

中图分类号: TQ174
文献标识码: A

文献编号: 1005-1198 (2017) 04-0278-08
DOI: 10.16253/j.cnki.37-1226/tq.2017.05.006



三维打印制备 MAX 基复相陶瓷研究进展

范晓孟, 殷小玮, 马显昭

西北工业大学 超高温结构复合材料重点实验室, 西安 710072

摘要: 本文综述了三维打印 (Three-Dimensional Printing, 3DP) 结合反应熔体渗透 (Reactive Melt Infiltration, RMI) 技术制备 MAX 基复相陶瓷的研究进展。在致密 MAX 基复相陶瓷的制备过程中, 3DP 技术的作用主要体现在两方面: 一方面是实现预制体的成型, 另一方面是通过孔隙结构和成分的设计控制所制备材料的微结构。3DP 所制备的预制体呈现为典型的双孔径分布模式, 有利于 RMI 的进行。通过 3DP 同 RMI 结合能够实现致密 MAX 基复相陶瓷的近尺寸成型, 同时通过对初始原料、渗透熔体以及渗透温度等参数的优化能够实现微结构、力学性能以及电磁屏蔽性能的调控。

关键词: MAX 相; 三维打印; 反应熔体渗透; 近尺寸成型

MAX 相陶瓷是一种新型的先进陶瓷材料, 其完整的表达式为 $M_{n+1}AX_n$, 其中 M 为过渡族金属元素, A 为 III 族或 IV 族元素, X 为碳或氮, n 为 1、2 或 3。 $M_{n+1}AX_n$ 的晶体结构为紧密堆积的过渡族金属碳化物或氮化物层被 A 层原子所隔开^[1-5]。特殊的晶体结构赋予 MAX 相陶瓷既像金属又类似陶瓷的综合性能, 一方面具有高导电、高导热及良好的可加工性等金属材料的特性, 另一方面又具有耐高温、抗氧化、抗热震等陶瓷材料的特性, 这就使得 MAX 相陶瓷拥有广阔的应用前景^[1-5]。迄今为止, 化学气相沉积 (Chemical Vapor Deposition, CVD)^[6,7]、热压烧结 (Hot Pressing, HP)^[1,8]、自蔓延高温合成 (Self-Propagation High-Temperature Synthesis, SHS)^[9] 和电火花烧结 (Spark Plasma Sintering, SPS)^[10,11] 等制备工艺均可用来制备 MAX 相陶瓷。然而, 如何采用无压工艺实现 MAX 相陶瓷的近尺寸成型依然是一个挑战。

三维打印 (Three-Dimensional Printing, 3DP) 是一种新型、快速、精密的成型方法。3DP 技术由三维 CAD 模型直接驱动, 能够实现设计、制造的一体化, 具有高度柔性, 制造方式不受零件形状和结构的任何约束, 可以直接制造传统工艺所不能制备的形状复杂的陶瓷部件, 故采用 3DP 技术有望

收稿日期: 2017-05-22

收到修改稿日期: 2017-05-27

基金项目: 国家自然科学基金 (51372204)。

第一作者: 范晓孟 (1987 -), 男, 河南许昌人, 副教授。E-mail: fanxiaomeng@nwpu.edu.cn。

通讯作者: 殷小玮 (1973 -), 男, 山东安丘人, 教授。E-mail: yinxw@nwpu.edu.cn。

实现 MAX 相陶瓷的近尺寸成型。常用 3DP 技术分为两种,一种是直接 3DP 技术,即将陶瓷粉末直接打印成型,又称喷墨打印技术,巴西和德国学者联合开展此方面的研究^[12],但迄今为止还仅限于对于初始 Ti_3SiC_2 墨水的研究,尚未见到关于块状材料的制备;另外一种则为间接 3DP 技术,即采用精密喷头,按照零件截面形状将溶液喷射在预先铺好的粉末层上,使部分粉末粘结在一起,形成截面轮廓。一层粉末成型完成后,再铺上一层粉末,进行下一层粉末的粘结,如此循环直至工件完成,再经过后处理得到构件。美国 Drexel 大学^[13,14]采用间接 3DP 同冷等静压、无压烧结相结合的技术制备 MAX 相陶瓷,所制备材料的致密度达到 99%,但整个过程伴随有 25%~30% 的体积收缩。

3DP 所制备的陶瓷材料由于仅靠黏结剂将粉末材料黏结在一起,表面质量及机械力学性能均不高,故 3DP 所起主要作用在于依据模型实现材料的无模具制造,其较高的气孔率是一个问题。但孔的存在为后续致密化提供了空间,故可考虑利用 3DP 合理设计材料内部的孔隙结构,然后结合反应熔体渗透 (Reactive Melt Infiltration, RMI) 实现致密化。RMI 是一种常见能够在无压条件下实现构件近尺寸制备的工艺。RMI 过程中,陶瓷颗粒同金属熔体具有良好的润湿性,熔体在毛细管力作用下自发渗透进入多孔预制体并与陶瓷颗粒反应生成新的陶瓷相^[15,16]。美国马萨诸塞理工学院采用 3DP 技术,用碳粉作为粉床、树脂作为粘结剂打印预制体,高温裂解后经液硅渗透得到了 SiC-Si 复相陶瓷^[17]。同样,采用 3DP 技术,选择合适的陶瓷粉末制备预制体,利用 RMI 过程中粉末同熔体的反应有望制备 MAX 相陶瓷。2007 年,德国埃尔兰根-纽伦堡大学采用 3DP 技术,以 TiC、 TiO_2 、糊精的混合粉作为粉床,通过 3DP 打印了预制体,在高温下熔铝渗透制备了 Ti_3AlC_2 基复相陶瓷^[18,19]。而后,国内西北工业大学采用 TiC、糊精的混合粉作为粉床,通过 3DP 结合液硅渗透法得到了 Ti_3SiC_2 基复相陶瓷^[20];并采用 Al-Si 合金取代硅熔体进行渗透,能够在较低的渗透温度下制备 Ti_3SiC_2 基复相陶瓷^[21,22]。

本文将对 3DP 结合 RMI 制备 MAX 基复相陶瓷的设计思路、微结构、性能以及潜在应用进行总结,并对其未来的发展趋势进行展望。

1 MAX 基复相陶瓷

1.1 预制体内部微孔结构的调控

RMI 是一个反应与渗透相互竞争的过程。一方面,熔体在毛细管力作用下会渗透进入预制体,另外一方面熔体会同陶瓷颗粒反应,此反应通常伴随着体积膨胀,这就堵塞熔体向预制体内扩散的通道。因此,对于预制体的孔隙结构需进行合理设计,从而实现快速致密化。

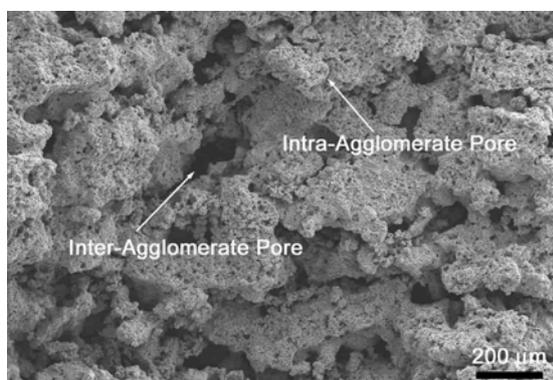


图 1 三维打印获得的 TiC 预制体 SEM 照片^[21]

Figure 1 SEM image of the TiC preform obtained by 3DP

如图 1 所示,3DP 所制备的预制体呈现为典型的双孔径分布模式,即层间陶瓷颗粒间所形成的孔 (Inter-Agglomerate Pores) 和层内陶瓷颗粒间所形成的孔 (Intra-Agglomerate Pores) 的组合。双孔径分布模式有利于 RMI 过程的进行。如图 2 所示,根据渗透动力学的计算,熔体在层间大孔内的渗透速度要高于在层内小孔内的渗透速度,因此 RMI 过程中熔体能够沿着层间的大孔快速渗透进入预制体,然后渗透进入层内小孔同陶瓷颗粒反应,得到所制备材料。大孔

的存在保证了熔体能够快速渗透整个预制体, 避免因反应过程中体积膨胀所造成的堵塞, 小孔的存在则保证了熔体同陶瓷粉体的充分反应。

3DP 的优势在于其可设计性, 通过调节初始粉体的粒径、打印层厚、喷头的喷射速度和扫描速度以及后续烧结过程中温度和控制, 能够合理设计预制体内部的孔隙结构, 之后利用 RMI 过程中熔体同陶瓷颗粒良好的润湿性, 熔体能够自发渗透进入预制体内部, 实现致密材料的制备。

1.2 微结构与性能的调控

3DP 结合 RMI 制备的 MAX 基复相陶瓷的微结构如图 3 所示。基于预制体内部陶瓷颗粒的分布, 所制备的 MAX 相均呈现为弥散分布。同

时可以看到, 材料内部的 Ti_3AlC_2 和 Ti_3SiC_2 呈现为不同微结构, 这是由于二者生成机理不同所造成。研究表明 Al 熔体和 Si 熔体并不能直接与 TiC 反应生成 MAX 相, 而是同 $TiAl_3$ 、 $TiSi_2$ 等中间相反应生成 MAX 相^[23]。RMI 过程中, Al 不会同 TiC 直接反应, 而是先同 Ti_2O_3 反应生成 $TiAl_3$, 而后 $TiAl_3$ 同 TiC 反应生成 Ti_3AlC_2 ; Si 则会同 TiC 直接反应生成 $TiSi_2$, 而后 $TiSi_2$ 同 TiC 反应生成 Ti_3SiC_2 。RMI 过程中所生成 $TiAl_3$ 、 $TiSi_2$ 等中间相会溶于 Al 熔体或 Si 熔体中, 伴随着熔体的扩散在预制体内部扩散。因此对于最终所制备材料, MAX 相均是从固液界面处析出并逐渐长大, 呈现为弥散分布。相比而言, 基于初始预制体内部较多 Ti_2O_3 的存在, RMI 过程中在熔体内部会有更多界面存在, 抑制 Ti_3AlC_2 晶粒的长大, 使得所生成 Ti_3AlC_2 晶粒更为细小。

表 1 列出了 3DP 结合 RMI 制备的 MAX 基复相陶瓷的一些物理及力学性能指标。由表 1 可以看出, 液硅渗透所制备的材料体积收缩比较大, 而采用 Al-Si 渗透和熔 Al 渗透所制备的试样则体积收缩较小。对于液硅渗透来说, 较高的渗透温度下预制体内部的陶瓷颗粒会快速烧结, 同时其反应速度比较快, 使得预制体内部的孔快速闭合, 后续没有足够的熔体填充进来, 故所制备试样收缩较大。而对于 Al-Si 渗透来说, 一方面渗透温度低于坯体的预烧结温度 ($1400^{\circ}C$), 另一方面 Al-Si 熔体中主要为 Si 参与反应, Al 在起到催化作用的同时起到稀释作用^[24], 降低了反应速率, 从而抑制收缩; 对于熔 Al 渗透所制备试样, 由于预制体内部大量 Ti_2O_3 的存在, 能够生成大量 $TiAl_3$, 同样能够抑制

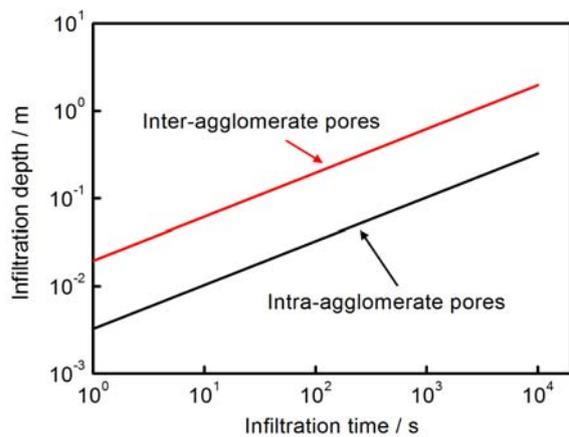


图 2 Si 熔体在 TiC 预制体内部单位时间的渗透深度^[21]

Figure 2 The relationship between infiltration depth and infiltration time for the infiltration of Si melt into TiC preform

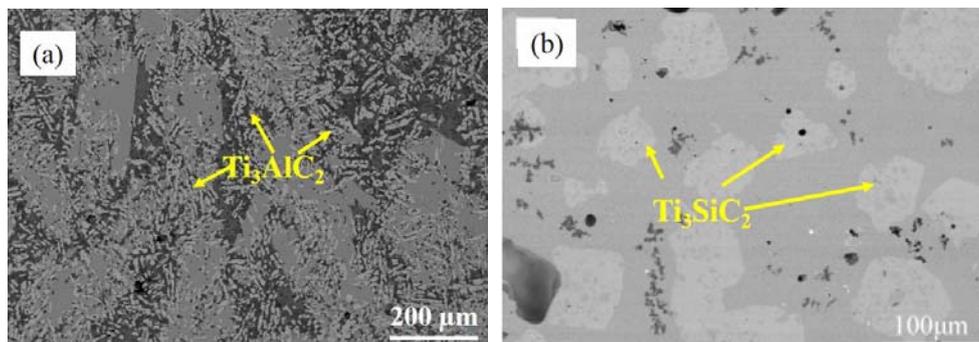


图 3 3DP 结合 RMI 制备的 (a) Ti_3AlC_2 ^[19] 和 (b) Ti_3SiC_2 ^[20] 基复相陶瓷的微结构
Figure 3 SEM images of (a) Ti_3AlC_2 -based^[19] and (b) Ti_3SiC_2 -based^[20] ceramics

表 1 采用 3DP 所制备 MAX 基复相陶瓷的参数与性能^[18-22]
Table 1 Parameters and properties of MAX-phases-based ceramics fabricated by 3DP

Preform	Melt	Infiltration temperature / °C	Volume shrinkage / vol%	Phase content	Flexural strength / MPa	Fracture toughness / MPa·m ^{1/2}	Ref.
TiC	Si	1700	51.6	Ti ₃ SiC ₂ , TiSi ₂ , TiC, SiC	293 ± 18	–	[20]
TiC	Al ₄₀ Si ₆₀	1300	6.43	Ti ₃ Si(Al)C ₂ , TiC, TiSi _x Al _y , Al	107 ± 4	5.9 ± 0.6	[21]
TiC	Al ₇₀ Si ₃₀	1300	1.17	Ti ₃ Si(Al)C ₂ , TiC, TiSi _x Al _y , Al	233 ± 53	4.6 ± 1.8	[21]
TiC-TiO ₂	Al	1400	6.1	Ti ₃ AlC ₂ , TiAl ₃ , Al ₂ O ₃ , Al	320 ± 40	9.7 ± 0.8	[18,19]

反应的快速进行。

如表 1 所示, 相比于 Ti₃SiC₂ 基复相陶瓷, Ti₃AlC₂ 基复相陶瓷表现出更好的强韧性, 这是由于 3DP 结合 RMI 所制备的材料内部的 Ti₃AlC₂ 晶粒更为细小, 形成更多的弱界面, 有利于在裂纹传播过程中更多地消耗能量, 从而表现出更好的强韧性。

如图 4 所示, 3DP 结合 RMI 制备的 MAX 基复相陶瓷在频率为 8.2 GHz ~ 12.8 GHz 范围内的平均屏蔽效能达到 28 dB^[21]。这就意味着, 当电磁波入射到材料表面时, 近乎 99.9% 的电磁波都会被屏蔽掉, 已经满足商业应用的需求。电磁屏蔽效能与材料的电导率直接相关。以液硅渗透制备的 Ti₃SiC₂ 基复相陶瓷为例, 其内部包含有 Ti₃SiC₂、TiSi₂、SiC 和 TiC, 其中 Ti₃SiC₂ 具有良好的电导率, 而 SiC 则是半导体。先前的结果已经表明通过对于渗透温度和 TiC/Si 比例的调控能够调控所制备材料内部的相含量^[20]。故通过合理控制相成分调节材料的电导率, 有望实现对电磁屏蔽性能的调控。

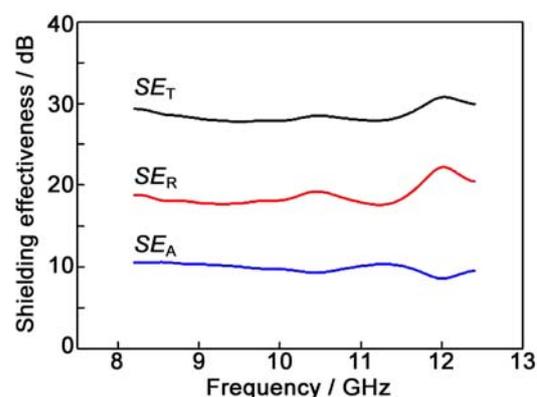


图 4 3DP 结合 RMI 制备的 MAX 基复相陶瓷的电磁屏蔽性能^[21]

Figure 4 Electromagnetic shielding properties of MAX-phase-based ceramics^[21]

1.3 近尺寸成型

从图 5 (a) 能够看出, 最终所制备 Ti₃AlC₂ 基复相陶瓷的尺寸很接近初始所设计的 CAD 模型, 实现了构件的近尺寸成型。德国埃尔兰根-纽伦堡大学采用同样工艺制备了具有各种蜂窝状结构的 Si-SiC 陶瓷, 如图 5 (b) 所示, 进一步表明当前工艺能够用来制备各种复杂形状构件^[23]。

2 潜在应用

2.1 轻质多孔点阵结构件

基于特殊的价键结合和片层状结构, MAX 相陶瓷具有高的损伤容限和独特的力学性能, 其良好

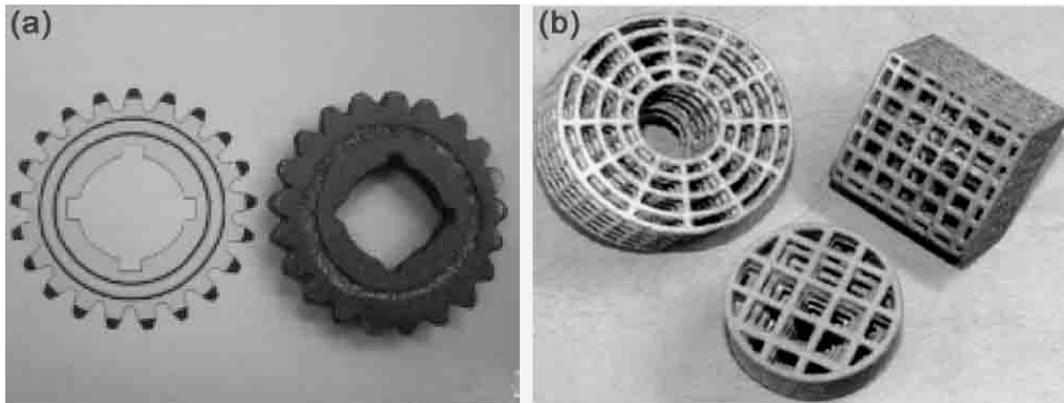


图 5 (a) 齿轮的 CAD 模型^[18]和所打印 Ti_3AlC_2 基复相陶瓷构件; (b) 各种蜂窝状结构的 SiSiC 构件^[25,26]
 Figure 5 (a) CAD model of a gearwheel and the corresponding printed part composed of Ti_3AlC_2 -based ceramics;
 (b) Macrocellular structures composed of SiSiC ^[25,26]

的抗氧化性能、热稳定性和抗热震性能使得 MAX 相陶瓷有望作为高温结构材料使用。相比于传统材料, 轻质多孔点阵材料的特色在于其具有多样的微结构和高孔隙率, 因而具有轻质量、比强度高以及多功能可设计性等优良性能。如图 5 (b) 所示, 采用 3DP 结合 RMI 能够实现各种具有点阵结构的镂空构件的制备, 同时通过对原材料以及后续熔体的调节能够实现微结构的可控设计。因此, 采用 3DP 结合 RMI 技术, 通过多尺度孔隙结构的设计有望制备各种 MAX 基陶瓷轻质构件。

2.2 发热组元

MAX 相陶瓷具有优异的抗热震性能、热稳定性和抗氧化性, 同时其良好的导热和导电性能有助于提高发热效率, 故 MAX 相陶瓷有潜力作为高温发热元件。瑞典 Kanthal 公司 Sundberg 等人^[5,27]制备了 MAX 相发热组元, 如图 6 所示。1350°C 下进行的有效时间为 260 h、共计 8000 次的热循环测试表明, 该发热组元表现出了良好的热稳定性。

基于 Al_2O_3 氧化膜高温下良好的保护作用, Ti_2AlC 和 Ti_3AlC_2 等含有 Al 的 MAX 相陶瓷极作为高温发热组元的应用潜力巨大。实际应用时常需要形式多样的发热组元, 而采用 3DP 结合 RMI 技术能够方便快捷地实现各种形状发热组元的制备, 同时基于 MAX 相良好的可加工性可对其表面进行进一步的加工处理, 有助于发热组元的规模化生产。

2.3 电磁屏蔽材料

随着科技的发展, 传统材料从单一功能逐渐向结构功能一体化方向发展。传统的金属屏蔽材料密度高、抗腐蚀性差; 而后发展的高导电聚合物密度轻且电导率可控, 但聚合物低的力学性能限制了其应用。相比而言, 高导电陶瓷材料的出现有望实现结构承载与电磁屏蔽性能的协同设计。

常见陶瓷材料导电性差, 而 MAX 相陶瓷因其内部金属键的存在使得其像金属一样表现出优异的导电性。研究表明 Ti_3SiC_2 的电导率约为纯金属 Ti 的两倍^[1], 高的电导率有助于增加介

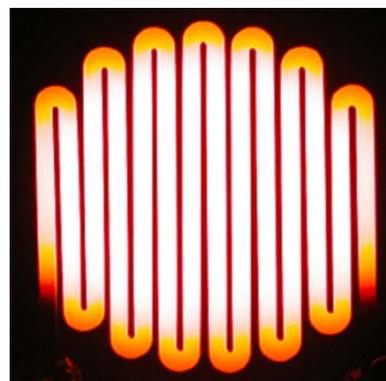


图 6 Kanthal 公司制备的 MAX 相发热组元^[5]
 Figure 6 Heating element composed of MAX phase fabricated by Kanthal ^[5]

电损耗, Ti_3SiC_2 陶瓷常温下在 8.2 GHz ~ 18 GHz 波段内电磁屏蔽能够达到 35 dB ~ 54 dB^[29], Ti_3AlC_2 陶瓷在 X 波段 (8.2 GHz ~ 12.4 GHz) 内从常温到 800°C 的总电磁屏蔽效能均达到 30 dB 以上。由此可见, MAX 相陶瓷无论在常温还是高温下均是良好的电磁屏蔽材料。采用 3DP 结合 RMI 工艺所制备 MAX 基复相陶瓷的电磁屏蔽性能接近 30 dB^[21], 同时所制备的材料具有优异的强韧性, 故通过对其相成分和微结构的优化有望实现 MAX 基复相陶瓷的结构功能一体化设计。

3 展 望

现代技术对于陶瓷材料的要求已经从单一结构承载或单一功能向结构功能一体化方向发展, 人们越来越青睐材料结构与功能的多样性。单一成分的陶瓷材料已经很难满足要求, 常需通过多组分陶瓷的结构设计实现陶瓷材料多种功能的协同。采用 3DP 结合 RMI 技术能够实现混杂 MAX 基复相陶瓷的制备, 通过对其相成分和微结构的设计, 能够为 MAX 基复相陶瓷的结构功能一体化提供新思路, 拓展 MAX 相陶瓷的应用领域。未来, 通过 3DP 技术实现具有三维网络结构的 MAX 相陶瓷材料的制备, 将更加有助于发挥 MAX 相陶瓷在导热、导电方面的优势。

参考文献

- [1] BARSOU M W, EL-RAGHY T. Synthesis and characterization of a remarkable ceramic: Ti_3SiC_2 [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1996, 79: 1953–1956.
- [2] BARSOU M W. The $\text{M}_{N+1}\text{AX}_N$ phases: a new class of solids; Thermodynamically stable nanolaminates [J]. *Progress in Solid State Chemistry*, 2000, 28: 201–281.
- [3] EKLUND P, BECKERS M, JANSSON U, et al. The $\text{M}_{n+1}\text{AX}_n$ phases: materials science and thin-film processing [J]. *Thin Solid Films*, 2010, 518: 1851–1878.
- [4] WANG J, ZHOU Y. Recent progress in theoretical prediction, preparation, and characterization of layered ternary transition-metal carbides [J]. *Annual Review of Materials Research*, 2009, 39: 415–443.
- [5] SUN Z M. Progress in research and development on MAX phases: a family of layered ternary compounds [J]. *Materials Review*, 2011, 56: 143–146.
- [6] GOTO T, HIRAI T. Chemically vapor deposited Ti_3SiC_2 [J]. *Materials Research Bulletin*, 1987, 22: 1195–1201.
- [7] JACQUES S, FAKIH H, VIALA J C. Reactive chemical vapor deposition of Ti_3SiC_2 with and without pressure pulses: effect on the ternary carbide texture [J]. *Thin Solid Films*, 2010, 518: 5071–5077.
- [8] LI S B, XIE J X, ZHANG L T, et al. Mechanical properties and oxidation resistance of $\text{Ti}_3\text{SiC}_2/\text{SiC}$ composite synthesized by in situ displacement reaction of Si and TiC [J]. *Materials Letters*, 2003, 57: 3048–3056.
- [9] GAUTHIER V, COCHEPIN B, SUBOIS S. Self-propagating high-temperature synthesis of Ti_3SiC_2 : study of the reaction mechanisms by time-resolved X-ray diffraction and infrared thermography [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2006, 89: 2899–2907.
- [10] ZHANG Z F, SUN Z M, HASHIMOTO H, et al. Fabrication and microstructure characterization of Ti_3SiC_2 synthesized from Ti/Si/2TiC powders using the pulse discharge sintering (PDS) technique [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2003, 86: 431–436.
- [11] YANG S, SUN Z M, YANG Q, et al. Effect of Al addition on the synthesis of Ti_3SiC_2 bulk material by pulse discharge sintering process [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2007, 27: 4807–4812.
- [12] CARRIJO M M M, CARO L G, LORENZ H, et al. Ti_3SiC_2 -based inks for direct ink-jet printing technology [J]. *Ceramics International*, 2017, 43: 820–824.
- [13] SUN W, DCOSTA D, LIN F, et al. Freeform fabrication of Ti_3SiC_2 powder-based structures: I, integrated fabrication process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 127: 343–351.

- [14] DCOSTA DJ, SUN W, LIN F, et al. Freeform fabrication of Ti_3SiC_2 powder-based structures: II, characterization and microstructure evaluation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 127: 353–360.
- [15] GREIL P. Biomorphous ceramics from lignocellulosics [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2001, 21: 105–118.
- [16] GREIL P. Near net shape manufacturing of ceramic [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 1999, 61: 64–68.
- [17] MOON J, CABALLERO AC. Fabrication of functionally graded reaction infiltrated SiC-Si composite by three-dimensional printing (3DP) process [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 298: 110–119.
- [18] YIN X, TRAVITZKY N, GREIL P. Near-net-shape fabrication of Ti_3AlC_2 -based composites [J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2007, 4: 184–190.
- [19] YIN X, TRAVITZKY N, GREIL P. Three-dimensional printing of nanolaminated Ti_3AlC_2 toughened $TiAl_3-Al_2O_3$ composites [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2007, 90: 2128–2134.
- [20] NAN B, YIN X, ZHANG L, et al. Three-dimensional printing of Ti_3SiC_2 -based ceramics [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2011, 94: 969–972.
- [21] MA Y, YIN X, FAN BX, et al. Near-net-shape fabrication of Ti_3SiC_2 -based ceramics by three-dimensional printing [J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2015, 12: 71–80.
- [22] MA Y, YIN X, FAN X. Fabrication of MAX-phase-based ceramics by three-dimensional printing [J]. *Journal of Ceramic Science & Technology*, 2015, 6: 87–94.
- [23] FAN X, YIN X, WANG L, et al. Synthesis of Ti_3SiC_2 -based materials by reactive melt infiltration [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2014, 45: 1–7.
- [24] YU R, HE L, YE H. Effects of Si and Al on twin boundary energy of TiC [J]. *Acta Materialia*, 2003, 51: 2477–2484.
- [25] TRAVITZKY N, BONET A, DERMEIK B, et al. Additive manufacturing of ceramic-based materials [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2014, 16: 729–754.
- [26] FU Z, SCHLIER L, TRAVITZKY N, et al. Three-dimensional printing of SiSiC lattice truss structures [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2013, 560: 851–856.
- [27] SUNDBERG M, MALMQVIST G, MAGNUSSON A. Alumina forming high temperature silicides and carbides [J]. *Ceramics International*, 2004, 30: 1899–1904.
- [28] SHI S, ZHANG L, LI J. Ti_3SiC_2 material: an application for electromagnetic interference shielding [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93: 172903.
- [29] TAN Y, LUO H, ZHANG H, et al. High-temperature electromagnetic interference shielding of layered Ti_3AlC_2 ceramics [J]. *Scripta Materialia*, 2017, 134: 47–51.

※ ※

Research Progress on MAX-Phase-Based Ceramics Fabricated by Three-Dimensional Printing

FAN Xiao-Meng, YIN Xiao-Wei, MA Yu-Zhao

Science and Technology on Thermostructural Composite Materials Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Abstract: This paper reviews the progress of MAX-phase-based ceramics fabricated by a combined process of three-dimensional printing (3DP) and reactive melt infiltration (RMI). For the preparation of dense MAX-phase-based ceramics, 3DP plays two roles: the first one is to realize the

formation of preforms, the second one is to optimize the microstructure by the design of pore structure and preform composition. The as-prepared preforms have a typical bimodal pore size distribution, which is beneficial for the RMI. The combination of 3DP and RMI can realize the near-net-shape fabrication of dense MAX-phase-based ceramics, and the microstructure, mechanical behavior and electromagnetic shielding properties can be tailored by adjusting the initial raw material in the preform, the melt and the infiltration temperature.

Keywords: MAX phase; Three-dimensional printing; Reactive melt infiltration; Near-net-shape

※ ※



第一作者范晓孟，河南许昌人。2015年毕业于西北工业大学，获得工学博士学位，而后赴德国埃尔朗根-纽伦堡大学进行博士后研究，于2017年应聘为西北工业大学材料

学院副教授。主要研究方向为 MAX 相陶瓷和连续纤维增韧陶瓷基复合材料的近尺寸成型，先后参与了多项国家自然科学基金，在国内外期刊和学术会议上发表学术论文 20 余篇。



通讯作者殷小玮，祖籍山东安丘，生于内蒙古包头，西北工业大学材料学院教授，德国洪堡学者，中国材料研究学会理事，中国复合材料研究学会理事。主要研究方向为结构

功能一体化陶瓷基复合材料。2008 年入选教育部新世纪优秀人才支持计划，2015 年获首届中国复合材料学会青年科学家奖，获教育部自然科学一等奖（排名第一）、军队科技进步一等奖（排名第三）、陕西省科学技术一等奖（排名第四）。发表 SCI 论文 150 篇。SCI 引用 2200 余次，3 篇 ESI 高被引论文；获授权专利 16 项。