

## 双 A 层 MAX 相 $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$ 的热压烧结研究

金 森<sup>1</sup>, 王作通<sup>2</sup>, 杜亚琼<sup>1</sup>, 胡前库<sup>1</sup>, 禹建功<sup>2</sup>, 周爱国<sup>1</sup>

(河南理工大学 1. 材料科学与工程学院; 2. 机械与动力工程学院, 焦作 454003)

**摘 要:** 本工作采用真空热压烧结的方法, 研究  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$  粉体的烧结性能, 制备致密的  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$  块体材料, 并且表征所制备材料的微观结构。实验发现 750 °C 是合适的烧结温度, 过高的烧结温度(850 °C)会导致样品分解, 主要产物为  $\text{Mo}_2\text{C}$ 。在 750 °C 烧结过程中, 随着烧结时间的延长, 样品的晶粒没有明显长大, 但是样品内部空隙显著变小, 内部结构增强, 相对密度明显提高。因为  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$  晶体的片状结构, 热压烧结过程中, 部分片状晶粒会偏转, 导致烧结样品的多数晶粒的(00 $l$ )晶面会倾向垂直于热压方向。在 750 °C 烧结 8 h, 可以得到几乎完全致密(相对密度 98.8%)的  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$  块体材料。

**关 键 词:** MAX 相;  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$ ; 烧结; 热压

中图分类号: TQ174 文献标识码: A

## Hot-pressing Sintering of Double-A-layer MAX Phase $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$

JIN Sen<sup>1</sup>, WANG Zuo-Tong<sup>2</sup>, DU Ya-Qiong<sup>1</sup>, HU Qian-Ku<sup>1</sup>, YU Jian-Gong<sup>2</sup>, ZHOU Ai-Guo<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

**Abstract:**  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$ , a double-A-layer MAX, is reported to be films or powders. This paper researched the sintering properties of  $\text{M}_2\text{Ga}_2\text{C}$  powders to make dense bulk samples by vacuum hot pressing. It was found that 750 °C was a suitable sintering temperature, while higher temperature (850 °C) resulted in decomposition of  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$  yielding to main product of  $\text{Mo}_2\text{C}$ . During sintering process at 750 °C, its grain size did not increase obviously with sintering time, meanwhile the size of pores decreased markedly and the relative density increased significantly with the increasing sintering time. Additionally, the hot-pressed samples had obvious texture. Due to layering, some grains changed their orientations during sintering, of which most of the (00 $l$ ) planes in the hot-pressed samples preferred to be perpendicular to the direction of hot press. Almost fully densified  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$  bulk (relative density: 98.8%) was obtained by hot pressing at 750 °C for 8 h. This advantage of the method suggested that it can serve as a promising preparation for  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$ , a double-A-Layer MAX.

**Key words:** MAX phase;  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$ ; sintering; hot press

$\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$  是在 2015 年被制备出来的一种新型 三元碳化物<sup>[1]</sup>, 这种碳化物是一种特殊的 MAX 相。

收稿日期: 2019-06-19; 收到修改稿日期: 2019-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(51772077); 河南省高校科技创新团队(19IRTSTHN027); 河南省自然科学基金(182300410228, 182300410275)

National Natural Science Foundation of China (51772077); Henan University Science and Technology Innovation Team (19IRTSTHN027); Henan Natural Science Foundation (182300410228, 182300410275)

作者简介: 金 森(1988-), 男, 硕士研究生. E-mail: jsjsjinsen@126.com

JIN Sen(1988-), male, Master candidate. E-mail: jsjsjinsen@126.com

通讯作者: 周爱国, 教授. E-mail: zhouag@hpu.edu.cn

ZHOU Ai-Guo, professor. E-mail: zhouag@hpu.edu.cn

MAX 相是层状三元碳化物/氮化物,同时具有陶瓷和金属的特性,在高温、高压和高腐蚀性等极端条件下呈现良好的稳定性、抗损伤容限性以及抗氧化性<sup>[2-3]</sup>,又具有良好的可加工性,因此这种材料在高温结构材料、高温润滑材料、核材料等领域有重要的应用<sup>[4-11]</sup>。MAX 相的化学式为  $M_{n+1}AX_n$  ( $n=1, 2, 3\dots$ ), 其中 M 是早期过渡金属元素 ( $M=Ti, Sr, V$  等), A 是第 IIIA、第 IVA 主族元素 ( $A=Al, Ga, Si$  等), X 是 C 或 N<sup>[8,12-14]</sup>。MAX 相的晶体中, M 原子和 X 原子以共价键结合,形成稳定的 MX 二维层; A 元素的单原子层通过较弱的金属键与 X 元素连接,并把 MX 二维层分隔开。但是  $Mo_2Ga_2C$  的 A 原子层是双层的镓(Ga)原子,这是第一种双 A 原子层的 MAX 相。研究  $Mo_2Ga_2C$  的结构与性能,可以促使科学家发现并制备一系列具有类似结构的双 A 层 MAX 相。例如: 2016 年, Thore 等<sup>[15]</sup>采用第一性原理计算方法,预测了另外一种双 A 层 MAX 相:  $V_2Ga_2C$  相; 2017 年, Eklund 课题组<sup>[16]</sup>制备了双 A 层  $Ti_2Au_2C$  和  $Ti_3Au_2C$ 。

在  $Mo_2Ga_2C$  被发现后,科学家通过理论计算与实验分析,研究了  $Mo_2Ga_2C$  的结构和性能<sup>[17-20]</sup>。理论上,因为多了 1 层金属性的 A 原子层,相对于典型的单 A 层 MAX 相,  $Mo_2Ga_2C$  这种双 A 层 MAX 相应该具有更多的金属特性,比如延展性更好、韧性增加、更好的机械加工性。目前实验合成的  $Mo_2Ga_2C$  都是粉体或薄膜<sup>[1,21]</sup>,很多性能无法测定。为了测定  $Mo_2Ga_2C$  材料的力学和电学性能,需要通过烧结  $Mo_2Ga_2C$  粉体,制备高纯的  $Mo_2Ga_2C$  块体材料。本工作通过真空热压烧结的办法,研究  $Mo_2Ga_2C$  粉体的烧结性能,尝试制备高纯致密的  $Mo_2Ga_2C$  块体材料,并且表征了所制备块体材料的微观结构。

## 1 实验方法

科研人员在 2015 年首次制备出的  $Mo_2Ga_2C$  粉体,除了主相之外,还含有约 20wt% 的碳化钼 ( $Mo_2C$ )“杂质”<sup>[1]</sup>。本实验采用 He 等<sup>[21]</sup>2018 年探索出的制备方法:  $Mo_2C$  粉与 Ga 块体按照摩尔比 1:5 混合,然后真空封装在石英管中,在 650 °C 高温处理 60 h,取出后在盐酸溶液(37wt%)中浸泡 48 h,移除多余的 Ga。这种方法合成的  $Mo_2Ga_2C$  纯度为 91.3wt%。将制备好的  $Mo_2Ga_2C$  粉体装入  $\phi 20$  mm 的石墨模具,放入真空热压烧结炉(ZT-40-21Y 型,上海晨华)烧结,烧结压力为 45 MPa。之后对烧结的

硬币状  $Mo_2Ga_2C$  陶瓷体表面进行 X 射线衍射(XRD, Smart-Lab, 日本理学,日本)表征,测试样品物相组成;用扫描电镜(SEM, Merlin Compact, 蔡司,德国)观察块体样品断面结构;采用阿基米德法测量样品的密度。

## 2 结果和讨论

### 2.1 烧结温度的确定

通常情况下,高温会促进陶瓷粉体连接成致密的块体,有利于烧结过程。但是  $Mo_2Ga_2C$  在高温下会分解为其它物质。所以选择合适的烧结温度,给烧结过程提供良好的条件同时避免  $Mo_2Ga_2C$  的分解,是研究  $Mo_2Ga_2C$  烧结过程的第一步。根据前期对  $Mo_2Ga_2C$  粉体的热稳定分析<sup>[21]</sup>, Ar 气氛下加热至 800 °C 时,  $Mo_2Ga_2C$  开始有分解的迹象;在 1000 °C 时,  $Mo_2Ga_2C$  完全分解,主要分解产物是  $Mo_2C$  和  $MoGa_3$ 。所以初步选择的烧结温度是 650、750 和 850 °C。  $Mo_2Ga_2C$  粉体在这三个烧结温度下,真空热压烧结 2 h, 压力为 45 MPa。

图 1 是三次烧结样品的 XRD 图谱。如图所示, 650 与 750 °C 烧结的样品仍然是非常纯净的  $Mo_2Ga_2C$ , 两者的 XRD 图谱没有明显的区别。然而当温度为 850 °C 时, 样品明显发生了分解, 分解后样品的主要组成是  $Mo_2C$  以及少量的  $Mo_2Ga_2C$  和 Ga。

图 2 是 850 °C 烧结样品的照片, 红色圆圈标记的明亮颗粒是析出的单质 Ga。样品在 850 °C 下  $Mo_2Ga_2C$  分解为  $Mo_2C$ , 这与之前的 Ar 气氛中的热稳定性分析一致, 而且在压力和高温的作用下金属 Ga 从  $Mo_2C$  样品中分离出来。所以, 750 °C 是合适的烧结温度, 既有利于样品的致密化, 也可以避免  $Mo_2Ga_2C$  在高温下的分解。

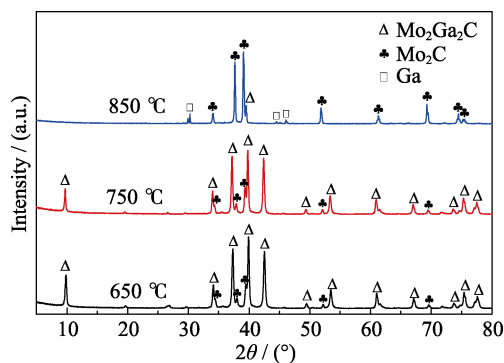


图 1 不同烧结温度下样品的 XRD 图谱  
Fig. 1 XRD patterns of samples sintered at different temperatures

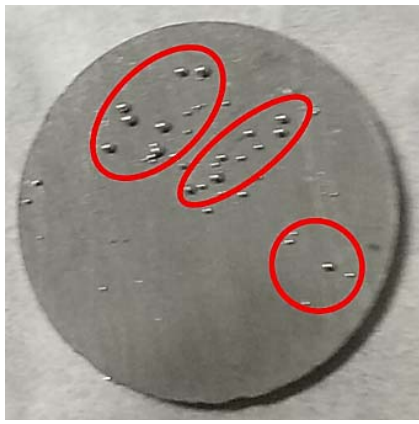


图 2 850 °C 热压烧结 2 h 样品的照片, 红色圆圈标记的明亮颗粒是析出的 Ga

Fig. 2 Photo of the sample sintered at 850 °C for 2 h, in which the glittering particles on samples surface marked by red cycles are precipitated Ga

### 2.2 烧结时间对样品的影响

确定 750 °C 为合适的合成温度之后, 需要确定样品的烧结时间。通常延长烧结时间, 有利于提高烧结样品的致密度, 但是过长的烧结时间会产生较高的成本。在不同的烧结时间下烧制样品, 然后分析样品的相对密度与相组成变化。

表 1 是用阿基米德法测量四次热压实验得到的样品密度。根据 Mo<sub>2</sub>Ga<sub>2</sub>C 的晶体结构数据<sup>[17-18]</sup>, 计算 Mo<sub>2</sub>Ga<sub>2</sub>C 的理论密度为 7.91 g/cm<sup>3</sup>, 烧结样品的相对密度见表 1。从表 1 可以看出, 随着烧结时间的延长, 热压 Mo<sub>2</sub>Ga<sub>2</sub>C 块体材料的密度持续增大。8 h 烧结样品的相对密度达到 98.8%。

图 3(a)为经过 2、4、6 和 8 h 烧结样品的 XRD 图谱, 最下面的图谱是 Mo<sub>2</sub>Ga<sub>2</sub>C 粉体, 对应的烧结时间为 0 h。从图中可以看到, 经过不同时间烧结样品的 XRD 图谱没有新的衍射峰出现, 每个衍射峰的 2θ 角没有变化。说明在这个烧结温度下, 样品没有分解, 也没有新的物质生成。

但是衍射峰的相对强度发生了明显的变化。粉体的最强峰是(103)峰, 但是烧结样品的(002)和(008)晶面对应的衍射峰明显变强。图 3(b)是经过不同烧结时间样品的(008)峰与(103)峰强度的比值。烧结前,

表 1 烧结时间对样品密度及相对密度的影响  
Table 1 Effect of sintering time on sample density and relative density

Sintering time/h	Density/(g·cm <sup>-3</sup> )	Relative density/%
2	5.44	68.8
4	6.69	84.6
6	7.28	92.0
8	7.81	98.8

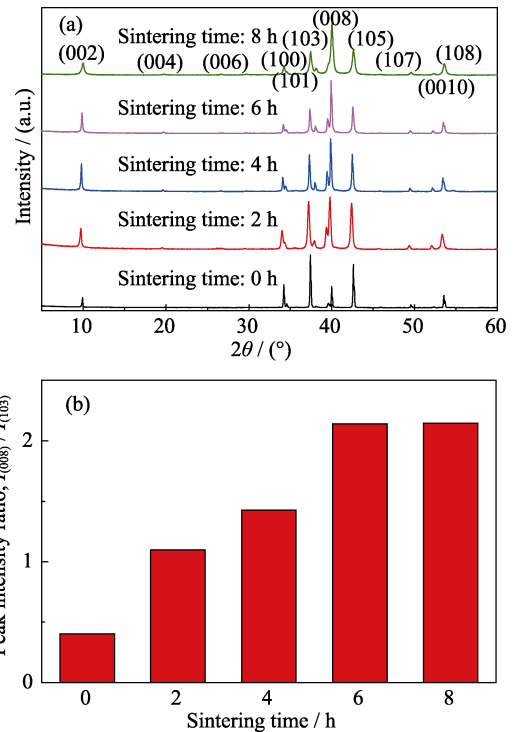


图 3 (a)不同时间烧结的 Mo<sub>2</sub>Ga<sub>2</sub>C 样品的 XRD 图谱和(b)热压样品的 XRD 图谱中(008)峰与(103)峰强度的比值  
Fig. 3 (a) XRD patterns of hot-pressed Mo<sub>2</sub>Ga<sub>2</sub>C samples with different sintering time, and (b) intensity ratios of (008) peak and (103) peak

粉体中(008)峰强度只是(103)峰强度的 0.4 倍, 2 h 的烧结时间已经导致样品的(008)峰超越(103)峰成为最强峰, 随着烧结时间的延长, (002)和(008)峰的相对强度仍然持续增加, 烧结 8 h 样品的(008)峰强度是(103)峰强度的 2.1 倍。根据以上现象可以得出: 热压制备的 Mo<sub>2</sub>Ga<sub>2</sub>C 块体具有明显的织构。随着热压时间的延长, Mo<sub>2</sub>Ga<sub>2</sub>C 样品中更多晶粒的(00l)晶面会倾向于垂直热压方向。

### 2.3 烧结样品的微观结构

图 4 是烧结前 Mo<sub>2</sub>Ga<sub>2</sub>C 粉末的扫描电镜照片, 从图 4 可以看出, 烧结前的 Mo<sub>2</sub>Ga<sub>2</sub>C 晶粒为不规则片状结构, 直径(8±2) μm, 厚度(0.5±0.2) μm。

图 5 是不同温度、不同时间烧结样品的断口的扫描电镜图片。图 5(a~d)是 750 °C 烧结 2、4、6

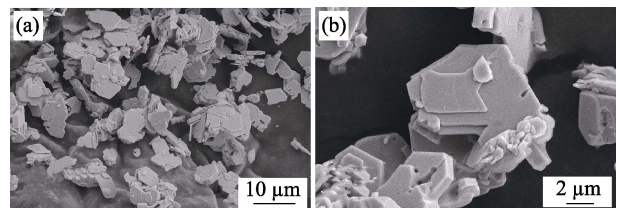


图 4 Mo<sub>2</sub>Ga<sub>2</sub>C 粉末的低倍和高倍扫描电镜照片  
Fig. 4 Low and high magnification SEM images of Mo<sub>2</sub>Ga<sub>2</sub>C powders

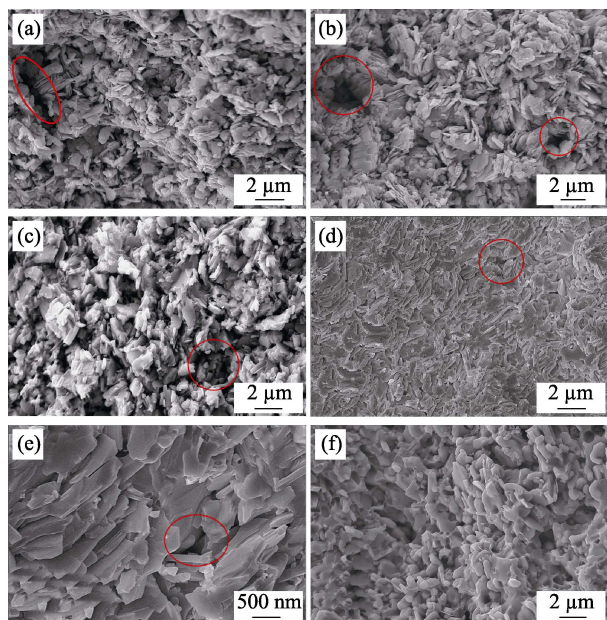


图 5 (a~d)750 °C 热压分别烧结 2、4、6 和 8 h  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$  块体的断面 SEM 照片, (e)图(d)的高倍放大照片, (f)850 °C 热压烧结 2 h 样品的断面 SEM 照片

Fig. 5 (a-d) SEM images of samples sintered at 750 °C for 2, 4, 6 and 8 h, (e) high-magnification image of (d), and (f) SEM image of sample sintered at 850 °C for 2 h

和 8 h 样品的断面显微照片, 图 5(e)是图 5(d)的高倍放大照片。从图中可以看出, 4 个烧结样品的晶粒都是典型 MAX 相的片状晶粒, 晶粒尺寸是 $(1.8 \pm 0.2) \mu\text{m}$ 。与图 4 对比, 发现烧结样品的晶粒尺寸比原料粉体的颗粒尺寸明显减小。所以热压烧结过程中, 原料粉体的片状颗粒受高温高压的作用而破坏成更小的晶粒。

对比图 5(a~d), 烧结过程中  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$  的晶粒没有明显长大, 相对于  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  和  $\text{Ti}_2\text{AlC}$  等常规 MAX 相,  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$  这种双 A 层 MAX 相的晶粒长大比较困难。但是晶粒之间的空隙开始明显变小。图 5(a)中, 2 h 烧结样品有各种空隙, 例如长度  $5 \mu\text{m}$  的长条状空隙。图 5(b)中, 4 h 烧结样品的空隙主要是孔洞, 直径大概是  $2 \mu\text{m}$ 。图 5(d)及其局部高倍照片如图 5(e)所示, 8 h 烧结样品的空隙是非常小的孔洞, 直径大概是  $0.4 \mu\text{m}$ 。从图 5(e)还可以看出, 延长烧结时间, 出现明显的层状晶粒结构, 从微观方面验证了 XRD 图谱中一些主峰规律性变化的结论。因此, 750 °C 的热压烧结过程中, 晶粒并没有随着时间的延长而明显长大, 烧结过程中的主要变化是空隙尺寸变小, 晶粒同向以及致密度提高。

图 5(f)是 850 °C 热压烧结 2 h 样品的断面照片, 与之前的片状  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$  晶粒不同的是, 热压处理后晶粒完全变为等轴的颗粒, 这与上面 XRD 分析的温度过高导致热压样品分解为  $\text{Mo}_2\text{C}$  的结论一致。

## 2.4 样品织构的机理

结合图 5 的微观结构, 可以对热压样品在图 3 中表现出织构给出解释。通常高温制备的材料产生织构有两个原因: 第一个是在晶体生长的过程中, 因为表面能不同, 不同晶面的生长速度不同, 会导致晶体的择优取向; 第二个是部分片状晶粒在外力的作用下偏转, 晶粒的随机排列转变为更稳定的部分晶粒定向排列。大多数高温合成的材料的织构都是这两个原因的共同作用。但是本研究制备的材料晶粒没有明显长大(图 5(a~e)), 第一个原因的作用不明显。因此, 第二个原因, 片状晶粒的转向, 应该是热压  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$  样品产生织构的主要原因。 $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$  晶体的空间群是  $P6_3/mmc$ , 属于六方晶系, 如图 4 所示, 和其它 MAX 相类似,  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$  粉体的颗粒是片状的。烧结前材料的晶粒是随机排列的, 在热压烧结过程中, 晶粒缓慢改变排列方向, 片状的晶粒会逐渐垂直于热压方向, 所以烧结的样品具有越来越强的织构。

## 3 结论

$\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$  粉体合适的烧结温度是 750 °C, 过高的烧结温度(850 °C)会导致样品分解, 分解主要产物是  $\text{Mo}_2\text{C}$ , 并且样品表面会析出金属 Ga 单质。在 750 °C 热压烧结过程中, 随着烧结时间的延长, 样品的晶粒没有明显长大, 相对于  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  和  $\text{Ti}_2\text{AlC}$  等常规 MAX 相,  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$  这种双 A 层 MAX 相的晶粒长大比较困难。但是样品的空隙显著变小, 相对密度明显提高, 而且样品的织构明显增强。因为  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$  晶体的片状结构, 热压烧结的样品的(00l)晶面会倾向于垂直于热压方向。在 750 °C 热压烧结 8 h, 可以得到几乎完全致密(相对密度 98.8%)的高纯  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$  块体材料。从显微结构分析, 样品主要由直径 $(1.8 \pm 0.2) \mu\text{m}$ 片状晶粒组成, 同时存在少量直径  $0.4 \mu\text{m}$  左右的空洞。本研究获得了致密的  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$  块体材料的制备方法, 对这种新型材料的性能(力学和电学等)表征与应用具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] HU C, LAI C. C, TAO Q, *et al.*  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$ : a new ternary nanolaminated carbide. *Chemical Communications*, 2015, **51**(30): 6560–6563.
- [2] BARSOUM M W, BRODKIN D, EL T. Layered machinable ceramics for high temperature applications. *Scripta Materialia*, 1997, **36**(5): 535–541.
- [3] BARSOUM MICHEL W, RADOVIC MILADIN. Elastic and mechanical properties of the MAX phases. *Annual Review of Materials Research*, 2011, **41**(41): 195–227.
- [4] LI MIAN, LI YOU-BING, LUO KAN, *et al.* Synthesis of novel

- MAX phase  $\text{Ti}_3\text{ZnC}_2$  via A-site-element-substitution approach. *Journal of Inorganic Materials*, 2019, **34(1)**: 60–64.
- [5] LI JIAN-HUA, ZHANG CHAO, WANG XIAO-HUI. Progress in machinable and electrically conductive laminate ternary ceramics (MAX phases). *Advanced Ceramics*, 2017, **38(1)**: 3–20.
- [6] LIANG BAO-YAN, ZHANG WANG-XI, WANG YAN-ZHI, *et al.* Reaction mechanism of fabrication of MAX-cBN composites by microwave sintering. *Materials Reports*, 2016, **30(6)**: 66–69.
- [7] LIU YAO, ZHANG JIAN-BO, LI YONG, *et al.* The status and progress of MAX/Metallic matrix self-lubricating composite. *Materials Reports*, 2015(**S2**): 517–523.
- [8] ZHOU AI-GUO, LI ZHENG-YANG, LI LIANG, *et al.* Preparation and microstructure of  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  bonded cubic boron nitride superhard composites. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2014, **42(2)**: 220–224.
- [9] ZHU YUAN-YUAN, ZHOU AI-GUO, JI YI-QIU, *et al.* Tribological properties of  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  coupled with different counterfaces. *Ceramics International*, 2015, **41(5)**: 6950–6955.
- [10] LI ZHENG-YANG, ZHOU AI-GUO, LI LIANG, *et al.* Synthesis and characterization of novel  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ -cBN composites. *Diamond and Related Materials*, 2014, **43**: 29–33.
- [11] LI LIANG, ZHOU AI-GUO, WANG LI-BO, *et al.* In situ synthesis of cBN- $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  composites by high-pressure and high-temperature technology. *Diamond and Related Materials*, 2012, **29**: 8–12.
- [12] LI MIAN, LU JUN, LUO KAN, *et al.* Element replacement approach by reaction with Lewis acidic molten salts to synthesize nanolaminated MAX phases and MXenes. *Journal of the American Chemical Society*, 2019, **141(11)**: 4730–4737.
- [13] LI MIAN, LI YOU-BING, LUO KAN, *et al.* Synthesis of novel MAX phase  $\text{Ti}_3\text{ZnC}_2$  via A-site-element-substitution approach. *Journal of Inorganic Materials*, 2019, **34(1)**: 63–67.
- [14] LU JIN-RONG, ZHOU YANG, LI HAI-YAN, *et al.* Wettability and wetting process in Cu/ $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  system. *Journal of Inorganic Material*, 2014, **29(12)**: 1313–1319.
- [15] THORE A, DAHLQVIST M, ALLING B, *et al.* Phase stability of the nanolaminates  $\text{V}_2\text{Ga}_2\text{C}$  and  $(\text{Mo}_{1-x}\text{V}_x)_2\text{Ga}_2\text{C}$  from first-principles calculations. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2016, **18(18)**: 12682.
- [16] FASHANDI H, LAI C C, DAHLQVIST M, *et al.*  $\text{Ti}_2\text{Au}_2\text{C}$  and  $\text{Ti}_3\text{Au}_2\text{C}_2$  formed by solid state reaction of gold with  $\text{Ti}_2\text{AlC}$  and  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$ . *Chemical Communications*, 2017, **53**: 9554–9557.
- [17] LAI C C, MESHKIAN R, DAHLQVIST M, *et al.* Structural and chemical determination of the new nanolaminated carbide  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$  from first principles and materials analysis. *Acta Materialia*, 2015, **99(15)**: 157–164.
- [18] ALI M A, KHATUN M R, JAHAN N, *et al.* Comparative study of  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$  with superconducting MAX phase  $\text{Mo}_2\text{GaC}$ : first-principles calculations. *Chinese Physics B*, 2017, **26(3)**: 297–302.
- [19] CHAIX-PLUCHERY O, THORE A, KOTA S, *et al.* First-order Raman scattering in three-layered Mo-based ternaries:  $\text{MoAlB}$ ,  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$  and  $\text{Mo}_2\text{GaC}$ . *Journal of Raman Spectroscopy*, 2017, **48**: 631–638.
- [20] WANG HAI-CHEN, WANG JIA-NING, SHI XUE-FENG, *et al.* Possible new metastable  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$  and its phase transition under pressure: a density functional prediction. *Journal of Materials Science*, 2016, **51(18)**: 1–9.
- [21] HE HONG-TIAN, JIN SEN, FAN GUANG-XIN, *et al.* Synthesis mechanisms and thermal stability of ternary carbide  $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$ . *Ceramics International*, 2018, **44(18)**: 22289–22296.