

纤维增强金属基复合材料细观几何结构 对宏观弹性性能的影响*

雷友锋 宋迎东 高德平

(南京航空航天大学能源与动力学院,南京 210016)

文 摘 基于复合材料宏、细观场量之间的联系,建立了一种纤维增强复合材料宏—细观力学模型。该模型建立起了宏观与细观应力、应变场量之间的联系,获得了宏观应力—应变关系,试验及理论计算表明,该模型能够较好地预测复合材料宏观弹性性能。利用该模型研究了纤维截面形状和排列方式对金属基复合材料宏观弹性性能的影响。

关键词 金属基复合材料,弹性性能,宏—细观力学模型,细观几何结构,代表性体积元

Influence of Micro-structural Geometry on Elastic Properties of Fiber Reinforced Metal Matrix Composites

Lei Youfeng Song Yingdong Gao Deping

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract A macro and micro mechanics model is presented based on the relation between macroscopic and microscopic stress and strain fields, in which composite macroscopic stress-strain relation is obtained. The model can calculate elastic properties of composites correctly, which is verified by experiments and theoretical analysis. Influence of fiber cross-section shape and packing arrangement on macroscopic elastic properties are analyzed with the model.

Key words Metal matrix composite, Elastic property, Macro and micro mechanics model, Micro structural geometry, Representative volume element

1 引言

随着纤维增强金属基复合材料制备工艺的发展,使得能够通过细观结构的优化而制造出特定应用的金属基复合材料,例如选择不同类型、不同尺寸、不同形状的纤维,采用特定的布置方式等,因此研究复合材料细观结构特征对宏观性能的影响具有重要的意义,将细观结构的优化与复合材料结构分析结合起来,将开创复合材料设计与分析的一个新

领域。

一些学者^[1]采用有限元方法研究了纤维截面形状及排列方式对纤维增强复合材料弹塑性行为的影响,但是由于采取比较耗时的有限元法来模拟纤维不同截面形状、不同排列方式,使得研究不系统全面。文献[2]在弹性范围内建立了宏—细观力学模型并提出了纤维增强复合材料结构的宏—细观一体化分析方法,本文在此基础上略做推广,将代表性体

收稿日期:2002-09-17;修回日期:2002-11-01

* 航空基础科学基金:01 C52 017 资助

雷友锋,1972年出生,博士研究生,主要从事航空发动机结构强度及载荷谱、材料力学特性的研究工作

宇航材料工艺 2003年 第1期

— 43 —

积元(RVE)划分为更多数目的子单元进行分析,建立起多单元的宏—细观力学模型,从而能够考虑复杂细观结构的情形,有效地研究细观特征(包括纤维截面形状及排列方式、纤维含量、两相或多相材料性能不匹配程度等)对复合材料宏观性能的影响。本文主要研究纤维截面形状及纤维排列方式对纤维增强金属基复合材料宏观弹性性能的影响。

2 复合材料宏—细观力学模型

复合材料本身既具有宏观特征,又具有细观特征,复合材料力学是一种两层次的力学理论^[3]。复合材料宏观结构体中的一点,对应有一个细观结构特征体,宏观应力、应变分别等于细观特征体的细观应力、应变的体积平均值。在细观结构特征体中可以选取出 RVE,细观结构特征体可以看作是由 RVE 周期性扩展而成,由于细观结构的周期性,可以用 RVE 的细观应力、应变场来反映细观特征体的应力、应变场。

2.1 细观力学基本方程

设宏观体上一点的宏观应力、应变分别为 $\bar{\sigma}^0$ 、 $\bar{\epsilon}^0$,相应地,RVE 中细观应力、应变分别为 σ 、 ϵ ,可以在 RVE 上建立如下的细观力学方程

$$\text{细观本构方程} \quad \sigma = C \cdot \epsilon \quad (1)$$

$$\text{细观平衡方程} \quad \text{div} \sigma = 0 \quad (2)$$

$$\text{宏、细观量的关系} \quad \bar{\sigma} = \bar{\sigma}^0 \text{ 或 } \bar{\epsilon} = \bar{\epsilon}^0 \quad (3)$$

式中, C 为细观刚度张量, $\bar{\sigma}$ 为 RVE 的细观应力平均值, $\bar{\epsilon}$ 为 RVE 的细观应变平均值。

2.2 RVE 的几何模型

对单向连续纤维增强复合材料的细观结构 RVE,可以做出广义平面应变假设^[4],即认为纤维方向正应变为常量,从而可以在二维问题上建立宏—细观力学模型。

选图 1 所示的 RVE 进行分析,将 RVE 划分为 $N \times N$ 个子单元,根据纤维形状及在基体中分布情况,其中某些子单元可以代表纤维、基体或界面相等。在各子单元内建立细观局部坐标系,为与整体坐标系 $x_1 x_2 x_3$ 相区别,记细观局部坐标系为 $\bar{x}_2^{(\beta)}$ $\bar{x}_3^{(\beta)}$ ($\beta = 1, 2, \dots, N$; $\gamma = 1, 2, \dots, N$; 文中推导过程中在不引起混淆前提下简记为 $\bar{x}_2 \bar{x}_3$)。

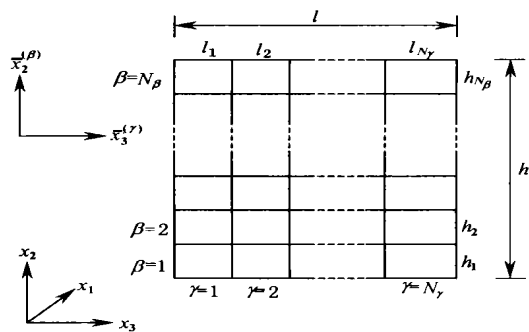


图 1 RVE 几何模型

Fig. 1 Geometric model of a RVE

2.3 RVE 细观力学方程的求解

首先设 RVE 对应的宏观体上某点的宏观应变为 $\bar{\epsilon}^0$,在 RVE 及其子单元上按式(1)~(3)建立细观力学基本方程,并进行求解。

根据对细观特征体的 RVE 进行分析可知,细观位移场可以表示为一个平均位移场与一个周期性位移波向量之和,应变场可表示为一个平均应变(宏观应变)与周期性位移波向量形成的应变场之和。于是有

$$u_i^{(\beta, \gamma)} = \bar{u}_i^0 x_j + u_i^* \quad (i, j = 1, 2, 3; \beta = 1, 2, \dots, N; \gamma = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

式中, $u_i^{(\beta, \gamma)}$ 为细观位移场, u_i^* 为周期性位移波向量。

进一步对 u_i^* 作位移假设,假设各子单元的 u_i^* 是细观局部坐标 \bar{x}_2, \bar{x}_3 的线性函数,于是各子单元内位移场为

$$u_i^{(\beta, \gamma)} = \bar{u}_i^0 x_j + \bar{u}_i^{(\beta, \gamma)} \bar{x}_2 + \bar{u}_i^{(\beta, \gamma)} \bar{x}_3 \quad (i, j = 1, 2, 3; \beta = 1, 2, \dots, N; \gamma = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

式中, $\bar{u}_i^{(\beta, \gamma)}$ 与 $\bar{u}_i^{(\beta, \gamma)}$ 称为细观位移系数。

在小变形范围内,子单元内应变与位移有如下关系

$$\bar{\epsilon}_{ij}^{(\beta, \gamma)} = \frac{1}{2} (u_{i,j}^{(\beta, \gamma)} + u_{j,i}^{(\beta, \gamma)}) \quad (i, j = 1, 2, 3; \beta = 1, 2, \dots, N; \gamma = 1, 2, \dots, N) \quad (6)$$

利用各子单元的材料本构方程,可得到子单元内应力为

$$\bar{\sigma}_{ij}^{(\beta, \gamma)} = C_{ijkl}^{(\beta, \gamma)} \cdot \bar{\epsilon}_{kl}^{(\beta, \gamma)}$$

$$(i, j, k, l = 1, 2, 3; r = 1, 2 \dots N; s = 1, 2 \dots N) \quad (7)$$

式中, $\sigma_{ij}^{(r)}$ 与 $\epsilon_{kl}^{(r)}$ 分别是细观应力与应变, $C_{ijkl}^{(r)}$ 为细观刚度张量。

将式(5)~(7)代入方程(1)~(3),并施加位移与应力的连续性与周期性边界条件。在保证宏、细观之间能量等效的基础上,对位移边界条件进行了弱化,即只要在边界上的平均值满足连续性与周期性条件,可以推得

$$\epsilon_r = A_r \epsilon^0 \quad (8)$$

式中, ϵ_r 为细观应变。 A_r 反映了细观应变与宏观应变之间的关系,可称其为应变集中矩阵,它是 $6N \times 6$ 的矩阵,包含了 RVE 的几何结构信息及各子单元的材料刚度信息,通过分块可以将其分解为 NN 个 6×6 的子矩阵,记为 $A_r^{(s)}$ ($s = 1, 2, \dots, N; r = 1, 2, \dots, N$),每个子矩阵 $A_r^{(s)}$ 对应着一个子单元的细观应变 $\epsilon^{(s)}$ 与宏观应变 ϵ^0 之间的系数关系,即有

$$\epsilon^{(s)} = A_r^{(s)} \epsilon^0 \quad (9)$$

利用各子单元本构方程可得

$$\sigma^{(s)} = C^{(s)} A_r^{(s)} \epsilon^0 \quad (10)$$

根据宏、细观量之间的关系式(3),可以得到宏观应力

$$\sigma^0 = \frac{1}{hl} \sum_{(s)} h l C^{(s)} A_r^{(s)} \epsilon^0 \quad (11)$$

于是,可以得到宏观应力—应变关系

$$\sigma^0 = C^0 \epsilon^0 \quad (12)$$

式中宏观刚度矩阵

$$C^0 = \frac{1}{hl} \sum_{(s)} h l C^{(s)} A_r^{(s)} \quad (13)$$

2.4 宏—细观力学模型对复合材料宏观弹性模量的计算

利用所建立的宏—细观力学模型,能够方便、高效地计算复合材料宏观弹性性能。采用宏—细观力学模型,计算了部分 B/Al 复合材料及 SiC/Ti 复合材料的弹性模量及泊松比,并与试验结果及有限元法计算结果进行了对照,见表 1。从表 1 可以看出,宏—细观力学模型计算结果与试验结果及有限元法计算结果均具有较好的一致性。

表 1 纤维增强 MMC 宏观弹性性能的计算值与试验值对比

Tab.1 Calculated and tested results of macroscopic elastic properties for fibrous metal matrix composites

材料	宏—细观统一本构模型 计算值						细观力学有限元法 计算值						试验值			
	E_1	E_2	G_{12}	G_{23}	μ_{21}	μ_{23}	E_1	E_2	G_{12}	G_{23}	μ_{21}	μ_{23}	E_1	E_2	G_{12}	μ_{21}
	/ GPa	/ GPa	/ GPa	/ GPa			/ GPa	/ GPa	/ GPa	/ GPa			/ GPa	/ GPa	/ GPa	
B/Al ¹⁾	228.0	146.9	49.9	42.6	0.262	0.301	228	148	57	52	0.251	0.263	228 ^[5]	138 ^[5]	57 ^[5]	0.24 ^[5]
B/Al ²⁾	223.4	150.4	51.5	44.3	0.265	0.300	221.0	146.7	52.5	44.6	0.263	0.304	227 ^[6]	139 ^[6]	58 ^[6]	0.24 ^[6]
SiC/Ti ³⁾	236.6	185.1	64.61	58.51	0.301	0.327	235	183	67	61	0.30	0.32	230.3 ^[7]	150.3 ^[7]	62.1 ^[7]	0.25 ^[7]

注:1) V_f 为 46%, E_m 为 69 GPa, μ_m 为 0.33, E_f 为 414 GPa, μ_f 为 0.2;

2) V_f 为 46%, E_m 为 72.5 GPa, μ_m 为 0.33, E_f 为 400.0 GPa, μ_f 为 0.2;

3) V_f 为 40%, E_m 为 109.0 GPa, μ_m 为 0.34, E_f 为 427.6 GPa, μ_f 为 0.25。

3 细观结构特征对宏观弹性性能的影响

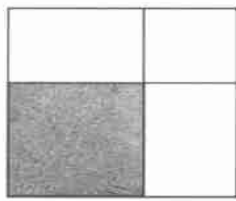
以单向纤维 B/Al 复合材料为例,研究纤维截面形状及排列方式对复合材料宏观弹性性能的影响。计算中 $E_f = 380$ GPa, $\mu_f = 0.15$; $E_m = 70$ GPa, $\mu_m = 0.31$ 。

3.1 纤维截面形状的影响

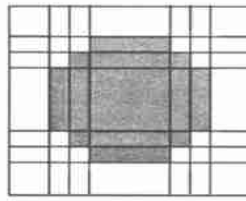
宇航材料工艺 2003 年 第 1 期

考虑的纤维截面形状有方形截面纤维、圆截面纤维、椭圆截面纤维,纤维在基体中呈方形排列分布,它们相应的 RVE 模型见图 2。

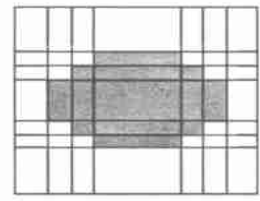
计算不同纤维截面形状复合材料的纵向杨氏模量、横向杨氏模量、纵横剪切模量、等正轴弹性模量随纤维体积分含量的变化情况,计算结果见图 3。



(a) 方形截面



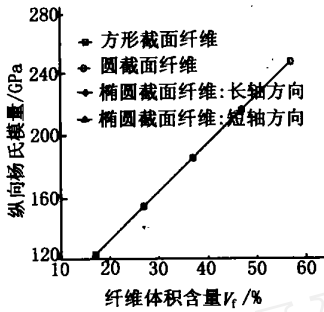
(b) 圆截面



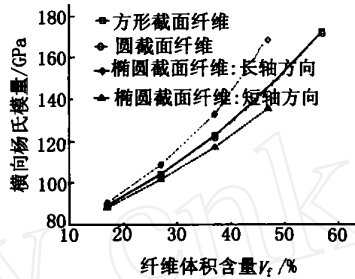
(c) 椭圆截面

图 2 不同纤维截面形状的微观结构代表性体积元

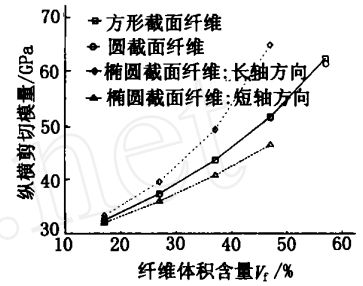
Fig. 2 Microstructural RVEs of different fiber cross sections



(a) 纵向杨氏模量



(b) 横向杨氏模量



(c) 纵横剪切模量

图 3 纤维截面形状对复合材料宏观弹性模量的影响

Fig. 3 Influence of fiber cross sections on composite macroscopic elastic modulus

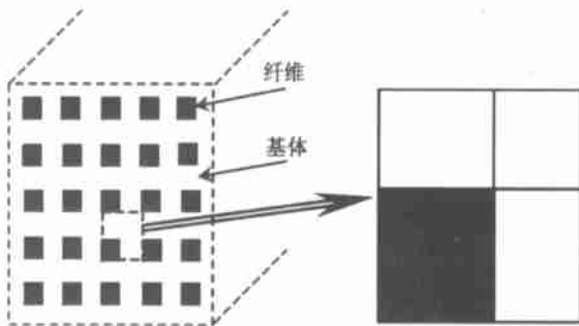
从图 3 可以看出,纤维截面形状对复合材料纵向杨氏模量几乎没有影响,对横向杨氏模量、纵横剪切模量则有一定的影响。对横向杨氏模量来说,方形截面纤维复合材料比圆截面纤维略高,椭圆截面纤维当载荷与椭圆长轴方向平行时表现出较高的模量,但当载荷与椭圆短轴方向平行时则表现出较低的模量。对于纵横剪切模量,不同纤维截面形状的影响趋势,与横向杨氏模量类同。此外,不同纤维截面形状对复合材料宏观弹性模量的影响,随纤维体

积含量的增加而增强。

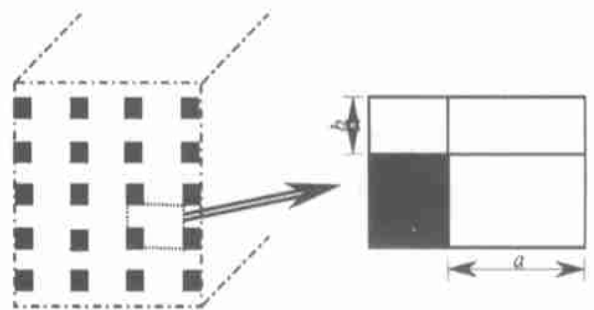
3.2 纤维排列方式的影响

考虑的纤维排列方式有方形排列、矩形排列、方形对角(方形转动 45°)排列、六角形排列(或称正三角形排列),纤维截面都取为方形截面,它们相应的 RVE 模型见图 4。

计算不同纤维排列方式复合材料的纵向杨氏模量、横向杨氏模量、纵横剪切模量等正轴弹性模量随纤维体积分量的变化情况,计算结果见图 5。



(a) 方形排列



(b) 矩形排列

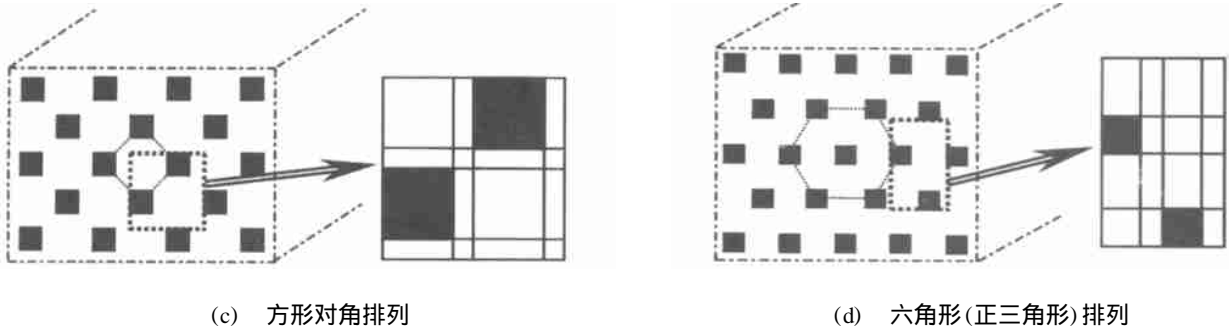


图 4 纤维不同排列方式的微观结构及 RVE

Fig. 4 Microstructure and RVEs of different fiber arrangement

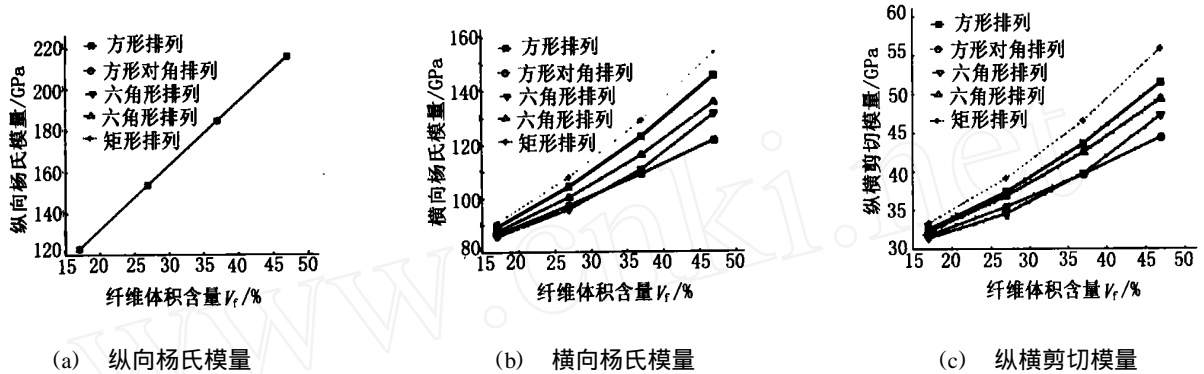


图 5 纤维排列方式对复合材料宏观弹性模量的影响

Fig. 5 Influence of fiber arrangement on composite macroscopic elastic modulus

从图 5 可以看出,纤维排列方式对复合材料纵向杨氏模量几乎没有影响,对横向杨氏模量、纵横剪切模量则有一定的影响。

对横向杨氏模量来说,纤维方形排列材料比方形对角排列材料高,六角形排列材料则介于方形排列与方形对角排列之间。矩形排列材料,纤维排列紧密方向的模量较高(图中示出的是纤维排列紧密方向的模量),但在纤维稀疏方向的模量会表现较低。对于纤维呈六角形排列情况,横向模量 E_2 与 E_3 并不完全相等,但两者差别很小,因为从微观结构上看,六角形排列是各个方向都比较均匀的排列方式。对于纵横剪切模量,不同纤维排列方式的影响趋势,与横向杨氏模量类同。此外,不同纤维排列方式对复合材料宏观弹性模量的影响,随纤维体积分含量的增加而增强。

另外,对比图 3 与图 5 还可发现,纤维排列方式对复合材料宏观弹性性能的影响,要比纤维截面形状的影响更为明显。

宇航材料工艺 2003 年 第 1 期

3.3 原因分析

纤维截面形状及排列方式对复合材料宏观性能的影响,依赖于复合材料承受外载时基体中应力、应变场量的分布及发展方式^[1]。一般说来,纤维截面形状直接影响力从基体到纤维的转移,而纤维排列方式则直接影响基体中应力空间化的分布。

单向复合材料承受纵向正载荷时,纤维承受大部分载荷,而且这种载荷不直接产生沿载荷方向纤维与基体之间的应力转移,在垂直于纵向载荷的横向平面内纤维截面形状、排列方式以及纤维/基体泊松比不匹配等,不足以对纵向响应产生较大的影响;因此复合材料纵向杨氏模量受纤维截面形状及排列方式的影响很不明显。

单向复合材料承受横向载荷情况下,会产生在纤维与基体之间的直接应力转移,使得某些形状的纤维比另一些形状的纤维在增强基体材料方面更有效。例如,在横向应力作用下,方形截面纤维中产生比圆截面纤维更高的应力,因此方形截面纤维复合

材料的横向模量略高于圆截面纤维复合材料。

复合材料承受横向载荷情况下,纤维排列方式会直接影响应力空间化的分布。相比之下,六角形排列是纤维在各个方向分布最均匀的情况,介于方形排列与方形对角排列之间,方形排列的邻近纤维间距最长,方形对角排列的邻近纤维间距最短。因此,方形排列情况与方形对角排列情况呈现出最大和最小的横向模量,而六角形排列情况的横向模量则居于中间。

纤维截面形状对应力转移的影响以及纤维排列方式对基体应力空间化分布的影响,都会由于纤维密度的增加而表现出纤维间的相互增强作用,因此当纤维体积含量更高时,纤维截面形状及排列方式对宏观弹性性能的影响更为显著。

另外,由于纤维截面形状主要影响纤维/基体界面附近基体的局部应力集中,而纤维排列方式在更大范围内影响基体的应力分布(在较大纤维密度情况下),因此在较高纤维体积含量情况下,纤维排列方式对宏观弹性性能的影响比纤维截面形状的影响要大。

4 结论

在分析复合材料宏、细观场量之间联系的基础上,建立了一种纤维增强金属基复合材料宏—细观力学模型,该模型能够较好地预测复合材料宏观弹性性能,并能够考虑复杂细观结构的情形。利用该

模型,研究了细观结构特征对宏观弹性性能的影响。计算表明,纤维截面形状及排列方式对复合材料纵向弹性模量几乎没有影响,但对横向弹性模量、纵横剪切模量则有一定影响,影响程度随纤维体积分量的增加而增强。

参考文献

- 1 Brockenbrough J R, Suresh S, Wienecke H A. Deformation of MMCs with continuous fibers: geometrical effects of fiber distribution and shape. *Acta Metall. Mater.*, 1991;39:735~752
- 2 雷友锋,宋迎东,高德平等.纤维增强复合材料结构的宏微观一体化分析方法. *机械科学与技术*, 2002;21(4):617~619
- 3 范赋群,王震鸣,稽醒等.关于复合材料力学几个基本问题的研究. *力学与实践*, 1995;17(1):4~9
- 4 Wisnom M R. Factors affecting the transverse tensile strength of unidirectional silicon carbide fiber reinforced 6061 aluminium. *J. Comp. Mater.*, 1990;24:707~726
- 5 Nakamura T, Suresh S. Effects of thermal residual stresses and fiber packing on deformation of metal matrix composites. *Acta Metall. Mater.*, 1993;41(6):1665~1681
- 6 Pindera M J, Herakovich C T, Becker W, Aboudi j. nonlinear response of unidirectional boron/aluminum. *J. Comp. Mater.*, 1990;24(2):2~21
- 7 Sun C T, Chen J L. Mechanical characterization of SCS-6/Ti-6-4 metal matrix composite. *J. Comp. Mater.*, 1990;24:1029~1059

(编辑 马晓艳)

新型有机薄膜保护剂

新型固体薄膜保护剂具有优良的抗腐蚀性能,可提高电接触元器件的抗腐蚀能力,抗潮湿、盐雾、霉菌以及工业大气中 H_2S 、 SO_2 、 CO_2 、 NO_2 等各种腐蚀介质对金属表面的腐蚀;优良的润滑性能,可延长金属元器件、工具、量具、冷作模具的使用寿命,降低插拔件的插拔力;优良的电气性能,电接触稳定,不影响接触电阻、高频特性,对提高电接触可靠性有重大作用。

本保护剂技术先进、工艺稳定、应用面广,投资少,见效快。已广泛应用于航空、航天、航海、电子工业、电力工业、机械工业等领域。在机械加工领域的应用,可使低速工作的刀具、量具以及冷作模具的寿命延长1~10倍,并使被加工工件粗糙度降低1~2级,故其经济效益是十分巨大的。

(邮电学院化学防护研究所, 010-62028982)

·李连清·