中图分类号： TB331 **文献编号：** 1005-1198 (2017) 01-0021-08
文献标识码： A **DOI：** 10.16253/j.cnki.37-1226/tq.2016.09.003

综合评述

MAX 相及喷涂法制备 MAX 相涂层

刘云龙，朱德贵，胡春峰
西南交通大学 材料科学与工程学院，成都 610031

摘 要：MAX 相作为新型的三元层状陶瓷材料，兼具陶瓷材料和金属材料的优良性能。性能的优异性使得其在诸多领域都有应用潜力，拥有广阔的使用前景。本文主要介绍该材料的结构、性能、制备方法以及利用喷涂法制备 MAX 相涂层的最新研究进展。

关键词：MAX 相；结构；合成；喷涂；涂层

上世纪 60 年代 Nowotny [1] 等开创性地提出“H-phase”(即三元过渡族金属碳化物或氮化物)，但是当时这类材料并没有引起人们的广泛关注。直到 1996 年，美国 Drexel 大学的 Barsoum 教授团队[2]才通过热压法成功制备出了块状 Ti_3SiC_2，并对其独特的性能做了报道。之后，此类材料被统称为“$M_{n+1}AX_n$ 相”或“MAX 相”，其中 M 代表的是过渡族金属元素，A 为主族元素，X 为 C 元素或 N 元素。M 和 A 元素位置如图 1 所示。经研究表明，Cd 元素也可以出现在 A 的位置上，但是这种情况相对比较特殊。

由于具有特殊的层状结构和成键类型，MAX 相这种新型的三元层状陶瓷材料兼具了金属和陶瓷的一些优良性能[3]。它具有良好的抗高温氧化性、易加工、耐腐蚀及高的损伤容限。MAX 相材料的这些优良性能使其在表面涂层方面有着很大的应用潜力和应用前景，通过喷涂法制备出的 MAX 相涂层有望应用于核能燃料的包壳，也可望作为抗磨损、耐腐蚀涂层上应用[4,5]。

1 MAX 相陶瓷的基本结构及特征

MAX 相属于六方晶系，为了便于描述，可以类比岩盐型结构，用 $M_{n+1}X_n$ 片层与紧密堆积的 A 族原子面在 *c* 方向上交替堆垛所组成，X 原子一般填充在 M 原子所构成的八面体间隙中。根据 n 值的不同，可将其分为 211 相、312 相和 413 相等。其常见晶体结构如图 2 所示。已经有最新的研究证

收稿日期： 2016–09–07 收到修改稿日期： 2016–10–22
基金项目： 四川省千人计划项目 (2015)；西南交通大学雏鹰学者计划 (2015)。
第一作者： 刘云龙 (1991 –), 男, 河南平顶山人，硕士研究生。E-mail: ylliu@my.swjtu.edu.cn。
通讯作者： 胡春峰 (1980 –), 男, 河南永城人, 教授。E-mail: chfhu@live.cn。

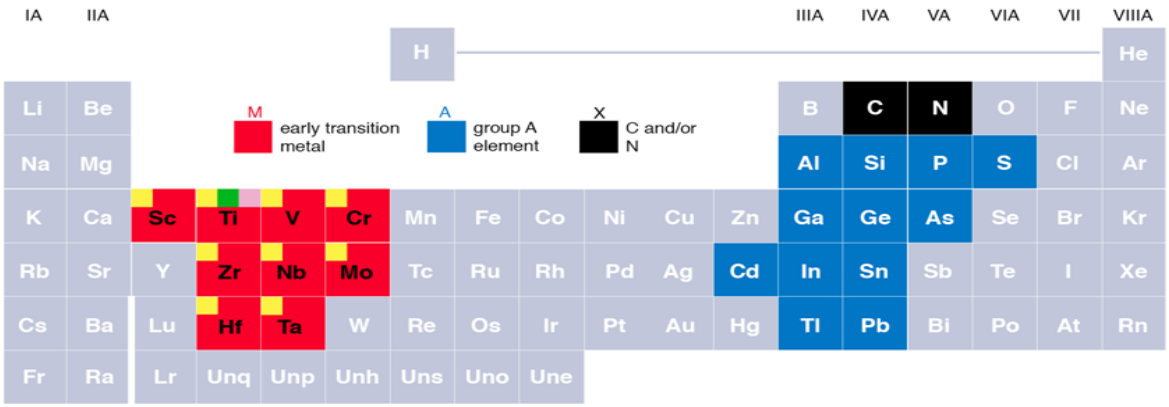


图 1 MAX 相形成元素在周期表中的位置

Figure 1 Locations of MAX phase forming elements in the periodic table

明存在有 n 值更高的相，包括 514、615、716 相等[4]。

进一步的研究[6]表明，MAX 相晶粒的生长方式表现出各向异性特征，并且在基面方向上择优生长。因此，MAX 相的形貌一般呈现板条状。MAX 相的化学键特征也比较特别，研究表明结合键强度较高的离子键和共价键结合构成 M–X 之间的作用力，而较弱的共价键和离子键则构成了 M–A 之间的结合力，M–M 之间的化学键主要是由金属键构成。正是由于这些原因，MAX 相材料才会兼具了一些金属和陶瓷的性能。

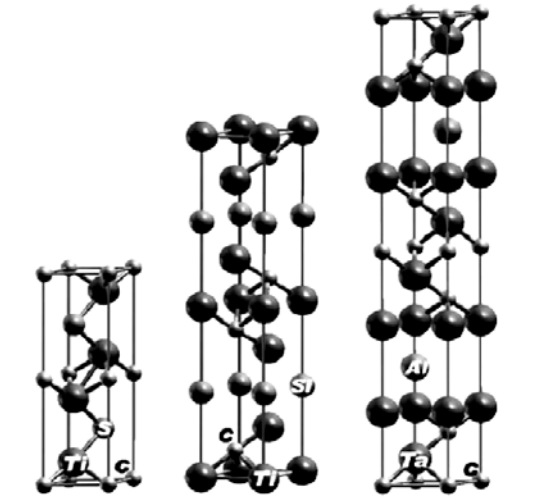


图 2 MAX 相结构示意图[3]

Figure 2 The atomic structure of MAX phases [3]

2 MAX 相陶瓷的基本性能

性能往往是结构的反映。MAX 相材料由于构成化学键的特殊性，因此兼具金属材料和陶瓷材料的性能。

机械性能：就硬度而言，与 MX 相相比，MAX 相的硬度值较小且其硬度具有各向异性的特征。MAX 相一般为六方结构，层与层之间易发生滑移而产生位错，进而产生一定的塑性变形。其层状结构在发生准塑性变形的过程中会产生类似于金属塑性变形时的流线，为位错的堆垛和移动。良好的微观塑性和导热性赋予了该种材料良好的抗热震性和高的损伤容限。同时，良好的准塑性和较低的硬度使得该材料具有较好的可机械加工性能[6]。

电学和热学性能：MAX 相材料由于具有金属材料的性能，因此具有较好的导电性能。较为复杂的 MAX 相体系的电阻率受杂质影响较大。此外，由于该材料的晶体结构具有各向异性，因此存在塞贝克效应。此效应使得 MAX 相材料可作为测量其他材料热电势的电极材料[7]。另外，各向异性也使得 MAX 相在不同方向上具有不同的热膨胀系数。一般认为，*a* 轴方向的热膨胀系数要小于 *c* 轴方向，这主要是由于 *c* 轴的 M–A 结合键弱于 M–X 的结合键。MAX 相的电导率和热导率也受到晶体内缺陷的影响，如 413 相中的 Ti_4AlN_3 晶体存在一定数量的点缺陷，导致其载流子在迁移过程中受

到一定限制，使其拥有最低的电导率和热导率[8]。

但是，并不是所有的 MAX 材料在具有较高电导率的同时也具有较高的热导率。Ti_2SC 的热导率在已有 MAX 相中独占鳌头，但其电导率却相对较低。造成该现象的原因主要是 Ti_2SC 材料中具有较多的声子通道，对于热传导有着较为积极的作用。

多形性：在高压条件下，MAX 相材料会发生三元层状化合物的相变。211 相和 312 相的转变是由于在晶体结构中 A 原子的位置发生改变，MX 层则不发生变化。如 Ti_3GeC_2 在较高的压力下可发生 α 型到 β 型的转变[9]。413 相材料的结构相对复杂，因此其相变机理较为复杂。目前已知 Ta_4AlC_3 存在多形性,最常见的是 α 态 Ta_4AlC_3，但是也有研究表明[10]存在着亚稳态的 β-Ta_4AlC_3。Manoun 研究表明[11] 在增加压力到 47 GPa 时能够使 Ta_4AlC_3 相变形成 α-Ta_4AlC_3，但是与理论数据存在偏差，可能的原因是晶体结构在高压下发生了择优取向。

热稳定性：通常认为，MAX 相材料的热力学稳定性取决于其内部元素的键能和蒸气压等。不同条件下材料的热稳定性也不同。长时间真空条件下若发生分解则是因为其内部存在有杂质[12]，在惰性气体保护下发生分解则可能是因为表面元素发生了选择性氧化[13]。

抗氧化性：三元 MAX 相材料的抗氧化性较二元 MX 相要更好。MAX 材料具有类似于抛物线型的氧化动力学曲线。随着温度的升高，抛物线的斜率逐渐增大。由于该材料中元素种类的不同，其抗氧化性也有很大的不同。目前研究发现[14]能在表面形成致密氧化物层的 MAX 相其抗氧化性都非常好，如 Ti_3AlC_2。

抗腐蚀性：在受到氧化性酸腐蚀的条件下，MAX 相材料受到腐蚀后，表面往往形成较为致密的氧化膜，阻止内部材料继续受到侵蚀[15]。有一个有趣的研究发现使用盐酸可以剥离 M 和 A 元素，形成碳化物驱动的碳材料。

3 MAX 相材料的制备方法

MAX 相材料的制备方法较多，根据不同最终形态有不同的合成工艺。MAX 相材料的形态一般有块状、粉末状和薄膜状等。

3.1 块状 MAX 相材料的制备

对于块状 MAX 相材料 (如 Ti_3SiC_2)，最早制备该材料的方法为化学气相沉积 (Chemical Vapour Deposition, CVD) 技术。CVD 技术所需的合成温度较高，生产成本较高，而且生产效率较低。因此，后来又出现了热等静压烧结技术。Pampuch 等[16]利用热等静压烧结技术制备出了块状 Ti_3SiC_2。虽然生产周期明显缩短，但在生产过程中容易产生杂质 (主要为 TiC)，纯度并不高。直到 1996 年，Barsoum 等人[17]通过热压制备出了纯度较高的 Ti_3SiC_2。为了提高生产效率，又出现了放电等离子烧结，虽然烧结过程与热压差不多，但其对原材料的要求有所降低[18]。

与其他方法比较而言，无压烧结较为适于工业化对大批量生产的要求。最早的无压烧结一般是要先经过机械合金化的预处理，然后再进行无压烧结的操作。但是此种方法混入杂质相较多。之后 Sun 等人[19]尝试在进行无压烧结时加入 Al，此方案使得材料的致密度提高显著。

3.2 粉末状 MAX 相材料的制备

对于粉末状 MAX 相材料，最早制备使用的方法是氧化反应。后来经过更进一步的研究，固液反应制取的方法成为较为合适的方法[20]。

较早研究粉状 MAX 相的 Racault 等人[21]将一定摩尔比的 Ti 粉、Si 粉和 C 粉置于真空硅管中，

在约 1100°C 的条件下加热 10 h，固相反应的产物为 Ti_3SiC_2、$TiSi_2$ 和 TiC 的混合物。在得到混合物之后，通过 HF 气体去除 $TiSi_2$ 杂质，然后将其置于 450°C 空气中氧化处理 10 h，再通过浓硫酸除去氧化反应中所得的 TiO_2，得到纯度可达 95% 的 MAX 相粉末。

Yang 等[22–24]通过控制不同粉末配比、不同温度以及不同保温时间来探究这些因素对 MAX 相制备的影响。结果显示，若想得到纯度为 99 wt% 以上的 MAX 相粉体，可将 Ti 粉、Si 粉和 TiC 的比例控制在 1：(1.10 ~ 1.15)：2，在 1250°C ~ 1300°C 下真空保温 2 h。此外，Yang 等人[25,26]又利用聚碳硅烷取代 C 粉和 Si 粉，与 Ti 和 TiH 相混合，在惰性气体条件下进行热解和进一步的热处理，得到了高纯度的 MAX 相材料。

3.3 薄膜状 MAX 相材料的制备

薄膜状 MAX 相材料最早是通过化学气相沉积法制取的。1972 年，Nickl [27] 利用 CVD 首次制备出了 Ti_3SiC_2 相薄膜，但是却无法获得单一相。之后经过研究发现，利用物理气相沉积 (Physical Vapour Deposition, PVD) 方法可以较好地制备薄膜状 MAX 相材料。Palmquist 等[28]利用磁控溅射技术，采用 Ti 靶、Si 靶和 C 靶的三源共溅射在 900°C 成功制备出 Ti_3SiC_2 薄膜。同时，阴极脉冲电弧、高速氧化喷射也在制备该材料上有一定的应用。

研究表明，如果温度低于 473 K，将无法制备出该材料[29]。但是在超过 473 K 的一定范围内，可制备出低温纳米薄膜，该材料拥有高的耐磨耐腐蚀性能，且导电性较强[30]。

4 喷涂法在 MAX 相涂层的应用

4.1 热喷涂法

热喷涂是一种利用高温热源，将喷涂的材料加热到熔融或者熔化的状态，然后再通过高速气流使其雾化后喷射到基体的表面，形成喷涂层的一种技术。热喷涂有很多种方法，根据其采用的热源不同可以分为四种：火焰喷涂、电弧喷涂、等离子喷涂和特种喷涂。目前制备陶瓷涂层主要的方法为等离子喷涂。

火焰喷涂发展出了超音速火焰喷涂技术。如图 3 所示，它是利用燃料和助燃气体的混合燃烧，使气流受热剧烈膨胀，经喷嘴时先收缩后膨胀，气体速度达到超音速，同时粉末受热后成为粒子，经过加速后与基体碰撞，形成涂层[31]。

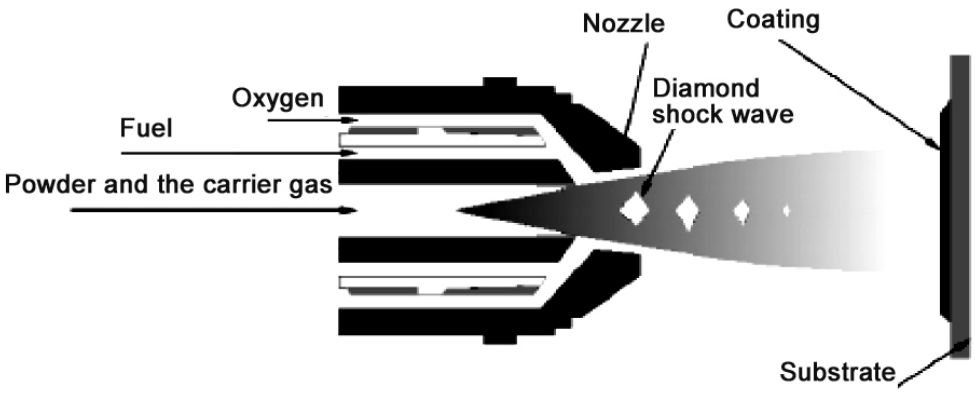


图 3 超音速火焰喷涂原理示意图[31]

Figure 3 Schematic map of high velocity oxy-fuel spraying [31]

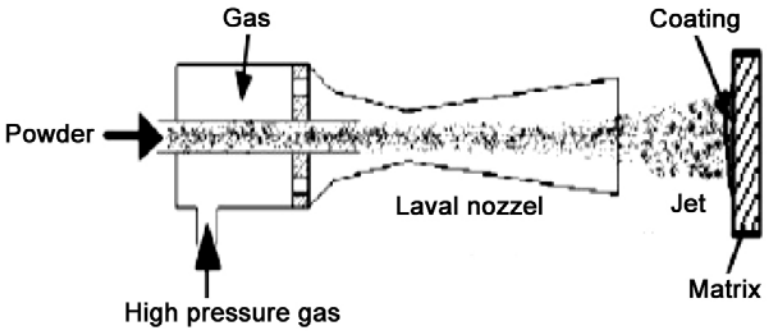


图 4 冷喷涂原理示意图[38]
Figure 4 Schematic map of cold spraying [38]

在制备 MAX 相材料涂层的研究过程中，Frodelius 等[32]利用超音速火焰法成功在不锈钢表面制备出厚度大于 100 μm 的 Ti_2AlC 涂层，并且对其进行了系统分析。结果表明，所得涂层与基体结合良好，具有孔隙率低、组织致密的特点。陈洋等[33]先利用真空烧结制备出高纯度 Cr_2AlC 粉末，再通过超音速火焰喷涂法制备出了厚度大于 200 μm 的 Cr_2AlC 涂层。

4.2 冷喷涂法

近年来，冷喷涂技术作为一种新的喷涂技术备受关注。它是在 1990 年由俄罗斯科学院西伯利亚分院理论与应用力学所双相流研究室的 Alkhimov [34]发明的，是一种能够在较低温度下实现涂层沉积的先进喷涂技术。冷喷涂又称冷空气动力学喷涂 (Cold Gas Dynamic Spraying, CDGS)，是由热喷涂技术拓展而来的一种新型的、先进的表面技术。其原理如图 4 所示，它是利用超音速气流加速喷涂颗粒到 300 m/s ~ 1200 m/s，固体颗粒与基体发生剧烈的碰撞，产生塑性变形，沉积形成涂层。

与传统的热喷涂相比，冷喷涂法有着独有的优点，但是同样也存在着一些限制和不足。冷喷涂在喷涂过程中不需要过高的温度，因此可以避免喷涂过程中喷涂颗粒发生相变、分解和一些化学反应；有些对温度比较敏感的，不能承受很高温度的材料，可以选用冷喷涂实现涂层的制备。冷喷涂过程不会对基体产生热影响，对环境无污染，粉末还可以回收利用，涂层沉积的效率比较高，能够实现涂层良好的导电、导热性。但是，由于冷喷涂技术依赖于高速撞击的塑性变形，像陶瓷一类的硬质脆性材料不能制备较厚的涂层。在制备高质量涂层方面，对于喷涂颗粒和基体自身的特性有着很大程度的依赖性[35]。

陶瓷颗粒在和基体进行高速撞击时，喷涂颗粒没有发生塑性变形而是破碎成了更小的颗粒或碎片，形成了由纳米级碎片嵌入基体的涂层。由于颗粒之间形成机械互锁，后续喷涂颗粒的撞击作用可能会造成涂层的冲蚀，也有可能使涂层更为紧实从而达到涂层致密化的效果。经过许多实验的不断探索，结果证明使用的喷涂颗粒若为纳米团聚的结构，就会更容易实现陶瓷单层沉积。纳米团聚结构的粉末是实现陶瓷材料能够冷喷涂的必要条件，但并非充分条件，因为其冷喷涂的效果也与团聚方式、团聚程度有关[36]。

利用冷喷涂技术来制备 MAX 相涂层，能够避免 MAX 相材料喷涂过程的相变和分解。Gutzmann 等[37]在 Cu 基体上冷喷涂沉积了厚度 110 μm ~ 115 μm 的 MAX 相涂层。图 5 为在 Cu 基体上分别喷涂了 1 层和 5 层的 Ti_2AlC 涂层显微结构。从图中可以看出随着喷涂次数的增加，涂层厚度虽然有所增加，但涂层中的裂纹和分层现象越发严重，这主要是因为喷涂颗粒有着较低的塑性变形率[38]。

另外，Rech [39]在 6060 铝合金及碳钢上冷喷涂了厚度为 50 μm ~ 80 μm 的 MAX 相涂层。所得

Ti_2AlC 涂层硬度在 6060 铝上为 570 $HV_{0.01}$，在碳钢上为 786 $HV_{0.01}$，可以作为抗磨损、耐腐蚀涂层。Benjamin 等[40]通过冷喷涂法在 Zry–4 表面成功沉积了厚度为 90 μm 的 Ti_2AlC 涂层。实验测试表明，涂层的耐磨损性明显优于基体，且和基体结合紧密；700°C 空气氧化测试和在 1005°C 蒸气环境下模拟 LOCA 实验均表明该涂层有应用为核燃料包壳的潜力。

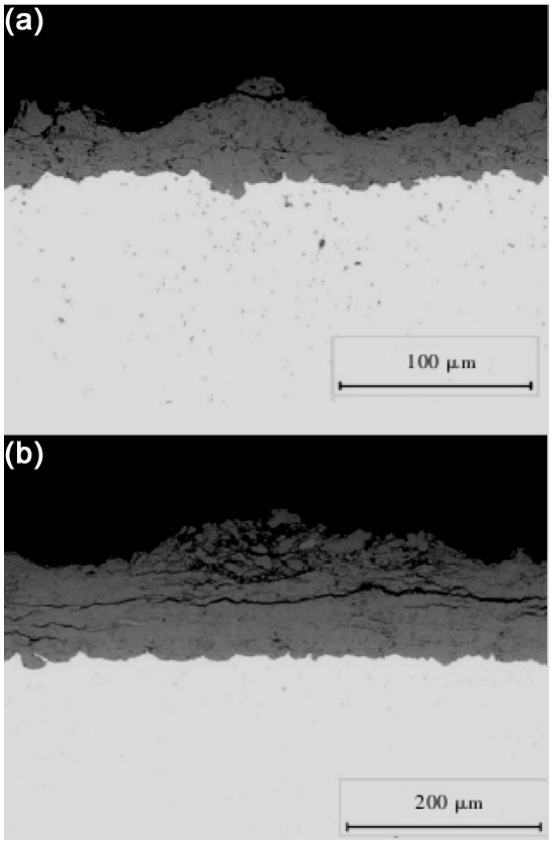


图 5 Ti_2AlC 涂层的显微结构
Figure 5 Microstructure of Ti_2AlC coating

5 总结与展望

三元层状化合物 MAX 相是一种新型结构–功能一体化陶瓷材料，具有广泛的应用前景。目前针对 MAX 相的研究需要更深层次的研究，并在应用领域方面进行拓广实验验证。对于 MAX 相的研究要着力于新相的合成及深入探索已经发现相的工业化应用。对于利用喷涂技术制备 MAX 相涂层的认知是一个不断探索、逐渐深入的过程。尽管目前已经取得了一定的进展，但是尚存在很大的不足，需要科学家投入更多的研究以改善和解决这些不足。可以相信，经过一段时间的努力，三元层状化合物 MAX 相以其独特的优点将在工业领域得到推广应用。

参考文献

[1] NOWOTNY H. Strukturchemie einiger verbindungen der Ubergangsmetalle mit den elementen C, Si, Ge, Sn [J]. Progress in Solid State Chemistry, 1971, 5: 27 –70.
[2] BARSOUM MW, EL-RAGHY T. Synthesis and characterization of a remarkable ceramic: Ti_3SiC_2 [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1996, 79 (7): 1953–1956.
[3] 战再吉, 吕云巧, 王文魁. 三元层状化合物 MAX 相的研究进展[J]. 燕山大学学报, 2012, 36 (3): 189–195.
[4] 郑丽雅, 周延春, 冯志海. MAX 相陶瓷的制备、结构、性能及发展趋势[J]. 宇航材料工艺, 2013, 43 (6): 1–23.
[5] 钱莹, 朱佳, 朱春城. 三元层状陶瓷 Ti_3AlC_2 的研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26 (23): 150–154.
[6] SUN ZM, HASHIMOTO H, TIAN WB, et al. Synthesis of the MAX phases by pulse discharge sintering [J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2010, 7 (6): 704–718.
[7] YOO HI, BARSOUM MW, EL-RAGHY T. Ti_3SiC_2: a material with negligible thermopower over an extended temperature range [J]. Nature, 2000, 407 (6804): 581–582.
[8] FINKEL P, BARSOUM MW, HETTINGER JD, et al. Low temperature transport properties of the natural nanolaminates: Ti_3AlC_2 and Ti_4AlN_3 [J]. Physical Review B, 2003, 67 (23): 235108.
[9] WANG ZW, ZHA CS, BARSOUM MW. Compressibility and pressure-induced phase transformation of Ti_3GeC_2 [J]. Applied Physics Letters, 2004, 85 (16): 3453–3455.
[10] LIN ZJ, ZHOU MJ, ZHOU YC, et al. Structural characterization of a new layered-ternary Ta_4AlC_3 [J]. Journal of Materials Research, 2006, 21 (10): 2587–2592.

[11] MANOUN B, SAXENA SK, EL-RAGHY T, et al. High-pressure X-ray diffraction study of Ta_4AlC_3 [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88 (20): 201902.
[12] EL-RAGHY T, BARSOUM MW. Processing and mechanical properties of Ti_3SiC_2. I, reaction path and microstructure evolution [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1999, 82 (10): 2849–2854.
[13] WANG XH, ZHOU YC. Stability and selective oxidation of aluminum in nano-laminated Ti_3AlC_2 upon heating in argon [J]. Chemistry of Materials, 2003, 15 (19): 3716–3720.
[14] WANG XH, ZHOU YC. Microstructure and properties of Ti_3AlC_2 prepared by the solid-liquid reaction synthesis and simultaneous in-situ hot pressing process [J]. Acta Materialia, 2002, 50 (12): 3141–3149.
[15] JOVIC VD, BARSOUM MW. Corrosion behavior and passive films characteristics formed on Ti,Ti_3SiC_2 and Ti_4AlN_3 in 1 M H_2SO_4 and 1 M HCl Solutions [J]. Journal of Electrochemical Society, 2004, 151 (2): B71–B76.
[16] PALMQUIST JP, JANSSON U, SEPPANEN T, et al. Magnetron sputtered epitaxial single-phase Ti_3SiC_2 thin films [J]. Applied Physics Letters, 2002, 81 (5): 835–837.
[17] BAROUSM MW, EL-RAGHY T. A progress report on Ti_3SiC_2, Ti_3GeC_2 and the h-phases, M_2BX [J]. Journal of Materials Synthesis and Processing, 1997, 5 (3): 197–216.
[18] ZHOU AG, WANG CA, HUANG Y. Synthesis and mechanical properties of Ti_3SiC_2 by spark plasma sintering [J]. Journal of Materials Science, 2003, 38 (14): 3111–3115.
[19] SUN ZM, YANG SL, HASHIMOTO H, et al. Synthesis and consolidation of ternary compound Ti_3SiC_2 from green compact of mixed powders [J]. Materials Transactions, 2004, 45 (2): 373–375.
[20] SUN ZM, ZHANG Y, ZHOU YC. Synthesis of Ti_3SiC_2 powders by a solid-liquid method [J]. Scripta Materialia, 1999, 41 (1): 61–66.
[21] RACAULT C, LANGLAIS F, NASLAIN R. Solid-state synthesis and characterization of the ternary phase Ti_3SiC_2 [J]. Journal of Materials Science, 1994, 29 (13): 3384–3392.
[22] YANG SL, SUN ZM, HASHIMOTO H, et al. $Ti_3Si\ C_2$ powder synthesis from Ti/Si/TiC powder mixtures [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2003, 358: 168–172.
[23] YANG SL, SUN ZM, HASHIMOTO H. Synthesis of Ti_3SiC_2 powder from 1Ti/(1+x)Si/2TiC power mixtures [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2004, 368: 318–325.
[24] YANG SL, SUN ZM, HASHIMOTO H, et al. Synthesis of single-phase Ti_3SiC_2 powder [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2003, 23: 3147–3152.
[25] YANG JS, DONG SM, DING YS, et al. Fabrication of high-purity Ti_3SiC_2 powders by an in situ reaction of polycarbosilane and metal titanium [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2010, 93: 2117–2120.
[26] YANG JS, ZHANG XY, WANG Z, et al. Fabrication of Ti_3SiC_2 powders using TiH_2 as the source of Ti [J]. Ceramics International, 2012, 38: 3509–3512.
[27] NICKLE JJ, SCHWEITZER KK, LUXENBERG P. Gasphasen-abscheidung im systeme Ti-Si-C [J]. Journal of the Less-Common Metals , 1972, 26: 335–353.
[28] PALMQUIST JP, LI S, PERSSON POA, et al. $M_{n+1}AX_n$ phases in the Ti-Si-C system studied by thin-film synthesis and ab initio calculations [J]. Physical Review B, 2004, 70 (16): 165401.
[29] LOPES C, PARREIRA NMG, CARVALHO S, et al. Magnetron sputtered Ti-Si-C thin films prepared at low temperatures [J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 201: 7180–7186.
[30] RESTER M, NEIDHARDT J, EKLUND P, et al. Annealing studies of nanocomposite Ti-Si-C thin films with respect to phase stability and tribological performance [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 429 (1–2): 90–95.
[31] 朱昱, 魏金栋, 张宇, 等. 热喷涂技术制备陶瓷涂层的研究进展[J]. 现代化工, 2015, (8): 72–75.
[32] FRODELIUS J, SONESTRDT M, BJORKLUND S, et al. Ti_2AlC coatings deposited by high velocity oxy-fuel spraying [J]. Surface and Coatings Technolgy, 2008, 202 (24): 5976–5981.
[33] 陈洋, 储茂友, 王力军, 等. 超音速火焰喷涂制备 Cr_2AlC 涂层组织性能研究[J]. 稀有金属, 2012, (4): 568–573.
[34] ALKHIMOV AP, KOSAREV VF, PAPYRIN AN. A method of cold gas-dynamic deposition [J]. Doklady Akademii Nauk, SSSR, 1990, 315 (5): 1062–1065.

[35] 田宁, 张萍. 浅谈冷喷涂技术的应用与前景[J]. 中国铸造装备与技术, 2016, (3): 13–15.
[36] 宋婉, 沈艳芳, 吴杰, 等. 冷喷涂沉积陶瓷涂层的研究历程[J]. 热喷涂技术, 2015, (1): 1–10.
[37] GUTZMANN H, GARTNER F, HOCHE D, et al. Cold spraying of Ti_2AlC MAX-phase coatings [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2013, 22 (2–3): 406–412.
[38] 崔烺, 马冰, 冯胜强, 等. 冷喷涂制备陶瓷及陶瓷金属复合涂层的研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2015, (1): 115–120.
[39] RECH S, SOPPI A, VEZZU S, et al. Cold-spray deposition of Ti_2AlC coatings [J]. Vacuum, 2013, 94: 69–73.
[40] BEMKAMIN RM, BRENDA LG, LUKE CO, et al. Cold spray deposition of Ti_2AlC coatings for improved nuclear fuel cladding [J]. Journal of Nuclear Materials, 2015, 466: 712–717.

※ ※

Review of MAX Phases and Its Coating Fabricated by Spraying

LIU Yun-Long, ZHU De-Gui, HU Chun-Feng

School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

Abstract: MAX phases are ternary layered ceramics, which combine excellent properties of ceramics and metals. Excellent performance endows it to be used in many fields. This work reviews the structure, properties, synthesis of MAX phases, as well as the latest investigations of sprayed coating.

Key words: MAX phases; Structure; Synthesis; Spraying; Coating

※ ※



第一作者刘云龙，男，1991 年出生，2016 年进入西南交通大学材料学院攻读硕士学位。



通讯作者胡春峰，男，工学博士，西南交通大学材料科学与工程学院教授，四川省千人计划青年人才入选者，中国硅酸盐学会测试技术分会理事。申请人 2008 年博士毕业于中科院金属研究所，获师昌绪奖学金三等奖。随后在日本国立材料研究机构 (NIMS) 做两站博士后共 4 年；在中科院宁波材料所任“春蕾计划”副研究员 2 年，期间入选宁波市海外高层次引进人才 3315 计划和宁波市领军拔尖培养工程第三层次；在美国德雷塞尔大学做博士后 1 年。2015 年由西南交通大学以“雏鹰学者”计划引进，在材料科学与工程学院担任教授职务，并入选四川省千人计划人才项目。