

40%SiCp/Al复合材料热变形行为及热加工图

郝世明, 刘鹏茹, 庞晋安, 彭名卿, 吴浩展, 袁浩然

Hot deformation behavior and hot processing map of 40%SiCp/Al composites

HAO Shiming, LIU Pengru, PANG Jinan, PENG Mingqing, WU Haozhan, and YUAN Haoran

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2021080007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

SiC_p/Cu复合材料的研究进展

Research progress of SiC_p/Cu composites

粉末冶金技术. 2021, 39(2): 184–190

热等静压法制备大尺寸铝基碳化硼复合材料及性能研究

Fabrication and properties of large size aluminum-based boron carbide composites by hot isostatic pressing

粉末冶金技术. 2020, 38(2): 132–137

铝基体类型对铍铝复合材料均匀流变特征的影响

Effect of Al matrix type on the uniform flowability of beryllium–aluminum composites

粉末冶金技术. 2019, 37(5): 356–360

稀土元素Ce对Cu–Al₂O₃复合材料组织及性能的影响

Effect of rare earth Ce on the microstructure and properties of Cu–Al₂O₃ composites

粉末冶金技术. 2018, 36(3): 196–200, 216

挤压致密超细WC/纳米Al₂O₃弥散强化铜基复合材料的组织性能研究

Study on the microstructure and properties of dispersion–reinforced Cu–based composites by ultrafine WC and nano–sized Al₂O₃ particles via extrusion densification

粉末冶金技术. 2019, 37(6): 422–427

铝粉对Al₂O₃/MgO复合材料抗氧化性的影响

Effect of aluminum powders on the oxidation resistance of Al₂O₃–MgO composites

粉末冶金技术. 2019, 37(5): 367–372



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

40%SiCp/Al 复合材料热变形行为及热加工图

郝世明[✉], 刘鹏茹, 庞晋安, 彭名卿, 吴浩展, 袁浩然

河南科技大学物理工程学院, 洛阳 471023

[✉]通信作者, E-mail: haoshm@haust.edu.cn

摘要 采用 Glebble-1500D 热模拟试验机, 在 350~500 °C 变形温度、0.01~10.00 s⁻¹ 应变速率条件下进行等温压缩变形, 研究 40%SiCp/Al 复合材料 (体积分数) 的热加工性能。通过热变形真应力-真应变曲线分析复合材料的热变形规律, 建立材料本构方程, 利用动态材料模型计算出应变速率敏感指数和功率耗散效率系数, 绘制出功率耗散图、失稳图及二维加工图。结果表明, 应变速率和变形温度显著影响流变应力, 应变速率一定时, 变形温度升高, 流变应力减小; 在相同的变形温度下, 随应变速率的增加, 流变应力也随之升高。根据加工图可知, 在高温高应变速率条件下, 材料的功率耗散效率系数大, 说明该变形区域发生了组织转变; 应变对失稳区域和加工区域影响不大, 功率耗散效率系数随应变的增加而增大。40%SiCp/Al 复合材料建议热加工条件为变形温度 436~491 °C, 应变速率 0.04~9.97 s⁻¹。

关键词 SiCp/Al 复合材料; 热变形行为; 本构方程; 热加工图

分类号 GB331

Hot deformation behavior and hot processing map of 40%SiCp/Al composites

HAO Shiming[✉], LIU Pengru, PANG Jin'an, PENG Mingqing, WU Haozhan, YUAN Haoran

School of Physics and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China

[✉]Corresponding author, E-mail: haoshm@haust.edu.cn

ABSTRACT The hot workability of the 40%SiCp/Al composites (volume fraction) was studied by isothermal compression deformation on Glebble-1500D thermal simulated test machine at the deformation temperature of 350~500 °C under the strain rate of 0.01~10.00 s⁻¹. The thermal deformation of the composites was analyzed according to the true stress-strain curves, and the constitutive equation was established. The strain rate sensitivity index and power dissipation efficiency factor were calculated by dynamic material model, and the power dissipation diagram, instability diagram, and two-dimensional processing map were obtained. The results show that, the strain rate and deformation temperature significantly affect the flow stress. Under the same strain rate, the flow stress decreases with the increase of deformation temperature; at the same deformation temperature, the flow stress increases with the increase of strain rate. According to the processing map, the power dissipation efficiency factor is large under the condition of high temperature and high strain rate, illustrating the microstructure transformation in the deformation region. The strain has little effect on the instability region

收稿日期: 2021-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52171138); 河南省自然科学基金资助项目 (182300410260); 河南科技大学大学生研究训练计划资助项目 (2020185, 2021046)

DOI: 10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2021080007; <http://pmt.ustb.edu.cn>

and processing region, and the power dissipation efficiency factor increases with the increase of strain. The recommended hot working conditions for the composite is as the deformation temperature of 436~491 °C and the strain rate of 0.04~9.97 s⁻¹.

KEY WORDS SiCp/Al composites; hot deformation behavior; constitutive equations; hot processing map

近代科学技术,特别是航空航天技术的发展,对所用工程材料性能提出了更高要求,如更高的比强度和比刚度,传统单一金属材料较难满足服役性能要求^[1]。金属基复合材料既可保留金属材料的主要特性,又具有增强体的特性,有望满足高技术发展需求^[2]。

金属基复合材料的研究始于 20 世纪 60 年代初期,80 年代以来,美、日等国加大了对复合材料的研究开发,并采用粉末冶金法、熔铸技术、压力渗透技术等技术制备出性能优良的颗粒增强型铝基复合材料^[3-4]。SiCp/Al 复合材料由于轻质、高比强度、高比刚度、低热膨胀系数、良好的抗磨损等优点,被广泛用于航空航天、汽车、电子通讯、军事等领域。15%~20%SiCp/Al 复合材料(体积分数)作为结构材料被应用于承载飞机上的承力结构件与电子元器件^[5-6]。美国、日本、印度等国把 SiCp/Al 复合材料应用到汽车用连杆和缸套上^[7-9]。我国于 1981 年启动金属基复合材料研究,多种复合材料产品在尖端国防领域得到应用,随着军民技术一体化需求的急剧增长,对金属基复合材料的研究更加迫切。

复合材料在制备过程中需要二次加工变形,国内外学者对铝合金和低体积分数 SiCp/Al 复合材料的研究较多^[10-11]。Shao 等^[12]认为细小的 SiCp 和细小的 2024Al 粉末导致大量晶界的存在,使动态再结晶区域向低温和高应变速率区域移动,并且使得功率耗散效率系数的峰值减小。Rajamuthamil selvan 和 Ramanathan^[13]研究了 SiC 颗粒体积分数对复合材料热变形行为的影响,发现 SiC 颗粒含量增多对复合材料的再结晶有促进作用。

材料固有的加工性与材料的化学组成、变形条件和变形量有关^[14]。随着颗粒体积分数增加,加工难度增大,因此对中高体积分数(30%~60%)颗粒增强铝基复合材料热变形行为展开研究十分有意义。40%SiCp/Al 复合材料(体积分数)作为一种新的结构材料有着广阔的发展前景,虽可以进行挤压、轧制和锻造等传统的热塑性变形加工,但可加工性能显著下降,要实现产业化仍需做大量的研究。以动态材料模型为基础的加工图和热变形本构方程

是材料加工设计和优化的一种有效手段,已经得到了广泛应用^[15-16]。本文在不同变形条件下对 40%SiCp/Al 复合材料(体积分数)进行等温热压缩实验研究,分析材料的热加工变形行为特征,并找出影响规律,提出优化加工参数,为优化该复合材料的热加工工艺提供指导。

1 实验材料及方法

实验材料为碳化硅颗粒增强铝基复合材料(40%SiCp/Al,体积分数)。以平均直径 10 μm 的 2024Al 粉末为基体材料,增强体 SiC 颗粒粒径为 15 μm,通过球磨混粉、冷压和热压烧结而成,复合材料的微观组织如图 1 所示。利用线切割将烧结后的试样加工成 8 mm×12 mm 的热模拟试样,用于等温热压缩变形。采用圆柱体单向压缩法,变形设备为 Gleeble-1500D 热模拟机,加热速率为 10 °C/s,变形温度分别为 350、400、450 和 500 °C,应变速率分别为 0.01、0.10、1.00 和 10.00 s⁻¹。压缩变形终了立即水淬,以便保留高温微观组织。总压缩量达到应变值 0.7,即总变形程度为 50% 左右。在热变形过程中,在试样两端填充润滑剂以减少摩擦的影响。热模拟系统自动采集应力、应变、温度等数据。

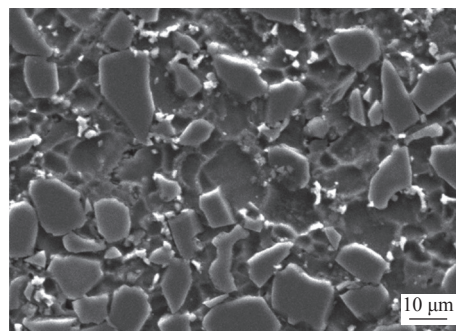


图 1 40%SiCp/Al 复合材料微观组织

Fig.1 Microstructure of the 40%SiCp/Al composites

2 结果及分析

2.1 真应力-应变曲线

图 2 为 40%SiCp/2024Al 复合材料热变形过程的真应力-应变曲线。由图可见,在热变形过程中,当应变超过一定值后,复合材料呈现稳态流变特征,

应变增加时真应力改变很小。在应变速率保持一定的情况下，随应变逐渐增加，流变应力先快速升高达到峰值，然后逐渐小幅下降，进入近似稳态流变状态。整体来看，稳态流变应力随变形温度升高而逐渐减小。在变形温度一定时，流变应力随应变速率的增大而增大，表明该复合材料有正的应变速率

敏感性，即应变速率越大，复合材料实现稳态变形就越困难。图 2 (d) 中显示复合材料在高应变速率变形时，应力-应变曲线上出现明显的连续波浪峰，表现出应力不连续屈服现象，这可能是由于材料发生动态再结晶和动态失效或者局部流变而引起的。

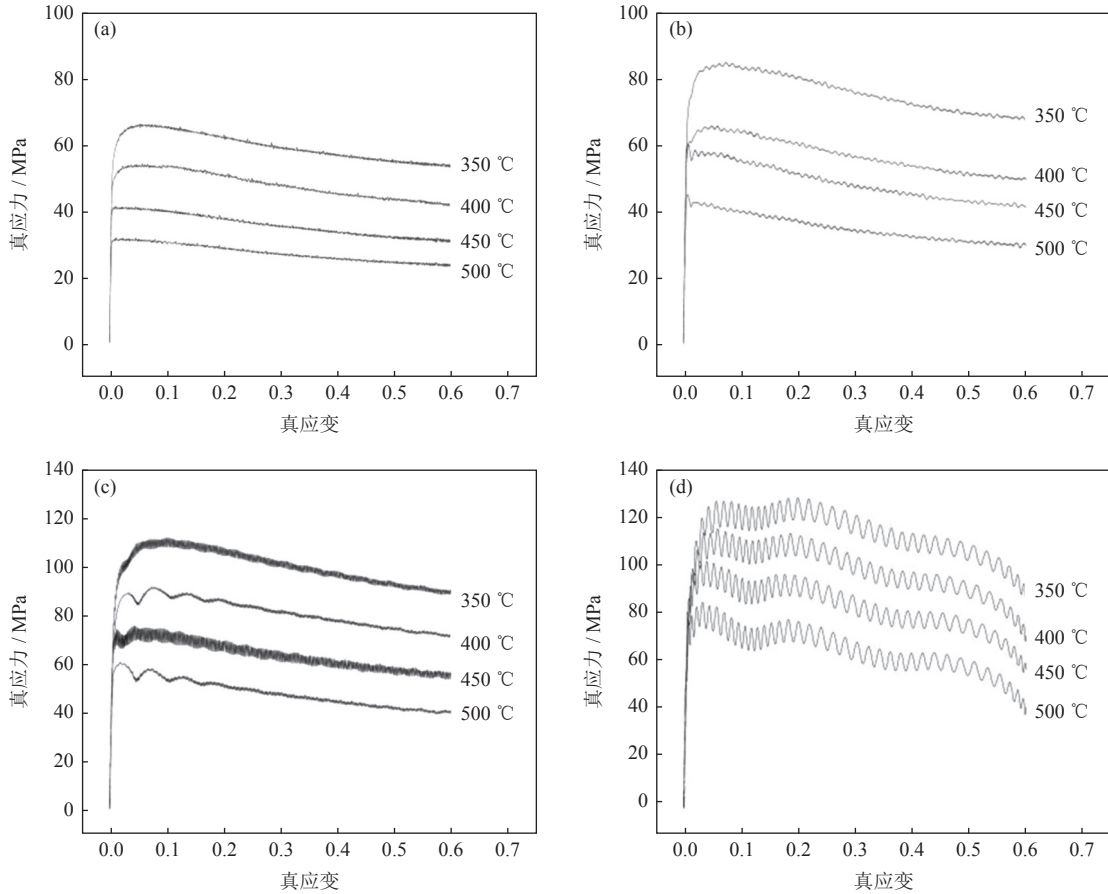


图 2 不同应变速率下 40%SiCp/Al 复合材料的真应力-应变曲线：(a) 0.01 s⁻¹；(b) 0.10 s⁻¹；(c) 1.00 s⁻¹；(d) 10.00 s⁻¹
 Fig.2 True stress-strain curves of the 40%SiCp/Al composites at different strain rates: (a) 0.01 s⁻¹；(b) 0.10 s⁻¹；(c) 1.00 s⁻¹；(d) 10.00 s⁻¹

2.2 构建复合材料本构方程

基于模拟系统自动采集的应力、应变、温度等数据建立本构方程。当应力较低时如式 (1) 所示，当应力较高时如式 (2) 所示。

$$\dot{\epsilon} = A_1 \exp(\beta\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} = A_2 \sigma^{n_1} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

式中： $\dot{\epsilon}$ 为应变速率，s⁻¹； σ 为流变应力，MPa； ϵ 为应变； A_1 、 A_2 、 n_1 、 β 为材料常数； Q 为变形激活能，kJ·mol⁻¹； R 为气体常数； T 为变形温度，K。

Sellars 和 Tegart 提出式 (3) 适用于所有应力。Zener 和 Hollomon 为更好地描述材料的热加工行为

提出了 Zener-Hollomon 参数 (Z 参数)，如式 (4) 所示。

$$\dot{\epsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (3)$$

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (4)$$

式中： A 、 α 、 n 为材料常数。

为求解热变形激活能 (Q)，可以对式 (1) ~ 式 (3) 同时取对数，绘制线性方程。在高应力水平下，如式 (5) 所示，在低应力水平下，如式 (6) 所示，对所有应力水平，如式 (7) 所示。

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_1 + \beta\sigma - Q/(RT) \quad (5)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_2 + n_1 \ln \sigma - Q/(RT) \quad (6)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A - Q/(RT) + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \quad (7)$$

对式 (3) 求偏导可得式 (8)。为了求解本构方程, 需求得材料常数 n_1 、 n 、 β 、 M 值, 其中 $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln \sigma$ 拟合曲线斜率是 n_1 值, $\ln \dot{\epsilon}$ - σ 拟合曲线斜率是 β 值, $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ - $1/T$ 斜率是 M 值, $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 斜率平均值是 n 值。

$$Q = R \{ \partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)] / \partial (1/T) \} \cdot \{ \partial \ln \dot{\epsilon} / \partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \}_T = RnM \quad (8)$$

将不同变形条件下峰值应力 (σ_p , MPa) 以及对应的 $\dot{\epsilon}$ 带入式 (5) ~ 式 (7), 可以绘制图 3 ~ 图 5, 图中直线斜率的平均值即为本构方程中所求材料常数值, 即 M 、 n_1 、 n 、 β , 其中 $\alpha = \beta/n_1$

将得到的 n 和 M 数据代入式 (4) 和式 (8), 可以求得不同真应力的 Q 值和 Z 值, 再由 $\ln Z$ - $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 曲线计算得到截距 $\ln A$ 值, 如图 6 和表 1 所示。

根据表 1 可知复合材料常数的求解结果, 将其代入式 (3) 和式 (4) 式可得本构方程。真应变

为 0.1 时, 变形激活能 $Q=157.288 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, 应力指数 $n=6.56$, 应力水平参数 $\alpha=0.0154 \text{ MPa}^{-1}$, 结构因子 $A=4.46 \times 10^{10}$ 。将上述材料参数代入式 (3) 和式 (4), 可得复合材料在真应力为 0.1 时的本构方程, 如式 (9) 所示。

$$\begin{cases} \dot{\epsilon} = 4.46 \times 10^{10} [\sinh(0.0154\sigma)]^{6.56} \exp\left(-\frac{157.288}{RT}\right) \\ Z = 4.46 \times 10^{10} [\sinh(0.0154\sigma)]^{6.56} \end{cases} \quad (9)$$

真应变为 0.3 时, 变形激活能 $Q=157.903 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, 应力指数 $n=6.14$, 应力水平参数 $\alpha=0.0162 \text{ MPa}^{-1}$, 结构因子 $A=7.04 \times 10^{10}$ 。将上述材料参数代入式 (3) 和式 (4), 可得复合材料在真应力为 0.3 时的本构方程, 如式 (10) 所示。

$$\begin{cases} \dot{\epsilon} = 7.04 \times 10^{10} [\sinh(0.0162\sigma)]^{6.14} \exp\left(-\frac{157.903}{RT}\right) \\ Z = 7.04 \times 10^{10} [\sinh(0.0162\sigma)]^{6.14} \end{cases} \quad (10)$$

真应变为 0.5 时, 变形激活能 $Q=157.273 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, 应力指数 $n=6.60$, 应力水平参数 $\alpha=0.0152 \text{ MPa}^{-1}$, 结构因子 $A=4.95 \times 10^{10}$ 。将上述材料参数代入式 (3)

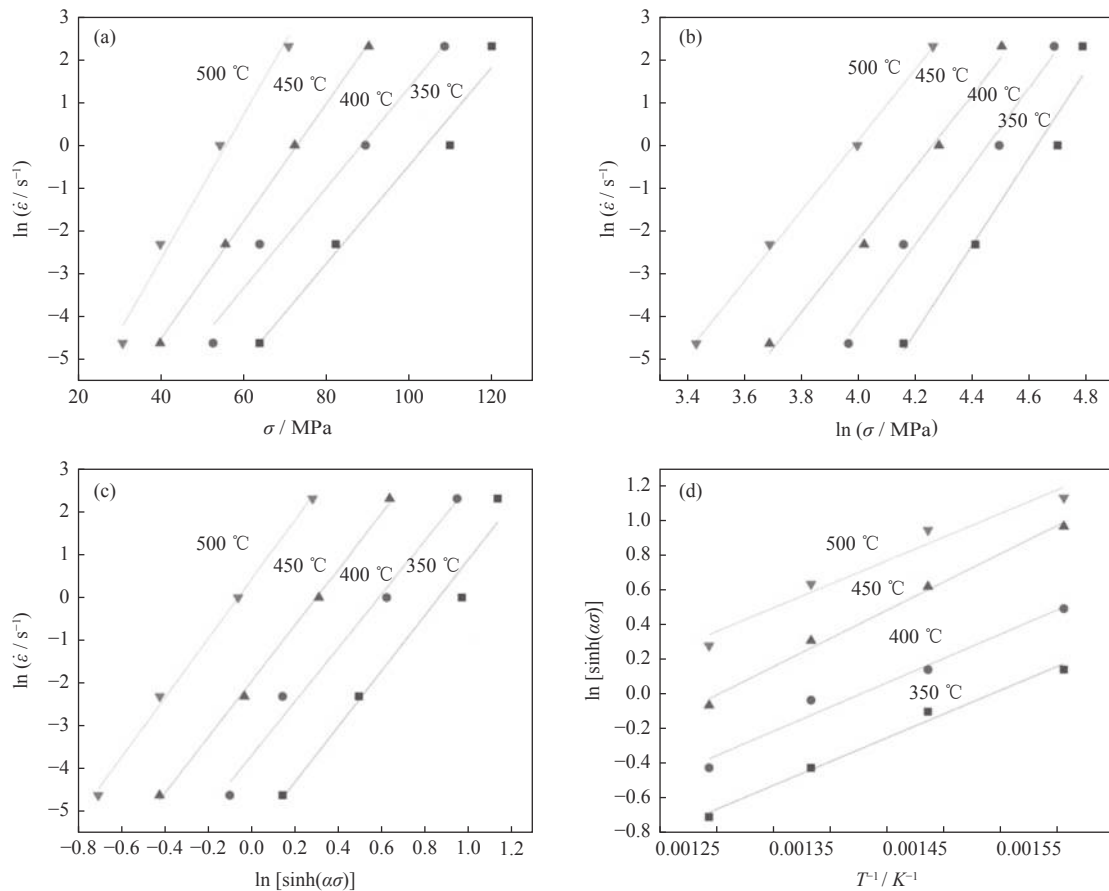


图 3 真应变为 0.1 时应力、应变速率和温度关系: (a) $\ln \dot{\epsilon}$ - σ ; (b) $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln \sigma$; (c) $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$; (d) $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ - $1/T$

Fig.3 Relationship between stress, stress rate, and temperature at true strain of 0.1: (a) $\ln \dot{\epsilon}$ - σ ; (b) $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln \sigma$; (c) $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$; (d) $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ - $1/T$

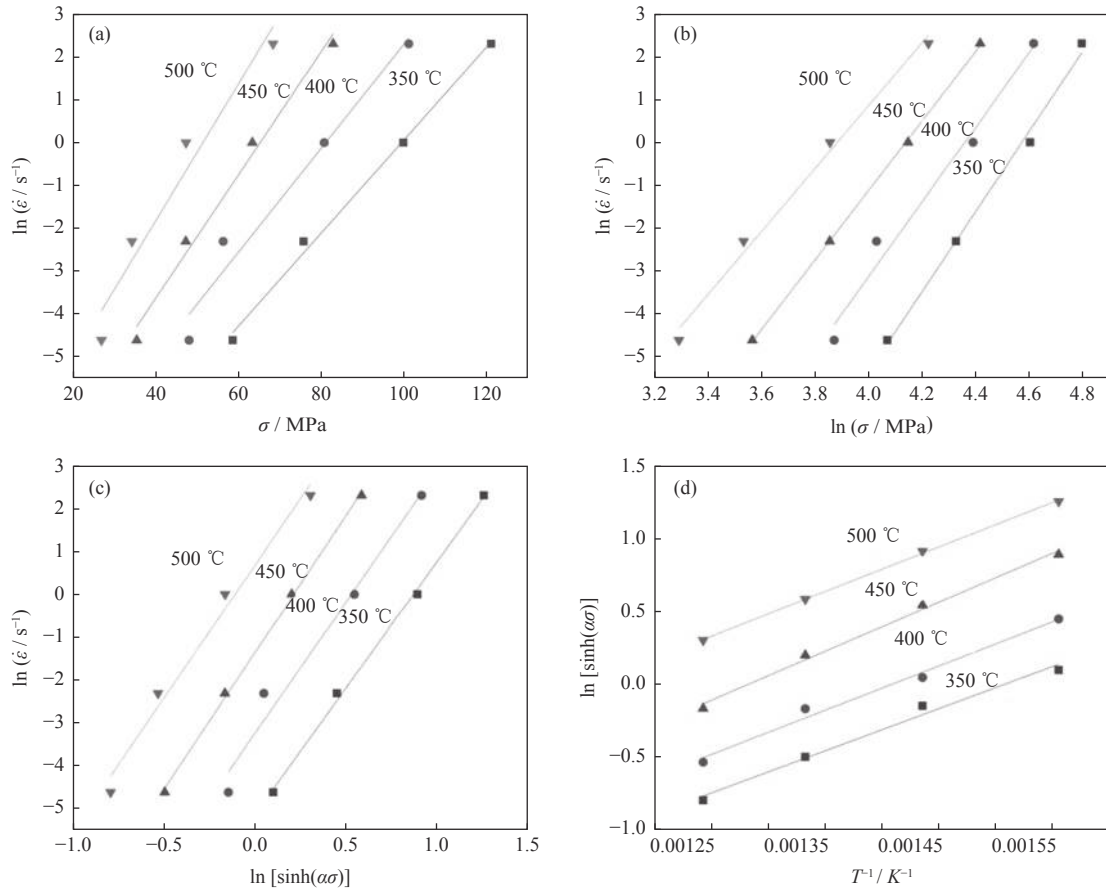


图 4 真应变为 0.3 时应力、应变速率和温度关系: (a) $\ln \dot{\epsilon}-\sigma$; (b) $\ln \dot{\epsilon}-\ln \sigma$; (c) $\ln \dot{\epsilon}-\ln [\sinh (\alpha \sigma)]$; (d) $\ln [\sinh (\alpha \sigma)]-1 / T$

Fig.4 Relationship between stress, stress rate, and temperature at true strain of 0.3: (a) $\ln \dot{\epsilon}-\sigma$; (b) $\ln \dot{\epsilon}-\ln \sigma$; (c) $\ln \dot{\epsilon}-\ln [\sinh (\alpha \sigma)]$; (d) $\ln [\sinh (\alpha \sigma)]-1 / T$

和式 (4), 可得复合材料在真应力为 0.5 时的本构方程, 如式 (11) 所示。

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}=4.95 \times 10^{10}[\sinh (0.0152 \sigma)]^{6.60} \exp \left(-\frac{157.273}{R T}\right) \\ Z=4.95 \times 10^{10}[\sinh (0.0152 \sigma)]^{6.60} \end{cases} \quad (11)$$

复合材料热变形时应力的计算值与实验值如图 7 所示。由图可知, 计算值与实验值比较接近, 证明本构方程能较好地描述本复合材料的热变形力学行为。如图所示, 不同应变条件下的变形激活能变化不大, 复合材料变形激活能通常与变形抗力的变化相关, 说明变形量增加时, 变形抗力变化不大。

2.3 二维加工图

动态材料模型将复合材料的热加工过程看作一个消耗能量过程。如式 (12) 所示, 输入功率 (p) 的耗散来源于两个方面: 由材料塑性变形引起的耗散量 (G) 和由组织变化引起的功率耗散 (J), 其动态本构方程如式 (13) 所示。由式 (12) 和式 (13) 可得到式 (14) 和式 (15)。

$$p=\sigma \dot{\epsilon}=G+J=\int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d \dot{\epsilon}+\int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d \sigma \quad (12)$$

$$\sigma=K \dot{\epsilon} \quad (13)$$

$$J=p-G=\sigma \dot{\epsilon}-\int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d \dot{\epsilon} \quad (14)$$

$$J=\sigma \dot{\epsilon}-\int_0^{\dot{\epsilon}} K \dot{\epsilon}^m d \dot{\epsilon}=\frac{m}{m+1} \sigma \dot{\epsilon} \quad (15)$$

式中: m 为材料的应变速率敏感指数。材料处于理想耗散状态时, $m=1$, J 达到最大值, 如式 (16) 所示。此时引入功率耗散效率系数 (η), 如式 (17) 所示, 可以看出功率耗散效率系数与应变速率敏感指数直接相关。

$$J_{\max }=J(m=1)=\sigma \dot{\epsilon} / 2 \quad (16)$$

$$\eta=\frac{J}{J_{\max }}=\frac{2 m}{m+1} \quad (17)$$

在应变速率和温度所构成的二维平面上绘出等功率耗散效率系数曲线即为功率耗散图。按照动态材料模型原理及 Prasad 失稳判断准则, 耗散函数同应变速率满足式 (18), 将式 (17) 代入可最终化简得到式 (19)。

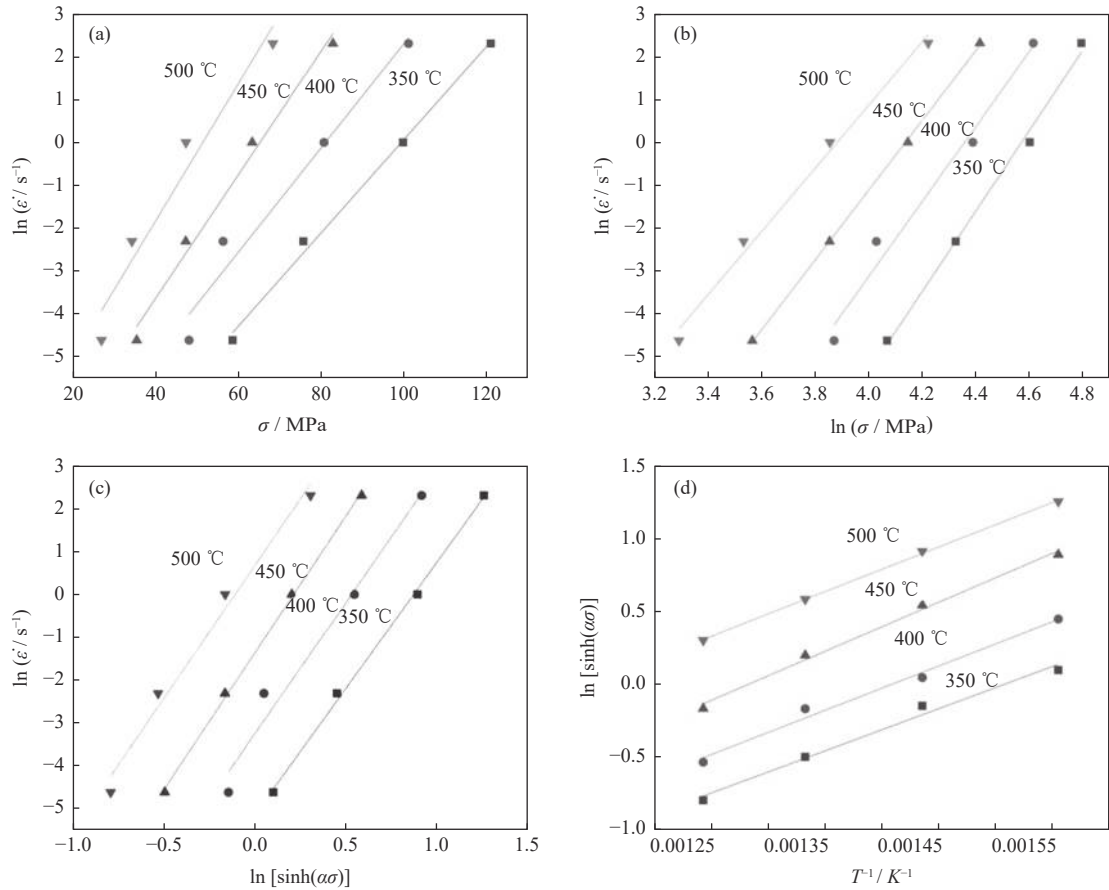


图 5 真应变为 0.5 时应力、应变速率和温度关系: (a) $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$; (b) $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$; (c) $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$; (d) $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$
Fig.5 Relationship between stress, stress rate, and temperature at true strain of 0.5: (a) $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$; (b) $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$; (c) $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$; (d) $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$

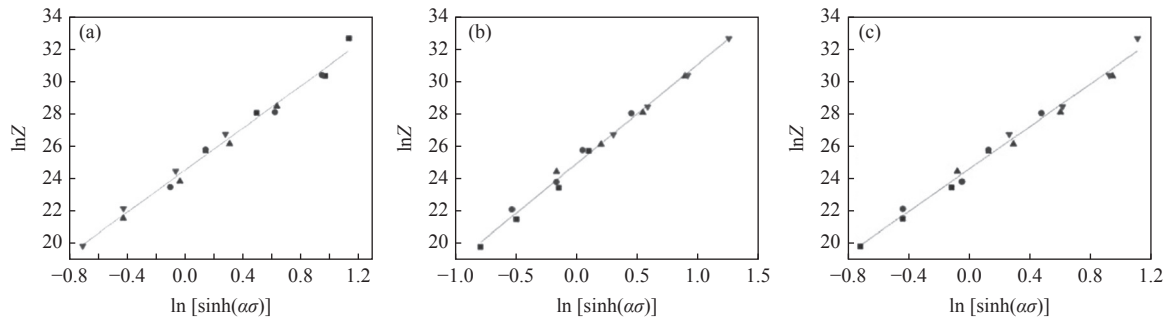


图 6 不同真应变线下 $\ln Z$ 与 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系: (a) 0.1; (b) 0.3; (c) 0.5
Fig.6 Relationship between $\ln Z$ and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ at the different true strain: (a) 0.1; (b) 0.3; (c) 0.5

表 1 不同应变时材料常数计算结果

Table 1 Calculation results of the material constants at the different strains

ϵ	β	n_1	n	M	α / MPa^{-1}	$\ln A$	$Q / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$
0.1	0.134408	8.973713	6.656257	2882.649	0.015438	24.52115	157.288
0.3	0.133552	8.387507	6.149667	3088.224	0.016263	24.97749	157.903
0.5	0.134407	8.973715	6.601892	2865.210	0.015245	24.62439	157.273

$$\frac{dJ}{d\dot{\epsilon}} < \frac{J}{\dot{\epsilon}}$$

$$(18) \quad \frac{\partial \ln\left(\frac{m}{m+1}\right)}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m < 0$$

$$(19)$$

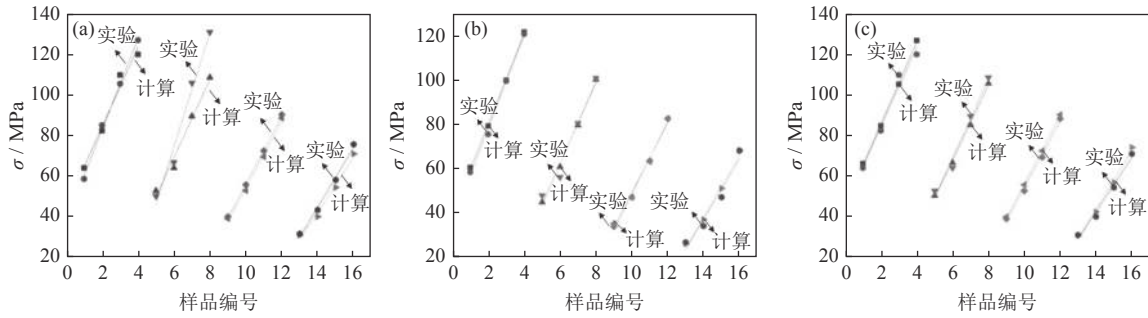


图 7 不同真应变下实验值与计算值分析与对比: (a) 0.1; (b) 0.3; (c) 0.5

Fig.7 Analysis and comparison of the experimental and calculated values at the different true strain: (a) 0.1; (b) 0.3; (c) 0.5

此处定义材料的流变失稳条件 ($\xi(\dot{\epsilon})$) 如式 (20) 所示, 可以看到失稳条件与应变速率敏感指数有关。

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln\left(\frac{m}{m+1}\right)}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m < 0 \quad (20)$$

真应变为 0.1, 0.3 和 0.5 时的功率耗散图、失稳图及二维加工图分别如图 8、图 9、图 10 所示。从图 8 (a) 可知, 应变为 0.1 时, 功率耗散效率系数在 365~420 °C 区域最大, 约为 0.21; 从图 9 (a) 可知, 应变为 0.3 时, 功率耗散效率系数在 377~420 °C 区域最大, 约为 0.22; 从

图 10 (a) 可知, 应变为 0.5 时, 功率耗散效率系数在 379~420 °C 区域最大, 约为 0.27。在功率耗散效率系数最大区域很可能发生了组织转变。从图 8 (b) 可知, 应变为 0.1 时, 失稳区域主要为温度 350~430 °C, 应变速率为 0.03~9.97 s⁻¹; 从图 9 (b) 可知, 应变为 0.3 时, 失稳区域主要为温度 350~432 °C, 应变速率为 0.04~9.97 s⁻¹; 从图 10 (b) 可知, 应变为 0.5 时, 失稳区域主要为温度 350~439 °C, 应变速率为 0.03~9.97 s⁻¹。从图 8 (c) 可知, 温度 433~490 °C、应变速率 0.03~9.97 s⁻¹ 是该应变下最理想的加工区域; 从图 9 (c) 可知, 温度 436~490 °C、应变速率

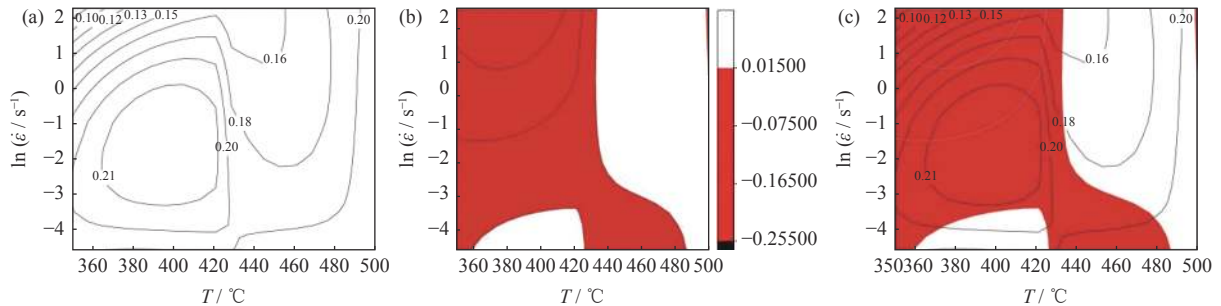


图 8 应变为 0.1 时复合材料功率耗散图 (a)、失稳图 (b) 和二维加工图 (c)

Fig.8 Power dissipation diagram (a), instability diagram (b), and two-dimensional processing map (c) of the composites at the strain of 0.1

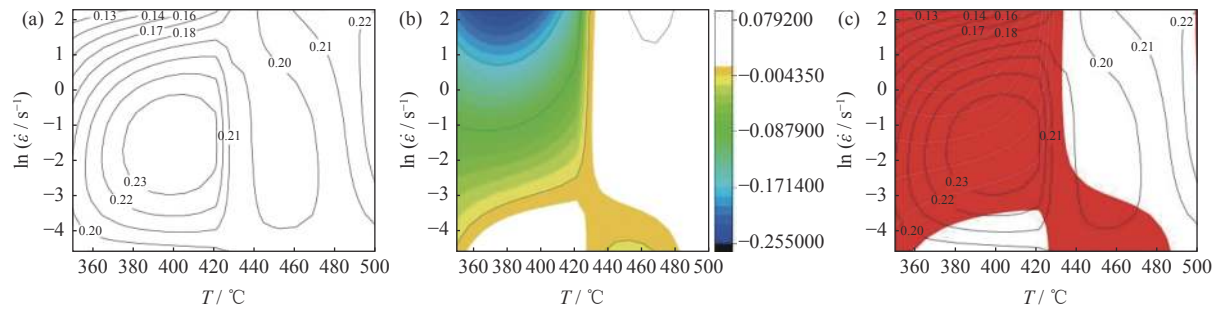


图 9 应变为 0.3 时复合材料功率耗散图 (a)、失稳图 (b) 和二维加工图 (c)

Fig.9 Power dissipation diagram (a), instability diagram (b), and two-dimensional processing map (c) of the composites at the strain of 0.3

$0.04 \sim 9.97 \text{ s}^{-1}$ 是该应变下最理想的加工区域; 从图 10 (c) 可知, 温度 $440 \sim 492 \text{ }^\circ\text{C}$ 、应变速率 $0.04 \sim 9.97 \text{ s}^{-1}$ 是该应变下最理想的加工区域。由此可知, 在同一应变速率下, 随温度的升高, 功率耗

散效率系数先增大后减小再增大。在 $350 \sim 430 \text{ }^\circ\text{C}$, 功率耗散效率系数随应变速率的增大先增大后减小; 在 $430 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$, 功率耗散效率系数随应变速率的增大而增大。

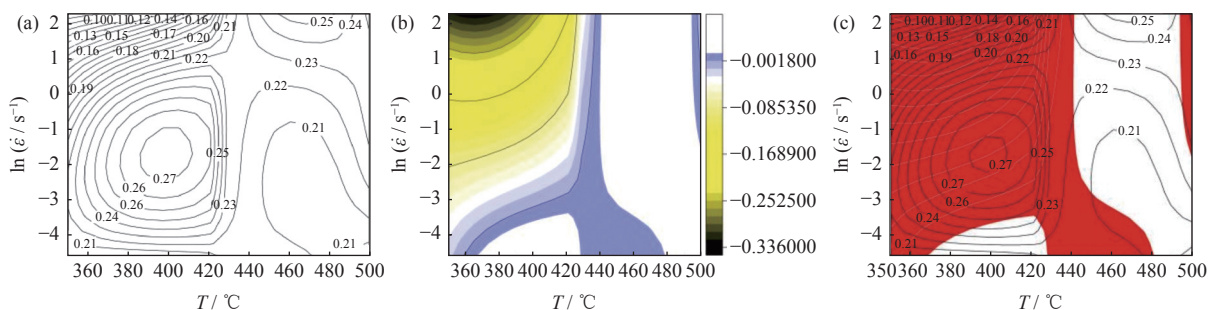


图 10 应变为 0.5 时复合材料功率耗散图 (a)、失稳图 (b) 和二维加工图 (c)

Fig.10 Power dissipation diagram (a), instability diagram (b), and two-dimensional processing map (c) of the composites at the strain of 0.5

由图 8 (a)、图 9 (a) 和图 10 (a) 可以看出, 功率耗散效率系数随应变的增加而增大。由图 8 (b)、图 9 (b)、图 10 (b) 可以看出应变对失稳区域影响不大。由图 8 (c)、图 9 (c)、图 10 (c) 可以看出应变对理想加工区域影响不大。

3 结论

(1) 40%SiCp/Al 复合材料应变速率和变形温度对流变应力有明显的影 响, 应变速率越大, 变形温度越低, 复合材料越难于达到稳态变形。

(2) 40%SiCp/Al 复合材料应变速率增大, 流变应力升高; 变形温度升高, 流变应力降低。热压缩变形时的流变行为可采用 Zener-Hollomon 参数的双曲正弦形式来描述。

(3) 应变 (真应变从 0.1 到 0.5) 对变形激活能影响不大, 变形量增加, 受到的变形抗力基本不变。

(4) 在变形过程中, SiCp/Al 复合材料容易发生破坏的区域主要分布在中低温范围。应变变化对失稳区域影响不大。复合材料能够稳定变形的区域在中高温、低应变速率区, 建议最佳加工区域温度为 $436 \sim 491 \text{ }^\circ\text{C}$, 应变速率为 $0.04 \sim 9.97 \text{ s}^{-1}$ 。

参 考 文 献

[1] Zheng J, Jia Z H, Ma G. Progress in research of SiC particle reinforced Al-based composites. *Titanium Ind Prog*, 2006, 23(6): 13 (郑晶, 贾志华, 马光. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料的研究进展. 钛工业进展, 2006, 23(6): 13)

[2] Wang Y, Liu X D. Present status and development trend of SiCp/Al composites. *Foundry Equip Technol*, 2003(3): 20

(王莹, 刘向东. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料的现状及发展趋势. 铸造设备研究, 2003(3): 20)

[3] Liu Y, Li L, Li C Y, et al. Research progress on high-strength and high-conductivity Al-graphene composites. *Powder Metall Technol*, 2021, 39(4): 358 (刘洋, 李雷, 历长云, 等. 高强高导铝-石墨烯复合材料研究进展. 粉末冶金技术, 2021, 39(4): 358)

[4] Zhou Y H. Main preparation processes and research status of SiC particle reinforced aluminum matrix composites. *Tool Eng*, 2017, 51(4): 7 (周艳华. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料主要制备技术. 工具技术, 2017, 51(4): 7)

[5] Wang M, Guo D, Ding C F, et al. Research progress of machining of SiC particle reinforced aluminum matrix composites. *Dev Innov Mach Electr Prod*, 2016, 29(6): 76 (王明, 郭丹, 丁成富, 等. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料加工研究进展. 机电产品开发与创新, 2016, 29(6): 76)

[6] Wei S H, Nie J H, Liu Y Q, et al. Effect of isothermal forging on fracture toughness of SiC particle reinforced aluminum matrix composites. *Rare Met Mater Eng*, 2017, 46(11): 3464 (魏少华, 聂俊辉, 刘彦强, 等. 等温锻造对碳化硅颗粒增强铝基复合材料断裂韧性的影响. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(11): 3464)

[7] Gui M C, Wang D B, Wu J J, et al. Microstructure and mechanical properties of cast (Al-Si)/SiCp composites produced by liquid and semisolid double stirring process. *Mater Sci Technol*, 2013, 16(5): 556

[8] Cui Y, Geng L, Yao Z K, et al. A new advance in the development of high-performance SiCp/Al composite. *J Mater Sci Technol*, 1997(3): 227

[9] Wu G H, Kuang Z Y. Opportunities and challenges for metal matrix composites in the context of equipment upgrading. *Strategic Study CAE*, 2020, 22(2): 79 (武高辉, 匡泽洋. 装备升级换代背景下金属基复合材料的发展机遇和挑战. 中国工程科学, 2020, 22(2): 79)

[10] Rawal S P. Metal-matrix composites for space applications. *JOM*, 2001, 53(4): 14

3 结论

(1) 基于通用有效介质方程建立了 Mo-ZrO₂、Mo-SiO₂ 和 Mo-Al₂O₃ 金属陶瓷电导率与组分关系的电导率模型, 其中 ZrO₂、SiO₂、Al₂O₃ 氧化物临界体积分数分别为 0.249, 0.095 和 0.145, 临界指数分别为 2.52, 3.20 和 2.90。电导率模型计算结果与实验结果吻合程度较好。

(2) 金属陶瓷电导率随着温度的升高而发生明显变化, 当陶瓷相体积分数较低时, 呈现电子电导的温阻特性; 当陶瓷相体积分数较高时, 呈现离子电导的温阻特性。金属钼-氧化物金属陶瓷高温导体材料中氧化物体积分数不宜超过 0.6。

(3) ZrO₂、SiO₂、Al₂O₃ 等三种氧化物形成的金属钼-氧化物金属陶瓷的导电性能相差无几。金属陶瓷的相对电导率对孔隙度比较敏感, 随着相对密度的降低而急剧减小, 相对密度以大于 0.95 为宜。

参考文献

- [1] Xiong Z, Jiang W, Shi Y, et al. Evaluation of high-temperature strength of Mo/PSZ composites by modified small punch tests. *Mater Trans*, 2005, 46(3): 631
 - [2] Guo Y L, Tang L, Zhang J Y. Sintering, microstructure, and electrical conductivity of zirconia-molybdenum cermet. *J Mater Eng Perform*, 2015, 24(8): 3180
 - [3] Zhang D D, Nie F, Wei S Z, et al. Influence of process control agent on the refinement of Al₂O₃/Mo composite powder. *Powder Metall Technol*, 2011, 29(6): 403
(张丹丹, 倪锋, 魏世忠, 等. 过程控制剂对 Al₂O₃/Mo 复合粉末细化的影响. 粉末冶金技术, 2011, 29(6): 403)
 - [4] Kats M, Byl'kova Z I, Bogin N, et al. Thermal conductivity of lamellar metal/cermet composite materials based on ZrO₂-Mo and Mo. *Poroshk Metall*, 1985, 266(2): 61
 - [5] Wang Q, Guo C, Liu Y X. Research on metal-ceramic die material used for robot cover. *Powder Metall Technol*, 2020, 38(3): 357
(王强, 郭超, 刘永兴. 机器人覆盖件用金属陶瓷模具材料的研究. 粉末冶金技术, 2020, 38(3): 357)
 - [6] Martinelli J R, Sene F F. Electrical resistivity of ceramic-metal composite materials: application in crucibles for induction furnaces. *Ceram Int*, 2000, 26(3): 325
 - [7] McLachlan D S, Blaszkiewicz M. Electric resistivity of composites. *J Am Ceram Soc*, 1990, 73(8): 2187
 - [8] Tchmutin I, Ponomarenko A, Krinichnaya E, et al. Electrical properties of composites based on conjugated polymers and conductive fillers. *Carbon*, 2003, 41: 1391
 - [9] Wang L S. *Special Ceramic*. Changsha: Central South University Press, 1994
(王零森. 特种陶瓷. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994)
 - [10] Muccillo E N S, Kleitz M. Impedance spectroscopy of Mg-partially stabilized zirconia and cubic phase decomposition. *J Eur Ceram Soc*, 1996, 16(4): 453
 - [11] Peters D W, Feinstein L, Peltzer C. On the high-temperature electrical conductivity of alumina. *J Chem Phys*, 1965, 42(7): 2345
 - [12] Seemann H E. The thermal and electrical conductivity of fused quartz as a function of temperature. *Phys Rev*, 1928, 31(1): 119
 - [13] Ishibashi H, Tobimatsu H, Hayashi K, et al. Characterization of Mo-SiO₂ functionally graded materials. *Metall Mater Trans A*, 2000, 31(1): 299
 - [14] Egorov F F. Electrical conductivity of ZrN-Al₂O₃, Mo-Al₂O₃, and ZrN-Mo composite powders. *Sov Powder Metall Met Ceram*, 1980, 19(10): 705
 - [15] Zhao H. Research and development on the sintering techniques of molybdenum and molybdenum alloys. *Powder Metall Technol*, 2019, 37(5): 382
(赵虎. 钼及钼合金烧结技术研究及发展. 粉末冶金技术, 2019, 37(5): 382)
 - [16] Mizusaki J, Tsuchiya S, Waragi K, et al. Simple mathematical model for the electrical conductivity of highly porous ceramics. *J Am Ceram Soc*, 1996, 79(1): 109
-
- (上接第 571 页)
- [11] Miracle D B. Metal matrix composites from science to technological significance. *Compos Sci Technol*, 2005, 65(15-16): 2526
 - [12] Shao J C, Xiao B L, Wang Q Z, et al. Constitutive flow behavior and hot workability of powder metallurgy processed 20vol.% SiCp/2024Al composite. *Mater Sci Eng A*, 2010, 527(29): 7865
 - [13] Rajamuthamil selvan M, Ramanathan S. Effect of silicon carbide volume fraction on the hot workability of 7075 aluminium-based metal-matrix composites. *Int J Adv Manuf Technol*, 2013, 67(5-8): 1711
 - [14] Ghazani M S, Eghbali B. Strain hardening behavior, strain rate sensitivity and hot deformation maps of AISI 321 austenitic stainless steel. *Int J Miner Metall Mater*, 2021, 28(11): 1799
 - [15] Sivakesavam O, Prasad Y V R K. Hot deformation behaviour of as-cast Mg-2Zn-1Mn alloy in compression: a study with processing map. *Mater Sci Eng A*, 2003, 362(1-2): 118
 - [16] Xiao B L, Huang Z Z, Ma K, et al. Research on hot deformation behaviors of discontinuously reinforced aluminum composites. *Acta Metall Sin*, 2019, 55(1): 59