

SiC与碳纤维强化2A12铝合金钻杆材料的 拉伸性能研究

黄世寅¹, 刘宝昌^{1,2}, 孟庆南^{1,2*}, 吴金昊³, 袁牧¹, 王思凡¹, 毛馨悦¹, 邱玉婷¹

(1. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学超硬材料国家重点实验室, 吉林 长春 130026; 3. 嘉兴南湖学院机电工程学院, 浙江 嘉兴 314001)

摘要:我国浅层和中浅层油气资源总量随着不断开采而逐渐减少, 加大深层和超深层油气资源的勘探与开发对于保障国家能源安全具有重要意义。在深层超深层的高温地层进行钻井作业已经成为无法回避的工程难题, 研发轻质高强且耐高温的钻杆材料迫在眉睫。本文采用真空热压烧结、热挤压和热处理工艺制备了SiC颗粒以及SiC颗粒和短碳纤维共混2A12铝合金钻杆材料, 并对不同SiC体积分数的复合材料在不同温度的性能进行了研究。结果表明, 25℃下体积分数为3%的SiC/2A12铝合金复合材料的力学性能最好, 抗拉强度较2A12提高10.8%; 180℃和220℃下体积分数为5%的SiC/2A12铝合金/碳纤维复合材料的力学性能最好, 抗拉强度较基体分别提高17.9%和19.2%。SiC和碳纤维的混合加入可使2A12铝合金的工作温度提高40℃。SiC的强化方式主要是Orowan强化, 碳纤维的强化方式主要是载荷传递。

关键词: 铝合金钻杆; 短碳纤维; SiC; 复合材料; 高温性能; 抗拉强度; 深层超深层油气资源

中图分类号: P634.4; TE921⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)05-0076-10

Study on tensile properties of 2A12 aluminum alloy drill pipe reinforced with SiC and carbon fiber

HUANG Shiyin¹, LIU Baochang^{1,2}, MENG Qingnan^{1,2*}, WU Jinhao³,
YUAN Mu¹, WANG Sifan¹, MAO Xinyue¹, QIU Yuting¹

(1. Key Laboratory of Drilling Technology for Complex Conditions of the Ministry of Natural Resources, Changchun Jilin 130026, China; 2. State Key Laboratory of Superhard Materials, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiaxing Nanhu University, Jiaxing Zhejiang 314001, China)

Abstract: The total reserves of shallow and mid-shallow oil and gas resources in China are dwindling due to continuous exploitation. Enhancing exploration and development of deep and ultra-deep oil and gas resources is crucial for ensuring national energy security. Drilling in deep and ultra-deep high-temperature formations poses inevitable engineering challenges, necessitating the development of lightweight, high-strength, and temperature-resistant drill pipe materials. In this study, SiC particle-reinforced 2A12 aluminum alloy drill pipe materials, with short carbon fibers incorporated, were prepared through vacuum hot-pressing sintering, hot extrusion, and heat treatment processes. The mechanical properties of composites with varying SiC volume fractions were evaluated under different temperatures. Results

收稿日期: 2024-10-31; 修回日期: 2025-01-21 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.05.010

基金项目: 深地国家科技重大专项“特深井科学钻探工艺与钻具(一期)”课题8“钻具关键部件材料设计与仿生研究”(编号: 2024ZD1000908)

第一作者: 黄世寅, 男, 汉族, 2000年生, 硕士研究生, 地质工程专业, 研究方向为耐高温铝合金钻杆, 吉林省长春市朝阳区西民主大街938号, huangsy22@mails.jlu.edu.cn。

通信作者: 孟庆南, 男, 汉族, 1986年生, 副教授, 博士生导师, 地质工程专业, 博士, 从事钻探用超硬材料与金刚石钻头、耐高温铝合金钻杆等方面的研究工作, 吉林省长春市朝阳区西民主大街938号, qingnanmeng@jlu.edu.cn。

引用格式: 黄世寅, 刘宝昌, 孟庆南, 等. SiC与碳纤维强化2A12铝合金钻杆材料的拉伸性能研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(5): 76-85.

HUANG Shiyin, LIU Baochang, MENG Qingnan, et al. Study on tensile properties of 2A12 aluminum alloy drill pipe reinforced with SiC and carbon fiber[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(5): 76-85.

indicate that the mechanical properties of SiC/2A12 aluminum alloy composites with a 3% SiC volume fraction at 25°C are the best, and the tensile strength is 10.8% higher than that of 2A12; the mechanical properties of SiC/2A12 aluminum alloy/carbon fiber composites with a 5% volume fraction at 180°C and 220°C exhibit superior performance, with corresponding increases in tensile strength of 17.9% and 19.2%, respectively. The incorporation of SiC particles and carbon fibers increases the operational temperature of the 2A12 aluminum alloy by 40°C. The primary strengthening mechanisms are Orowan strengthening for SiC particles and load transfer for carbon fibers.

Key words: aluminum alloy drill pipe; short carbon fiber; SiC; composite material; high temperature performance; tensile strength; deep and ultra-deep oil and gas resources

0 引言

近年来,我国石油和天然气消费需求逐年增长,油气供应对外依存度仍居高位。2023年,我国原油对外依存度达 71.9%,远高于国际石油安全警戒线,天然气对外依存度为 40.8%,严重影响我国能源安全,迫切需提升油气自给能力^[1]。我国 83%

深层油气有待探明和开发,向“地下珠峰”进军获取油气资源是保障国家能源安全的重大战略任务^[2],在深层超深层的高温地层进行钻井作业已经成为无法回避的工程难题。我国典型深层、超深层油气藏特征见表 1^[3-6]。

表 1 中国典型深层、超深层油气藏特征
Table 1 Characteristics of typical deep and ultra-deep reservoirs in China

区 域	储层埋深/m	储量规模	最高温度/℃
塔里木盆地塔河油田	5350~6200	探明储量 13.5×10 ⁸ t	165
塔里木盆地顺北油田	6500~9000	资源量 17×10 ⁸ t 油当量	190
塔里木盆地顺托果勒隆起	6600~8300	天然气资源量>2×10 ¹² m ³	220
四川盆地川东北震旦系-寒武系	8000~10000	(4570~5414)×10 ⁸ m ³	180
四川盆地川西雷口坡组	5000~8000	控制储量 2166×10 ⁸ m ³	166
四川盆地深层页岩气	3500~4500	>12.5×10 ¹² m ³	155

钻杆是现在常规钻探技术中的重要组成部分,深井及超深井钻进的高温高压环境要求钻杆必须具有以下特征:密度低、质量轻,高温下能保持高强度、高硬度、耐蠕变、耐疲劳等高温力学性能,良好的高温摩擦性能。铝合金具有低密度、高强度、耐摩擦以及耐腐蚀等特点,是钻杆的优选材料之一^[7-10]。常规的 G105、S135 钢钻杆因自身质量大、不耐酸腐蚀等缺点,不能很好地满足深层超深层安全、高效钻井的需要,铝合金钻杆可以有效解决这

个问题,且铝合金材料的成本远远低于行业内提出的其他新型钻杆材料。铝合金钻杆与钢钻杆性能对比见表 2^[11]。2A12 铝合金是铝-铜-镁体系中典型的硬铝合金^[12-13],具有成分合理、综合性能好、抗拉强度高、抗蠕变性能好、热稳定性优异、可焊性好等优点,具有良好的塑性成形能力和机械加工性能^[14-16]。与广泛应用于航空航天和钻井的 7075 和 2024 铝合金相比,2A12 铝合金钻杆材料具有更好的热稳定性^[11]。

表 2 铝合金钻杆与钢钻杆性能对比
Table 2 Performance comparison between aluminum alloy drill pipe and steel drill pipe

材 质	屈服强度/MPa			抗拉强度/MPa			强度密度比(25℃)
	25℃	150℃	260℃	25℃	150℃	260℃	
S135 钢级		930			1134		119
7075 铝合金	503	186	62	570	214	62	186
2024 铝合金	325	248	32	469	310	76	120
2A12 铝合金	300	265	224	440	380	270	111

然而,随着钻井深度的增加和地热资源的开发,对钻杆材料的耐高温要求也越来越高。为了使铝合金能够在更高的温度下使用,研究人员提出了合金成分优化^[17]、物理冶金优化^[18]和颗粒强化^[19-22]等方案。颗粒增强铝基复合材料具有良好的力学性能和摩擦性能^[23]。Oñoro等^[24]将B₄C添加到6061和7015合金中,证实在25~500℃时,B₄C颗粒的加入改善了两种基体合金的力学性能。碳化硅颗粒具有密度和价格成本低、耐高温、耐腐蚀耐磨等优点。Božić等^[25]在CW67铝合金中加入SiC颗粒,复合材料在25~400℃的屈服强度高于整体合金。汤健^[26]在2014铝合金中加入SiC颗粒,复合材料在25~220℃的屈服强度高于基体合金。

碳纤维具有强度高、密度低、高温下强度恒定等优点,被广泛应用于改善铝合金的力学性能。Zhang等^[27]研究了短碳纤维(SCFs)对2024铝合金室温和高温性能的增强机理,结果表明,与2024铝合金相比,SCFs增强复合材料在150℃时的屈服强度和抗拉强度分别提高了45.6%和21.8%。Yuan等^[28]研究了SCFs的加入对2024铝合金热暴露的影响。当160℃热暴露时间延长至500h时,SCFs的加入仍能显著提高2024铝合金的抗拉强度。Wu等^[29]对SCFs增强7075铝合金进行了研究。当SCFs添加量为12%时,合金在150℃和200℃的抗拉强度分别提高了15.6%和16.5%。

本文通过在2A12铝合金中加入SiC和SiC/SCFs提高其高温强度,并研究了SiC含量以及SCFs加入对铝合金室温和高温性能的影响,探讨了SiC和SCFs对铝合金性能的增强机理。

1 材料与方法

选取2A12作为基体合金,粉末粒径为75~150 μm,化学成分见表3。SiC由中研纳米新材提供,粒径为50 nm,SCFs由市售的PAN基碳纤维(T700,日本东丽)加工而成。

SiC(1vol%、2vol%、3vol%、4vol%和5vol%)和SCFs(6vol%)以乙醇为混合剂,和2A12铝合金粉末人工混合2h,均匀分散于2A12粉末中。混合后的粉末在90℃真空环境下干燥10h,使乙醇完全脱除。干燥后的粉末放入石墨模具(Φ30 mm×100 mm)中,在真空炉中热压烧结(温度为575℃,压力为45 MPa)1h。烧结后的样品尺寸约为Φ30 mm×

表3 2A12合金的化学成分

Table 3 Chemical composition of 2A12 aluminum alloy

元素	质量分数/%
Cu	4.59
Mg	1.68
Mn	0.43
Fe	0.06
Si	0.043
Zn	<0.05
Cr	<0.01
Ti	<0.001
Al	Bal.

20 mm,炉内冷却后,清洗复合材料并在495℃下重新加热3h,分别去除表面残留物和残余应力,之后复合材料在445℃和30 MPa的条件下进行挤压测试。所有试样均经过T6热处理(495℃固溶1h,水淬,190℃时效12h)。试样经放电切割成以下试验所需的特定形状,然后仔细抛光。对比样品2A12和SiC含量为1vol%、2vol%、3vol%、4vol%和5vol%的复合材料用同样的方法制备。

采用Cu Kα在30°~80°跃迁模式下的X射线衍射(XRD, DX2700)对样品的相组成进行了鉴定。样品的密度采用阿基米德原理测量(DE-120型密度计),样品测量3次取平均值,计算中SiC、SCFs、2A12的理论密度分别取3.20 g/cm³、1.80 g/cm³和2.77 g/cm³。拉伸试验试样按ASTM标准E-8/E8M-09制备(宽度约为3.6 mm,厚度为1~2 mm,试验段长度为10 mm)^[27],通用试验机为中国长春赛诺试验设备有限公司生产,分别在室温、180℃、220℃条件下以0.6 mm/min的应变速率进行拉伸试验,测3次取平均值。扫描电镜(SEM, S4800)记录了表面形貌和断口形貌。统计方法用误差计算方法。

2 结果和讨论

复合材料的密度随着SiC体积分数增加逐渐增大。为消除试样孔隙率的影响,对试样的相对密度进行计算,见表4,所有试样的致密度均大于99%。

图1为2A12及其复合材料拉伸后的XRD图谱,检测到铝峰约为38.47°(111),44.74°(200),65.13°(220)和78.23°(311)(PDF#04-0787),SiC含量为5vol%的样品还能检测到SiC的峰(35.72°)。

表4 不同SiC浓度下2A12及其复合材料的密度

Table 4 Density of 2A12 and its composites at different SiC concentrations

2A12样品添加配方	样品代号	密度/(g·cm ⁻³)	致密度/%
0vol%SiC+0vol%SCFs	2A12	2.756±0.007	99.5
1vol%SiC+0vol%SCFs	1sic	2.769±0.004	99.8
2vol%SiC+0vol%SCFs	2sic	2.773±0.005	99.8
3vol%SiC+0vol%SCFs	3sic	2.769±0.003	99.5
4vol%SiC+0vol%SCFs	4sic	2.768±0.011	99.3
5vol%SiC+0vol%SCFs	5sic	2.764±0.008	99.0
1vol%SiC+6vol%SCFs	1sic+6cf	2.692±0.006	99.1
2vol%SiC+6vol%SCFs	2sic+6cf	2.701±0.004	99.3
3vol%SiC+6vol%SCFs	3sic+6cf	2.708±0.003	99.4
4vol%SiC+6vol%SCFs	4sic+6cf	2.718±0.009	99.6
5vol%SiC+6vol%SCFs	5sic+6cf	2.722±0.005	99.6

由于挤压过程的影响,复合材料在(220)平面上具有择优取向。XRD图谱中没有发现石墨和Al₄C₃的信号。

采用Scherrer公式计算了2A12及复合材料的晶粒尺寸。

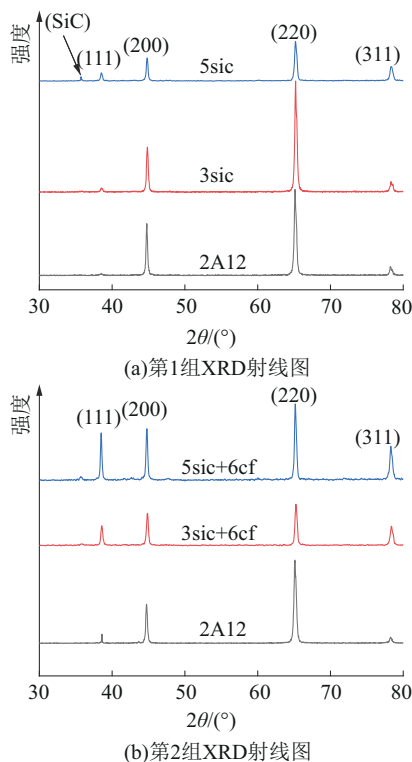


图1 2A12及复合材料XRD射线图

Fig.1 XRD images of 2A12 and composites

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

式中: D ——晶粒垂直于晶面方向的平均厚度(即晶粒尺寸),nm; K ——Scherrer常数,取 $K=0.9$; λ ——x射线波长,取 $\lambda=0.15406$ nm; β ——实测样品衍射峰半峰高宽度或者积分宽度,在计算的过程中需转化为弧度; θ ——衍射角,(°)。

计算结果表明,2A12及复合材料的晶粒尺寸基本一致,均在25 nm左右。

2.1 SiC对2A12铝合金的影响及强化机制

2A12和1sic、2sic、3sic、4sic、5sic复合材料在25℃、180℃和220℃下的力学性能见图2。当SiC含量小于3vol%时,复合材料的强度随SiC含量的增加而增加,在SiC含量为3vol%时达到最大值。25℃下3sic的屈服强度和抗拉强度分别为391 MPa和533 MPa,高于2A12的相应值(354 MPa和481 MPa),分别提高了10.5%和10.8%。180℃下3sic的屈服强度和抗拉强度分别为357 MPa和426 MPa,高于2A12的相应值(321 MPa和391 MPa),分别提高了11.2%和9.0%。在220℃时,3sic的屈服强度和抗拉强度也最高,分别为308 MPa和360 MPa,相较2A12(287 MPa和344 MPa)提高7.3%和4.7%。当SiC含量大于3vol%时,复合材料的强度随SiC含量的进一步增加而降低,甚至略低于2A12。SiC的加入会导致材料断裂伸长率下降, SiC含量小于3vol%时,温度对断裂伸长率的影响不大,当SiC含量大于3vol%时,复合材料的断裂伸长率随着测试温度的升高而增大。

2A12,3sic和5sic复合材料的应力-应变曲线见图3。SiC的添加对2A12铝合金在25℃的性能提升幅度高于其在高温环境中的表现。随着温度的升高,SiC对其性能提升的效果逐渐减弱。在25℃和180℃时,SiC含量的增加会导致样品断裂伸长率下降,但在220℃时,5sic的断裂伸长率大于3sic。

2A12,3sic和5sic复合材料在220℃的断口见图4,可以看到2A12,3sic和5sic复合材料的断口处有很多韧窝和撕裂边。图4(b)中3sic断口处还有由于SiC产生的细小韧窝,图4(c)中5sic断口可以看到由于SiC团聚而产生的小球。

SiC颗粒的强化机制包括晶粒细化和Orowan强化^[25]。由霍尔-佩奇(Hall-Petch)关系^[30]可知,晶粒细化所引起的性能强化

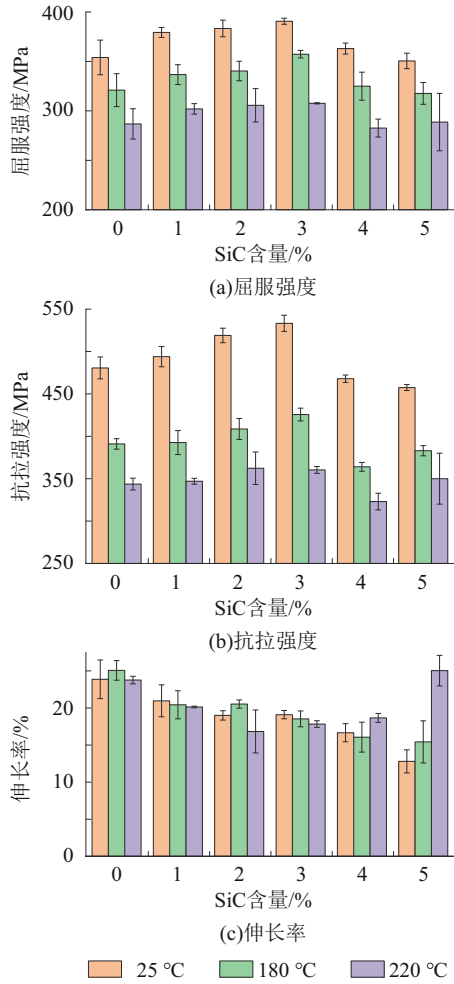


图2 2A12和SiC/2A12复合材料的力学性能
Fig.2 Mechanical properties of 2A12 and SiC/2A12 composites

$$\Delta\sigma_{GR} = k(D_c^{-0.5} - D_m^{-0.5}) \quad (2)$$

式中: $\Delta\sigma_{GR}$ ——晶粒细化所引起的性能强化,MPa; k ——用于调整量纲的配平系数,取 $k=0.04 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; D_c ——复合材料的晶粒尺寸,nm; D_m ——非增强材料2A12的晶粒尺寸,nm。

前述计算结果表明,SiC含量多少基本不影响晶粒尺寸大小,故SiC含量导致晶粒细化的增强很小。

基体中析出颗粒的分布会阻止位错沿晶面滑动,从而产生强化作用。硬化效果是通过分散硬化框架内的Orowan机制实现的。SiC的加入不影响基体合金析出相的析出过程,且复合材料的制备工艺完全相同,因此该部分的强化效果可以忽略不计。加入的SiC通过限制位错运动来强化复合材

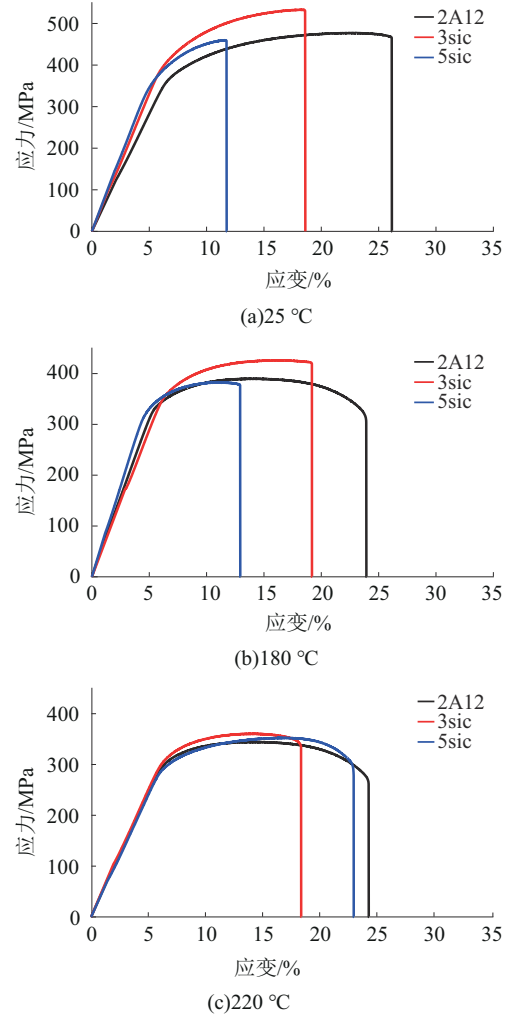


图3 2A12,3sic和5sic复合材料的应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curves of 2A12, 3sic and 5sic composites

料,SiC的均匀分散可以提供大量纳米颗粒参与这种强化机制^[31]。

$$\sigma_c = (1 + 0.5f_{SiC})(\sigma_m + \Delta\sigma_o + \Delta\sigma_{CTE} + \frac{\Delta\sigma_o \Delta\sigma_{CTE}}{\sigma_m}) \quad (3)$$

其中:

$$\Delta\sigma_o = \frac{0.13Gb}{d_p[(1/2f_{SiC})^{1/3} - 1]} \ln\left(\frac{d_p}{2b}\right) \quad (4)$$

$$\Delta\sigma_{CTE} = 1.25Gb \sqrt{\frac{12\Delta T \Delta C f_{SiC}}{bd_p}} \quad (5)$$

式中: σ_c ——复合材料的屈服强度,MPa; f_{SiC} ——SiC的体积分数,%; σ_m ——2A12基体的屈服强度,MPa; $\Delta\sigma_o$ ——Orowan强化,MPa; $\Delta\sigma_{CTE}$ ——位错密度引起的强化,由基体和增强颗粒之前的热失配引

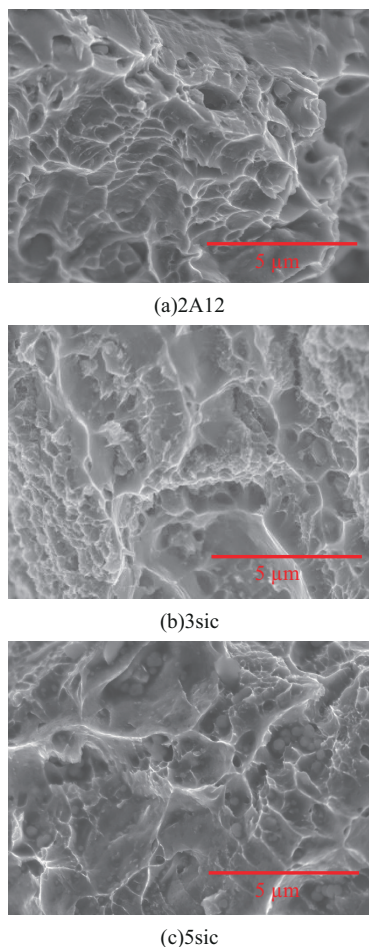


图4 2A12及复合材料在220 °C的断口SEM图

Fig.4 SEM images of fracture of 2A12 and composites at 220 °C

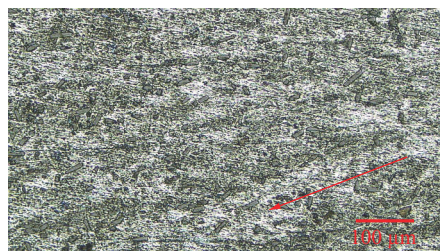
起,MPa; G ——基体的剪切模量,GPa; b ——基体的Burgers矢量,取 $b=0.286\text{ nm}$; d_p ——SiC颗粒的平均直径,本文SiC粒径为 50 nm ; ΔT ——时效温度($190\text{ }^{\circ}\text{C}$)与试验温度之差, $^{\circ}\text{C}$; ΔC ——基体($2.47\times 10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)与SiC($4.4\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)的CTE(热膨胀系数)之差, $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

从公式(3)、(4)和(5)可以看出,理论上SiC含量越高,SiC对复合材料的强化效果就越强,这可以解释图2中当SiC含量小于3vol%时,复合材料的强度随着SiC含量的增加而增加;但当SiC含量大于3vol%时,复合材料的强度却随SiC含量的增加而降低,我们可以从图4(c)中找到原因:在高SiC含量的复合材料中,SiC颗粒容易发生团聚现象,这不仅削弱了SiC的强化效果,而且团聚形成的微球体可能成为缺陷源,进而导致复合材料整体性能下降。

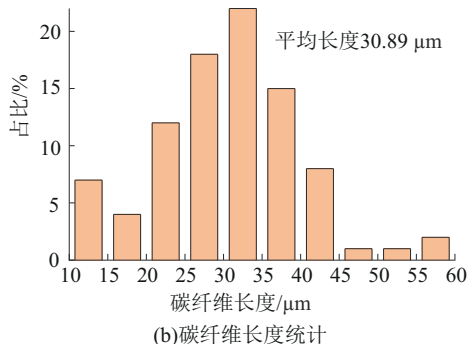
此外,随着SiC含量的增加,团聚倾向加剧,进一步影响复合材料的力学性能。

2.2 SiC对2A12铝合金/碳纤维复合材料的影响及强化机制

SCFs在2A12挤压试样中的典型分布见图5。图5(a)中红色箭头代表挤压方向,SCFs在2A12矩阵中均匀分布,没有明显的聚类 and 极性。在纵截面上,SCFs的形状以矩形和椭圆形居多,且SCFs在基体内的取向与热挤压时的取向基本一致。SCFs的平均长度为 $30.89\text{ }\mu\text{m}$ 。



(a)sic-6cf纵剖面光学表面形貌



(b)碳纤维长度统计

图5 SCFs在2A12挤压试样中的典型分布

Fig.5 Typical distribution of SCFs in 2A12 extruded specimen

2A12和1sic+6cf、2sic+6cf、3sic+6cf、4sic+6cf、5sic+6cf复合材料在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的力学性能见图6。在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,复合材料的强度先随SiC含量的增加而增加,3sic+6cf复合材料有最好的力学性能,其屈服强度和抗拉强度(399 MPa 和 495 MPa)相较于基体(354 MPa 和 481 MPa)提高了12.7%和2.9%,之后随SiC含量的增加而降低; $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下5sic+6cf的抗拉强度和2A12基体基本一致,且5sic+6cf的屈服强度大于2A12基体。在180和 $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,复合材料的强度随SiC含量的增加而增加,5sic+6cf复合材料有最高的强度。5sic+6cf在180和 $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的屈服强度(381 MPa 和 348 MPa)

相较于基体(321 MPa和287 MPa)提高了18.7%和21.3%;抗拉强度(461 MPa和410 MPa)相较于基体(391 MPa和344 MPa)提高了17.9%和19.2%。如图6(c)所示,总体来说,材料的断裂伸长率随SiC含量的增加而降低,随测试温度的升高而增大。

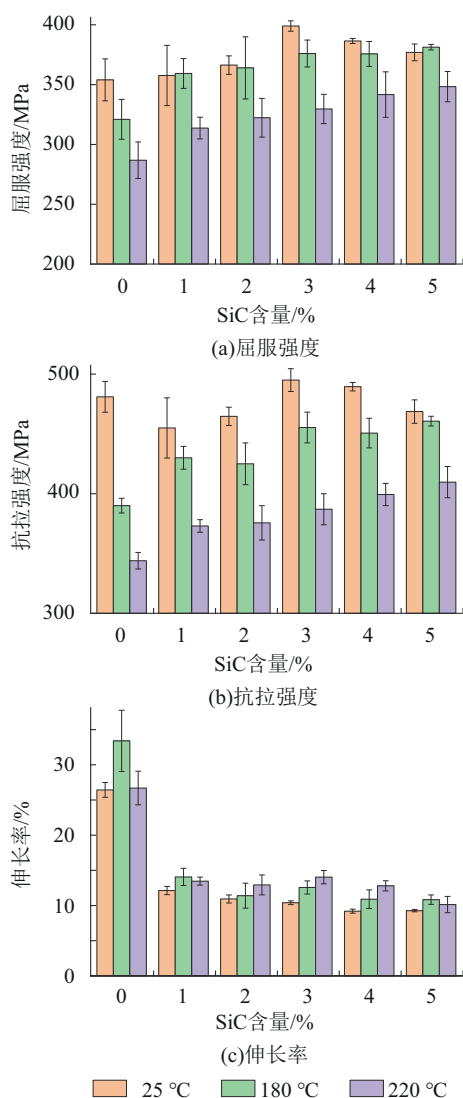


图6 2A12和SiC/6CF/2A12复合材料的力学性能
Fig.6 Mechanical properties of 2A12 and SiC/6CF/2A12 composites

2A12, 3sic+6cf和5sic+6cf复合材料在25 °C、180 °C和220 °C测试温度下的应力-应变曲线见图7。如图7(a)所示,在25 °C时,5sic+6cf断裂伸长率小于10%,且其应力-应变曲线断裂前是尖角,说明其在拉伸阶段或者刚从拉伸阶段进入屈服阶段就已断裂,导致其未达到抗拉强度,这可以解释5sic+6cf

在25 °C时的强度不高。在180 °C和220 °C时,三种样品都基本进入了屈服阶段,SiC的强化效果得以发挥。

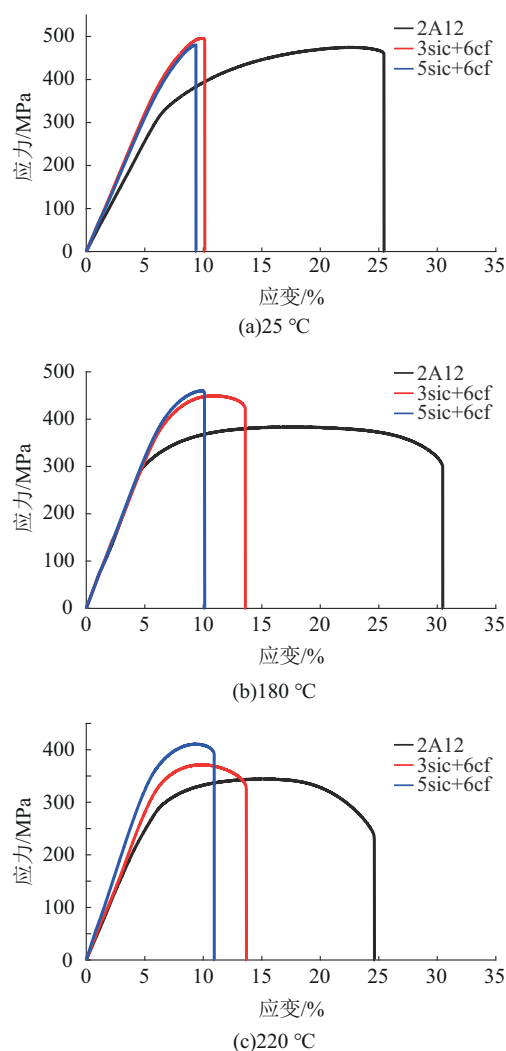


图7 2A12,3sic+6cf和5sic+6cf复合材料的应力-应变曲线
Fig.7 Stress-strain curves of 2A12, 3sic+6cf and 5sic+6cf composites

2A12, 3sic和5sic复合材料在220 °C的断口见图8。如图8(a)所示,2A12中充满了韧窝和撕裂边。对于3sic+6cf,可以看到里面充满了韧窝、撕裂边缘,还有很多由于SiC产生的细小韧窝,如图8(b)所示。如图8(c),5sic+cf中由SiC产生的细小韧窝变多,没有看到和图4(c)中一样由SiC团聚而产生的小球,在图8(d)可以看到5sic+cf中碳纤维没有明显的团聚现象。

SiC颗粒和SCFs共混2A12铝合金复合材料的

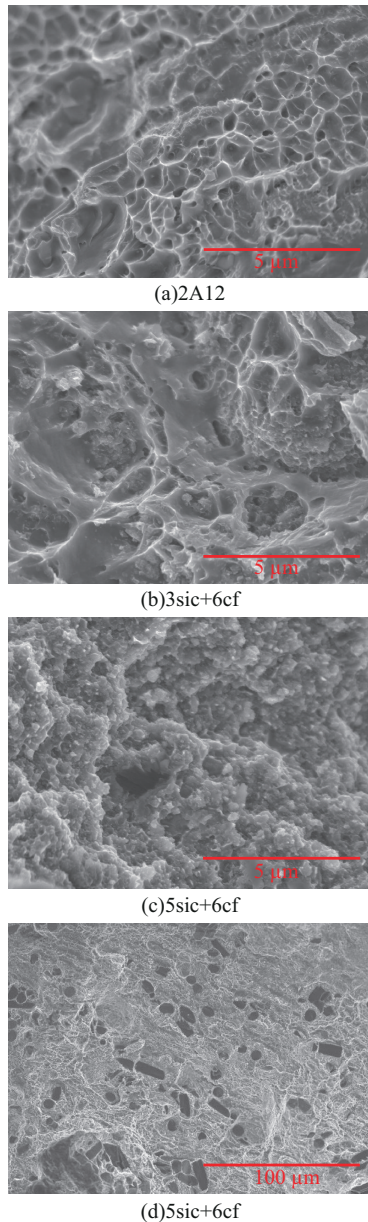


图8 2A12及复合材料在220 °C的断口SEM图

Fig.8 SEM images of fracture of 2A12 and composites at 220 °C

强化机制不仅包含晶粒细化、Orowan强化,还包含载荷传递。

其中SiC颗粒和SCFs共混2A12铝合金复合材料所有样品的晶粒尺寸都很接近,晶粒细化对复合材料的强化很小;SiC颗粒的Orowan强化如前文公式(2)、(3)和(4)所示。碳纤维的CTE为 $1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,受短碳纤维直径($7 \text{ } \mu\text{m}$)的影响,Orowan的强化效果较小,其他文献也有类似现象^[32]。

还有基于碳纤维的载荷传递强化机制。碳纤

维长度小于碳纤维临界长度时,碳纤维强化后的强度值可按式(6)计算^[33]。

$$\sigma_c = \sigma_F f_v \frac{l}{l_c} + \sigma_M (1 - f_v) \quad (6)$$

式中: σ_F ——纤维的屈服强度,MPa; f_v ——碳纤维体积分数,%; l ——试验用碳纤维长度, μm ; l_c ——纤维临界长度, μm , $l_c = \sigma_F D / (2\tau_M)$; τ_M ——基体抗剪强度,MPa。

经计算试验用碳纤维长度小于 l_c ,满足公式(6)的使用条件。碳纤维的加入有助于提高复合材料的性能。

2.3 2A12, 3sic和5sic+6cf复合材料的性能对比

2A12, 3sic和5sic+6cf复合材料在25 °C、180 °C和220 °C下的屈服强度和抗拉强度对比情况见图9。在25 °C时,3sic有最好的屈服强度和抗拉强度;在180 °C和220 °C时,5sic+6cf有最好的屈服强度和抗拉强度。在180 °C时,5sic+6cf的屈服强度和抗拉强度提升幅度为18.7%和21.3%,几乎是3sic提升幅度(11.2%和9.0%)的2倍;在220 °C时,5sic+6cf的屈服强度和抗拉强度提升幅度为17.9%和19.2%,同样远高于3sic的7.3%和4.7%。5sic+6cf和2A12在25 °C的强度基本一样,5sic+6cf在220 °C的屈服强度和抗拉强度(348 MPa和410 MPa)高于2A12在180 °C的屈服强度和抗拉强度(321 MPa和391 MPa),说明SiC和碳纤维的混合加入可以将2A12铝合金的工作温度提高超40 °C。

3 结论

采用真空热压、热挤压、热处理等工艺制备了SiC增强2A12铝合金钻杆材料和SiC/SCFs共混增强2A12铝合金钻杆材料,并研究了SiC含量对2A12铝合金及2A12铝合金/碳纤维钻杆材料力学性能的影响。SiC的加入可以通过Orowan强化提高2A12铝合金的强度,碳纤维通过载荷传递来提高2A12铝合金的强度。

25 °C下体积分数为3%的SiC/2A12铝合金复合材料的力学性能最好,屈服强度和抗拉强度分别为391 MPa和533 MPa,高于2A12的相应值(354 MPa和481 MPa),分别提高了10.5%和10.8%;180 °C和220 °C下体积分数为5%的SiC/2A12铝合金/碳纤维复合材料的力学性能最好,其在180 °C和220 °C的屈服强度(381 MPa和348 MPa)相较于基

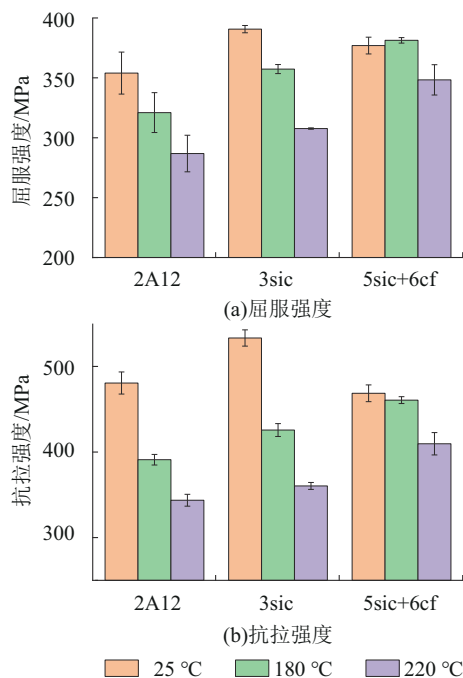


图9 2A12, 3sic和5sic+6cf复合材料的力学性能

Fig.9 Mechanical properties of 2A12, 3sic and 5sic+6cf composites

体(321 MPa和287 MPa)提高了18.7%和21.3%;抗拉强度(461 MPa和410 MPa)相较于基体(391 MPa和344 MPa)提高了17.9%和19.2%。高SiC含量的2A12铝合金复合材料中出现SiC团聚现象,导致其性能降低;加入碳纤维的高SiC含量的2A12铝合金/碳纤维复合材料中没有出现SiC团聚现象。

样品5sic+6cf在220 °C的屈服强度和抗拉强度(348 MPa和410 MPa)高于样品2A12在180 °C的屈服强度和抗拉强度(321 MPa和391 MPa),表明SiC和碳纤维的混合加入可使2A12铝合金的工作温度提高40 °C。SiC和SCFs的混合加入可以提高2A12铝合金在高温环境下的强度。因此,SiC/SCFs/2A12钻杆材料可应用于高温钻井。

参考文献(References):

- [1] 樊大磊,王宗礼,李剑,等.2023年国内外油气资源形势分析及展望[J].中国矿业,2024,33(1):30-37.
FAN Dalei, WANG Zongli, LI Jian, et al. Analysis of domestic and international oil and gas resources situation in 2023 and outlook[J]. China Mining Magazine, 2024,33(1):30-37.
- [2] 郭旭升.以关键核心技术突破带动我国深层、超深层油气勘探开发突破[J].能源,2022(9):46-50.
GUO Xusheng. Breakthroughs in deep and ultra-deep oil and gas

exploration and development in China driven by key core technology breakthroughs[J]. Energy, 2022(9):46-50.

- [3] 李剑,余源琦,高阳,等.中国陆上深层—超深层天然气勘探领域及潜力[J].中国石油勘探,2019,24(4):403-417.
LI Jian, SHE Yuanqi, GAO Yang, et al. Onshore deep and ultra-deep natural gas exploration fields and potentials in China [J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(4):403-417.
- [4] 李熙喆,郭振华,胡勇,等.中国超深层构造型大气田高效开发策略[J].石油勘探与开发,2018,45(1):111-118.
LI Xizhe, GUO Zhenhua, HU Yong, et al. Efficient development strategies for large ultra-deep structural gas fields in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45 (1) : 111-118.
- [5] 漆立新.塔里木盆地顺托果勒隆起奥陶系碳酸盐岩超深层油气突破及其意义[J].中国石油勘探,2016,21(3):38-51.
QI Lixin. Oil and gas breakthrough in ultra-deep Ordovician carbonate formations in Shuntuoguole uplift, Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2016,21(3):38-51.
- [6] 魏国齐,王志宏,李剑,等.四川盆地震旦系、寒武系烃源岩特征、资源潜力与勘探方向[J].天然气地球科学,2017,28(1):1-13.
WEI Guoqi, WANG Zhihong, LI Jian, et al. Characteristics of source rocks, resource potential and exploration direction of Sinian and Cambrian in Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2017,28(1):1-13.
- [7] 熊洪威,马银龙,张帅,等.玄武岩纤维增强铝基复合钻杆材料的制备研究[J].钻探工程,2021,48(3):140-145.
XIONG Hongwei, MA Yinlong, ZHANG Shuai, et al. Preparation of basalt fiber reinforced aluminum based composite material for drill pipes [J]. Drilling Engineering, 2021, 48 (3) : 140-145.
- [8] 梁健,赵杰,王成彪,等.基于COMSOL的铝合金钻杆腐蚀分析[J].钻探工程,2021,48(4):1-10.
LIANG Jian, ZHAO Jie, WANG Chengbiao, et al. Analysis of Aluminum alloy drill pipe corrosion based on COMSOL [J]. Drilling Engineering, 2021,48(4):1-10.
- [9] 白皓亮,刘宝昌,王如生,等.极地钻探用铝合金双壁钻杆结构强度的有限元分析及试验研究[J].钻探工程,2024,51(1):75-82.
BAI Haoliang, LIU Baochang, WANG Rusheng, et al. Finite element analysis and experimental study of aluminum alloy double-wall drill pipe for polar multi-process drilling [J]. Drilling Engineering, 2024,51(1):75-82.
- [10] 赵富胜.我国铝合金钻杆的应用前景展望[J].有色金属加工,2020,49(5):9-11,20.
ZHAO Fusheng. Application prospect of aluminum alloy drill pipe in China [J]. Nonferrous Metals Processing, 2020,49(5):9-11,20.
- [11] 李奎奎.铝合金材料及其热处理技术[M].北京:冶金工业出版社,2012.
LI Niankui. Aluminum Alloy Material and its Heat Treatment Technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
- [12] Guo J H, Li Y L, Chen R, et al. An investigation on constitutive model of aluminum alloy 2A12 by isothermal hot compression [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2021:

- 012045.
- [13] Liang M C, Chen L, Zhao G Q. Effects of artificial ageing on mechanical properties and precipitation of 2A12 Al sheet[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2020, 56(5):736-744.
- [14] Garay-Reyes C G, González-Rodelas L, Cuadros-Lugo E, et al. Evaluation of hardness and precipitation in Zn-modified Al2024 alloy after plastic deformation and heat treatments[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 705:1-8.
- [15] Jian H G, Xiao K M, Pai J, et al. Effect of deformation annealing on microstructure, texture and properties of 2a12 Aluminum alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2023, 52(10):3363-3373.
- [16] Zhang H J, Zhao X H, Liu Y. Effect of high frequency impact-ing and rolling on fatigue crack growth of 2A12 aluminum alloy welded joint[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 147: 106172.
- [17] Qi Z F, Chao Y J, Wang R C, et al. Effects of Fe and Ni on the microstructure and high temperature tensile properties of Al-Si aluminium alloys[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2510:012003.
- [18] Tabatabaei N, Zarei-Hanzaki A, Moshiri A, et al. The effect of heat treatment on the room and high temperature mechanical properties of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 23:6039-6053.
- [19] Razaghian A, Yu D, Chandra T. Fracture behaviour of a SiC-particle-reinforced aluminium alloy at high temperature[J]. *Composites Science and Technology*, 1998, 58(2):293-298.
- [20] Hao S M, Xie J P, Wang A Q, et al. Preparation, properties and microstructure of SiC particle reinforced Al-Si matrix composite[J]. *Materials Transactions*, 2014, 55(5):750-753.
- [21] Manohar G, Pandey K M, Maity S R. Aluminium (AA7075) metal matrix composite reinforced with B₄C nano particles and effect of individual alloying elements in Al fabricated by powder metallurgy techniques[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1451:012024.
- [22] Mohanavel V, Ravichandran M. Influence of AlN particles on microstructure, mechanical and tribological behaviour in AA6351 aluminum alloy [J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(10):106557.
- [23] Khelge S, Kumar V, Shetty V, et al. Effect of reinforcement particles on the mechanical and wear properties of aluminium alloy composites: review [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 52, Part 3:571-576.
- [24] Onoro J, Salvador M D, Cambronero L E G. High-temperature mechanical properties of aluminium alloys reinforced with boron carbide particles[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 499(1/2):421-426.
- [25] Božić D, Vilotijević M, Rajković V, et al. Mechanical and fracture behaviour of a SiC-Particle-Reinforced aluminum alloy at high temperature[J]. *Materials Science Forum*, 2005, 494: 487-492.
- [26] 汤健. 纳米 SiCp 增强 2014 铝基复合材料的组织与拉伸性能 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- TANG Jian. Microstructure and tensile properties of Al2014 matrix composites reinforced with nano-sized SiCp[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [27] Zhang C, Wu J H, Meng Q N, et al. The evolution of interfacial microstructure and fracture behavior of short carbon fiber reinforced 2024 Al composites at high temperature[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(17):3477.
- [28] Yuan M, Wu J H, Meng Q N, et al. The role of Al₄C₃ morphology in tensile properties of carbon fiber reinforced 2024 aluminum alloy during thermal exposure[J]. *Materials*, 2022, 15(24):8828.
- [29] Wu J H, Zhang C, Meng Q N, et al. Study on tensile properties of carbon fiber reinforced AA7075 composite at high temperatures [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 825:141931.
- [30] Nam D H, Cha S I, Lim B K, et al. Synergistic strengthening by load transfer mechanism and grain refinement of CNT/Al-Cu composites [J]. *Carbon*, 2012, 50(7): 2417-2423.
- [31] Zhang Z, Chen D L. Consideration of orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites: a model for predicting their yield strength[J]. *Scripta Materialia*, 2006, 54(7):1321-1326.
- [32] CHEN B, Shen J, Ye X, et al. Length effect of Carbon nanotubes on the strengthening mechanisms in metal matrix composites[J]. *Acta Materialia*, 2017, 140:317-325.
- [33] Kelly A, Tyson W R. Tensile properties of fibre-reinforced metals: copper/tungsten and copper/molybdenum [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1965, 13(6):329-338, in1-in2, 339-350.

(编辑 王跃伟)