

# MoSi<sub>2</sub> 及其复合材料的研究进展

李玲艳 艾云龙 程玉桂 刘长虹

(南昌航空工业学院材料科学与工程系,南昌 330034)

**摘 要** 介绍了 MoSi<sub>2</sub> 的性能特点,阐述了它的应用领域,并从合金化和复合化等方面综述了对 MoSi<sub>2</sub> 及其复合材料进行强韧化的途径,同时还展望了其发展趋势和应用前景。

**关键词** MoSi<sub>2</sub>, 复合材料, 合金化, 复合化

## Progress in Research on Molybdenum Disilicide and Its Composites

Li Lingyan Ai Yunlong Cheng Yugui Liu Changhong

(Department of Material and Engineering, Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang 330034)

**Abstract** In this paper, the properties, characteristics and application of molybdenum disilicide are introduced. Meanwhile, the methods of strengthening and toughing of molybdenum disilicide by alloying and compositing are briefly summarized. At last, the trend of development and the prospect of application are overviewed.

**Key words** Molybdenum disilicide, Composite, Alloying, Compositing

### 1 前言

MoSi<sub>2</sub> 基材料在 1 200 ~ 1 600 用作高温结构材料有着非常广阔的前景<sup>[1]</sup>。目前, Ti 基和 Ni 基合金的使用温度为 0.85T<sub>m</sub> (临界温度)、已达极限, 急需开发和研制可在更高温度 (>1 200) 下使用的新型高性能结构材料。高温结构难熔硅化物尤其以 MoSi<sub>2</sub> 最为突出, 以其熔点高、密度适中、高温抗氧化性强、耐蚀性强等优势引起了国内外材料界的极大兴趣。国外一些发动机公司已经把 MoSi<sub>2</sub> 作为工作温度高达 1 600 的燃气涡轮发动机热部件的最佳候选材料, 展开了广泛的研究<sup>[2]</sup>。本文拟就 MoSi<sub>2</sub> 的性能特点、应用以及对其的强韧化途径作一概述。

### 2 MoSi<sub>2</sub> 的性能特点及应用

MoSi<sub>2</sub> 是一种道尔顿型金属间化合物<sup>[3]</sup>, 其性能介于金属与陶瓷之间。它有两种晶型, 在 1 900

以下, 为稳定的 C11<sub>b</sub> 型体心正方晶体; 在 1 900 以上发生相变转变为 - MoSi<sub>2</sub>, 是不稳定的 C40 型六方晶体<sup>[4]</sup>。Mo—Mo 原子以金属键结合, Si—Si 原子以共价键结合。由于 Mo、Si 两原子半径相差不大, 电负性接近, 其结合既有金属键又有共价键, 因此它具有金属和陶瓷的双重特性, 故又称作是金属陶瓷。MoSi<sub>2</sub> 具有足够高的熔点 (2 030), 适中的密度 (6.24 g/cm<sup>3</sup>), 良好的导电、导热性, 较低的线膨胀系数, 优良的高温抗氧化性、耐腐蚀性, R 特性 (即直到 1 400 屈服强度不随温度升高而降低)<sup>[5]</sup> (如图 1)。1 000 左右有脆性 - 韧性转变 (BDT)<sup>[2]</sup>。因此 MoSi<sub>2</sub> 基材料满足高温结构应用的许多要求, 但是在用作高温结构材料前必须增强其低温 (1 000 以下) 韧性, 同时需要提高其高温强度和高温蠕变性<sup>[6]</sup>。

收稿日期: 2003 - 12 - 30; 修回日期: 2004 - 06 - 17

基金项目: 江西省自然科学基金资助 (0 250 040); 江西省材料科学与工程中心基金资助项目 (CL0212)

作者简介: 李玲艳, 1979 年出生, 硕士研究生, 主要从事高温结构材料的应用研究工作

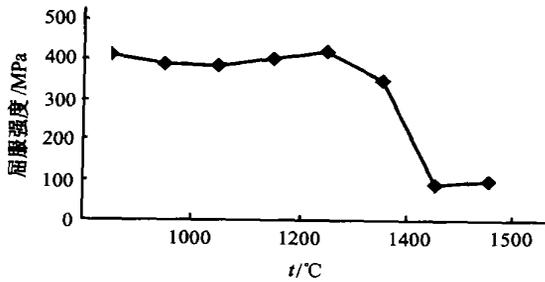


图 1 MoSi<sub>2</sub> 强度随温度变化关系曲线  
Fig 1 Relationship between strength and temperature of molybdenum disilicide

MoSi<sub>2</sub> 密度较低,可用作燃气涡轮发动机热部件的元件,如叶片、燃烧室、喷嘴等,也可用于汽车发动机上,如涡轮增压器的转子、气门等;因能有效隔离反应环境、提高静态部件的使用寿命,可用于柴油机火花塞;因在氧化性、还原性、中性、惰性以及一些强腐蚀气氛中可使用到相当高的温度,使得其可作为热交换器、煤气灶、点火器和高温过滤器等热部件<sup>[7]</sup>;因具有较高的导电性,使得其能够进行电加工(EDM);有较高的熔点和良好的抗氧化性,使得其可作为结构材料的连接材料,并可用作难熔金属和碳基材料的抗氧化性涂层<sup>[11]</sup>。此外,MoSi<sub>2</sub>在BDT温度以上是一种韧性相,可以对脆性陶瓷产生韧化效果<sup>[8,9]</sup>。MoSi<sub>2</sub>是一种资源丰富、成本相对较低的材料,它无毒无公害有利于环保<sup>[2]</sup>。

### 3 MoSi<sub>2</sub> 的强韧化途径

#### 3.1 合金化

MoSi<sub>2</sub> 的合金化对其性能有一定改善,但由于MoSi<sub>2</sub>具有特殊的晶体结构,只有少数硅化物可作为它的合金化组元,如WSi<sub>2</sub>、NbSi<sub>2</sub>、CoSi<sub>2</sub>、Mo<sub>3</sub>Si<sub>5</sub>和Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>等<sup>[10]</sup>。WSi<sub>2</sub>和MoSi<sub>2</sub>具有相同的晶体结构和相近的点阵晶格常数,二者相匹配并能以任意比例混合,合金化效果最好<sup>[11]</sup>。其中元素W能置换出MoSi<sub>2</sub>的Mo原子,并形成合金化合物(Mo,W)Si<sub>2</sub>可提高材料的高温强度。但是WSi<sub>2</sub>合金化使MoSi<sub>2</sub>的密度明显增加,丧失了其密度小的优势。而Nb、Ti等元素的加入将会改变MoSi<sub>2</sub>的晶体结构。

文献[12]利用合金化方法在MoSi<sub>2</sub>中加入Co可提高材料的断裂韧性,但是材料的硬度却有所下降。在MoSi<sub>2</sub>陶瓷制备过程中,加入Al粉能有效“吸收”原材料中的氧形成Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,从而减少SiO<sub>2</sub>的含量,可提高材料的室温硬度、弯曲强度、断裂韧宇航材料工艺 2005年 第1期

度<sup>[13]</sup>。张厚安等研究表明加入稀土元素不仅能提高MoSi<sub>2</sub>材料的室温硬度而且有显著的增韧效果。稀土元素的加入细化了晶粒,不仅提高了强度、硬度,同时也提高了断裂韧度<sup>[14]</sup>,但基体的耐磨性却有所下降<sup>[15]</sup>。

#### 3.2 复合化

由于MoSi<sub>2</sub>与许多陶瓷增韧剂,如SiC、TiC、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、ZrO<sub>2</sub>、HfO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和TB<sub>2</sub>等都有良好的化学稳定性和相容性,因此对MoSi<sub>2</sub>复合化即制造MoSi<sub>2</sub>基复合材料是改善其力学性能的另一有效途径。MoSi<sub>2</sub>的增韧剂包括连续纤维(陶瓷纤维、难熔金属纤维)和非连续纤维(晶须、颗粒)两类。Evans总结了近年来研究增韧结构陶瓷的研究结果,指出增韧效果由强到弱依次是:连续纤维、韧性金属、ZrO<sub>2</sub>相变、第二相晶须或颗粒<sup>[11]</sup>。表1给出了几种增韧剂加入MoSi<sub>2</sub>基复合材料的室温断裂韧度。

表 1 MoSi<sub>2</sub>基复合材料的室温断裂韧度<sup>[11]</sup>

Tab 1 Room-temperature fracture toughness of MoSi<sub>2</sub> based composites

增韧剂 <sup>1)</sup>	最高断裂韧度 /MPa·m <sup>1/2</sup>
难熔金属丝(Nb,W,Mo)	>15
20% Ta <sub>p</sub>	10
20% ZrO <sub>2p</sub>	7.8
20% SiC <sub>w</sub>	4.4
20% SiC <sub>p</sub>	4.0
多晶 MoSi <sub>2</sub>	3

注:1)百分数为体积分数。

#### 3.2.1 连续纤维强韧化

用作MoSi<sub>2</sub>增韧的陶瓷纤维仅限于SiC和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>两种<sup>[16]</sup>。根据文献[17],SCS-6 SiC纤维经1600℃保温1.5h,其强度就损失一半以上,因复合工艺温度多在1600~1700℃,故它的热稳定性不能满足要求。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>纤维虽然与MoSi<sub>2</sub>有良好的相容性,但是复合后纤维与界面结合力过强,很难达到增韧的目的。难熔金属(Nb等)丝具有非常好的增韧效果,但这类复合材料大都存在各向异性、纤维与基体界面反应严重以及难以均匀分布在基体中,其使用受到了限制<sup>[11]</sup>。虽然有报道在Nb纤维表面涂一层Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>可阻碍MoSi<sub>2</sub>和Nb之间相互扩散,但仍不能改善其抗蠕变性<sup>[16]</sup>。

### 3.2.2 非连续纤维强韧化

与难熔金属相比,晶须或颗粒强韧化复合材料的效果虽然有限,但其制造工艺简单、材料各向同性、与基体物理化学相容、热膨胀失配的影响小等优点使得非连续纤维的应用日益受到重视。

$SiC_w$  可以同时提高  $MoSi_2$  基材料的强度和韧性,最大程度地改善高温抗蠕变性<sup>[18]</sup>。20% (体积分数)的  $SiC_w$  增强  $MoSi_2$  可使材料的弯曲强度提高近 100%,断裂韧度提高近 54%<sup>[11]</sup>,1 200 时的蠕变率指数下降到 15~20<sup>[19]</sup>。在制备晶须强韧化陶瓷基复合材料过程中,由于表面张力和静电作用,晶须产生严重团聚和缠结,使得材料难以通过烧结达到充分致密,影响材料力学性能的进一步提高<sup>[20]</sup>。Lan Sun 等用酒精分散  $SiC_w$ ,以  $MoSi_2$  和  $SiC$  的 zeta 电位为依据,通过两步调 pH 值法实现了晶须在  $SiC_w - MoSi_2$  复合材料中的均匀分散。用该法制备的材料弯曲强度达 389 MPa,断裂韧度达 3.2 MPa·m<sup>1/2</sup>,与传统的干混和湿混法相比,都有显著的提高<sup>[21]</sup>。表 2 总结了多晶  $MoSi_2$  和 20% (体积分数)的  $SiC_w - MoSi_2$  复合材料的弯曲强度及断裂韧度。

表 2  $MoSi_2$  和 20% (体积分数)  $SiC_w - MoSi_2$  复合材料的室温力学性能<sup>[21]</sup>

Tab 2 Room-temperature mechanical properties of  $MoSi_2$  and 20%  $SiC_w - MoSi_2$  composites

材料 <sup>1)</sup>	分散工艺	弯曲强度 /MPa	断裂韧度 /MPa·m <sup>1/2</sup>
$MoSi_2$	-	202 ±16	3.2 ±0.2
SP 20% $SiC_w - MoSi_2$	悬浮液	389 ±10	5.5 ±0.1
CP 20% $SiC_w - MoSi_2$	传统湿混	330 ±20	4.8 ±0.3
DP 20% $SiC_w - MoSi_2$	干混	310	8.20

注: 1) SP 为用酒精作分散介质制成悬浮液并调整 pH 值; CP 为传统湿混,即以酒精为分散介质,不调 pH 值; DP 即传统干混。

$SiC_p$  的高温强度很高,与  $MoSi_2$  具有良好的化学相容性和热力学稳定性,其抗氧化能力很强。 $SiC_p$  的加入不仅改善了  $MoSi_2$  基复合材料的强韧性,同时还表现出比纯  $MoSi_2$  更好的高温抗氧化性。A. Newman<sup>[7]</sup> 等用四点弯曲试验测得 16% (体积分数)的  $SiC - MoSi_2$  材料的断裂韧度为 8.4 MPa·m<sup>1/2</sup>。 $SiC_p$  的加入能显著改善  $MoSi_2$  复合材料的力学性能,同时减小复合材料的线膨胀系数。微米

$SiC_p$  增强  $MoSi_2$  材料,由于自身弥散体或团聚体可能成为断裂源而使得强韧化效果有限。Koichi Nihara<sup>[22]</sup> 将纳米级  $SiC_p$  加入到  $MoSi_2$  制得 15% (体积分数)的  $SiC - MoSi_2$  复合材料,具有 1 101 MPa 的弯曲强度,3.79 MPa·m<sup>1/2</sup> 的断裂韧度以及 11.77 GPa 的维氏硬度。

$ZrO_2$  是一种非常重要的陶瓷增韧剂。它具有相变效应,与  $MoSi_2$  有良好的物理、化学相容性<sup>[2]</sup>,线膨胀系数与  $MoSi_2$  相当,使得  $MoSi_2 - ZrO_2$  系复合材料成为利用单一相强化,实现低温相变增韧和高温弥散化最理想的成分和组织设计<sup>[23]</sup>。有研究表明,在  $MoSi_2$  基体中加入 1% (摩尔分数)的 3Y- $ZrO_2$  能显著提高断裂强度,这种复合材料的断裂强度约为 1 050 MPa。随着 3Y- $ZrO_2$  的增加,当加到 2% (摩尔分数)时断裂强度会突然减小,继续增加含量断裂强度会再次增大,因此  $ZrO_2$  的强韧化效果与其含量有关。但同时由于它的高温力学性能较差,又会导致材料高温强度和硬度的下降<sup>[24]</sup>。Danqing Yi<sup>[25]</sup> 等分别以市售  $MoSi_2$  和机械合金化制得的  $MoSi_2$  为基体,通过加入不稳定的  $ZrO_2$  (UZ) 和部分稳定的  $ZrO_2$  (YPSZ) 经热压烧结制成复合材料。经实验证明不稳定的  $ZrO_2$  具有显著的增韧效果,而部分稳定的  $ZrO_2$  增韧效果不明显;纯合金化制得的  $MoSi_2$  及其复合材料的硬度均高于市售  $MoSi_2$ ,结果如表 3 所示。另有报道<sup>[26]</sup>,纳米级  $ZrO_2$  粒子的加入对  $MoSi_2$  力学性能有相当明显地提高,断裂韧度高达 5.79 MPa·m<sup>1/2</sup>。如何避免纳米级  $ZrO_2$  的团聚并使其在基体中能均匀分散是该复合材料性能改进的关键所在<sup>[25]</sup>。

另有  $Al_2O_3$  颗粒增强  $MoSi_2$  基材料, $Al_2O_3$  的加入可以调整  $SiO_2$  的含量、最小化晶粒的长大,从而提高材料的低温断裂韧度<sup>[7]</sup>。在  $MoSi_2$  中加入 2% (摩尔分数)的  $HfO_2$  能提高断裂强度,当  $HfO_2$  的量达到 10% (摩尔分数)时强度达最大值。由于热膨胀及各向异性引起残余应力区域的形成,从而导致加入 15%~20% (摩尔分数)  $HfO_2$  时材料表现出明显的硬化<sup>[24]</sup>。TiC 颗粒在室温非常硬,但是随着温度的升高在 600~800 以上会发生变形。TiC 颗粒的加入成功地促进了位错的增殖,提高了材料的强度和塑性<sup>[27]</sup>。 $MoSi_2$  与 TiC 复合可以达到显著增强效果,但是由于 TiC 的高温抗氧化性比  $MoSi_2$  要差,因此高温抗氧化性是该种复合材料最主要的问

题<sup>[28]</sup>。用 10% (体积分数)  $B_4C$  增强  $MoSi_2$ , 制得的复合材料具有较高的相对密度、弯曲强度 (380 MPa)、断裂韧度 ( $3.9 MPa \cdot m^{1/2}$ ) 及维氏硬度<sup>[29]</sup>。同时  $B_4C$  可有效抑制  $MoSi_2$  材料的氧化, 并能提高材料的耐磨性<sup>[30]</sup>。 $Si_3N_4$  具有很高的强度、良好的抗热震性和较高的室温断裂韧度, 被认为是最重要的结构陶瓷之一。在  $MoSi_2$  中加入不同量的  $Si_3N_4$  颗粒制备的复合材料室温断裂韧度可达  $15 MPa \cdot m^{1/2}$ , 1 200 时蠕变率为  $10^{-8} /s$ , 且表现了比  $MoSi_2$  更优异的抗氧化性。而加入 SiC 纤维制成 SiC/ $MoSi_2 - Si_3N_4$  复合材料, 其断裂韧度可高达  $35 MPa \cdot m^{1/2}$ , 蠕变率在 1 200 仅为  $10^{-9} /s$ <sup>[31]</sup>。

表 3 热压材料的实验数据<sup>[24]</sup>

Tab 3 Experimental data of hot-pressed materials

材 料 <sup>1)</sup>	热压温度 /	密度 / $g \cdot cm^{-3}$	硬度 /GPa	断裂韧度 / $MPa \cdot m^{1/2}$
$MoSi_2$ (A)	1 500	6.19	10.1	2.82
$MoSi_2$ (B)	1500	6.13	12.4	2.85
$MoSi_2$ (A) + 20% $ZrO_2$ (UZ)	1 600	6.09	8.9	6.66
$MoSi_2$ (A) + 20% $ZrO_2$ (YPSZ)	1 600	6.13	11.1	3.44
$MoSi_2$ (A) + 20% $ZrO_2$ (UZ)	1 600	6.05	10.3	6.75
$MoSi_2$ (A) + 20% $ZrO_2$ (UZ)	1 600	5.97	11.2	2.73

注: 1) A 为市售  $MoSi_2$  颗粒; B 为机械合金化所制  $MoSi_2$  颗粒。

### 3.3 复合协同效应

在合金化制成的  $MoSi_2$  和  $WSi_2$  复合材料中, 添加 20% (体积分数) 的 SiC 晶须可大大提高材料的抗蠕变性及高温强度, 而且具有比硅基陶瓷更好的高温断裂韧度和更低的裂纹扩展速率<sup>[11]</sup>。在  $Mo-Si-Al$  合金中加入 15% (体积分数) 的  $SiC_p$  可使材料在 1 100 的强度值达到 954 MPa, 大大提高了高温强度<sup>[21]</sup>。

另有报道, 利用不同种类增强剂的协同效应, 可达到室温增韧、高温补强的目的。如在  $MoSi_2$  中加入 20% (体积分数) 的 SiC 和 2% (体积分数) 的 C, 材料硬度、弯曲强度和断裂韧度分别为 12.2 GPa, 530 MPa 和  $7.2 MPa \cdot m^{1/2}$ ; 800 时的维氏硬度为 8.0 GPa; 在 1 200 和 1 400 的压缩强度分别是宇航材料工艺 2005 年 第 1 期

560 MPa 和 160 MPa, 与未增强的  $MoSi_2$  相比各项力学性能都有大幅度的提高<sup>[32]</sup>。艾云龙等利用 SiC 和  $ZrO_2$  的协同效应强韧化  $MoSi_2$  材料, 结果表明制得材料晶粒较基体细小, 裂纹扩展曲折, 断口呈沿晶和穿晶混合断裂特征, 显著提高了  $MoSi_2$  基复合材料的强度和韧度<sup>[33]</sup>, 实验结果如表 4 所示。

表 4  $MoSi_2$  及其复合材料的力学性能

Tab 4 Mechanical properties of  $MoSi_2$  and  $MoSi_2$ -based composites

材 料	孔隙率 /%	弯曲强度 /MPa	显微硬度 (HV)	断裂韧度 / $MPa \cdot m^{1/2}$
$MoSi_2$	2.9	160	1 341	2.52
10% $ZrO_2 - MoSi_2$	4.5	380	1 499	5.81
20% SiC - $MoSi_2$	2.7	215	1 912	3.84
(20% $ZrO_2$ + 10% SiC) - $MoSi_2$	4.1	470	1 975	7.65

此外, SiC 强韧化  $MoSi_2$  基复合材料的线膨胀系数比一般的结构陶瓷 (如  $Si_3N_4$ ) 高, 因此 H. CHEN<sup>[34]</sup> 在 40% (体积分数) 的 SiC -  $MoSi_2$  复合材料中添加 1.0% (质量分数)  $B_4C$ , 使得材料的维氏硬度、弯曲强度和断裂韧度分别达到 16.5 GPa, 710 MPa 和  $6.3 MPa \cdot m^{1/2}$ , 同时材料的线膨胀系数与纯  $MoSi_2$  相比降低了 21%。 $MoSi_2 - 20%$  (质量分数) TiC - 1% (质量分数) C 复合材料与未加炭粉的  $MoSi_2 - 20%$  (质量分数) TiC 材料相比, 弯曲强度和断裂韧度分别从 481 MPa, 3.98  $MPa \cdot m^{1/2}$  提高到 689 MPa, 5.4  $MPa \cdot m^{1/2}$ <sup>[35]</sup>。

### 4 结语

目前  $MoSi_2$  基复合材料的研究还处于实验阶段, 但它在 1 200 ~ 1 600 具有与硅基结构陶瓷可以相媲美的高温强度和抗氧化性, 而且安全可靠性能优于脆性陶瓷, 因此是一种极有前途的高温结构材料。提高  $MoSi_2$  基体材料的纯度, 同时利用合金化和复合化的双重效应、不同增韧剂的协同效应以及纳米复合与合金化技术的结合都有利于  $MoSi_2$  基复合材料强韧性的改善。

### 参考文献

- 1 Petrovic J J. Mechanical behavior  $MoSi_2$  and  $MoSi_2$  composites Mater Sci & Eng, 1995; A192/A193: 31
- 2 Vasudevan A K, Petrovic J J. A comparative overview

of molybdenum disilicide composites Mater Sci & Eng , 1992; A155: 2 ~ 3

3 山口正治 (日), 马越佑吉, 丁树深译. 金属间化合物. 北京: 科学出版社, 1991: 74

4 Khmura K, Nakamura M, Hirano T. High temperature deformation behavior of  $\text{MoSi}_2$  and  $\text{WSi}_2$  single crystals. J. Mater Sci & Eng , 1990; (2) : 2 490

5 陈又松. 金属间化合物高温结构材料. 材料科学与工程, 1983; 1 (3) : 31

6 Bertziss D A, Cerchiara R R, Gulbransen E A et al. Oxidation of  $\text{MoSi}_2$  and comparison with other silicide materials. Mater. Sci & Eng , 1992; A155: 165

7 Newman A, Sampath S, Herman H. Processing and properties of  $\text{MoSi}_2$  - SiC and  $\text{MoSi}_2$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Mater Sci & Eng , 1999; A261: 252 ~ 260

8 Chakraborty A, Kamat S V, Mitra R. Effect of  $\text{MoSi}_2$  and Nb reinforcements on mechanical properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  matrix composites. J. Mater Sci & Eng , 2000; 35: 3 827

9 张丙荣, 沈建兴, 刘宏.  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{MoSi}_2$  陶瓷材料力学性能的研究. 机械工程材料, 2000; (6) : 11

10 Schwarz R B, Srinivasan S R, Petrovic J J, Maggiori C J. Synthesis of molybdenum disilicide by mechanical alloying. Mater Sci & Eng , 1992; A155: 76

11 Wiederhorn S M, Gettings R J, Roberts D E, Ostrag C. Tensile creep of silicide composites. Mater Sci & Eng , 1992; A155: 209

12 黎文献, 徐广卓等. 钴对  $\text{MoSi}_2$  组织和性能的影响. 稀有金属材料与工程, 1998; 12 (4) : 224

13 Zhang GuoJun, Yue Xuemei, Watanabe Tadahiko. Addition effects of aluminum and in situ formation of alumina in  $\text{MoSi}_2$ . J. Mater Sci & Eng , 1999; 34 : 999 ~ 1 000

14 张厚安, 唐果宁等. 稀土增强  $\text{MoSi}_2$  力学性能的研究. 湘潭矿业学院学报, 1998; (3) : 62 ~ 64

15 张厚安, 陈平等. 稀土 -  $\text{MoSi}_2$  复合材料的干摩擦磨损性能. 中国稀土学报, 2002; 8 (4) : 308 ~ 310

16 Aman D E, Shaw K G, Stoff N S, Rajan K. Fabrication, structure and properties of  $\text{MoSi}_2$ -base composites. Mater Sci & Eng , 1992; A155: 85 ~ 93

17 Mabney M J, Hecht R J. Development of continuous-fiber-reinforced  $\text{MoSi}_2$ -base composites. Mater Sci & Eng , 1992; A155: 19

18 Sadananda K, Feng C R, Jones H. Creep of molybdenum disilicide composites. Mater Sci & Eng , 1992; A155: 227 ~ 239

19 Bose S. Engineering aspect of creep deformation of molybdenum disilicide. Mater Sci & Eng , 1992; A155 : 217 ~ 225

20 凌律巍, 吴文彪等. SiC晶须在 Mullite浆料中的分散特性及流变学表征. 无机材料学报, 2001; 16 (6) : 1 084

21 Sun Lan, Pan Jinsheng, Liu Yajun. An improvement in processing and fabrication of SiC-whisker-reinforced  $\text{MoSi}_2$  composites. J. Mater Sci & Eng , 2001; 20: 1 421 ~ 1 423

22 Koichi Niihara, Yoshikazu Suzuki. Strong monolithic and composite  $\text{MoSi}_2$  materials by nanostructure design. Mater Sci & Eng , 1999; A261: 6 ~ 15

23 Petrovic J J, Bhattacharya A K.  $\text{ZrO}_2$  and  $\text{ZrO}_2$ -SiC particulate reinforced matrix composites. Mater Sci & Eng , 1992; A155: 259 ~ 266

24 Yoshikazu Suzuki, Peter E D, Morgan Koichi Niihara. The improvement in mechanical properties of  $\text{MoSi}_2$  through in situ crystallization of grain boundary silica glass by the additions of refractory oxides. Mater Sci & Eng , 1999; A261: 188 ~ 195

25 Yi Danqing, Li Changhai.  $\text{MoSi}_2$  -  $\text{ZrO}_2$  composites-fabrication, microstructures and properties. Mater Sci & Eng , 1999; A261: 89 ~ 98

26 马勤等. 纳米  $\text{ZrO}_2$  颗粒强韧  $\text{MoSi}_2$  基复合材料. 甘肃工业大学学报, 1996; 22 (1) : 47

27 Gibala R, Chang H, Czamik C M, Campbell J P. Plasticity enhancement mechanisms in  $\text{MoSi}_2$ . Mater Sci & Eng , 1999; A261 : 122 ~ 130

28 Zhu Q, Shobu K, Zeng Y, Watanabe T. Oxidation behavior of hot-pressed  $\text{MoSi}_2$  - TiC composite. J. Mater Sci & Eng , 2001; 36 : 313

29 李建林等.  $\text{MoSi}_2$  与  $\text{B}_4\text{C}$  反应合成复合材料的显微结构及力学性能研究. 应用科学学报, 1999; 17 (4) : 397 ~ 399

30 阎逢元等. 碳化硼颗粒增强二硅化钼复合材料的摩擦学性能. 摩擦学学报, 2002; 22 (4) : 104 ~ 106

31 Hebsur M G. Development and characterization of  $\text{SiC}_f/\text{MoSi}_2$  -  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (p) hybrid composites. Mater Sci & Eng , 1999; A216 : 24 ~ 37

32 刘伯威等.  $(\text{SiC}_p + \text{C})\text{MoSi}_2$  复合材料的组织结构及力学性能. 中国有色金属学报, 2001; 11 (4) : 633 ~ 636

33 艾云龙等.  $\text{ZrO}_2 + \text{SiC}$  颗粒强韧化  $\text{MoSi}_2$  基复合材料的显微组织和性能. 金属热处理学报, 2000; 21 (4) : 20 ~ 22

34 Chen H. New approach to  $\text{MoSi}_2/\text{SiC}$  intermetallic-ceramic composite with  $\text{B}_4\text{C}$ . J. Mater Sci & Eng , 2001; 36 : 5 773 ~ 5 777

35 Zeng Yuping, Xu Chaonan, Tadahiko Watanabe. High temperature bending strength of  $\text{MoSi}_2$  - TiC - 1wt% C composites. J. Mater Sci & Eng , 2001; 20 : 1 373 ~ 1 375

(编辑 吴坚)

宇航材料工艺 2005年 第1期