

文章编号:1000-582X(2004)11-0151-06

金属基复合材料固/液反应制备技术的研究进展*

汤爱涛,汪凌云,潘复生

(重庆大学材料科学与工程学院,重庆 400030)

摘要:金属基复合材料固/液反应制备技术是最有发展潜力的原位反应合成技术之一,近年来发展迅速。文中对放热弥散复合技术、接触反应涂层制备技术、液相接触反应合成技术、熔体浸渍技术和固/液反应喷射沉积复合技术等几种典型的固/液反应制备技术的研究进展进行了综述,重点总结和分析了放热弥散复合技术、接触反应涂层制备技术和液相接触反应合成技术的研究现状,讨论了各种固/液反应制备技术的工艺特点和存在的问题。

关键词:金属基复合材料;反应合成;固/液反应;原位合成

中图分类号:TB33

文献标识码:A

在复合材料的快速发展中,金属基复合材料(MMCs)因其特有的高强度、高硬度、耐磨及耐高温等优良性能,引起国内外材料科学工作者的普遍关注,现已发展成为先进复合材料的一个重要分支。但工艺复杂、成本昂贵、增强体易偏聚、性能不稳定等问题依然没有很好解决。针对这些情况而发展的金属基复合材料反应合成(Reactive Synthesis)技术在近十多年来有了重要进展。

在复合材料的制备技术中,反应合成技术有时又称原位生成复合法^[1],最早出现于1967年前用SHS法合成TiB₂/Cu功能梯度材料的研究中^[2]。金属基复合材料的反应合成法是指借助化学反应,在一定条件下在基体金属内原位生成一种或几种热力学稳定的增强相的一种复合方法。这种增强相一般为具有高硬度、高弹性模量和高温强度的陶瓷颗粒,即氧化物、碳化物、氮化物、硼化物、甚至硅化物,它们往往与传统的金属材料,如Al、Mg、Ti、Fe、Cu等金属及其合金,或(NiTi)、(AlTi)等金属间化合物复合,从而得到具有优良性能的结构材料或功能材料^[3]。

金属基复合材料的反应合成技术分类较为复杂,从反应原料的状态出发,可按气-液反应,固-液反

应、固-固反应等反应类型进行归类。对以VLS技术为代表的气-液反应合成技术和以SHS技术为代表的固-固反应合成技术,有关文献已进行了较多的分析和讨论,文中着重就近年来发展最快的固-液反应合成技术进行总结、分析和讨论。

1 放热弥散复合技术(XD技术)

放热弥散复合技术(Exothermic Dispersion)的基本原理是将增强相反应物料与金属基粉末按一定的比例均匀混合,冷压或热压成型,制成坯块,以一定的加热速率加热,在一定的温度下(通常是高于基体的熔点而低于增强相的熔点)保温,使增强相各组分之间进行放热化学反应,生成增强相。增强相尺寸细小,呈弥散分布。其工艺关键是控制金属基复合材料中增强相尺寸大小、形状及体积分数等。该技术具有很多优点:1)可合成的增强相种类多,包括硼化物、碳化物、硅化物等;2)增强相粒子的体积百分比可以通过控制增强相组分物料的比例和含量加以控制;3)增强相粒子的大小可以通过调节加热温度加以控制;4)可以制备各种MMC_p和IMC_p;5)由于反应是在熔融状态下进行,可以进一步近终形成型。

* 收稿日期:2004-06-27

基金项目:国家“863”项目(715-009-0170和2003AA33X210);国家自然科学基金项目(59871067);全国高校博士基金(200020611008)

作者简介:汤爱涛(1963-),女,四川渠县人,副教授,重庆大学博士研究生,主要从事复合材料方向研究。

XD 技术自 80 年代初由美国 Brupbacher 等人发明以来,在 $TiAl$ 、 Ti_3Al 、 Al_3Ti 、 Al_2O_3 、 Ti_2SnC 等化合物和新材料的反应合成方面有许多重要进展。已报道的由 XD 工艺生产的 MMC, 种类包括: Al 、 Ti 、 Fe 、 Cu 、 Pb 、 Sn 和 Ni 及金属间化合物 $TiAl$ 、 Ti_3Al 、 Al_3Ti 、 Ti_2SnC 、 $NiAl$ 等, 它们的几何形状以片状、颗粒或晶须状原位形成。文献[4]报道了含有 TiB_2 分散相的 $NiAl$ 材料的研究结果。这种复合材料是用 Ni 、 Al 、 Ti 和 TiB_2 都是剧烈的放热反应, 这个反应能在 Ni 、 Al 比率变化较大范围内进行, TiB_2 的含量也较大。这种复合材料的微观组织是由 TiB_2 、 $(-NiAl)$ 及 Ni_3Al 颗粒组成。张二林等人^[5]对 $Al-Ti-C$ 系中反应合成 Al/TiC 复合材料的机理进行了探讨。研究表明, 该反应机理是一种溶解和析出过程, 其间 Ti 溶解于熔化了了的铝液中并扩散到碳颗粒周围形成富 Ti 层, 富 Ti 层的 Ti 与碳发生反应生成 TiC 并从铝液中析出。反应过程可分为 3 个阶段: 铝粉的熔化, Al_3Ti 相的形成和分解, TiC 颗粒的形成。

程秀兰等人近年来对 $Al-TiO_2$ 反应体系进行了近年来较多的研究^[6-7]。 $Al-TiO_2$ 反应体系作为一合成高性能新材料的新型体系, 得到了中外不少专家的青睐, 但如果 $Al-TiO_2$ 反应完全, 并且铝量足够, 则除了在铝基体中原位生成 $\alpha-Al_2O_3$ 颗粒外, 还有粗大的块状或长条状的 Al_3Ti 相出现, 该相在铝基体中呈明显的各向异性生长, 是一种不利的硬脆相。为此, 在 $Al-TiO_2$ 反应烧结粉末体系中添加一定量的石墨粉, 以期消耗 $Al-TiO_2$ 反应产生的活性 Ti 原子, 一方面避免各向异性的不利硬脆相 Al_3Ti 的出现, 另一方面原位生成另一种增强效果更好的增强颗粒 TiC ($4Al + 3TiO_2 + 3C = 2Al_2O_3 + 3TiC$), 从而获得了综合性能较佳的 Al_2O_3-TiC/Al 原位复合材料。实验结果表明, 1) $Al-TiO_2$ 粉末压坯在 $1200^\circ C$ 高温烧结后, 可以原位形成 $Al_2O_3-Al_3Ti/Al$ 铝基复合材料。 Al_3Ti 呈粗大条状或块状, 由晶界向晶内生长; $\alpha-Al_2O_3$ 颗粒沿晶原位形成。2) $Al-TiO_2-C$ 粉末压坯在 $900^\circ C$ 以下烧结时, 因铝液表面致密 Al_2O_3 薄膜的存在, 反应极其微弱; 而在 $1000^\circ C$ 以上烧结时, 反应明显加剧; 当烧结温度达到 $1200^\circ C$, Al_3Ti 已基本被 TiC 颗粒所取代。3) $Al-TiO_2-C$ 完全反应后可得到 Al_2O_3-TiC/Al 原位复合材料, 其中 $\alpha-Al_2O_3$ 颗粒 ($<1\ \mu m$) 和 TiC 颗粒 ($0.5\sim 2\ \mu m$) 相混杂沿晶网状原位生成, 并且有向铝晶粒内弥散的趋势。机理研究认为: 在 $Al-TiO_2-C$

反应烧结中, 首先 $Al-TiO_2-C$ 粉末体系中 TiO_2 与熔融铝液接触反应, 原位生成 $\alpha-Al_2O_3$ 颗粒和 $[Ti]$ 原子, 而后 $[Ti]$ 再与 C 反应形成 TiC 颗粒。图 1 为 $Al-TiO_2-C$ 反应中 TiC 形成的示意图。有文献已经证实 $TiAl_3$ 和 C 发生反应形成 TiC 是完成可能的。复合材料中较细的 TiC 颗粒是由于在原料配比时严格控制了 $TiC:C=1:1$ (原子百分比)。当反应结束时, 铝液中 Ti 和 C 含量已很低, 不会导致 Ti 和 C 原子向已反应生成的 TiC 颗粒表面有更多的扩散, 所以反应后就获得了微细的 TiC 颗粒。

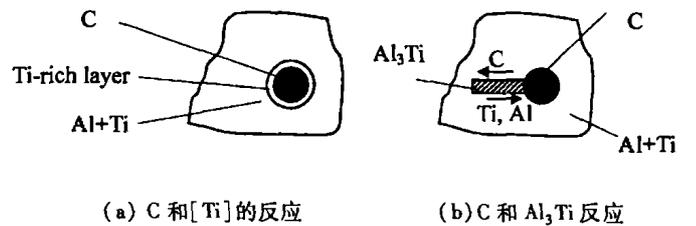


图 1 $Al-TiO_2-C$ 反应中 TiC 形成的示意图

Ti_2SnC 粉末的合成是近年来 XD 技术应用中很有特色的研究工作之一。Dong 等人^[8-9]在 $Ti-Sn-C$ 体系中采用固/液反应发展了一种典型的 Ti_2SnC 粉末合成技术。采用这种技术, Sn 在 $230^\circ C$ 开始熔化后为 $Ti-Sn-C$ 反应体系提供了有利于热传递和化学反应的液相。 Ti 和液相 Sn 反应后形成 $Ti-Sn$ 化合物, 然后 $Ti-Sn$ 化合物再和石墨反应形成 Ti_2SnC 化合物。这种固/液反应的优点在于低的合成温度、短的反应时间和较少的杂质含量。研究表明, Ti_2SnC 化合物在 $1200^\circ C$ 以下的 Ar 气中有好的热稳定性, 但在空气中要发生氧化—分解—再氧化的复杂过程。利用电弧熔化技术应用固/液反应合成工艺制备 $TiAl/Ti_2AlN$ 复合材料是另一有特色的工作。文献[10]报道了最近的研究结果, 所合成的 Ti_2AlN 化合物以短棒状为主, 直径小于 $5\ \mu m$, 分布在层片状晶粒中。 Ti_2AlN 的形成减小了基体的晶粒尺寸。均匀化处理后使层片状晶粒进一步分解为 $TiAl$ 和非常细小的 Ti_2AlN 。性能测试表明, $TiAl/Ti_2AlN$ 复合材料的延性和 $TiAl$ 材料相当, 但抗弯强度明显增加。

XD 工艺已被初步证明是合成颗粒增强金属基及金属间化合物基复合材料的最有效的工艺之一。但用 XD 工艺制成的产品存在着较大孔隙度的问题, 目前一般采用在反应过程中直接压实来提高致密度。

2 接触反应涂层制备技术 (CTCR 技术)

接触反应涂层制备技术 (Coating Technology by

Contact Reaction)有多种类型,包括熔体烧结技术、热压烧结技术、熔体扩散技术、SHS-铸渗法、激光熔覆工艺等^[11-16]。

SHS-铸渗法是将金属基复合材料的自蔓延高温合成技术(SHS技术)(Self-Propagating High Temperature Synthesis)和液态铸造法结合起来的一种新技术,它包括增强颗粒的原位合成和铸造成型 2 个过程。SHS-铸渗法是最有竞争力的反应合成工艺之一,但过程控制依然非常困难。其工艺过程有多样性,典型工艺为:利用合金熔体的高温引燃铸型中的固体 SHS 系,通过控制反应物和生成物的位置,在铸件表面形成复合涂层,它可使 SHS 材料合成与致密化、铸件的成形与表面涂层的制备同时完成。潘复生等人^[11]把自蔓延高温合成技术(SHS技术)和铸渗工艺相结合,制备了颗粒增强的铁基复合材料涂层。在这种工艺中,SHS 过程使基体产生一定数量的增强颗粒,而随后的熔铸过程则利用高温金属液的流动,对 SHS 过程中易产生的孔隙进行充填和焊补,因此,两个过程的综合作用,可获得较为致密的复合材料。研究表明,涂层中陶瓷颗粒在金属体内原位生成,避免了表面污染;金属和陶瓷的比例可以在较大的范围内调整。复合材料中的与基体之间无孔隙和过渡区,界面结合良好。

热压烧结技术是等人^[12]最新开发的一项表面涂层复合技术。将反应预制块放在铸铁表面,然后在 800~1 033 K 温度范围内进行热压,预制块在热压过程中发生反应,形成等化合物。在涂层和基体界面的反应层是和化合物。和热压烧结技术不同,熔体烧结技术是利用熔体对反应预制块进行烧结,实现增强相的反应合成。采用这种技术,文献[13-14]在铁基表面成功地制备了复合材料涂层。激光熔覆工艺目前也在发展和探讨中。马乃恒等人^[6]利用该工艺在铝合金表面反应合成制备了 TiC/Al 复合材料涂层。在这种复合材料涂层中,增强体分布均匀,尺寸大约 800 nm。

熔体扩散技术是重庆大学发展的一种新的复合材料涂层的制备工艺^[16]。该工艺选择 Fe-Ti 合金熔体为浇注液,在常规铸造法进行浇铸的同时,使铸模表面的 C 元素熔入高温合金液体中,与 Ti 元素发生反应,原位形成增强相,从而制备 TiC 增强的 Fe 基复合材料涂层。结果表明,采用坩埚熔炼法时,随着保温时间的延长和基体 Ti 含量的升高,生成的 TiC 颗粒增多,颗粒尺寸增大,涂层厚度增加。而采用常规浇铸法时,基

体 Ti 含量的影响则得到了相反的实验规律,即合金基体中 Ti 含量越高,生成的 TiC 颗粒越少,而且颗粒尺寸也越小。型腔中间插石墨片的方法得到的涂层厚度小于在型腔侧壁预涂石墨粉的方法得到的涂层厚度,前者约为 500 μm ,后者约为 700 μm 。涂层与基体没有明显的界面,结合状态良好。对坩埚熔炼保温工艺,涂层厚度可用动力学方程进行计算,计算结果与实验结果的变化规律相似。

3 液相接触反应合成技术(LCR 技术)

液相接触反应合成技术(Liquid Contact Reaction, 简称 CR)的基本工艺流程为:将基体元素粉末和强化相元素粉末或者将有基体元素和强化相元素的合金粉末按一定比例混合,混合后的粉末冷压成具有一定致密度的预制块,然后将预制块压入处于一定温度的合金液中(有时反应原料也可直接放进合金液中),反应后在合金液中生成尺寸细小的强化相,然后浇注成各种形状的复合材料铸件。常用的元素粉末有钛、碳、硼等,化合物粉末有 Al_2O_3 、 TiO_2 、 B_2O_3 等。该方法可用于制备 Al 基、Mg 基、Cu 基、Ti 基、Fe 基、Ni 基复合材料。强化相可以是硼化物、碳化物、氮化物等。

哈尔滨工业大学从 1992 年起从事接触反应法制备复合材料的研究工作^[17],现已成功制备了 Al-Si/TiC、Al-Cu/TiC 和 Al/TiB₂ 复合材料,其机械性能优异。Asanuma 等^[18]利用钛粉、铝粉直接接触反应制成了 $\text{Al}_3\text{Ti}/\text{Al}$ 复合材料,并发现硬而脆的 Al_3Ti 的形貌随冷却速度和钛的含量而改变。降低冷却速度和钛的含量时,其耐磨性明显提高,甚至强于同体积分数的 SiC_p/Al 复合材料。章德铭等人^[19-20]采用反应铸造法在工业化生产条件下制备了 TiC/Fe 原位复合材料。在保证与反应质量比为 4:1 的基础上,研究了成分和工艺参数对 TiC/Fe 原位复合材料组织和性能的影响。结果表明,反应温度在 1 600~1 700 K 范围内,温度对材料性能的影响波动不大;但保温时间的延长可使反应合成更加充分。惠希东等人^[21]利用固液反应合制备了 TiC 颗粒增强的 TiC/Fe-Cr-Ni 基复合材料。这种复合材料由多面体 TiC 颗粒和基体组成。预制块中 Ti 和 C 的比例和加入时的温度越高,形成 TiC 的可能性越大,TiC 颗粒的尺寸越小,均匀性越好。于化顺等人^[22-23]利用固液反应合成制备了颗粒增强的镁基复合材料。研究证实, SiO_2 、 B_2O_3 、Si 和 ZnO 4 种粉末体系均能与 Mg-Li 合金发生反应,反应产物为 MgO

和 Mg_2Si , 但反应的起始温度并不一样。其中, SiO_2 、 B_2O_3 和 Si 反应温度接近于 $Mg-Li$ 合金的正常熔炼温度, 较适合于复合材料的反应合成。孙建荣等人^[24-25]对 $TiC/3Cr13$ 和 $TiC/H13$ 两种铁基复合材料的反应合成和材料的力学性能进行了研究, 发现该工艺制备的复合材料工艺性能优良, 易于加工成形。小于 8% 颗粒的形成能有效提高材料的常温及高温强度, 但在一定程度上降低了材料的塑性和冲击性能。Cheng 等人^[26]通过反应合成技术控制液相铝和 SiO_2 的反应成功制备了 Al_2O_3/Al 复合材料。反应温度对这种复合材料的组织形态有明显影响。当温度升高时, Al_2O_3 的形状从细等轴状向骨络状转变。

接触反应合成工艺具有成本低、工艺简单、增强体与基体结合好, 增强体大小和数量容易控制等优点, 尤其值得指出的是该法可以通过铸造的方法获得各种形状、尺寸的复合材料铸件, 应用范围较宽, 是一种很有市场和经济竞争能力的方法。

4 熔体浸渍技术(MI 技术)

熔体浸渍 (Melt Infiltration) 是指在高温下金属熔体依靠毛细管力作用向多孔预形体内渗透, 包括非反应的和反应的熔体浸渍两种。非反应的熔体一般对预形体的润湿性不好而难以达到液相烧结的目的, 但也有成功的实例^[27]。反应性的熔体则通常可满足润湿的需要, 且可以节能(比一般烧结温度低), 材料(通常为金属陶瓷)的性能也可调控, 如 B_4C-Al 系统^[28]。Travitzky 等用 Al 、 $Al-Si-Mg$ 合金、 $Ti-Al$ 金属间化合物及 Si 等浸渍反应结合 Si_3N_4 (RBSN), 使材料的力学性能明显提高^[29]。用 Si 熔体浸渍碳预形体制备的 Si/SiC 复合材料是最早利用熔体浸渍技术的成功实例^[30], 若预形体采用 C 纤维, 如纤维束、毡等, 则 Si 用熔体浸渍后生成的 SiC 将保留纤维的形状^[31]。

近十几年来, 熔体浸渍技术有了新的发展, 美国 Lanxide 公司在 DIMOX 技术的基础上, 利用高温下金属 Zr 熔体与 B_4C 预形体之间的定向反应制备出了 $ZrB_2/ZrC/Zr$ 复合材料。复合材料中 ZrB_2 具有板晶形貌^[32], 材料的性能可根据残余金属 Zr 含量来控制, 当 Zr 含量为 3~12 vol% 时, 材料性能为: 弯曲强度 800~900 MPa, 断裂韧性 10~15 $MPa \cdot m^{1/2}$, 杨氏模量 350~400 Gpa, 热膨胀系数 $7(10^{-6}/K)$, 这种复合材料已在工程上得到应用。采用同样的方法也可制备出 $TiB_2/TiC/Ti$ 复合材料^[33]。前不久 Breslin 等^[34]采用 Al 浸

渍 SiO_2 或莫来石的预形体, 制备出了 $Al_2O_3/Al(Si)$ 复合材料, 这种材料中的两相互相穿插、连续, 并被称为 C^4 材料 (Co-Continuous Ceramic Composite), 它具有某些殊的性能。

该技术可以制备各种大小部件, 强化相的体积比可达 60%, 增强相种类有 Al_2O_3 、 AlN 、 ZrN 、 SiC 、 MgO 、 ZrB_2 、 ZrC 、 TiB_2 、 TiC 等第二相, 工艺简单、原料成本低, 可近终成型。

5 固-液反应喷射沉积复合技术(RSD 技术)

反应喷射沉积工艺 (Reactive Spray Deposition) 有气-液反应、液-液反应、固-液反应和加盐反应等多种类型, 是目前金属基复合材料研究的热门课题。它不仅综合了快速凝固及粉末冶金的优点, 而且还克服了喷射共沉积工艺中存在的如颗粒与基体接近机械结合、增强相体积分数不能太高(一般不高于 20% Vf) 等缺点, 因而成为目前金属基复合材料研究的重要方向之一。反应喷射沉积工艺中固-液反应的典型过程为: 金属液被雾化前(如在导液管处)或雾化锥中, 喷入高活性的固体颗粒, 发生液固反应, 导致喷入的颗粒在雾化过程中溶解并与基体中的一种或多种元素反应形成稳定的弥散相, 控制喷雾的冷却速率以及随后坯件的冷却速率可以控制弥散相的尺寸。固-液反应喷射成形技术的优点是: 1) 可近形成型; 2) 可获得大体积分数的增强相粒子; 3) 在液-固模式的反应中有大量的反应热产生, 有利于反应过程的进行并达到节能目的; 4) 不会产生熔铸法中陶瓷相粒子成渣上浮现象。Lawly 等人用 N_2 和 O_2 的混合气体雾化 $Fe-2wt\% Al$ 合金, 得到了含有细小弥散的 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 析出相粒子的沉积坯; 在雾化 $Fe-Ti$ 合金时, 注入 $Fe-C$ 合金粒子, 通过 Ti 和 C 之间的反应, 得到了粒度在 $0.5 \mu m$ 以下的 TiC 和 Fe_2Ti 粒子^[16]。为了有效解决喷射沉积成形金属基复合材料制备过程中增强颗粒分布不均和颗粒利用率较低的问题, 杨滨等人^[35]提出将增强相的生成置于熔化室合金熔体中完成(即先采用液相接触反应合成技术进行反应合成, 而不是在现行通常在雾化室中进行合成), 然后再进行后续的雾化喷射沉积成形步骤, 成功地开发出了一种熔铸-原位反应喷射沉积成形颗粒增强金属基复合材料制备新技术。该技术的突出优点是: 颗粒在熔体内部原位反应生成, 不存在颗粒损失问题, 材料制备成本降低; 颗粒在基体中分布均匀; 可沿用现行喷射沉积成形制

备金属材料的各项工艺参数,设备无需做任何改动。杨滨等已成功制备出 TiC/Al-20Si-5Fe 复合材料。

近年来,原位反应雾化喷射沉积成形技术得到了许多国家的关注。但迄今为止,由于相关的基础性研究工作滞后,工艺上难以获得增强相均匀分布和显微组织一致的沉积坯件,致使原位反应雾化喷射沉积成形技术的实际应用受到限制。这是因为喷射成形过程是一个复杂的工艺过程,众多的工艺参数都影响着沉积坯的组织性能,现有的理论模型并不能精确地控制喷射沉积过程,因此要大力加强对这一技术的基础和模型化研究,预测和掌握各种工艺参数对喷射沉积凝固过程的影响规律,为工艺过程的优化控制提供可靠的理论依据。

6 结束语

在金属基复合材料的反应合成技术中,固/液反应是近几年研究最多的原位复合工艺,也是应用较成功的材料制备工艺,很有发展潜力。文中所总结和讨论的放热弥散复合技术、接触反应涂层制备技术、液相接触反应合成技术、熔体浸渍技术和固/液反应喷射沉积复合技术等五种工艺各有特色,工艺本身也有交叉。经过近几年的努力,固/液反应合成技术已在若干材料体系中较好地解决了增强体分布不均匀、界面质量难以控制等问题。但许多内容目前还有待进一步研究,如工艺的工业化应用能力、显微组织的稳定性、化学反应的控制、大尺寸复合材料部件的制备、增强体的形成机理、界面结构和界面分析等。

参考文献:

[1] 程秀兰,潘复生. 金属复合材料的反应合成技术[J]. 材料导报,1995,(5):61.

[2] SURBRAHMANYAM J, VIJAYAKUMAR M. Self-propagating High-temperature Synthesis [J]. Mater. Sci., 1992, 27: 6 249.

[3] KOCZAK M J, PREMKUMAR M K. Emerging technologies for the in-situ production of MMCs[J]. JOM, 1993, 45(1): 44.

[4] LEE B I, EINARSRUD M A. Low-temperature synthesis of aluminium nitride via liquid-liquid mix carbothermal reduction[J]. Mater. Sci. Lett., 1990, 9: 1389.

[5] 张二林,杨波,曾松岩,等. Ai-Ti-C 系中反应生成 TiC 机理研究[J]. 材料工程, 1998,(2):3-5.

[6] 程秀兰,潘复生,汤爱涛. 高温反应烧结制备原位复合材

料[J]. 中国有色金属学报,1999,9(2):313.

[7] 程秀兰,潘复生,汤爱涛. 原位铝基复合材料重熔稀释的研究[J]. 兵器材料科学与工程,1999,22(3):18.

[8] DONG H Y, YAN C K, CHEN S Q. et al. Solid-Liquid Reaction Synthesis and Thermal Stability of Ti₂SnC Powders [J] Journal of Materials Chemistry, 2001, 11: 1 402 - 1 407.

[9] ZHOU Y C, DONG H Y, WANG X H. Preparation of Ti₂SnC by Solid-Liquid Reaction Synthesis and Simultaneous Densification Method [J]. Mat. Res. Innovat., 2002, 6: 219 - 225.

[10] KAKITSUJI A, MIYAMOTO H, MABUCHI H, et al. Microstructure and Mechanical Properties of TiAl/Ti₂AiN Composites Prepared by Combustion Synthesis [J]. Materials Transaction, 2001, 42(9): 1 897 - 1 900.

[11] 潘复生,张静,陈万志,丁培道. SHS-铸渗法制备铁基复合材料涂层[J]. 材料研究学报, 1997,11(suppl.): 165 - 166.

[12] KIMATA T, UENISHI K, IKENAGA A, et al. Formation of thick Ni-Al composite coating on spheroidal graphite cast iron substrates by reaction synthesis processing [J]. Materials Transactions, 2003, 44(3): 407 - 410.

[13] WANG Y S, ZHANG X Y, ZENG G T, et al. Cast Sinter Technique for Producing Iron Base Surface Composites [J]. Materials and Design, 2000, 21: 447 - 452.

[14] WANG Y S, ZHANG X Y, LI F C, et al. Study on an Fe-TiC Surface Composite Produced in Situ [J]. Materials and Design, 1999, 20: 233 - 236.

[15] 马乃恒,方小汉,梁工英,等. 激光熔覆原位合成 TiC/Al 复合材料[J]. 中国有色金属学报,2000, 10(6):843 - 846.

[16] 鲁云,马鸣图,潘复生. 先进复合材料(书)[M]. 北京:机械工业出版社,2003.

[17] 陈子勇,陈玉勇,安阁英. 金属基复合材料的熔体直接反应合成工艺[J]. 材料导报, 1997, 11(2):62-63.

[18] ASANUMA H, HIROHASHI M, et al. Fabrication of in situ Al₃Ti/Al composite, Advancement in Synthesis and Processes [Proc. conf.], Toronto, Canada, 20 - 22, Oct., 1992, M581 - 7.

[19] 章德铭,李凤珍,刘兆晶,等. TiC/Fe 原位复合材料的制备工艺优化[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2002, 7(4):23 - 26.

[20] 刘兆晶,章德铭,左锋. 熔体覆盖剂对原位 TiC/Fe 复合材料组织和性能的影响[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2002, 7(2):83 - 86.

[21] 惠希东,王执福,孙本茂. 颗粒 TiC 增强铸造 Fe-Cr-Ni

- 基复合材料的制备工艺和显微组织[J]. 铸造, 1996, (11): 4-7.
- [22] 于化顺, 闵光辉, 王大庆. 反应合成法制备 Mg-Li 基复合材料的热力学研究[J]. 稀有金属, 1997, 21(2): 156-159.
- [23] 王辅中, 李荣华. Mg-Li 基复合材料的研究[J]. 稀有金属, 2003, 27(2): 273-277.
- [24] 孙建荣, 孙扬善, 李龙. TiC/3Cr13 复合材料的显微组织和力学性能的研究[J]. 铸造, 2000, 49(7): 392-395.
- [25] 孙建荣, 孙扬善, 樊泉. TiC/H13(4Cr5MoV1Si)复合材料的显微组织和力学性能[J]. 材料科学与工艺, 2001, 9(2): 146-149.
- [26] CHEN X M, WU X W, ZHANG L M, et al. Synthesis of Al₂O₃ Composites by Reaction between SiO₂ and Molten Al [J]. Key Engineering Materials, 2003, 249: 269-272.
- [27] HILLIG W B. Making ceramic composites by melt infiltration[J]. Ceram. Soc. Bull., 1994, 73(4): 56.
- [28] HILLIG W B. Ceramic composites by infiltration[J]. Ceram. Eng. Sci. Proc., 1985, 6: 674.
- [29] TRAVITZKY N A, CLAUSSEN N. Microstructure and properties of metal infiltrated RBSN composites[J]. Eur. Ceram. Soc., 1992, 9: 61.
- [30] WHITEHEAD A J, PAGE T F. Fabrication and characterization of some novel reaction-bonded silicon carbide materials[J]. Mater. Sci., 1992, 27: 839.
- [31] HILLING W B, MEHAN R L, et al. Silicon/silicon carbide composites [J] Am. Ceram. Soc. Bull., 1975, 54(12): 1054.
- [32] BREVAL E, JOHNSON W B. Microstructure of platelet-reinforced ceramics prepared by the directed reaction of zirconium with boron carbide[J]. Am. Ceram. Soc., 1992, 75(8): 2139.
- [33] LEE S K, KIM D H, KIM C H. J. Fabrication of TiB₂/TiC/Ti composite[J]. Mater. Sci., 1994, 29: 4125.
- [34] BRESLIN M C, RINGNALDA J. Alumina/aluminum continuous ceramic composite (C4) materials produced by solid/liquid displacement reactions: Processing kinetics and microstructures[J]. Ceram. Eng. Sci. Proc., 1994, 15(7-8): 104.
- [35] 扬滨, 王锋, 黄赞军, 等. 喷射沉积成形颗粒增强金属基复合材料制备技术的发展[J]. 材料导报, 2001, 15(3): 4-6.

Recent Development of Solid/Liquid Reaction Synthesis Technology for Metal Matrix Composites

TANG Ai-tao, WANG Ling-yun, PAN Fu-sheng

(College of Materials Science & Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The Solid/liquid Reaction Synthesis Technology for Metal Matrix Composites has attracted an increasing interest, and a lot of important progresses have been made in recent years. Five typical processes, exothermic dispersion, coating technology by contact reaction, liquid contact reaction, melt infiltration and reactive spray deposition, have been reviewed. More attention has been paid to recent development of the research work on the exothermic dispersion, coating technology by contact reaction and liquid contact reaction. The characteristics of these processes are analysed, and the existed problems on the reaction synthesis technologies are discussed.

Key words: metal matrix composites; reaction synthesis; solid/liquid reaction; in situ synthesis

(编辑 陈移峰)