐渐过渡无分层现象;且采用该材料制造的活塞顶具有良好的隔热效果。

**关键词** 铝基复合材料,挤压铸造,短纤维,梯度

## A Study on Gradient Aluminum Matrix Composite Reinforced by Ceramic Fibers

Zhu Xiurong Tong Wenjun Fei Liangjun Wang Rong

( Ningbo Branch, No. 52 Research Institute Ningbo 315041 )

**Abstract** The squeeze casting technology was used to manufacture gradient aluminum matrix composite reinforced by ceramic fibers, and metallographic structures and thermal properties of the composites were studied. The temperature distribution and heatproof effect of piston top made by this kind of composite was also calculated. It is indicated that a gradual fiber distribution with no delamination and excellent heatproof can be obtained by the squeeze casting for the gradient aluminum matrix composites.

**Key words** Aluminum matrix composite, Squeeze casting, Short fiber, Gradient

### 1 前言

我国未来军用发动机将朝着大功率、低散热方向发展。随着发动机功率的提高,活塞的热负荷增加,传统的铝合金活塞已不能满足使用要求,为此,必须研制具有良好耐热、隔热效果的活塞顶材料。对活塞顶进行陶瓷材料等离子喷涂或用陶瓷部件镶嵌是解决活塞耐热问题的一种方法<sup>[1]</sup>,但由于陶瓷和铝合金膨胀系数相差较大,在服役时因热应力易导致陶瓷层剥落或破裂。日本科技厅在1987年就开始实施“关于缓和热应力的FGM(梯度功能材料)的基础研究及开发”<sup>[2]</sup>。到目前为止,梯度功能材料研究仍处于实验室阶段。

陶瓷纤维增强铝基复合材料具有密度小、高温性能好、耐磨性好、热导率低、线膨胀系数小等优点,

是制造大功率发动机活塞的理想增强材料之一。用梯度铝基复合材料制造活塞顶可以有效保证活塞顶部的耐热隔热要求,同时,该梯度结构可以缓和铝基复合材料和活塞本体因膨胀系数差异而导致的热应力。本文将就梯度复合材料的制造、性能以及梯度复合材料活塞顶隔热效果作一简单介绍。

### 2 复合材料制造

#### 2.1 材料选择

选用中科院山西煤炭化学研究所生产的氧化铝短纤维为增强剂,其性能为:

抗拉强度	$\sigma_b = 0.8 \text{ GPa} \sim 1.2 \text{ GPa}$ ;
弹性模量	$E = 200 \text{ GPa}$ ;
纤维平均直径	$3 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ ;
密度	$= 3.3 \text{ g/cm}^3 \sim 3.5 \text{ g/cm}^3$ 。

收稿日期:1999-09-03

朱秀荣,1965年出生,高级工程师,主要从事金属基复合材料的研究工作

基体合金为 ZL109,成分为(质量分数):

Si 11.0%~13.0%;

Cu 0.5%~1.5%;

Mg 0.8%~1.3%;

Ni 0.8%~1.5%;

其余为 Al。

## 2.2 梯度层结构

梯度层结构分为 A、B、C、D 四层,其中 A 层为 30%Al<sub>2</sub>O<sub>3f</sub>/ZL109,B 层为 20%Al<sub>2</sub>O<sub>3f</sub>/ZL109,C 层为 10%Al<sub>2</sub>O<sub>3f</sub>/ZL109,D 层为 ZL109。

发动机活塞在工作时顶部承受的热负荷最高,采用高体积分数的纤维增强铝基复合材料制造活塞顶表层(A 层),一方面利用其良好的高温性能起到耐热作用,另一方面利用其低的热导率起到隔热效果。从 A 层到 D 层,纤维含量逐渐降低,其目的是缓和因膨胀系数差而造成的热应力分布。

## 2.3 梯度复合材料制造

Al<sub>2</sub>O<sub>3f</sub>用自制的纤维粉碎装置进行粉碎、除渣,用真空压滤法制造梯度预制件,用挤压铸造法制造梯度复合材料<sup>[3]</sup>。首先将预热好的预制件放入模具中,浇入精炼好的铝合金液加压,则铝液在压力下渗透到预制件空隙中,保压至铝合金液完全凝固,卸压后取出即得到复合材料。通过调节预制件与挤压铸造模具的预热温度以及挤压铸造压力、速度等工艺参数可以保证预制件完全被渗透,得到高质量的梯度复合材料。具体工艺参数为:

预制件预热温度	700	;
模具预热温度	350	;
铝液浇注温度	750	;
挤压铸造压强	100 MPa	;
保压时间	90 s。	

为改善铸造组织,得到高性能的材料,必须进行热处理。这里所用的热处理工艺和 ZL109 相同,具体工艺为:

固溶处理	(500 ±5)	×6 h	水淬;
时效处理	(180 ±5)	×16 h	空冷。

## 3 梯度复合材料性能测试及结果分析

### 3.1 复合材料的组织分析

图 1 为 B 层复合材料金相照片,纤维在基体中分布均匀。图 2 为梯度复合材料中界面结合处的金相照片,左边为 C 层,右边为 B 层。可见界面附近纤

维分布是逐渐过渡的,没有出现分层现象。



图 1 20%Al<sub>2</sub>O<sub>3f</sub>/ZL109 复合材料金相照片 100 ×

Fig. 1 Metallograph of 20% Al<sub>2</sub>O<sub>3f</sub>/ZL109 composite

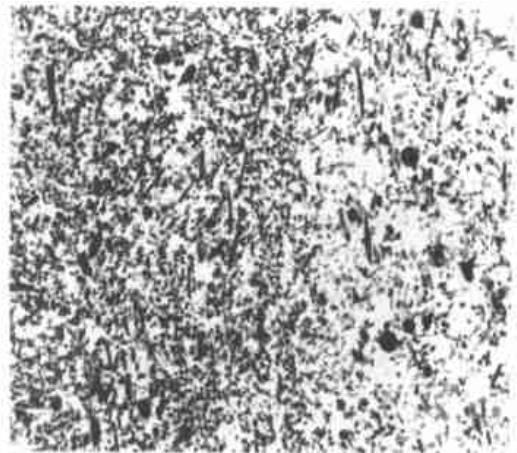


图 2 梯度复合材料界面结合处金相照片 100 ×

Fig. 2 Interface metallograph of the gradient composites

### 3.2 复合材料热学性能

复合材料的线膨胀系数测定采用 HTV 型光学膨胀仪进行,以 150 /h 速度升温,试样尺寸为 5 mm ×30 mm,测试结果如表 1 所示。

表 1 复合材料线膨胀系数

Tab. 1 Linear expansion coefficient of the composites

材料	线膨胀系数 10 <sup>-6</sup> /K			
	100	200	300	400
ZL109	19.47	19.67	21.14	22.12
10%Al <sub>2</sub> O <sub>3f</sub> /ZL109	17.23	17.61	19.57	20.43
20%Al <sub>2</sub> O <sub>3f</sub> /ZL109	16.75	17.29	18.96	19.20
30%Al <sub>2</sub> O <sub>3f</sub> /ZL109	14.39	14.73	15.97	16.10

从表 1 可见,复合材料中增强剂的加入使复合材料的线膨胀系数降低。这是因为  $Al_2O_3$  的热膨胀系数很小,当复合材料温度变化时, $Al_2O_3$  的变形比基体小,相当于给基体施加了压应力,从而限制了基体的热变形,使复合材料的线膨胀系数降低。

采用激光脉冲法(GB1201. 1. 91)测试 30%  $Al_2O_3$ / ZL109 复合材料热导率,结果如表 2。

表 2 复合材料热导率

Tab. 2 Thermal conductance of the composite

温度/	热导率/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	
	测量值	平均值
150	62	61
	60	
250	63	62
	61	
350	64	63
	62	
450	65	64
	63	

表 3 隔热前后 150 mm 活塞热负荷计算结果对比

Tab. 3 Calculation results of thermal loads of 150 mm piston before and after taking heat insulation composite

活塞类型	最高温度 $T_{max}$ /	$T_{max}$ 位置	活塞顶中心温度/	单个活塞顶部热流量/ $W$	第一环槽底部平均温度/	隔热度/ %
原活塞	320	燃烧室外缘	302.9	7 781.1	236.3	
隔热活塞	383.4	燃烧室外缘	363.1	7 123.5	238.5	8.7

## 5 结论

(1) 采用挤压铸造法可以制造出梯度铝基复合材料,梯度层间纤维分布逐渐过渡,无分层现象。

(2) 采用梯度复合材料制造活塞顶具有良好的隔热效果。

### 参考文献

1 段树林等. 低散热发动机的研究现状及展望. 车用发

动机,1999;(2):1~6

根据文献[4],基体 ZL109 150 的热导率为 156  $W/m \cdot K$ ,而  $Al_2O_3$  的热导率很小,在复合材料受热过程中, $Al_2O_3$  使基体的热梯度分布场发生改变,阻碍了热传导。30%  $Al_2O_3$ / ZL109 复合材料的热导率仅为基体的 2/5,说明增强剂的加入,可大幅度地降低热导率,提高材料的隔热性。

## 4 梯度复合材料活塞顶隔热效果分析

隔热效果计算以 150 mm 活塞为参照。计算以 Ansys 软件为工具,根据 150 mm 活塞发动机台架试验中活塞温度场的测量结果,对比计算了采用梯度铝基复合材料活塞顶前后活塞的热流变化情况。计算采用轴对称有限元模型,表 3 为计算结果。

从表 3 可以看出,采用梯度复合材料隔热后,活塞最高温度提高。根据热力学第二定律,发动机在高温下进行燃烧对做功更为有利,因为温度升高,热力过程的不可逆性降低<sup>[1]</sup>。采用隔热方案后,隔热度达到 8.7%。若进一步提高活塞顶层中复合材料的纤维体积分数,隔热度可以得到进一步提高。

2 张幸红等. 梯度功能材料制备技术及其发展趋势. 宇航材料工艺,1999;(2):1~5

3 朱秀荣等. 挤压铸造法铸造铝基复合材料活塞. 汽车工艺与材料,1992;(10):5~6

4 张国定,赵昌正. 金属基复合材料. 上海交通大学出版社,1997:13

## 微波锂铁氧体

微波锂铁氧体是一种新型材料。本成果采用了特有的、锻烧的  $MgO:TiO_2$  混合物的镁钛离子取代铁离子,并选取适当的预烧、烧结、温变等新工艺,研制出一系列微波锂铁氧体高低功率材料,满足了闭锁式数字移项器高功率差相移环形器和高功率闭锁式快速开关等器件的需要,研制出 C 波段闭锁式数字移相器,性能优良,是小阵面雷达的关键元件,经装机使用,满足技术指标要求,并已批量生产。

·李连清·