DOI：10.16410/j.issn1000-8365.2023.3213

挤压铸造(SiC_w+CNTs)/2024Al 复合材料高温摩擦磨损性能

张佳佳，张纪东，闫瑞芳，钱明芳，张学习，耿　林
(哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院，黑龙江 哈尔滨 150000)

摘　要：铝基复合材料因具有低密度、高硬度、高强度以及耐磨损等特点，是制备轻量化制动零部件的理想材料。本研究采用挤压铸造法和热挤压工艺制备了具有优异耐磨性的(SiC_w+CNTs)/2024Al 复合材料。利用干滑动摩擦磨损实验研究了复合材料在高温条件(200 ℃)不同载荷(5~20 N)下的耐磨性。研究表明，相较于 2024Al，复合材料在高温低载荷条件下具有高且稳定的摩擦系数以及低的磨损率，而在高载荷条件下，其摩擦系数显著降低且出现明显的波动。通过增加载荷使得 SiC_w 和 CNTs 被拔出，CNTs 自润滑能力及硬质 SiC_w 的表面强化作用得到充分发挥，大幅度降低了材料的摩擦系数。高温下 2024Al 被软化，发生粘着磨损，而复合材料中混杂增强体的存在有效提高了材料的高温耐磨性。

关键词：挤压铸造；混杂增强；(SiC_w+CNTs)/2024Al 复合材料；高温摩擦磨损

中图分类号：TG146.2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-8365(2023)08-0728-09

High Temperature Friction and Wear Properties of Squeeze Cast (SiC_w+CNTs)/2024Al Composites

ZHANG Jiajia, ZHANG Jidong, YAN Ruifang, QIAN Mingfang, ZHANG Xuexi, GENG Lin
(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, China)

Abstract: Aluminum matrix composites are ideal materials for lightweight brake components due to their low density, high hardness, high strength and wear resistance. In this study, (SiC_w+CNTs)/2024Al composites with excellent wear resistance were prepared by squeeze casting and hot extrusion. The wear resistance of the composites was investigated under different loads (5~20 N) at high temperature (200 ℃) using dry sliding friction and wear experiments. The results show that compared with 2024Al, the composites have a high and stable friction coefficient and low wear rate at low loads and high temperatures, while the friction coefficient of composites decreases significantly and fluctuates at high loads. With increasing load, SiC_w and CNTs are extracted, fully utilizing the self-lubricating ability of CNTs and the surface strengthening effect of hard SiC_w, which significantly reduce the friction coefficient of 2024Al. Additionally, 2024Al is softened at high temperatures and adhesive wear occurres, while the presence of reinforcements in the composites effectively improves the high-temperature wear resistance.

Key words: squeeze casting; hybrid reinforcement; (SiC_w+CNTs)/2024Al composites; high temperature friction and wear

铝基复合材料因其高强度、高比模量及良好的摩擦磨损性能而被广泛应用于航空航天、汽车等领域，其中较为典型的是在汽车零部件制作中的应用，包括发动机活塞、气缸和制动系统等[1-4]。因此，研究其摩擦学性能具有重要意义。

当铝基复合材料需要进行滑动接触时，尤其是在极端环境下，自润滑性能就变得至关重要[5]。因此，人们致力于利用不同的增强相，以调整铝基复合材料的摩擦学性能。一些固体润滑材料已表现出良好的性能，包括传统的石墨、一维碳纳米管(CNTs)和新兴的二维材料(MoS_2、BN、石墨烯纳米片(GNS))。例如，在 Al7075 合金中加入 5%(质量分数)的石墨

收稿日期：2023-08-16
基金项目：国家自然科学基金(52192593)
作者简介：张佳佳，1997 年生，博士生. 研究方向为铝基复合材料研究. Email: 22B909046@stu.hit.edu.cn
通讯作者：张学习，1975 年生，博士，教授. 研究方向为先进金属基复合材料强韧化研究. Email: xxzhang@hit.edu.cn
引用格式：张佳佳，张纪东，闫瑞芳，等. 挤压铸造(SiC_w+CNTs)/2024Al 复合材料高温摩擦磨损性能[J]. 2023, 44(8): 728-736.
ZHANG J J, ZHANG J D, YAN R F, et al. High temperature friction and wear properties of squeeze cast (SiC_w+CNTs)/2024Al composites[J]. 2023, 44(8): 728-736.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

后，摩擦力降低了50%，研究表明摩擦力的降低是通过富含石墨的三膜形成的自润滑机制实现[6]。然而，引入高含量的石墨会导致复合材料机械性能下降，进而造成更多的磨损。类似地，CNTs也能形成自润滑碳膜，提高摩擦学性能。研究表明，CNTs存在一个临界浓度，超过这一阈值，CNTs会发生明显团聚[7]。团聚的CNTs不仅不会起到强化作用，反而会显著恶化复合材料的力学性能，尤其是摩擦磨损性能[5,8]。Wozniak等[9]研究了几种二维纳米增强相的效果，观察到它们在降低摩擦系数方面的优势主要取决于二维增强相的均匀分散。

晶须增强铝基复合材料为铝基复合材料应用中的重要分支，常用晶须包括碳化硅(SiC)、氮化硅(Si_3N_4)、碳化硼(B_4C)等[10-11]。硬质晶须作为复合材料表面突出的、硬而脆的凸起与接触面相互作用，在初始磨合期间为复合材料提供了更高的强度[12]。但是，由于材料强度的提高会引起凸起增强相的微变形，从而导致表面磨损，最终材料摩擦系统的耐磨性也会因磨损的增加而降低[13]。然而，硬质晶须的存在对保持复合材料的强度和刚度必不可少，如何保持硬质陶瓷晶须的积极影响十分必要[14]。有研究表明，在(SiC+Gr)/Al复合材料滑动磨损过程中，位于摩擦界面处的石墨(Gr)颗粒有效降低了摩擦系数及摩擦过程中产生的热量。由于碳的加入，在表面形成固体润滑膜，提高了碳基混杂复合材料的耐磨性。这种薄膜减少了复合材料和表面材料之间的摩擦力[15]。

硬陶瓷相和软固体润滑相的混杂增强相，代表了摩擦学材料设计中两种理念的融合，即软相润滑和硬相增强，通常包括SiC-石墨[16-18]、SiC-CNTs[19-21]、Al_2O_3-石墨[22-23]、SiC-GNS[24-26]和B_4C-石墨[27]。通过将硬质陶瓷相的增强作用及柔性碳相的润滑作用相结合，实现复合材料耐磨性能的有效提高。本研究以2024Al为基体，利用挤压铸造制备了致密的(SiC_w+CNTs)/2024Al复合材料。对比了(SiC_w+CNTs)/2024Al复合材料与2024Al在高温下的耐磨性，并分析了混杂增强(SiC_w+CNTs)/2024Al复合材料的高温磨损机制。

1　实验材料及方法

1.1　实验材料

采用的基体合金为2024Al合金。增强相选用β-SiC晶须(SiC_w)和多壁碳纳米管(CNTs)。其中SiC_w平均直径为800 nm，长度为10~28 μm；CNTs的管径为60~100 nm，长度为0.7~300.0 μm。利用挤压铸造技术制备30%(SiC_w+CNTs)/2024Al(体积分数)复合材料，其中增强体的体积比为CNTs:SiC_w=1:1。

1.2　预制体制备

(SiC_w+CNTs)预制体制备流程如图1所示。首先对SiC_w和CNTs进行酸洗预处理，称取设定体积分数所需的SiC_w、CNTs，分别利用HF酸和混酸(体积比为3:1的浓硫酸和浓硝酸)进行浸泡后用蒸馏水反复洗涤至中性得到SiC_w及CNTs水溶液，期间伴有超声振动和机械搅拌。如图2(a~b)所示，可观察到分散良好的SiC_w及CNTs。随后将CNTs、SiC_w及硅胶溶液混合，机械搅拌至黏稠状，倒入预制体模具中渗掉多余的水分，进行压力成型，保压3 h后退模，得到圆柱形预制体(图2c)。对预制体烘干后真空烧结，在800 ℃下烧结3 h以提高预制体强度。如图2(d)所示，在预制体中CNTs及SiC_w均匀分散，大部分

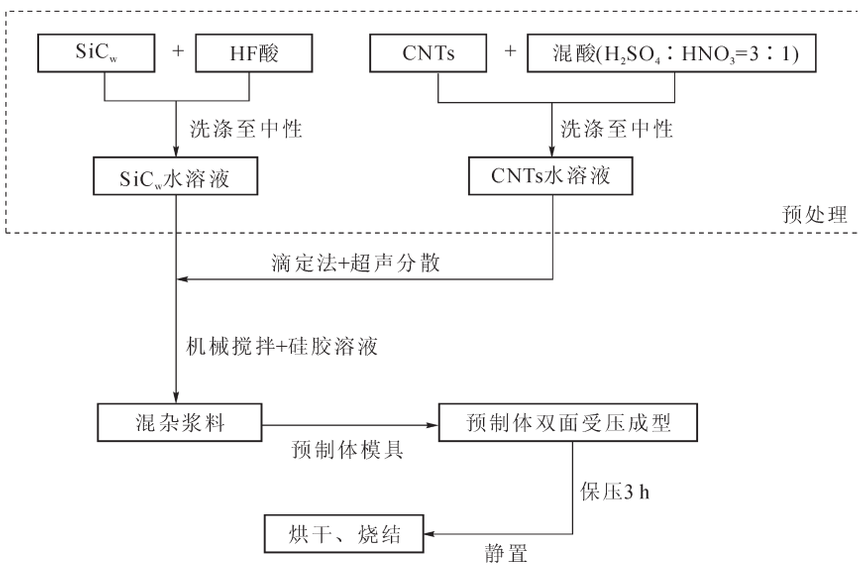


图1　(SiC_w+CNTs)预制体制备流程图

Fig.1　Preparation flow chart of the (SiC_w+CNTs) preforms

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

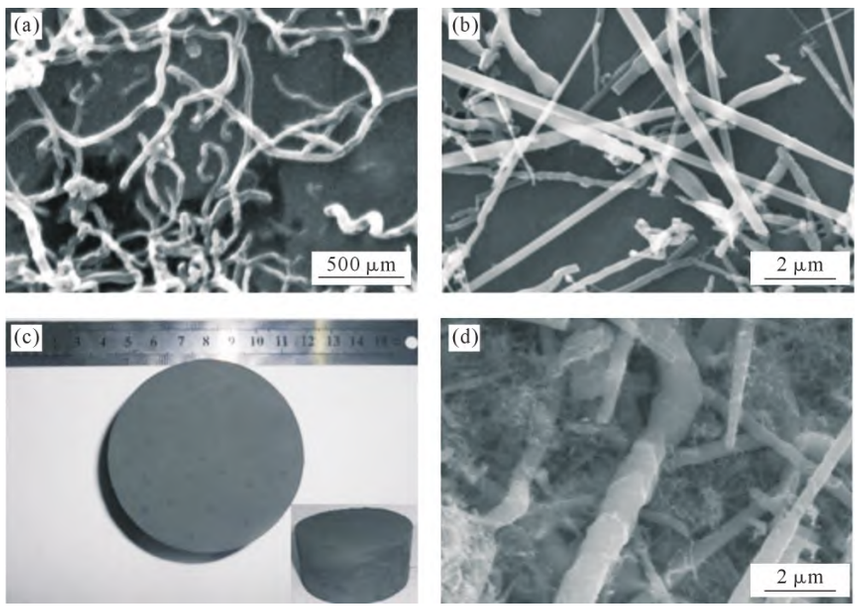


图 2 预处理后增强体及(SiC$_w$+CNTs)预制体形貌:(a) CNTs, (b) SiC$_w$, (c) 预制体, (d) 预制体组织

Fig.2 Morphology of the pretreated reinforcements and preforms: (a) CNTs, (b) SiC$_w$, (c) (SiC$_w$+CNTs) preforms, (d) microstructure of the (SiC$_w$+CNTs) preforms

CNTs 缠绕于 SiC$_w$ 表面。

1.2.1 挤压铸造

将烧结后的(SiC$_w$+CNTs)预制体置于底部带有气孔的石墨垫片中间，然后将其置于 H13 钢模具中，使其紧密配合，对预制体和模具在 550 ℃下进行预热。利用熔炼炉将 2024Al 锭熔化加热至 820 ℃，随后将熔融铝液倒入模具中，利用液压机加载至 50 MPa 直至铝液完全凝固，最终得到直径为 ϕ40 mm 的圆柱形复合材料坯料。

1.2.2 热挤压成型

铝基体中加入陶瓷类增强相使得复合材料的塑性降低，缺陷增多，通常需要热变形作为变形工序来提高材料致密度及组织均匀性。本研究采用热挤压变形工艺，挤压比为 16:1，挤压温度为 480 ℃，将复合坯料置于挤压模具中，在 480 ℃预热 1 h 后进行热挤压成型。

1.2.3 组织表征及性能分析

使用 Olympus PMG3 型光学显微镜对复合材料的微观组织形貌进行观察。用场发射扫描电子显微镜观察处理后的 SiC$_w$ 和 CNTs、(SiC$_w$+CNTs)预制体及(SiC$_w$+CNTs)/2024Al 复合材料磨损后的微观形貌。利用 HT-1000 型高温摩擦磨损试验机对复合材料耐磨性进行表征，实验温度为 200 ℃，摩擦速度为 0.126 m/s，摩擦副采用球/平面接触方式，磨球选用 GCr15(HRC56)，直径为 7.1 mm，采用表面粗糙仪来测定磨痕的深度和宽度来计算体积磨损率。

2 实验结果与分析

2.1 临界浸渗压力计算

挤压铸造过程中液态金属渗入预制体的条件是预制体的抗压强度大于其临界渗入压力。液态铝合金无法润湿(SiC$_w$+CNTs)预制体，此时需要施加外加压力才能促使液态铝合金浸渗到预制体的孔隙中。为了确保挤压浸渗的顺利进行，对临界浸渗压力进行了计算[28]，通过下式计算获得：

$$P^*=4\pi\gamma\sqrt{\frac{V_f}{1-V_f}}\frac{1}{\sqrt{[0.07999(AM+39.28A^2)+9.21\pi A^2]}} \quad (1)$$

式中，P^* 为临界浸渗压力，MPa；γ 为液态铝合金在增强体表面张力，N/m；V_f 为增强体体积分数，%；A 为增强体平均直径，μm；M 为增强体平均长度，μm。

对碳化硅晶须，取 A=0.8 μm，M=20 μm，γ=0.8 N/m 时，式(1)表示为：

$$P^*=0.45\sqrt{\frac{V_f}{1-V_f}} \quad (2)$$

对碳纳米管，取 A=80 nm，M=150 μm，γ=0.8 N/m 时，式(1)表示为：

$$P^*=8.0\sqrt{\frac{V_f}{1-V_f}} \quad (3)$$

采用式(2~3)分别计算 SiC$_w$ 与 CNTs 预制体临界浸渗压力。SiC$_w$ 尺寸远大于 CNTs，因此 SiC$_w$ 临界浸渗压力远小于 CNTs。根据上述理论计算，当体积分数为 30%时，CNTs 预制体的临界浸渗压力约为 5.7 MPa，而 SiC$_w$ 预制体的临界浸渗压力仅为 0.3 MPa

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

左右。所以从理论计算可知，二者的混合更有利于浸渗。进一步证明，纳米相中混杂晶须更有利于浸渗。

2.2　复合材料微观组织

图 3 为平行及垂直于加工方向铸态及挤压态(SiC_w+CNTs)/2024Al 复合材料的金相组织形貌。经挤压铸造后，复合材料致密度达 99.5%以上，如图 3(a)所示，沿挤压铸造方向复合材料浸渗良好，未发现明显孔洞存在，可观察到部分深色铝带区，在垂直于挤压铸造方向组织中(图 3b)也可观察到白色铝带区。少量白色条状物的存在也是不可避免的，这是由于挤压铸造时预制体中大的孔隙将产生富铝区所致[29]。通过热挤压对复合材料进行致密化，相比铸态复合材料，挤压态复合材料(图 3c~d)中组织均匀致密，夹铝带区得到明显细化及消除，经测量，其致密度达到 99.9%以上，热挤压变形对复合材料起到了有效的闭合孔洞、消除缺陷的作用。

为了对铝基体内 CNTs 和 SiC_w 分布进行清晰观察，利用氢氟酸 HF 对挤压态复合材料进行腐蚀。如图 4(b)所示，在铸态复合材料中 CNTs 和 SiC_w 较为均匀分布，CNTs 呈团絮状分布在 SiC_w 之间，但是

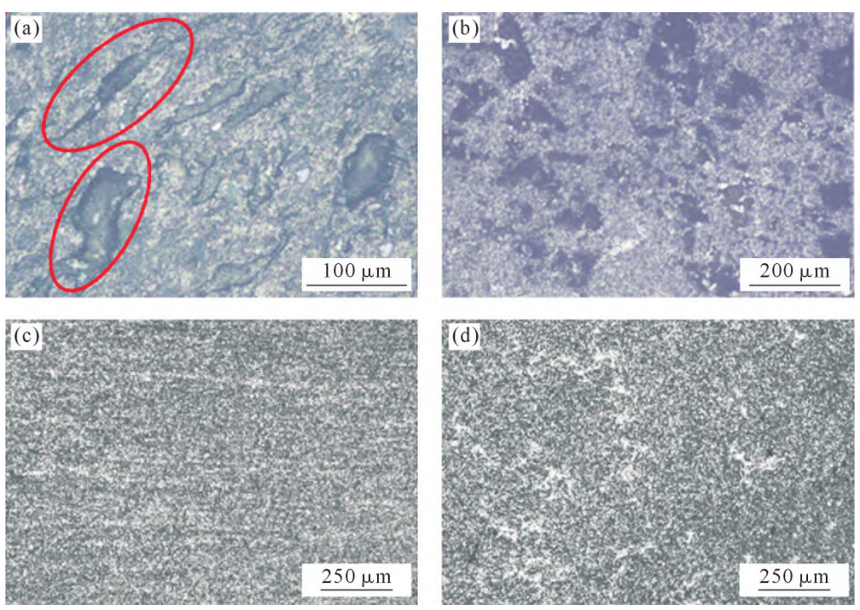


图 3　不同方向下铸态及挤压态(SiC_w+CNTs)/2024Al 复合材料组织 OM 形貌：(a~b) 平行及垂直于挤压铸造方向铸态形貌，(c~d) 平行及垂直于热挤压方向挤压态形貌

Fig.3　OM images of as-cast and as-extruded composites in different directions: (a~b) casting morphology parallel and perpendicular to the extrusion casting direction, (c~d) extruded morphology parallel and perpendicular to the hot extrusion direction

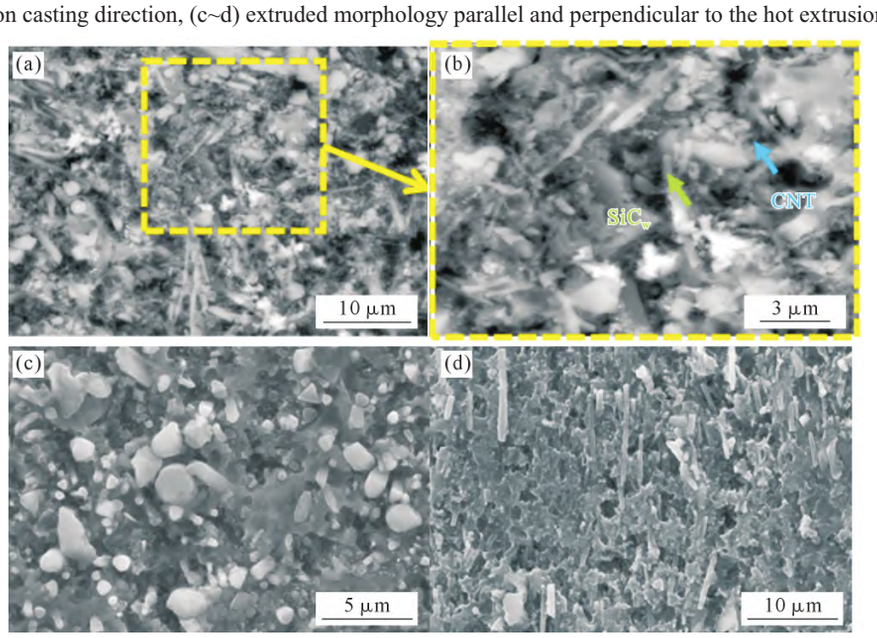


图 4　铸态及热挤压态(SiC_w+CNTs)/2024Al 复合材料经腐蚀后组织形貌：(a~b) 铸态组织，(c) 挤压态横截面组织，(d) 挤压态纵截面组织

Fig.4　SEM images of as-cast and as-extruded (SiC_w+CNTs) /2024A1 composites after corrosion: (a~b) as-cast structure, (c) cross-section of the as-extruded structure, (d) longitudinal section of the as-extruded structure

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

也可以看到部分碳纳米管富集区，这可能是由于纳米级的 CNTs 表面能量很高，容易团聚所致，SiC_w 的存在对 CNTs 起到了一定的团聚阻碍作用。经热挤压后复合材料中 CNTs 和 SiC_w 分布明显改变，从复合材料横截面(图 4c)中可以看出，两种增强相弥散分布于横截面上；通过复合材料纵截面(图 4d)可以看出，晶须被折断的比率较小，大部分可保持较长的长度。复合材料在热挤压变形时避免晶须被大量折断，使得复合材料中增强体分布更均匀，并沿流变方向分布，CNTs 作为塑性增强体呈线状分布，而 SiC_w 作为脆性增强体呈链状分布，使得复合材料的力学性能呈现各向异性，沿流变方向比垂直于流变方向具有更高的力学性能[12,18]。

2.3 复合材料高温摩擦磨损性能

图 5 为在 25、200 ℃下施加不同载荷时热挤压态 2024Al 及 (SiC_w+CNTs)/2024Al 复合材料的摩擦系数变化曲线。在 25 ℃及 200 ℃下 2024Al 及复合材料摩擦系数随载荷的增加均呈现下降的趋势。在较低载荷下，摩擦副上一部分小尺寸磨屑无法及时排出，残留在摩擦表面，造成材料表面的进一步磨损，同时存在部分大尺寸磨屑被摩擦副反复碾压，黏附在铝基体上产生粘着磨损，然而随着摩擦载荷的提高，摩擦方向上基体表面碾压作用增强，界面平整度提高[30]。由图 5(a~b)对比可看出在室温环境中复合材料摩擦系数高于 2024Al，这是由于加入增强相后复合材料耐磨性较铝基体得到提高。如图 5(b)所示，随着载荷的提高，复合材料摩擦系数曲线更为平稳，说明复合材料在高载荷下摩擦特性更为稳定。

与室温下复合材料摩擦系数相比，如图 5(d)所示，在低载荷(5、10 N)下，复合材料在高温(200 ℃)下摩擦系数明显提高，这可能归因于高温下铝基体软化，材料表面硬质 SiC_w 暴露，摩擦副之间凸起接触点增多，从而使得复合材料高温摩擦系数较室温下得到明显提高。如图 5(c)所示，随着滑动距离的增加，2024Al 的摩擦系数整体呈现出较稳定的趋势，仅在 10、15 N 下前期存在相对较大的波动，存在先增大后降低的变化，这是由于在摩擦前期金属间黏着明显导致摩擦系数上升，随着摩擦进行，摩擦副之间接触面积增大，造成摩擦系数呈现降低趋势。而在 15 N 摩擦后期摩擦系数上升，这主要由于在高温环境下铝基体软化，在高载荷下摩擦生热导致基体黏着磨损程度加剧[7]。然而与 2024Al 不同，如图 5(d)所示，随着施加载荷的提高，复合材料摩擦系数明显降低，到 15 N 载荷下出现大幅降低，当载荷达到 20 N 时，其摩擦系数几乎与 15 N 载荷下接近，复合材料的摩擦系数呈现出大波动性的上升趋势。复合材料在 10、15 N 载荷下摩擦系数的明显差异表明其在高温下摩擦稳定性对载荷的高敏感特征。在高温低载荷作用 (5、10 N) 下，复合材料的摩擦系数高于 2024Al，当载荷增大(20 N)时，复合材料的摩擦系数低于 2024Al，说明复合材料在高温、高载荷作用时，

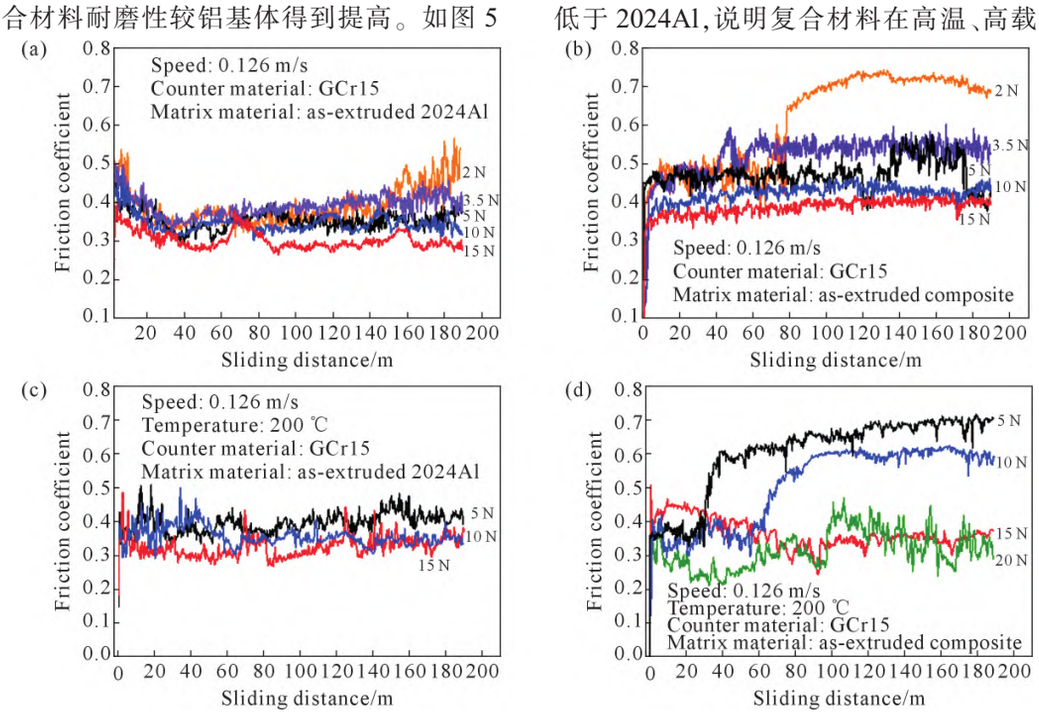


图 5 热挤压态 2024Al 及复合材料不同载荷、不同温度下的摩擦系数：(a) 2024Al (25 ℃), (b) (SiC_w+CNTs)/2024Al (25 ℃), (c) 2024Al (200 ℃), (d) (SiC_w+CNTs)/2024Al (200 ℃)

Fig.5 Friction coefficients of as-extruded 2024Al and composites under different loads and temperatures: (a) 2024Al (25 ℃), (b) (SiC_w+CNTs)/2024Al (25 ℃), (c) 2024Al (200 ℃), (d) (SiC_w+CNTs)/2024Al (200 ℃)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

摩擦稳定性优于铝基体。

对在 200 ℃下热挤压态 2024Al 及(SiC_w+CNTs)/2024Al 复合材料随载荷变化的磨损率进行统计。如图 6 所示，两种材料的磨损率均随着载荷的增加而增大。复合材料在低载荷下磨损率变化不大，增大趋势接近平缓，维持在 5×10^{-2} mm^3/m 左右，当载荷超过 10 N 时，磨损率急剧上升，推测 10 N 为该试验条件下的临界载荷转变点。然而 2024Al 合金的磨损率明显高于复合材料，相差 20 倍左右。说明在高温条件下，两种材料的主要磨损机制不同，由常温下的轻微磨损转化为严重磨损，从磨损率可以看出，该试验条件下 2024Al 合金临界载荷小于 5 N，当高于临界载荷时，材料从轻微磨损过渡到严重磨损，从而体现磨损率的急剧上升。从前面摩擦系数的分析可知，当载荷超过 10 N 时，复合材料摩擦系数发生了大的改变，也可以综合验证 10 N 为该试验条件下的临界载荷。主要是由于高温条件下，复合材料的塑性变形力提高，铝基体明显软化，材料的强度和硬度大幅度下降，加剧切削和粘着磨损；相比复合材料，SiC_w 和 CNTs 的加入强化基体材料，增强体对基体高温软化和塑性变形有约束作用，从常温的到高温的磨损率变化，可以发现，增强体对基体高温下的这种约束效果更明显，抑制材料的脱落，从而降低磨损率。在高温条件下，复合材料的磨损率明显低于铝基体，摩擦系数更稳定，相比之下，说明复合材料更适合用于高温环境中工作，而铝合金适用于常温、低载荷的工作环境。

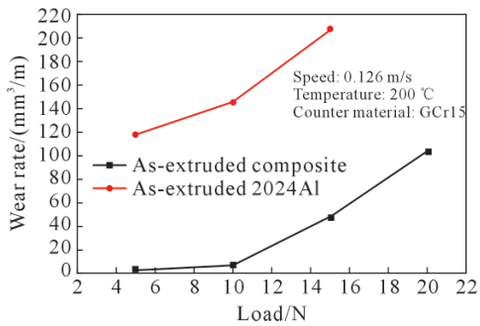


图 6　热挤压态 2024Al 合金和复合材料在 200 ℃下磨损率随载荷的变化曲线

Fig.6　Wear rate change of as-extruded 2024Al and composites with increasing load at 200 ℃

2.4　复合材料高温磨损机制分析

图 7 为 200 ℃，滑动速度为 0.126 m/s，热挤压态 2024Al 及(SiC_w+CNT)/Al 复合材料在 5、10、15 N 载荷作用下的磨损表面微观形貌。从图 7(a)可以看出，在 200 ℃时，5 N 载荷作用下铝基体磨损表面有较浅的犁沟，也有部分典型的粘着脱落区，接触面较为不平整，也可以观察到基体发生了塑性变形，相比之下，复合材料中存在少量、较浅的犁沟(图 7d)，看不到粘着区，属于轻微磨损；随着作用载荷的提高，在 10 N 载荷作用下，铝基体粘着现象更为严重，如图 7(b)所示，基体表面出现大块的塑性变形区，磨损加重，而复合材料仍属于轻微磨损(图 7e)，只有较为深的犁沟，极少数的粘着区，以及加工硬化导致的脱落点。这主要由于小载荷下，SiC_w 周围的铝基体被切削，CNTs 部分露头，而且该载荷下产生的切向应力不足以使 SiC_w 和 CNTs 折断，产生的磨屑被碾压于滑道内，在摩擦副之间形成有很多凸点的接触面，碳纳米管自身的润滑能力不能得到充分发挥，从而使得材料的摩擦系数较高。随着载荷提高到 15 N 时，图 7(c)展现了 2024Al 极其深而宽的犁沟，上面

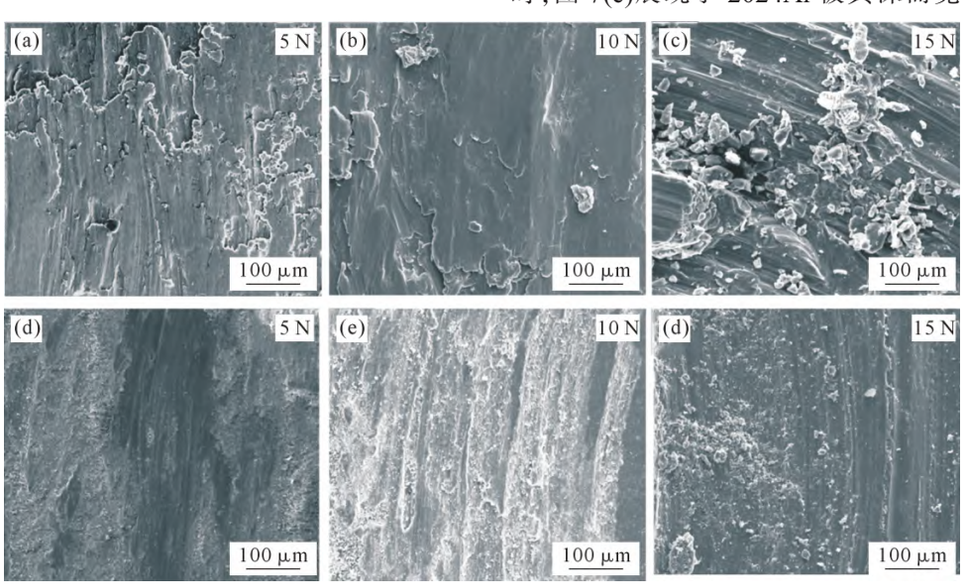


图 7　200 ℃下 2024Al、复合材料不同载荷下的磨痕形貌：(a~c) 2024Al, (d~e) (SiC_w+CNTs)/2024Al

Fig.7　Abrasion morphology of as-extruded 2024A1 and composites under different loads at 200 ℃: (a~c) 2024Al, (d~e) (SiC_w+CNTs)/2024Al

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

有较多的粘着区，磨面粗糙不平，磨损严重，然而(SiC$_w$+CNTs)/2024Al 复合材料在该载荷下大部分仍为犁沟(图 7f)，较 10 N 载荷作用下的更深和宽，犁沟两侧有部分脱落区，但是没有典型的粘着磨损现象。这可能归因于在高温条件下，基体被软化，增强体和基体的界面结合变弱，在较大的切应力作用下 SiC$_w$ 和 CNTs 更容易被拔出，当然也有 SiC$_w$ 折断的情况，这些物质存在于滑道内，由于 CNTs 管径为 60 nm 左右，高强的纳米短纤维弥散分布于接触面上，CNTs 自润滑能力得到了充分的发挥，从而使得相较 2024Al，复合材料具有明显较少的磨损。

图 8 是复合材料在 200 ℃，15 N 载荷下磨痕表面微观形貌，从图 8(a)中可观察到部分 CNTs 暴露于磨痕表面，以及一些 CNTs 被切断之后又被二次碾压于基体中，CNTs 作为柔性石墨层能够在摩擦过程中起到润滑作用[19]，这使得摩擦系数大大降低，摩擦系数的降低使得摩擦过程中的切应力也降低，从而进一步降低复合材料体积损失率。CNTs 在摩擦磨损过程中对摩擦面起到的润滑作用在其他研究中也被证实[20,31-33]。此外，滑道表面有大量弥散分布的类似于碳化硅晶须状的杆状物(图 8b)。通过对其表面物质进行线扫描发现，如图 8(d)所示，杆状物为 SiC$_w$。部分 SiC$_w$ 在滑道内横向分布，说明是被折断后又被二次碾压于较软的基体内，一部分晶须会与基体脱粘暴露在摩擦面上，作为磨粒对基体会带来一定程度的磨损，但作为硬质粒子与基体结合可对磨损面起到有效的强化效果，起到承载作用，从而减轻磨球对材料表面的切削。碳化硅晶须作为硬质增强相可有效提高基体的强度及硬度，且因其径向尺寸较大的形状特点相较颗粒更不容易在摩擦过程中被拔出，相比陶瓷颗粒具有明显优势，在高温条件下明显提高了 2024Al 的耐磨性能。在高温条件下 CNTs 的润滑作用及 SiC$_w$ 的强化作用相互协调，大大降低了复合材料的磨损率，实现了复合材料耐磨性的提高。

根据增强体在整个磨损过程中的作用，现将整

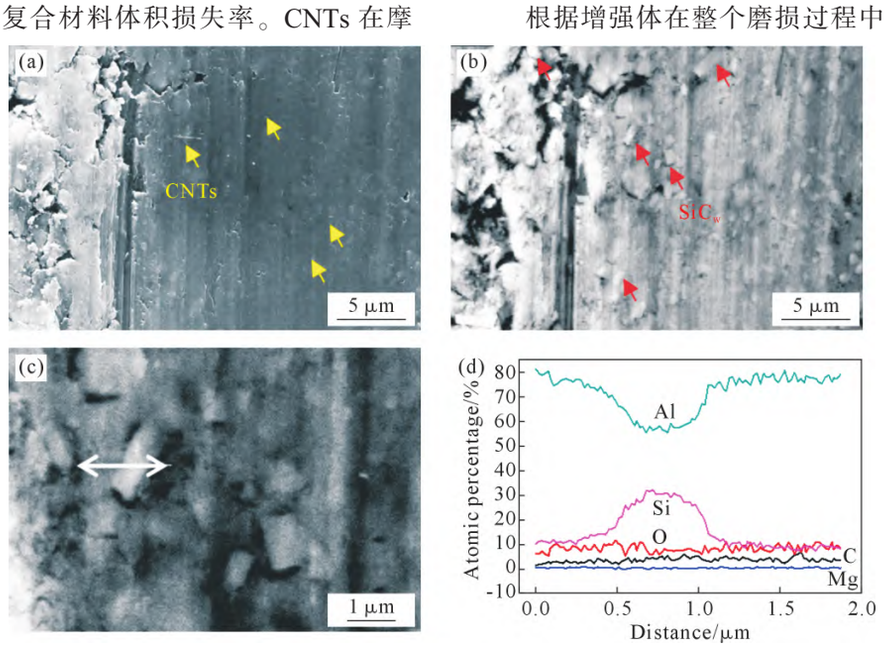


图 8 200 ℃，15 N 下挤压态复合材料磨痕分析：(a~b) 磨痕中 CNTs 及 SiC$_w$ 分布，(c~d) 线扫 EDS 分析

Fig.8 Wear mark analysis of as-extruded composites at 15 N and 200 ℃: (a~b) distribution of CNTs and SiC$_w$ in wear marks, (c-d) Line scan of EDS analysis

个摩擦磨损分为以下 3 个阶段：①轻微磨损阶段。主要表现为磨痕表面较浅较细犁沟，犁沟是由对磨球的凸起或者少量晶须被折断或拔出形成磨粒引起。该阶段主要是微犁削和氧化磨损。②机械混合层形成阶段。基体和磨屑被反复碾压，发生塑性变形，产生加工硬化，形成连续的接触面，即摩擦的稳定阶段。③严重磨损阶段。机械混合层的形成及脱落，接触面被反复碾压，基体中晶须与基体界面处易过早开裂，也因接触面温度升高而发生严重的粘着磨损。CNTs 因此独特的多层柔性特征使得在复合材料摩擦过程中能够缓慢释放应力从而在应变层和表面之间充当缓冲层，降低接触体积进而降低摩擦体积，与此同时在 CNTs 表面脱落的石墨鳞片能够在摩擦过程中起到润滑的作用，进而降低切向应力；而 SiC$_w$ 作为硬质陶瓷相主要是增强铝基体材料的耐磨性。一方面，磨损表面形成硬的微凸体，减少对磨材料对基体的磨损；另一方面对铝基体起到承担载荷的作用，抑制高温环境下的软化倾向和塑性流变。通过这两种混杂增强相的相互协调，复合材料的高温抗磨损能力得到显著提高。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3　结论

(1)借助机械搅拌、超声和溶液滴定法得到了混合均匀的增强体浆料，采用湿法成型工艺成功制备了碳纳米管CNTs和亚微米级SiC_w混杂的预制体。选择合适的压铸工艺参数制备出高含量CNTs的铸态复合材料。

(2)对铸态材料进行热挤压变形可得到组织更致密和缺陷少、增强体定向分布的复合材料，同时使易于团聚的碳纳米管局部含量减少以及分散性得到有效改善。

(3)在高温条件下，复合材料的摩擦磨损性能明显优于铝基体，高温下铝基体软化程度很大，产生了大的塑性流变和较严重的粘着磨损，而复合材料中CNTs和SiC_w的混杂存在有效提高材料的高温耐磨损能力。

参考文献：

[1] STOJANOVIC B, IVANOVIC L. Application of aluminium hybrid composites in automotive industry[J]. Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette, 2015, 22(1): 247-251.

[2] SENTHIL S, RAGURAMAN M, MANALAN D T. Manufacturing processes & recent applications of aluminium metal matrix composite materials: A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 45(5): 5934-5938.

[3] HAN T L, WANG F C, LI J J, et al. Simultaneously enhanced strength and ductility of Al matrix composites through the introduction of intragranular nano-sized graphene nanoplates[J]. Composites Part B:Engineering, 2021, 212: 108700.

[4] RONG X D, CHEN X F, ZHAO D D, et al. High mechanical strengthened CNTs/Al composite concepts with robust interface and intragranular reinforcement achieved via interfacial thermite reaction[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2023, 173: 107630.

[5] ZHANG J S, YANG S F, CHEN Z X, et al. Graphene encapsulated SiC nanoparticles as tribology-favoured nanofillers in aluminium composite[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 162: 445-453.

[6] BARADESWARAN A, PERUMAL A E. Wear and mechanical characteristics of Al7075/graphite composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 56: 472-476.

[7] CARVALHO O, BUCIUMEANU M, MADEIRA S, et al. Dry sliding wear behaviour of AlSi-CNTs-SiC_p hybrid composites[J]. Tribology International, 2015, 90: 148-156.

[8] SHARMA A, SHARMA V M, JINU P. A comparative study on microstructural evolution and surface properties of graphene/CNT reinforced Al6061-SiC hybrid surface composite fabricated via friction stir processing[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(10): 2005-2026.

[9] WOZNIAK J, KOSTECKI M, CYGAN T, et al. Self-lubricating aluminium matrix composites reinforced with 2D crystals[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 111: 1-9.

[10] PANDEY N, CHAKRABARTY I, BARKANE K, et al. Microstructure, mechanical and wear properties of aluminum borate whisker reinforced aluminum matrix composites[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(7): 1731-1742.

[11] 吴祎晗，姜传海. 喷丸处理对$Al_{18}B_4O_{33}$晶须增强铝基复合材料残余应力和微观结构的影响[J]. 机械工程材料，2020, 44(12): 62-66.
WU Y H, JIANG C H. Effect of shot peening treatment on residual stress and microstructure of $Al_{18}B_4O_{33}$ whisker reinforced aluminum matrix composites [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2020, 44(12): 62-66.

[12] MONDAL D P, DAS S, RAO R N, et al. Effect of SiC addition and running-in-wear on the sliding wear behaviour of AI-Zn-Mg aluminium alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 402 (1-2): 307-319.

[13] RAO R N, DAS S. Effect of SiC content and sliding speed on the wear behaviour of aluminium matrix composites[J]. Materials & Design, 2011, 32(2): 1066-1071.

[14] MOUSTAFA E B, MELAIBARI A, ALSORUJI G, et al. Al 5251-based hybrid nanocomposite by FSP reinforced with graphene nanoplates and boron nitride nanoparticles: Microstructure, wear, and mechanical characterization[J]. Nanotechnology Reviews, 2021, 10(1): 1752-1765.

[15] BASAVARAJAPPA S, CHANDRAMOHAN G, MUKUND K, et al. Dry sliding wear behavior of Al 2219/SiC_p-Gr hybrid metal matrix composites[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2006, 15(6): 668-674.

[16] BASAVARAJAPPA S, CHANDRAMOHAN G, MAHADEVAN Arjun, et al. Influence of sliding speed on the dry sliding wear behaviour and the subsurface deformation on hybrid metal matrix composite[J]. Wear, 2007, 262(7-8): 1007-1012.

[17] SHARMA A, NARSIMHACHARY D, SHARMA V M, et al. Surface modification of Al6061-SiC surface composite through impregnation of graphene, graphite & carbon nanotubes via FSP: a tribological study[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 368: 175-191.

[18] ELKADY O A, YEHIA H M, IBRAHIM A A, et al. Direct observation of induced graphene and SiC strengthening in Al-Ni alloy via the hot pressing technique[J]. Crystals, 2021, 11(9): 1142.

[19] YADAV B N, VERMA G, MUCHHALA D, et al. Effect of MWCNTs addition on the wear and compressive deformation behavior of LM13-SiC-MWCNTs hybrid composites [J]. Tribology International, 2018, 128: 21-33.

[20] 张军，刘崇宇. 粉末冶金法制备CNT和SiC混杂增强铝基复合材料的摩擦磨损性能[J]. 材料工程，2020, 48(11): 131-139.
ZHANG J, LIU C Y. Friction and wear properties of CNT and SiC hybrid reinforced aluminum matrix composites prepared by powder metallurgy[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(11): 131-139.

[21] SIVAMARAN V, BALASUBRAMANIAN V, GOPALAKRISHNAN M, et al. Mechanical and tribological properties of Self-Lubricating Al 6061 hybrid nano metal matrix composites reinforced by nSiC and MWCNTs[J]. Surfaces and Interfaces, 2020, 21: 100781.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[22] IACOB G, GHICA V G, BUZATU M, et al. Studies on wear rate and micro-hardness of the Al/Al_2O_3/Gr hybrid composites produced via powder metallurgy[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 69: 603-611.

[23] ANITHA P, BALRAJ U S. Dry sliding wear performance of Al/7075/Al_2O_3p/Grp hybrid metal matrix composites[J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(2): 3033-3042.

[24] VENCL A, VUČETIĆ F, BOBIĆ B, et al. Tribological characterisation in dry sliding conditions of compocasted hybrid A356/SiC_p/Grp composites with graphite macroparticles[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100: 2135-2146.

[25] ISLAM M, KHALID Y, AHMAD I, et al. Microstructural evaluation of inductively sintered aluminum matrix nanocomposites reinforced with silicon carbide and/or graphene nanoplatelets for tribological applications [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2018, 49: 2963-2976.

[26] SINGH J. Fabrication characteristics and tribological behavior of Al/SiC/Gr hybrid aluminum matrix composites: A review[J]. Friction, 2016, 4: 191-207.

[27] BARADESWARAN A, VETTIVEL S C, PERUMAL A E, et al. Experimental investigation on mechanical behaviour, modelling and optimization of wear parameters of B_4C and graphite reinforced aluminium hybrid composites[J]. Materials & Design, 2014, 63: 620-632.

[28] 储双杰，吴人洁. 挤压铸造短纤维增强金属基复合材料浸渗过程分析[J]. 材料工程，1997(12): 10-12, 17.
CHU S J, WU R J. Analysis of impregnation process of short fiber reinforced metal matrix composites by extrusion casting[J]. Journal of Materials Engineering, 1997(12): 10-12, 17.

[29] 邓德杰，赵海东，李芳东. 挤压铸造 10SiC_p/A356 铝基复合材料的摩擦磨损性能[J]. 特种铸造及有色合金，2018, 38(12): 1327-1331.
DENG D J, ZHAO H D, LI F D. Friction and wear properties of 10SiC_p/A356 aluminum matrix composites by extrusion casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2018, 38(12): 1327-1331.

[30] 王志辉，樊新波，简忠武，等. 压铸 ZL101A 铝合金摩擦磨损性能及机理的研究[J]. 湖南工业职业技术学院学报，2021, 21(4): 7-12.
WANG Z H, FAN X B, JIAN Z W, et al.Study on friction and wear properties and mechanism of die-casting ZL101A aluminum alloy [J]. Journal of Hunan Metallurgical Professional Technology College, 2021, 21(4): 7-12.

[31] 简正豪，曾敏，张杰. Al-Si-Cu-CNTs 铝基复合材料干滑动摩擦磨损行为研究[J]. 炭素技术，2022, 41(4): 74-78.
JIAN Z H, ZENG M, ZHANG J. Study on dry sliding friction and wear behavior of Al-Si-Cu-CNTs aluminum matrix composites[J]. Carbon Techniques, 2022, 41(4): 74-78.

[32] 吴昊，吴星平，陈名海，等. 碳纳米管增强铝基复合材料的制备及摩擦磨损性能[J]. 热处理，2013, 28(5): 44-48.
WU H, WU X P, CHEN M H, et al. Preparation and friction and wear properties of carbon nanotube reinforced aluminum matrix composites[J]. Heat Treatment, 2013, 28(5): 44-48.

[33] 史娜，聂俊辉，张亚丰，等. 碳纳米管增强铝基复合材料的力学和物理性能[J]. 北京科技大学学报，2013, 35(1): 104-111.
SHI N, NIE J H, ZHANG Y F, et al. Mechanical and physical properties of aluminum matrix composites reinforced by carbon nanotubes[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(1): 104-111.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net