SPS 烧结工艺对 TiC/6061Al 复合材料显微结构及力学性能的影响

张 洋[1,2,3], 刘灿森[1], 王 娟[2,3*], 田 卓[2,3], 郑开宏[2,3], 柯志敏[4]

(1. 广东工业大学材料与能源学院, 广东 广州 510006; 2. 广东省科学院新材料研究所, 国家钛及稀有金属粉末冶金工程技术研究中心, 广东省金属强韧化技术与应用重点实验室, 广东 广州 510650; 3. 广东省钢铁基复合材料工程研究中心, 广东 广州 510650; 4. 广东中天创展球铁有限公司, 广东 清远 513000)

摘 要: 采用低速卧式球磨法和放电等离子烧结法(SPS)制备了 2%TiC/6061Al 复合材料, 利用光学显微镜、扫描电镜、显微硬度仪和拉伸试验研究了不同烧结温度和压力对该复合材料致密度、显微结构和力学性能的影响。结果表明, 当烧结温度为 500 ℃ 时, 烧结不充分, 颗粒之间结合不紧密, 导致复合材料致密度过低; 当烧结温度为 550 ℃ 时, 超过了 Al 基体的熔点, 少部分熔融 Al 飞溅并溢出模具, 导致模具内压力不平衡, 从而降低了复合材料致密度。复合材料致密度和力学性能随着烧结压力的增大而增大, 故选取模具所能承受的最大压力作为最佳烧结压力。故当烧结温度为 525 ℃、烧结压力为 40 MPa 时, 该复合材料的致密度、硬度和强度均达到最大值。

关键词: TiC/6061Al 复合材料; 放电等离子烧结; 烧结温度; 烧结压力; 显微组织; 力学性能
中图分类号: TB331,TF823 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004−7638(2023)06−0081−07
DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.06.012 **开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID) :**

听语音 聊科研 与作者互动

Effect of SPS sintering process on microstructure and mechanical properties of TiC / 6061Al composites

Zhang Yang[1,2,3], Liu Cansen[1], Wang Juan[2,3*], Tian Zhuo[2,3], Zheng Kaihong[2,3], Ke Zhimin[4]

(1. School of Material and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China; 2. Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences, National Engineering Research Center of Powder Metallurgy of Titanium & Rare Metals, Guangdong Provincial Key Laboratory of Metal Toughening Technology and Application, Guangzhou 510650, Guangdong, China; 3. Guangdong Provincial Iron Matrix Composite Engineering Research Center, Guangzhou 510650, Guangdong, China; 4. Guangdong Zhongtian Chuangzhan Ductile Iron Co., Ltd., Qingyuan 513000, Guangdong, China)

Abstract: The 2% TiC/6061Al composites were prepared by low-speed horizontal ball milling and spark plasma sintering (SPS). The effects of different sintering temperatures and pressures on the density, microstructure and mechanical properties of the composites were studied by optical microscope, scanning electron microscope, microhardness tester and tensile test. The results show that when the sin-

收稿日期: 2023−09−12
基金项目: 广东省科学院发展专项资金项目(2022GDASZH-2022010103); 清远市科技计划项目 (2023DZX013) ; 广东省科学院杰出科学家项目(2020GDASYL-20200101001)。
作者简介: 张洋, 1998 年出生, 男, 汉族, 湖南常德人, 硕士研究生, 主要从事纳米颗粒增强金属基复合材料的研究, E-mail: 403318522@qq.com; *通讯作者: 王娟, 1981 年出生, 女, 山东烟台人, 博士, 教授级高工, 主要从事金属基复合材料研究, E-mail: sweetanna@foxmail.com。

tering temperature is 500 ℃, the sintering is not sufficient, and the binding between the particles is not close, which leads to low density of the composite material. When the sintering temperature is 550 ℃ which exceeds melting point of Al matrix, a small amount of molten Al splashes and overflows the mold, resulting in unbalanced pressure in the mold, thereby reducing the density of the composite material. The density and mechanical properties of the composites increase with increase of the sintering pressure, so the maximum pressure that the mold can withstand is selected as the optimal sintering pressure. Therefore, when the sintering temperature is 525 ℃ and the sintering pressure is 40 MPa, the density, hardness and strength of the composite material reach the maximum values.

Key words: TiC/6061Al composites, spark plasma sintering, sintering temperatures, pressures, microstructure, mechanical properties

0 引言

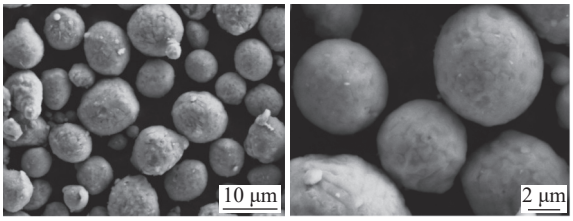
在中国制造 2025 规划的指引下，我国工业正朝着绿色制造方向发展，因此轻质材料的应用就显得尤为重要。铝基复合材料作为一种理想的轻质金属基复合材料，不仅有高的比强度，还有良好的塑性，可靠的耐腐蚀性，较低的维护成本和可循环利用性。在汽车制造、航空航天和船舶等交通运输领域对降低燃料消耗十分关键，因此铝基复合材料成为现代工业的研究热点[1−3]。

颗粒增强金属基复合材料的应用十分广泛[4−6]，TiC 颗粒因具有强度高、耐磨和耐蚀等优良性能而受到广泛关注，在颗粒增强金属基复合材料领域占据重要地位[7−9]。目前绝大多数对 TiC 颗粒增强金属基复合材料的研究都是采用微米级的 TiC 颗粒，Zeng 等[10] 选取了 2 μm 的 TiC 颗粒作为增强相，LY12 作为基体材料，制备方法为原位合成法，将质量分数为 20%，粒径为 2 μmTiC 颗粒增强相均匀地加入 LY12 铝基体材料中，可以明显发现该铝基复合材料晶粒细化，从而判断加入的微米级 TiC 增强相颗粒起到了细化晶粒的作用，分析试验结果可知，TiC 颗粒增强 LY12 铝基复合材料中并没有 Al_4C_3 和 AlTi 等脆性相杂质生成，且屈服强度和抗拉强度均得到了大幅提升，分别从 356 MPa 和 427 MPa 提高到了 463 MPa 和 558 MPa，但是延伸率却没得到有效改善，与基体材料相比，从 9% 下降到了 4.5%。Selcuk 等[11] 选用了 3 μm 的 TiC 作为增强相颗粒，Al-Mg-Si 系中的 6 061 铝作为基体材料，选用中间合金法制备 TiC 颗粒增强铝基复合材料，将体积分数为 10% 的微米级 TiC 颗粒加入 6 061 铝基体后发现，杨氏模量、屈服强度和抗拉强度同样得到了大幅提升，分别从 70 GPa、241 MPa 和 283 MPa 提高到 85 GPa、306 MPa 和 329 MPa，同样延伸率从 8% 下降到了 7%。分析可知，加入微米级 TiC 颗粒可以使晶粒得到良好的细化，增强了材料的屈服强度和抗拉强度等力学性能指标，但塑性却存在一定程度的下降，不利于复合材料后续的加工变形。张清泉等[12] 选用纳米级的 TiC 作为增强相颗粒，纯 Al 作为基体材料，通过中间合金法制备了复合材料，试验证明纳米级的 TiC 颗粒加入到铝基材料中，不仅能细化晶粒，还能将 α-Al 的枝晶结构在一定程度上改变。当纳米 TiC 加入量从 0 到 0.5%时，晶粒细化会越来越明显，含 0.5% 纳米 TiC 铝基复合材料组织中晶粒大部分呈现为细小的等轴晶，同时该复合材料的力学性能达到最佳，屈服强度和抗拉强度均得到大幅度提升，分别从 291 MPa 和 477 MPa 提高到 316 MPa 和 543 MPa，与此同时，延伸率也得到了大幅提升，从 7.6% 上升到了 17.6%，使得复合材料后续的加工变形更易进行。周东帅等[13] 选用纳米级的 TiC 颗粒作为增强相，Al-Cu 系合金作为基体材料，制备方法采用了外加搅拌铸造法，熔体内反应法和中间合金法。同样发现纳米 TiC 颗粒在组织中起到了细化晶粒的作用。确定了在该制备体系下，加入 1.0% 的纳米 TiC 颗粒能使该复合材料的组织与力学性能达到最优。晶粒尺寸明显变小，由原来的 180 μm 下降到 150 μm，抗拉强度跟延伸率均得到了提升，分别从 485 MPa 和 6.6% 提高到 527 MPa 和 14.3%。通过对纳米 TiC 颗粒增强铝基复合材料结果分析可知，随着纳米级 TiC 颗粒的加入，不仅能够使屈服强度、抗拉强度得到大幅提升，而且在合适的颗粒含量下，延伸率也会得到一定程度的提升，这对于后续复合材料的变形加工十分重要。对比微米级和纳米级的 TiC 颗粒增强铝基复合材料，可发现纳米级颗粒在提升复合材料力学性能的同时还能提升材料的延伸率，这是微米级颗粒不能做到的，这对复合材料的性能提升十分重要。

目前颗粒增强铝基复合材料的制备工艺主要有液相法[14−15]、固相法[16−17] 和固液两相法[18] 三种。笔者选用固相法中的放电等离子烧结(SPS)[19−20],相比于传统工艺易造成颗粒分布不均匀、易团簇、易产生孔洞和夹杂, 且制备温度过高、时间长和极易发生界面反应生成亲水脆性相 Al_4C_3 等缺点, SPS 工艺加热均匀, 升温速度快, 烧结温度低, 烧结时间短, 生产效率高, 产生组织细小均匀, 能保持原材料的自然状态, 从而得到高致密度的铝基复合材料。并主要研究了烧结温度及压力对纳米 TiC/6061Al 基复合材料显微组织及力学性能的影响。

1　试验材料与方法

本课题选用的基体材料为 Al-Mg-Si 系合金 6061Al 粉, 其表面形貌如图 1 所示, 表 1 为其具体的合金成分。6061Al 具有良好的变形能力、高耐蚀性、可热处理化、易于加工等优良性能, 因而广泛应用于航空航天、轨道交通以及汽车工业等领域, 其主要性能参数见表 2。



(a) 低倍下 6061Al 形貌　　(b) 高倍下 6061Al 形貌

图 1　6061Al 基体表面的 SEM 形貌

Fig. 1　SEM image of the surface morphology of 6061Al substrate

表 1　6061Al 合金主要元素成分

Table 1　Main chemical composition of 6061Al alloy　　%

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ni	Co
97.85	0.555	0.092	0.247	0.004	1.07	0.112	0.008	0.004	0.002	0.005

表 2　6061Al 的主要性能参数

Table 2　Main performance parameters of 6061Al

密度/ ($g\cdot cm^{-3}$)	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/ %	弹性系数/GPa	抗弯强度/MPa
2.75	124	55.2	25	68.9	228

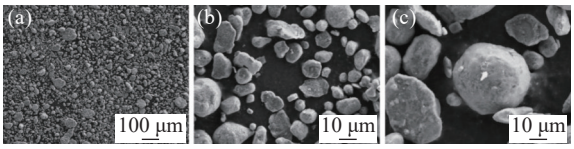
增强体颗粒选用纳米 TiC, 因其与 Al 基体都是面心立方结构。TiC 晶格常数为 0.432 nm, 而 Al 的晶格常数为 0.404 nm, 两者十分接近, 其晶格失配度约为 5.8%。从晶体学角度来说, 这两者之间湿润性较好, 有利于 α-Al 异质形核, 形成良好的界面结合, 除此之外, TiC 颗粒还具有强度高、耐磨和耐腐蚀等优良的性能。表 3 列出了 TiC 的主要性能参数, 其纯度为 99.5%, 粒径为 40 nm。

表 3　TiC 的主要性能参数

Table 3　The main performance parameters of TiC

密度/ ($g\cdot cm^{-3}$)	熔点/ ℃	努氏硬度/ GPa	弹性模量/ GPa	热膨胀系数/ $℃^{-1}$
4.93	3 067	28 ~ 35	440	7.74×10^{-6}

在烧结前将两种粉末球磨均匀, 加入质量分数为 2% 的纳米 TiC 颗粒, 采用低速卧式球磨机球磨 25 h, 球料比为 5∶1, 8 mm 和 3 mm 的 Al_2O_3 球为球磨介质, 转速为 80 r/min。长时间低速卧式球磨使粉末得以充分混合均匀。球磨后粉末形貌如图 2 所示, 然后将混合均匀的粉末通过 SPS 放电等离子烧结设备烧结成Ø40 mm 的 TiC/6061Al 复合材料块体。烧结温度设定为 500、525、550 ℃, 采用两步升温放电等离子烧结法保证烧结温度的稳定, 减弱热冲击导致的裂纹产生, 从而保证材料的结构完整性, 具体为: 以 80 ℃/min 从室温升至 400 ℃, 在 400 ℃ 下保温 3 min, 随后以 25 ℃/min 的速率升高至设定的烧结温度, 并在此温度下保温 20 min 后, 炉内冷却。



(a)×500 倍; (b)×1000 倍; (c)×2000 倍

图 2　低能卧式球磨下粉体混合状态的 SEM 形貌

Fig. 2　SEM image of powder mixing state under low energy horizontal ball milling

在放电等离子烧结过程中, 烧结压力的大小可以在一定程度上调控 TiC 颗粒与 Al 基体之间的距离, 烧结压力的持续增大可以使得纳米 TiC 增强颗粒与 Al 基体之间的接触越来越紧密, 降低材料孔隙率, 提高材料性能, 但受所选用的石墨模具的强度所限(模具所能承受的最大压力值为 40 MPa), 烧结压

力不能一直持续增大，因此本试验在前述烧结温度试验基础上，选取 20、30、40 MPa 三个不同的烧结压力来探究其对复合材料的影响。

采用 X 射线衍射仪（XRD Xpert powder,XRD Smartlab）对低速卧式球磨后的 TiC 颗粒以及 6061 铝合金粉末进行物相分析；用场发射扫描电镜（FEI Nova Nano SEM 430, FEI, Netherlands）对低速卧式球磨前后的 TiC 颗粒以及 6061 铝合金粉末和 2.0%TiC/6061Al 基复合材料的形貌与组织分别进行表征；采用 SUNS UTM5105 型万能试验机进行 2%TiC/6061Al 基复合材料的拉伸及弯曲试验；采用显微维氏硬度计对复合材料进行显微硬度测试。

图 3 为低速卧式球磨后 2%TiC/6061Al 复合粉末的 XRD 谱，由图 3 可知，主要衍射峰所对应的分别是 Al 和 TiC，没有 Al_4C_3 和 Mg_2Si 等脆性相的存在。

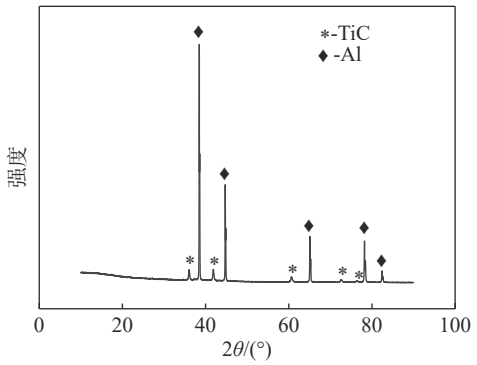


图 3 低速卧式球磨后 2%TiC/6061Al 的 XRD 谱

Fig. 3 XRD patterns of 2% TiC/6061Al after low-speed horizontal ball milling

2 试验结果与分析

2.1 不同烧结温度对 2%TiC/6061Al 复合材料组织及力学性能的影响

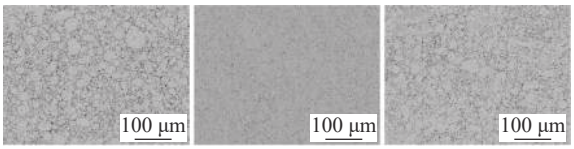
利用阿基米德排水法对不同温度烧结下的 2%TiC/6061Al 复合材料进行致密度表征，如表 4 所示。可以得出，当烧结温度从 500 ℃ 提升到 525 ℃ 时，更接近 Al 基体的熔点，使得 Al 球的塑性变形能力得到较大提高，并且在 30 MPa 外加压力的作用下，Al 球发生塑性变形，与周围的 TiC 颗粒紧密接触，导致与 TiC 之间的空隙大量减少，从而形成致密的复合材料，致密度从 92.4% 提升到 97.8%。当烧结温度继续由 525 ℃ 提升到 550 ℃ 时，此时将超过 Al 基体的熔点范围，并且 Al 基体开始出现大面积熔化，同时在外加压力的作用下，Al 液飞溅并溢出模具腔体，导致模具内压力不平衡，从而使得 Al 基体与纳米 TiC 颗粒之间结合不紧密，导致 TiC/6061Al 复合材料的致密度降低，致密度从 97.8% 下降到 96.1%。

表 4 不同烧结温度下的 2%TiC/6061Al 复合材料的致密度

Table 4 The relative density of 2% TiC/6061Al composites sintered at different temperatures

T/ ℃	理论密度/(g·cm^{-3})	实际密度/(g·cm^{-3})	致密度/%
500	2.793	2.583	92.4
525	2.793	2.732	97.8
550	2.793	2.685	96.1

不同烧结温度下 2%TiC/6061Al 复合材料在 Keller 试剂腐蚀下的 SEM 形貌如图 4 所示。从图 4 可以看出，当烧结温度为 500 ℃ 时，由于没有完全达到 Al 基体的塑性变形温度，Al 球塑性变形不充分，这将导致复合材料颗粒之间存在大量的间隙与孔洞，到烧结温度升高到 525 ℃ 时，Al 基体的塑性变形能力较好，复合材料颗粒之间结合紧密，材料的致密度较高，到烧结温度继续升高到 550 ℃ 时，由于超过了 Al 的熔点会有少量的 Al 液飞溅并溢出模具，导致纳米 TiC 颗粒的相对含量比试验设定颗粒含量有一定程度的提高。同时还由于模具内压力不平衡导致颗粒与基体之间的结合力变差，使得铝基复合材料内部还存在少量小尺寸孔洞。



(a) 500 ℃ (b) 525 ℃ (c) 550 ℃

图 4 不同烧结温度下的 2%TiC/6061Al 复合材料的 SEM 形貌

Fig. 4 SEM images of 2% TiC / 6061Al composites sintered at different temperatures

为了进一步探究烧结温度对复合材料的影响，对不同烧结温度下制备的 2%TiC/6061Al 复合材料进行力学性能测试，结果见表 5。

表 5 不同烧结温度下制备的 2%TiC/6061Al 复合材料的力学性能

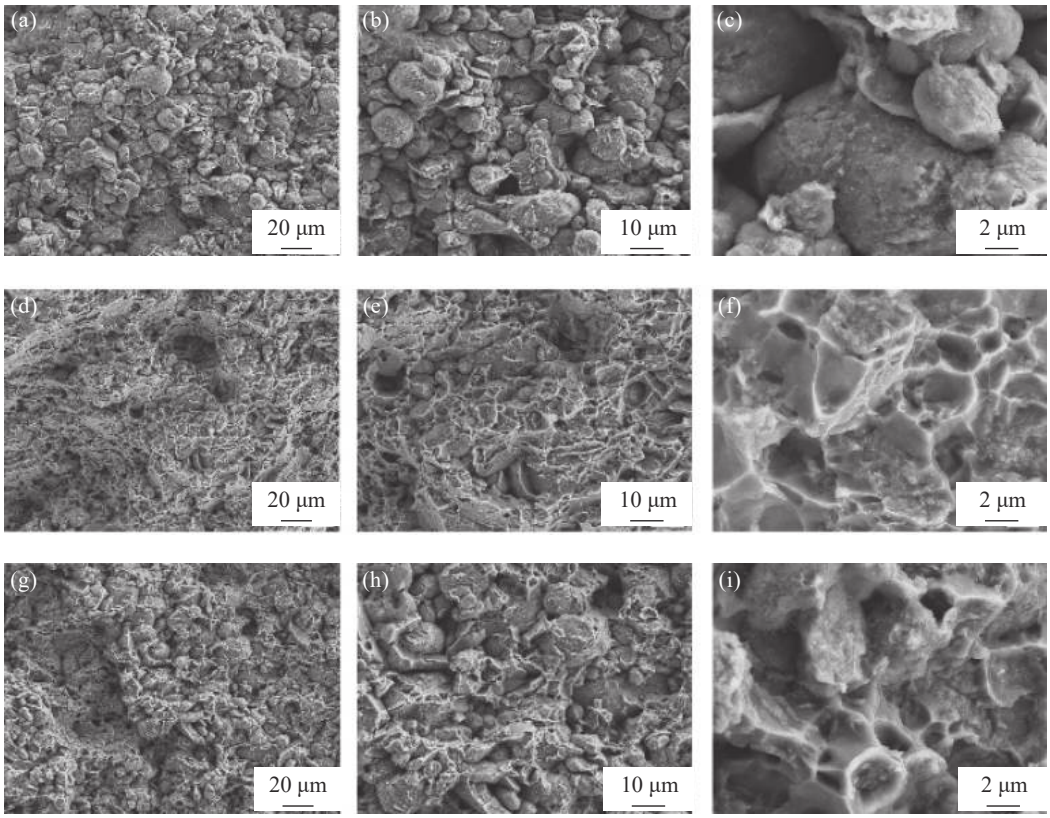
Table 5 Mechanical properties of 2% TiC/6061Al composites sintered at different temperatures

T/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa	延伸率/%	抗弯强度/MPa	硬度（HV）
500	246	204	62	6.4	342	63
525	281	233	78	7.8	401	75
550	263	218	69	6.6	382	66

从表 5 可以看到, 当烧结温度从 500 ℃ 上升至 525 ℃ 时, 复合材料的抗拉强度从 246 MPa 增加至 281 MPa; 屈服强度从 204 MPa 增加至 233 MPa; 弹性模量从 62 GPa 增加至 78 GPa; 延伸率从 6.4% 增加至 7.8%, 各项拉伸指标均出现一定程度的提升。当烧结温度继续升高到 550 ℃ 时, 可以看出其拉伸性能出现明显下降, 抗拉强度下降至 263 MPa; 屈服强度下降至 233 MPa; 弹性模量下降至 69 GPa; 延伸率下降至 6.6%, 对比之前对显微组织和致密度的表征, 出现这种现象的主要原因是温度升高到超过 Al 基体熔点, 导致大面积 Al 基体熔化, 同时由于外加压力的存在, 使得部分的熔融 Al 液飞溅并溢出模具, 造成材料内部出现间隙、孔洞缺陷, 最终导致材料力学性能下降。

复合材料的抗弯强度和显微硬度均随温度的升高呈现出先升高后下降的变化趋势, 并在 525 ℃ 时抗弯强度与显微硬度(HV)达到最大值, 分别为 401 MPa 与 55, 其弯曲性能和显微硬度的变化趋势与拉伸性能基本一致。

图 5 为不同烧结温度下的拉伸断口形貌, 从图 5 可以看出, 500 ℃ 烧结下, 由于烧结不充分, 颗粒之间结合度很差, 颗粒轮廓明显, 拉伸断口处有较多的微裂纹产生; 525 ℃ 烧结下颗粒之间结合度良好, 在断裂过程中会表现出典型的韧性断裂, 因此在断口处会形成大量的撕裂棱和韧窝; 由于在 550 ℃ 烧结时有少量 Al 基体溢出模具, 导致颗粒之间结合度较差, 从图中可看出该拉伸断口处少量韧窝与颗粒交互存在, 并存在部分微裂纹。



(a)、(b)、(c): 500 ℃; (d)、(e)、(f): 525 ℃; (g)、(h)、(i): 550 ℃

图 5　不同烧结温度下 2%TiC/6061Al 复合材料的拉伸断口 SEM 形貌

Fig. 5　SEM images of tensile fracture morphology of 2% TiC/6061Al composites at different sintering temperatures

2.2　不同烧结压力对 2%TiC/6061Al 复合材料组织及力学性能的影响

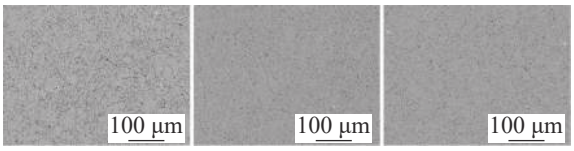
利用阿基米德排水法对不同压力烧结下 2%TiC/6061Al 复合材料进行致密度表征, 结果见表 6。由表 6 可知, 当烧结压力由 20 MPa 上升至 30 MPa 时, 致密度增加 1.7 个百分点, 当烧结压力继续上升至 40 MPa 时, 致密度达到最大值 98.6%。

不同烧结压力下的 2%TiC/6061Al 复合材料在 Keller 试剂腐蚀下的 SEM 形貌如图 6 所示。从图 6 可以看出, 当烧结压力为 20 MPa 时, 复合材料出现

部分孔洞，这主要是由于烧结压力过低导致模具腔体内颗粒无法紧密接触，存在较大孔隙。当烧结压力逐步增加到 30 MPa 和 40 MPa，可以看到复合材料孔洞逐步减少，致密度也逐步提升。

表 6 不同烧结压力下的 2%TiC/6061Al 复合材料的致密度
Table 6 Density of 2% TiC/6061Al composites under different sintering pressures

压力/MPa	理论密度/(g·cm^{-3})	实际密度/(g·cm^{-3})	致密度/%
20	2.793	2.684	96.1
30	2.793	2.732	97.8
40	2.793	2.756	98.6



(a) 20 MPa (b) 30 MPa (c) 40 MPa

图 6 不同烧结压力下 2%TiC/6061Al 复合材料的 SEM 形貌
Fig. 6 SEM images of 2% TiC/6061Al composites under different sintering pressures

为了进一步探究放电等离子烧结(SPS)的最佳烧结压力，分别对不同烧结压力下制备的 2%TiC/6061Al 复合材料进行拉伸、弯曲等力学性能测试，结果见表 7。

表 7 不同烧结压力下制备的 2%TiC/6061Al 复合材料的力学性能
Table 7 Mechanical properties of 2% TiC/6061Al composites sintered at different sintering pressures

压力/MPa	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa	延伸率/%	抗弯强度/MPa	硬度(HV)
20	233	193	60	4.2	337	54
30	251	208	69	6.3	351	69
40	266	220	74	7.6	386	77

从表 7 可以看出，当烧结压力从 20 MPa 上升至 30 MPa 时，其抗拉强度从 233 MPa 增加到 251 MPa；屈服强度从 193 MPa 增加到 208 MPa；弹性模量从 60 GPa 增加到 69 GPa；延伸率从 4.2% 增加到 6.3%。当烧结压力继续上升至 40 MPa 时，其抗拉强度继续增加到 266 MPa，屈服强度增加到 220 MPa；弹性模量增加到 74 GPa；延伸率增加到 7.6%。

当烧结压力由 20 MPa 上升至 30 MPa 时，其抗弯强度由 337 MPa 增加到 351 MPa，显微硬度(HV)由 54 增加到 69；当烧结压力继续上升至 40 MPa 时，其抗弯强度与显微硬度均达到最大值，分别为 386 MPa 和 77，其变化趋势与拉伸性能基本一致。

3 总结与展望

1)烧结温度对 2%TiC/6061Al 复合材料致密度以及力学性能影响较大，随着烧结温度的增加，致密度、硬度、拉伸及弯曲性能均呈现先上升后下降的趋势，且在 525 ℃ 时达到性能的最优值，到烧结温度为 500 ℃ 时，烧结不充分，颗粒之间结合性很差，2%TiC/6061Al 复合材料内部存在很多孔洞及缺陷，导致复合材料性能不佳。当烧结温度为 550 ℃ 时，会出现少部分熔融 Al 飞溅并溢出模具的现象，导致 2%TiC/6061Al 复合材料内部出现明显的缺陷，性能相较于 525 ℃ 时出现明显下降。

2)烧结压力也对 2%TiC/6061Al 复合材料的致密度以及力学性能有一定程度的影响，随着烧结压力的上升，2%TiC/6061Al 复合材料的致密度、硬度、拉伸及弯曲性能都有一定程度的提高。在石墨模具所能承受的最大压力值 40 MPa 下，该复合材料的性能表现最优。当烧结压力为 20 MPa 时，其致密度为 96.1%，此时 2%TiC/6061Al 复合材料内部颗粒之间结合不紧密，且存在较多的小尺寸孔洞及缺陷，从而导致该复合材料力学性能表现不佳。

3)最终确定最优的 SPS 烧结工艺参数为：烧结温度为 525 ℃，烧结压力为 40 MPa。此时，2%TiC/6061Al 复合材料的致密度、硬度(HV)、抗拉强度及抗弯强度均达到最佳，分别为 98.6%、77、281 MPa 和 401 MPa。

4)在添加 2%TiC 后，复合材料性能提升没达到预期，推测原因是纳米 TiC 颗粒加入量过多，下一步工作将在此工艺条件下进一步探索最合适的颗粒含量。最终将复合材料运用到汽车零部件生产等行业中。

参考文献

[1] Liu Zhenshan, Li Yingdong, Zhao Jingwei, *et al*. Research on aluminum alloy materials and application technology for

automobile lightweight[J]. Progress of Materials in China, 2022, 41: 786−795.
(刘贞山, 李英东, 赵经纬, 等. 汽车轻量化用铝合金材料及应用技术的研究[J]. 中国材料进展, 2022, 41: 786−795.)

[2] Kaushal G, Bharti P K, Anas M. Mechanical and tribological behavior analysis of metal powder reinforced filled 7075 aluminum alloy composites for gear material application[J]. JETIR, 2021, 8(9): 756−760.

[3] Patel M, Mulgaonkar S, Desai H, *et al*. Development and implementation of wire arc additive manufacturing (WAAM) based on pulse spray GMAW for aluminum alloy (AlSi7Mg)[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2021, 74(5): 1129−1140.

[4] Sakthi Sadhasivam R M, Ramanathan K, Bhuvaneswari B V, *et al*. A study on tribological behaviour and analysis of ZnO reinforced AA6061 matrix composites fabricated by stir casting route[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2021, 73(4): 642−651.

[5] Bhoi N K, Singh H, Pratap S, *et al*. Developments in the aluminum metal matrix composites reinforced by micro/nano particles – A review[J]. Journal of Composite Materials, 2020, 54(6): 813−833.

[6] Zhou N, Yang S, Liu Y, *et al*. Performance evaluation on particle-reinforced rigid/flexible composites via fused deposition modeling 3D printing[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139(19/20): 52149.

[7] Xu Shenghang, Qiu Jingwen, Zhang Huibin, *et al*. Friction behavior of TiC particle reinforced Ti-30Fe composites[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals (English), 2021, 31: 988−998.
(徐圣航, 邱敬文, 张惠斌, 等. TiC颗粒强化Ti-30Fe复合材料的摩擦行为[J]. 中国有色金属学报(英文版), 2021, 31: 988−998.)

[8] Zhai W, Zhou W, Nai S M L. In-situ formation of TiC nanoparticles in selective laser melting of 316L with addition of micronsized TiC particles[J]. Materials Science and Engineering:A, 2022, 829: 142179.

[9] Bagheri G A. The effect of reinforcement percentages on properties of copper matrix composites reinforced with TiC particles[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 676: 120−126.

[10] Zeng X W, Zhang W G, Wei N, *et al*. Preparation of in situ TiCp/Ly12 composite and its microstructure and mechanical properties[J]. Materials Science & Engineering A, 2007, 443: 224−228.

[11] Selcuk C, Kennedy A R. Al–TiC composite made by the addition of master alloys pellets synthesised from reacted elemental powders[J]. Materials Letters, 2006, 60: 3364−3366.

[12] Zhang Qingquan. Microstructure evolution and strength-toughness of Al-Cu alloy inoculated with nano-TiC particles [D]. Changchun : Jilin University, 2018.
(张清泉. 纳米TiC颗粒孕育Al-Cu合金的组织演变及强韧性[D]. 长春: 吉林大学, 2018.)

[13] Zhou Dongshuai. Preparation, microstructure and mechanical properties of nano-TiC_p / Al-Cu composites [D]. Changchun : Jilin University, 2014.
(周东帅. 纳米TiC_p/Al-Cu复合材料制备和组织与力学性能的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.)

[14] Yu W, Wang Y, Li Y, *et al*. Texture evolution, segregation behavior, and mechanical properties of 2060Al-Li (aluminium-lithium) composites reinforced by TiC (titanium carbide) nanoparticles[J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 255: 110611.

[15] Wu Y, Luo S, Wu J B, *et al*. Development and characterization of CrCoNi medium entropy alloy particles reinforced aluminum matrix composite[J]. Crystals, 2022, 12: 1452.

[16] Zhang J, Liu Q, Yang S, *et al*. Microstructural evolution of hybrid aluminum matrix composites reinforced with SiC nanoparticles and graphene/graphite prepared by powder metallurgy[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2020, 30: 192−199.

[17] Shi Q, Mertens R, Dadbakhsh S, *et al*. In-situ formation of particle reinforced aluminium matrix composites by laser powder bed fusion of Fe_2O_3/AlSi12 powder mixture using laser melting/remelting strategy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 299: 117357.

[18] Zhang Xuezheng. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of powder thixoformed SiCp / 6061Al matrix composites and its strengthening and toughening mechanism [J]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.
(张学拯. 热处理对粉末触变成形SiCp/6061Al基复合材料组织和力学性能的影响及其强韧化机理研究[J]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.)

[19] Cohen S, Ratzker B, Kalabukhov S, *et al*. Diffusion bonding of transparent ceramics by spark plasma sintering (SPS) complemented by hot isostatic pressing (HIP)[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2023, 43: 6628−6633.

[20] Imran M, Deillon L, Sizova I, *et al*. Process optimization and study of the co-sintering behaviour of Cu-Ni multi-material 3D structures fabricated by spark plasma sintering (SPS)[J]. Materials & Design, 2022, 223: 111210.

编辑　杨冬梅