复合材料学报 第20卷 第4期 8月 2003年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 20 No. 4 August 2003

文章编号: 1000-3851(2003)04-0023-06

SiC颗粒增强铝合金基梯度复合材料拉伸力学性能及其评价

郭 成, 郭生武, 程 羽, 张新功, 史东才
(西安交通大学 机械工程学院, 西安 710049)

摘 要: 对SiC颗粒增强铝合金基梯度复合材料的拉伸力学性能进行了研究。提出了一种新的材料力学性能评价指标——梯度系数 K_x。理论研究表明, 金属基梯度复合材料(MMGC)各组分性能的差异使其在拉伸变形时产生了三轴应力。实验及断口分析表明, 由拉伸试验获得的材料平均力学性能指标弹性模量E和屈服强度 $\sigma_{0.2}$近似符合ROM法则; 此类材料的拉伸力学性能受SiC颗粒梯度分布方式的影响。外层为基体, 芯部为高SiC含量的材料拉伸断口具有韧性断裂特征, 能发挥其性能优势。反之, 断口表现出脆性断裂特征, 降低了材料的力学性能; 受多种因素影响, 裂纹穿过层间界面时, 会引起断裂方式和扩展方向的改变。当梯度层间SiC颗粒体积分数相差较大时, 材料会产生分层开裂; 梯度系数 K_{eb}和 K_W可反映材料的梯度分布方式和性能的优劣程度, 梯度系数 K_E 则反映了材料性能的稳定性程度。

关键词: 梯度复合材料; 拉伸; 力学性能; 性能评价
中图分类号: TB331; TG304 **文献标识码:** A

TENSILE MECHANICAL PROPERTIES AND ITS EVALUATION OF ALUMINIUM ALLOY MATRIX GRADIENT COMPOSITES REINFORCED WITH SiC PARTICLES

GUO Cheng, GUO Shengwu, CHENG Yu, ZHANG Xingong, SHI Dongcai
(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The tensile mechanical properties are studied for the aluminium alloy matrix gradient composites reinforced with SiC particles. Gradient coefficient K_x, a new evaluating index of mechanical properties of materials, is put forward. The results of the basic research show that a tri-axial stress will be produced in the tensile specimens because of components property difference of the metal matrix gradient composites (MMGC). The results of the tensile test and fracture analysis show that the elastic modulus E and yield strength $\sigma_{0.2}$ of the MMGC obey approximately the Role of Mixture (ROM) law. The tensile mechanical properties of the composites are remarkably influenced by the distribution of SiC particles. Fracture of the tensile specimen appears to have a toughness character and the composites can develop their potential in tensile properties when the matrix component is in outside and the component with high SiC volume fraction is in inside. Conversely, the fracture appears to have a brittleness character and mechanical properties of the composites will be decreased. The fracture way and the crack propagating orientation will be changed by the influence of many factors when the crack grows through the bonding interface. Interface cracking could be produced if there is a great difference of SiC volume fraction between two layers of the composites. The coefficients K_{eb} and K_W can be used to identify gradient distribution and tensile properties level, but the coefficient K_E can be used to identify steadiness extent of the composites.

Key words: gradient composites; tension; mechanical properties; properties evaluating

收稿日期: 2002-02-28; **收修改稿日期:** 2002-11-04
作者介绍: 郭 成(1948-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为先进材料制备与成形控制、冲压件质量控制和模具CAP。
通讯作者: 郭 成, E-mail: gch@mail.xjtu.edu.cn

世界经历了两次工业革命,这两次革命的推动力都是新材料的发展和广泛应用。新材料是指那些新近出现和仍在发展中的具有优异性能的材料。它具有传统材料所不具备的高性能。金属基梯度复合材料(MMGC)具有均质和复层材料所不具备的优点,是目前新材料研究和开发的一个重点[1~3]。对MMGC进行深入的研究无疑对新材料发展具有重要的意义[4, 5]。

MMGC组织结构与性能的梯度分布特征给材料性能评价带来了困难。目前,国内外还很少见到对MMGC力学性能评价的报道[6~9]。因此,对这类材料的力学性能评价成为阻碍其工程产业化进程的关键。本文中采用拉伸试验方法对材料的力学性能进行了实验研究,在理论分析基础上,揭示了这类材料力学性能与各组分性能的关系;分析了SiC梯度分布方式及其组织结构对材料性能的影响;提出了一种新的材料力学性能评价指标。

1　实验材料、设备和方法

实验用材料为PM法制备的Al-Cu-Mg和Al-Cu基复合材料,基体成份如表1所示。增强体选用平均粒度为10 μm的SiC颗粒。为进行比较,制备了基体、5%、10%、15%和20% 5种体积分数的均质复合材料试样。

表1　基体的化学成份

Table 1　Chemical composition of the matrix　　vol %

Matrix	Cu	Mg	Si	Fe	Al
Al-Cu-Mg	4.50	0.60	< 0.10	< 0.50	Balance
Al-Cu	5.00	0.00	< 0.30	< 0.15	Balance

MMGC毛坯按由内到外的规律分为两类。一类是: 20% SiC-15% SiC-10% SiC-5% SiC-基体五层材料, 20% SiC-基体两层材料;另一类是: 基体-5% SiC-10% SiC-15% SiC-20% SiC五层材料和基体-20% SiC两层材料。

试样制备工艺流程为: 混粉→冷压制坯→烧结→正挤压→机加工→测量。挤压温度为520℃、速度为0.035 mm/s,毛坯表面施加石墨润滑剂,挤压比R= 12。挤压和机加工后,MMGC毛坯的阶梯尺寸将发生变化,故加工成H5 mm×25 mm标准拉伸试样后需进行再测量。室温拉伸实验在Instron 1195万能材料实验机上进行,拉伸速度为1 mm/min。断口分析在AMRAY-1000B型扫描电镜上进行。

2　材料的拉伸力学性能

2.1　组成MMGC基本组分的拉伸力学性能

表2显示了两类均质复合材料的力学性能。由表中可见,随SiC体积分数的增加,材料弹性模量E值升高,伸长率W值下降;以Al-Cu为基体复合材料的屈服强度$e_{0.2}$和抗拉强度e_b呈上升趋势, SiC颗粒的加入起到了增强作用;以Al-Cu-Mg为基体复合材料的屈服强度$e_{0.2}$和抗拉强度e_b呈下降趋势, SiC颗粒的加入降低了材料强度[10]。

表2　基本组分材料的拉伸力学性能

Table 2　Tensile mechanical properties of the components

Matrix	Index	0% SiC	5% SiC	10% SiC	15% SiC	20% SiC
Al-Cu-Mg	$e_{0.2}$/MPa	290.2	240.3	202.1	176.7	156.7
	e_b/MPa	471.4	394.6	331.0	278.8	243.1
	E/GPa	79.3	87.0	94.3	102.8	109.2
	W%	10.7	7.3	4.9	4.1	3.6
Al-Cu	$e_{0.2}$/MPa	77.6	86.2	95.3	120.2	123.8
	e_b/MPa	152.2	151.0	150.1	175.8	200.3
	E/GPa	71.5	80.2	86.1	93.8	102.3
	W%	16.8	9.6	7.4	3.6	3.6

2.2　MMGC的拉伸力学性能

2.2.1　不同基体MMGC的拉伸力学性能

表3为由拉伸试验测得平均SiC含量为10%、不同基体MMGC的力学性能。由表中可见,梯度分布方式对材料的E值和$e_{0.2}$值影响较小,而对e_b和W值影响较大;外侧为基体时,材料的强度和塑性均高,外侧SiC含量高时,材料的强度和塑性均低;五层梯度组合材料的力学性能指标较两层梯度组合材料的相应力学性能指标高。

表3　MMGC的拉伸力学性能

Table 3　Tensile mechanical properties of the MMGC

Matrix	Layers	Distribution	E/GPa	$e_{0.2}$/MPa	e_b/MPa	W%
Al-Cu-Mg	5	Outside	93.6	210.7	385.3	6.13
		Inside	94.4	200.5	290.3	4.52
	2	Outside	92.8	204.3	364.7	5.67
		Inside	93.2	198.1	269.2	4.22
Al-Cu	5	Outside	85.6	107.7	186.9	9.39
		Inside	86.8	115.7	125.4	1.09★

Annotation: Outside— The matrix component is in outside; Inside— The matrix component is in inside; ★— Defect specimen in outside

2.2.2　MMGC轴向拉伸力学分析

如图1所示,选两层梯度材料为研究对象。设外层基体材料的弹性模量、泊松比分别为E_1和$__1$;内层20% SiC组分材料的弹性模量、泊松比分别为E_2

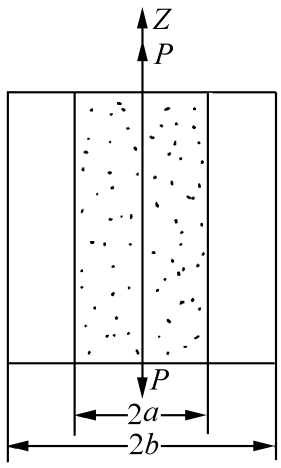


图 1　两层 MMGC 拉伸力学模型

Fig. 1　The tensile mechanical model of the twilayer MMGC

和 _2。对于本文中所选用的两种基体材料有：E2> E1，_2< _1[11]。本模型属空间轴对称问题，应变 Vr[、Vz和环向位移 U[为零[12]。用应力函数法求解，取应力函数为[13]

$$\text{外层：}\ h_1 = AZ\ln r + BZr^2 + CZ^3,\quad a < r \le b \tag{1}$$

$$\text{内层：}\ h_2 = DZ^3 + Fr^2Z,\quad 0 \le r \le a \tag{2}$$

h1 和 h2 满足相容方程，即

$$^2\ ^2h_i = 0 \qquad (i = 1 \text{ 或 } 2)$$

以 h 表示的内、外层应力和位移为

$$e_{ri} = \frac{5}{5z}\ _i\ ^2h - \frac{5^2h_i}{5r^2}$$

$$e_{[i} = \frac{5}{5z}\ _i\ ^2h - \frac{1}{r}\ \frac{5h_i}{5r}$$

$$e_{zi} = \frac{5}{5z}\ (2 - \ _i)\ ^2h - \frac{5^2h}{5z^2} \tag{3}$$

$$f_{zri} = \frac{5}{5r}\ (1 - \ _i)\ ^2h - \frac{5^2h_i}{5z^2}$$

$$f_{r[i} = f_{[zi} = 0$$

$$U_{ri} = -\ \frac{(1 + \ _i)}{E_i}\ \frac{5^2h}{5r5z}$$

$$U_{zi} = \frac{(1 + \ _i)}{E_i}\ 2(1 - \ _i)\ ^2h_i - \frac{5^2h}{5z^2} \tag{4}$$

$$U_{[i} = 0$$

将式(1)、式(2)代入式(3)、式(4)，由应力边界条件：r= b 时，er1= 0；径向应力和位移连续条件：r= a 时，er1= er2，Ur1= Ur2 和轴向应变相等条件：X1= X2= X 确定出系数 A、B、C、D、F，可得

外层的应力为：

$$e_{r1} = E_2X(_2 - \ _1)(b^2/r^2 - 1)/H$$

$$e_{[1} = -\ E_2X(_2 - \ _1)(b^2/r^2 + 1)/H \tag{5}$$

$$e_{z1} = E_1X - 2_1E_2X(_2 - \ _1)/H$$

内层的应力为：

$$e_{r2} = E_2X(_2 - \ _1)(b^2/a^2 - 1)/H$$

$$e_{[2} = e_{r2} \tag{6}$$

$$e_{z2} = E_2X - 2_2E_2X(_2 - \ _1)(1 - b^2/a^2)/H$$

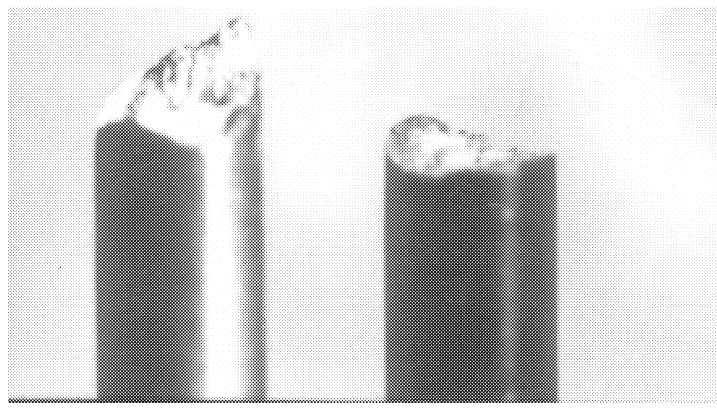
式中：

$$H = \frac{E^2}{E_1}(1 + \ _1)(1 - 2_1 + b^2/a^2) + (1 - 2_2)(1 + \ _2)(1 - b^2/a^2)$$

分析式(5)、式(6)可知，各组分材料性能的差异，使得在拉伸过程中产生了三轴应力。因此，与均质材料不同，表 3 所示 MMGC 的拉伸力学性能实际上反映了材料在三轴应力状态下的平均力学性能。当外层材料为基体时，由于 _2< _1，er 为负值，试样径向受压，有利于材料性能的发挥。反之，er 为正值，试样径向受拉，不利于材料性能的发挥。此外，外层切向应力 e[与 er 反号，而芯部切向应力 e[与 er 相等，在层间界面处产生了切向应力的间断。

2.2.3　MMGC 宏观断口分析

图 2 显示了以 Al-Cu-Mg 为基体两层梯度复合材料拉伸试样的宏观断口。其中图 2(a)试样的外侧为基体，芯部为 20% SiC。这类材料裂纹萌生于芯部，裂纹行至外层基体材料时，沿着与拉伸轴相交约 45 的方向扩展，断口呈杯锥状，具有韧性断裂特征；图 2(b)试样外侧为 20% SiC，芯部为基体。这类材料裂纹萌生于外部，裂纹行至内层基体材料时，扩展方向会发生改变，断口与拉伸轴线垂直方向偏一很小的角度，表现出脆性断裂特征。



(a) Matrix in outside, (b) H(SiC) = 20 % in outside

图 2　Al-Cu-Mg 基体 MMGC 的宏观断口(放大 3 倍)

Fig. 2　Macro-fracture of the MMGC with Al-Cu-Mg matrix

2.2.4　层间微观断口及裂纹走向特征

图 3 显示了不同基体 MMGC 层间微观断口形貌。由图中可见，外层为 20% SiC，芯部为基体的梯度材料，由于芯部基体材料受到轴向和径向拉应力的作用使其临界应变降低、韧窝减少、材料脆化。这类材料在拉伸时还会出现层间开裂现象，但当材料

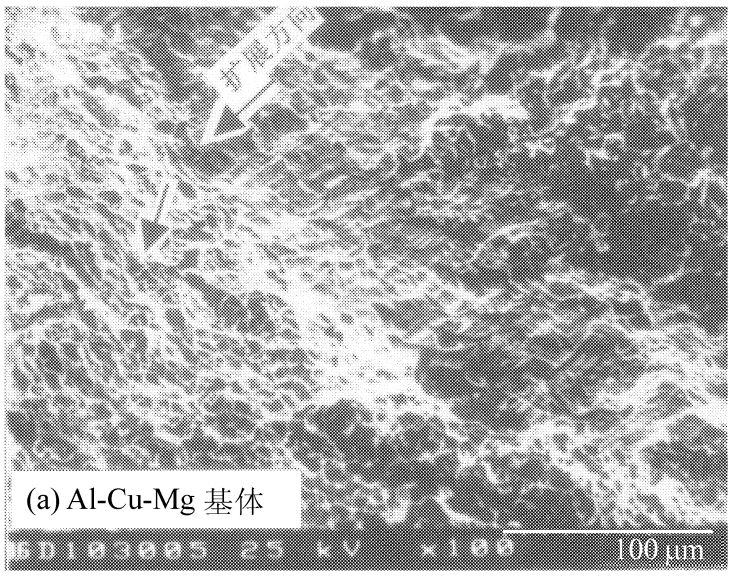


图 3　基体-20% SiC 层间微观断口形貌

Fig. 3　Micro-fractographs of the MMGC in the matrix-20% SiC bonding interfacial zone

的梯度层数增多,梯度过渡平缓时,没有这种现象发生。此外,在层间界面处存在的切向应力间断导致了裂纹扩展方向的改变。从图中还可看出,裂纹穿过层间界面时,断裂方式发生了改变,即由界面脱开型转变为基体的韧断。

2.2.5　关于复合(ROM)法则的探讨

按等应变条件下材料的复合法则[14,15],有

$$E = \sum_{i=1}^{n} f_i E_i \qquad (7)$$

$$e_{0.2} = \sum_{i=1}^{n} f_i e_{0.2i} \qquad (8)$$

式中:　E——MMGC 的弹性模量, GPa;

$e_{0.2}$——MMGC 的屈服强度, MPa;

E_i——第 i 层组分材料的弹性模量, GPa;

$e_{0.2i}$——第 i 层组分材料屈服强度, MPa;

f_i——第 i 层组分材料所占面积比。

表 4 显示了平均 SiC 含量为 10%、Al-Cu 基体 MMGC 弹性模量和屈服强度理论值与实测值的比较。将 Al-Cu-Mg 基体 MMGC 弹性模量和屈服强度的实测值代入式(7)、式(8),也可得出类似的结果,

表 4　Al-Cu 基体材料 ROM 法则理论与实测值的比较

Table 4　The comparison of the theoretical values and the experimental values on the Role of Mixture (ROM) law of the Al-Cu matrix composites

Way	Index	Theory	Exp.	Error/ %
Outside	E/ GPa	83.00	85.60	3.00
	$e_{0.2}$/ MPa	97.00	107.70	9.90
Inside	E/ GPa	88.60	86.80	2.10
	$e_{0.2}$/ MPa	106.00	115.70	8.40

Annotation: Theory-Theoretical values;　Exp. -Experimental values

但误差相对较大。分析造成误差的原因主要有:测量误差;试样内部存在三轴应力状态;材料复合产生的交互作用。实验和理论分析表明,在弹性范围和小塑性变形时,横向应力与轴向应力相比很小。故这类 MMGC 弹性模量 E 和屈服强度 $e_{0.2}$ 值可用复合法则式(7)和式(8)近似预测;当材料塑性变形增加,在微观上不同组分材料微元塑变或断裂过程之间的交互作用将增大,故这类材料的其它力学性能指标,如流动应力 e(以区别初始屈服应力 $e_{0.2}$)和抗拉强度 e_b 值用类似式(7)和式(8)表示的复合法则进行预测会有较大的误差。

3　梯度系数的概念及其应用

3.1　梯度系数 8_ 的基本概念

为了定量评价 MMGC 与均质复合材料拉伸力学性能的差异,本文中提出梯度系数 K_x 的概念。定义

$$K_x = \frac{X_g - X_m}{X_m} \qquad (10)$$

式中: K_x 为材料某一特定性能的梯度系数,表示在基体和第二相平均体积分数相同情况下,由于第二相的梯度分布所造成拉伸性能的变化。K_x 是一无量纲的相对性能指标; X_g 为拉伸试验得到的 MMGC 某一特定性能指标; X_m 为满足单向应力条件且与 MMGC 所含 SiC 体积分数平均值相等的均质复合材料相应性能指标。

3.2　梯度系数的应用举例

按照式(10)定义,对于 MMGC 抗拉强度有

$$K_{eb} = \frac{e_{bg} - e_{bm}}{e_{bm}} \qquad (11)$$

式中: e_{bg} 为 MMGC 的抗拉强度(MPa); e_{bm} 为与

MMGC 平均 SiC 含量相等的均质复合材料抗拉强度(MPa)；$K_{\sigma b}$为 MMGC 抗拉强度梯度系数。

将表 2、表 3 相关数据代入式(11)，结果如表 5 所示。可见，基体在外侧时，$K_{\sigma b}>0$，材料抗拉强度有所提高，五层梯度材料的性能提高幅度大于两层梯度材料；A1-Cu 基体材料的性能提高幅度较 A1-Cu-Mg 基体的大。基体在内侧时，$K_{\sigma b}<0$，MMGC 抗拉强度有所降低，两层梯度材料的性能降低幅度较大，A1-Cu 基体材料性能的降低幅度大于 A1-Cu-Mg 基体材料性能的降低幅度。

表 5　MMGC 抗拉强度梯度系数 δ_{σ}

Table 5　Gradient coefficient δ_{σ} of the MMGC

Layers	5	5	2
Matrix	Al-Cu	Al-Cu-Mg	Al-Cu-Mg
Outside	0.245	0.164	0.102
Inside	-0.165	-0.123	-0.187

Annotation: Average SiC volume fraction H(SiC) = 10%

同样，对于伸长率有

$$K_W=\frac{W_g-W_m}{W_m} \tag{12}$$

式中：W_g为 MMGC 的伸长率(%)；W_m为与 MMGC 平均 SiC 含量相等均质复合材料的伸长率(%)；K_W为 MMGC 的伸长率梯度系数。

表 6 列出了本文中所研究的两种基体 MMGC 的伸长率梯度系数。从表中可见，基体在外侧时，$K_W>0$，材料的伸长率有所提高；五层梯度材料塑性提高幅度大于两层梯度材料；两种不同基体材料性能提高幅度相当。基体在芯部时，$K_W<0$，材料的塑性指标有所降低；两层梯度材料塑性降低幅度大于五层梯度材料；A1-Cu 基体材料塑性指标大幅度降低是由于 20% SiC 外侧表面存在缺陷所致。实验表明，基体在外侧时，试样的表面质量好，这也是其性能得以提高的重要因素之一。

表 6　MMGC 伸长率梯度系数 δ_{ε}

Table 6　Gradient coefficient δ_{ε} of the MMGC

Layers	5	5	2
Matrix	Al-Cu	Al-Cu-Mg	Al-Cu-Mg
Outside	0.269	0.251	0.157
Inside	-0.853★	-0.078	-0.139

Annotation: Average SiC volume fraction H(SiC) = 10 %

★-Defect specimen in outside

对于弹性模量有

$$K_E=\frac{E_g-E_m}{E_m} \tag{13}$$

式中：E_g为 MMGC 的弹性模量(GPa)；E_m为与 MMGC 平均 SiC 含量相等均质复合材料的弹性模量(GPa)；K_E为 MMGC 的弹性模量梯度系数。

采取同样方法可以得到材料弹性模量梯度系数 K_E 值如表 7 所示。从表中可见，其绝对值都很小。考

表 7　MMGC 弹性模量梯度系数 δ_2

Table 7　Gradient coefficient δ_2 of the MMGC

Layers	5	5	2
Matrix	Al-Cu	Al-Cu-Mg	Al-Cu-Mg
Outside	-0.006	-0.007	-0.016
Inside	0.008	0.001	-0.012

Annotation: Average SiC volume fraction H(SiC) = 10 %

虑到实验中的测量误差，弹性模量 E 值是一个相当稳定的力学性能指标，SiC 梯度分布方式、梯度层数的多少对 E 值的影响都不大。用单向应力状态条件下测得的均质材料的 E 值可预测平均 SiC 体积分数相同 MMGC 的弹性模量。

综上所述，对于由局部量决定的材料抗拉强度和伸长率等性能来说，梯度系数的符号和大小可反映材料梯度分布方式和性能的优劣程度。对于由整体量决定的材料弹性模量，梯度系数可表示材料的稳定性程度，而无法断定材料的梯度分布方式及性能的优劣。

4　结　论

(1) MMGC 各组分性能的差异使其在拉伸变形时产生了三轴应力，拉伸试验获得的各项力学性能指标反映了在三轴应力状态下的平均力学性能。

(2) 由拉伸试验获得的 MMGC 弹性模量 E 和屈服强度 $\sigma_{0.2}$值近似符合 ROM 法则；这类材料的力学性能受 SiC 颗粒梯度分布方式的影响。外层为基体、芯部为高 SiC 组分的分布方式有利于材料性能的发挥；反之，会降低材料的强度和塑性。

(3) 外层为基体、芯部为高 SiC 含量的 MMGC 拉伸断口呈杯锥状，裂纹从芯部产生后向外部扩展，具有韧性断裂特征；外层为高 SiC 含量、芯部为基体的 MMGC 拉伸断口平齐，裂纹从外部产生后向内部扩展，具有脆性断裂特征；受多种因素的影响，裂纹穿过层间界面时将引起断裂方式和扩展方向的改变，当梯度层数较少、SiC 体积分数差别较大时，将产生材料的分层开裂。

(4) 抗拉强度梯度系数 $K_{\sigma b}$和伸长率梯度系数 K_W可反映材料的分布方式和性能的优劣程度；弹性

模量梯度系数 K_E 则反映了材料性能的稳定性程度。

参考文献:

[1] 石力开. 新材料的发展趋势及其在我国的发展状况(上) [J]. 科技成果纵横, 1996, 26(5): 25- 27.

[2] 新野正之. 倾斜机能材料の发想と开发动向 [J]. 工业材料, 1990, 38(12): 18- 25.

[3] 郭 成, 朱维斗, 金志浩. 梯度功能材料的研究现状与展望 [J]. 稀有金属材料与工程, 1995, 24(3): 18- 25.

[4] 赵稼祥, 周瑞发. 先进复合材料及其应用研究的现状与发展趋势 [J]. 复合材料学报, 1993, 10(3): 18- 34.

[5] 郭洪光. 光电器件用金属基复合材料研究进展 [J]. 兵器材料科学与工程, 1996, 19(4): 67- 72.

[6] Takahashi H, Hashide T. Development of an evaluation method of functionally gradient materials [J]. JSME International Journal, 1990, 33(3): 281- 287.

[7] 郭 成, 程 羽, 易树清, 等. SiC 颗粒增强铝合金基梯度复合材料的制备与压缩性能研究 [J]. 复合材料学报, 1999, 16(1): 8- 13.

[8] 郭 成, 程 羽, 苏文斌, 等. SiC 颗粒增强铝合金基梯度复合材料锻造性能及其塑性图 [J]. 塑性工程学报, 2000, 7(4): 9- 11.

[9] 郭 成, 郭生武, 程 羽, 等. SiC 颗粒增强铝合金基梯度复合材料弯曲力学性能及其评价 [J]. 复合材料学报, 2002, 19(6): 57- 60.

[10] 郭 成, 程 羽, 尚春阳, 等. SiC 颗粒增强铝合金基复合材料断裂与强化机理 [J]. 复合材料学报, 2001, 18(4): 54- 57.

[11] Fan Z, Tsakiropoulos P. A New Approach for the Prediction of the Young's Moduli of Particulate Reinforced Composites [A]. In: ICCM/9 [C], Vol. 1. Madrid Spain: Woodhead Publishing Limited, 1993. 263- 270.

[12] 徐芝纶. 弹性力学简明教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1983. 171- 175.

[13] 徐秉业. 弹性与塑性力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991. 61- 75.

[14] 张国定, 赵昌正. 金属基复合材料 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1996. 34- 44.

[15] 于春田. 金属基复合材料 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995. 3- 6; 105- 135.

责任编辑: 孙丽娟