

应变率和温度对 TC4_网/Al 复合材料动态压缩性能的影响规律

侯丽丽¹, 郭强², 要玉宏³, 刘江南³

- (1. 陕西工业职业技术学院, 陕西 咸阳 712000)
(2. 西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710018)
(3. 西安工业大学, 陕西 西安 710021)

摘要: 以 TC4 钛合金纤维为增强体, 5A06 铝合金为基体, 采用压力浸渗法制备二维连续纤维网增强铝基复合材料(TC4_网/Al)。利用万能材料试验机和分离式霍普金森压杆对 TC4_网/Al 复合材料分别进行准静态压缩和动态压缩, 研究复合材料在室温和高温下的压缩性能。结果表明: 该复合材料不论在室温还是高温均表现为正向应变率效应。对复合材料进行准静态压缩(应变率 $\leq 1 \text{ s}^{-1}$), 当试验温度 $\leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 试样均沿与轴向约呈 45° 方向的斜面发生破坏; 试验温度 $\geq 250 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 试样没有破坏而发生鼓肚变形。动态压缩(应变率为 1500 s^{-1})时, 无论在室温还是高温下, 该复合材料均未发生破坏。

关键词: TC4_网/Al 复合材料; 应变率; 压缩性能

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2023)01-010-06

Effect of Strain Rate and Temperature on Dynamic Compressive Properties of TC4_{Mesh}/Al Composite

Hou Lili¹, Guo Qiang², Yao Yuhong³, Liu Jiangnan³

- (1. Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang 712000, China)
(2. Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China)
(3. Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Two-dimensional continuous fiber mesh reinforced aluminum matrix composites (TC4_{Mesh}/Al) were prepared by pressure infiltration with TC4 titanium alloy fiber as reinforcement and 5A06 aluminum alloy as matrix. The quasi-static compression and dynamic compression of TC4_{Mesh}/Al composites were carried out by the universal material testing machine and split Hopkinson compression bar (SPHB) respectively, and the compression properties of the composite at room temperature and high temperature were studied. The results show that the composites exhibit positive strain rate effect at both room temperature and high temperature. Under quasi-static compression (strain rate less than 1 s^{-1}), when the compression temperature is lower than $100 \text{ }^\circ\text{C}$, the composites destroyed along the inclined plane which is approximately 45° to the axial direction. When the compression temperature is higher than $250 \text{ }^\circ\text{C}$, the specimen is not damaged and bulging deformation occurs. Under dynamic compression (the strain rate is 1500 s^{-1}), the composite is not damaged at room temperature or high temperature.

Key words: TC4_{Mesh}/Al composite; strain rate; compression performance

铝合金作为航空航天中使用最为广泛的材料之一, 在空间碎片防护设计上具有重要意义^[1]。然而,

由于铝合金的硬度和模量较低, 作为缓冲屏时对超高速撞击物体的破碎能力有限, 因此, 需要研发新型防护材料以弥补铝合金材料防护能力的不足。与铝合金相比, 铝基复合材料以其高的比强度、比模量、流变强度及良好的尺寸稳定性等优点, 在防护

收稿日期: 2022-07-06

基金项目: 陕西省科技重大专项(2020ZDZX04-04-01)

通信作者: 侯丽丽(1983—), 女, 讲师。

材料应用方面具有很大的潜力。

TC4 钛合金纤维具有高强高塑性的特点, 作为铝基复合材料增强体时, 在提高强度的同时, 可使复合材料具有较好的塑性。同时, TC4 钛合金纤维密度较低, 可以满足防护材料轻质的要求^[2-4]。

铝基复合材料在高速载荷作用下的动态响应行为与低速载荷下的静态响应行为完全不同。近年来, 有关铝基复合材料在动态力学性能方面的研究主要集中在室温压缩性能方面^[5-9], 对于高温和高应变动态性能的研究较少, 但在航空航天应用中, 铝基复合材料往往处于动态及高温环境下, 故研究应变率和温度对铝基复合材料动态压缩性能的影响规律尤为重要。

基于以上原因, 选择 5A06 铝合金作为基体, TC4 钛合金纤维网为增强体, 在温度为 25 ~ 550 °C, 应变率分别为 0.001、1、1500 s⁻¹ 下, 对二维连续纤维网增强铝基复合材料的压缩性能进行研究, 从而掌握应变率、温度对复合材料压缩性能的影响规律。

1 实验

1.1 实验材料

选用 TC4 钛合金纤维作为增强体, 航空工业常用的 5A06 铝合金作为基体。首先, 将 TC4 钛合金纤维编织成二维纤维网, 其中纤维直径 $D = 100 \mu\text{m}$, 纤维间距 $S = 0.5 \text{ mm}$ 。将多层 TC4 钛合金纤维网层叠排布并用夹具固定后放入模具中, 然后将熔融铝合金倒入模具, 经过压力浸渗工艺进行复合得到二维连续纤维网增强铝基复合材料 (TC4_网/Al), 增强体 TC4 钛合金纤维网的体积分数为 15%。对 TC4_网/Al 复合材料进行 330 °C/30 min/FC 退火热处理。

1.2 实验方法

利用 Instron 5569 万能材料试验机进行准静态压缩试验, 压缩试样为 $\phi 8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的圆柱体, 表面用砂纸打磨光滑。然后分别进行室温 (25 °C) 及高温 (100、250、400、550 °C) 静态压缩, 试验机压头速度在 0.0005 ~ 10 mm/s 之间, 应变率分别为 0.001、1 s⁻¹。其中, 高温静态压缩试样利用试验机自带的保温炉加热, 首先将炉温升高至所需温度, 然后将试样放入炉中保温 10 min 后开始压缩。为了保证试验数据的可靠性, 每组试验进行 3 次, 最后取平均值作为试验结果。

采用分离式霍普金森压杆装置进行动态 (即高

应变率) 压缩试验, 压缩试样为 $\phi 8 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的圆柱体, 表面用砂纸打磨光滑。然后分别进行室温 (25 °C) 及高温 (250、400、550 °C) 动态压缩, 应变率为 1500 s⁻¹。所采用的人射杆和透射杆均为钢杆, 规格为 $\phi 14.5 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$, 撞击杆规格为 $\phi 14.5 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。其中, 高温动态压缩需要增加一小型加热炉。由于复合材料动态压缩试验数据的分散性较大, 所以每组试验的有效数据 (即 3 条应力-应变曲线基本重合) 至少为 3 个。

利用线切割机从 TC4_网/Al 复合材料试样上切取厚度为 0.5 mm 的薄片, 然后用砂纸磨至 30 μm 厚, 再用 Gatan-600 离子减薄仪进行离子减薄。离子减薄时采用的电压为 5.5 kV, 电流为 0.5 mA, 减薄角度为 7°~15°。利用带有选区电子衍射 (SAED) 系统的 Tecnai-30 型高分辨透射电镜 (TEM) 对复合材料的增强体、基体以及界面形貌与结构进行分析, 操作电压为 300 kV。采用 S-570 扫描电子显微镜 (SEM) 观察压缩试样的微观组织。

2 结果与分析

2.1 TC4_网/Al 复合材料的微观组织

图 1 为 TC4_网/Al 复合材料的 SEM 照片、TEM 像及 SAED 花样。由于复合材料在制备过程中采用了较高的压力, 所以 TC4_网 被铝合金基体完全浸渗, 组织中无明显孔洞或铸造缺陷, 如图 1a 所示。同时可以看到, TC4 钛合金纤维均匀分布在铝合金基体中。由图 1b 可知, TC4 钛合金纤维和铝合金基体之间的界面有两层反应层, 经 SAED 花样分析得知, 靠 TC4 钛合金一侧为 Ti₃Al (图 1c), 靠 Al 一侧为 TiAl₃ (图 1d)。复合材料制备过程中, 液态铝与固态 TC4 钛合金纤维发生反应, 在 TC4 钛合金纤维表面形成 TiAl₃, 其反应速率很快, 与时间呈线性增长关系^[10]。由于 TiAl₃ 反应层中 Al 的扩散速率远远大于 Ti 的扩散速率, 所以 Al 会通过晶界继续向 TC4 钛合金内部扩散^[11-13]。因此随着反应的继续进行, TiAl₃ 中的 Al 继续向 TC4 钛合金纤维中扩散, 在界面上形成 Ti₃Al。此外, 由 SAED 花样 (图 1e) 得知, 基体中存在一些块状的 (Fe, Mn) Al₆ 相。

2.2 温度对复合材料压缩性能的影响

图 2 给出了 TC4_网/Al 复合材料压缩时的应力-应变曲线。由图 2 可知, 各应变率下, TC4_网/Al 复合材料的峰值流变应力均随着温度的升高而降低,

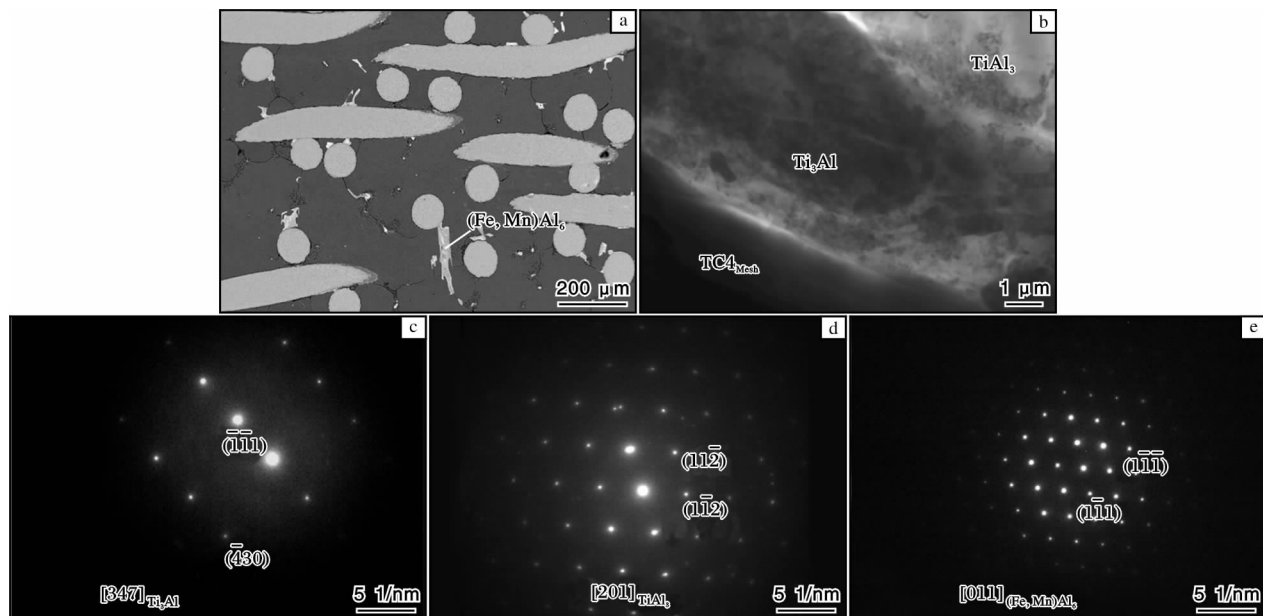


图1 TC4_网/Al复合材料的SEM照片、TEM像及SAED花样

Fig. 1 SEM photograph, TEM image and SAED patterns of TC4_{Mesh}/Al composite: (a) SEM photograph; (b) TEM image of interfacial layers between matrix and TC4 fiber; (c) SAED pattern of inner layer close to TC4 fiber; (d) SAED pattern of outer layer close to Al matrix; (e) SAED pattern of (Fe,Mn)Al₆

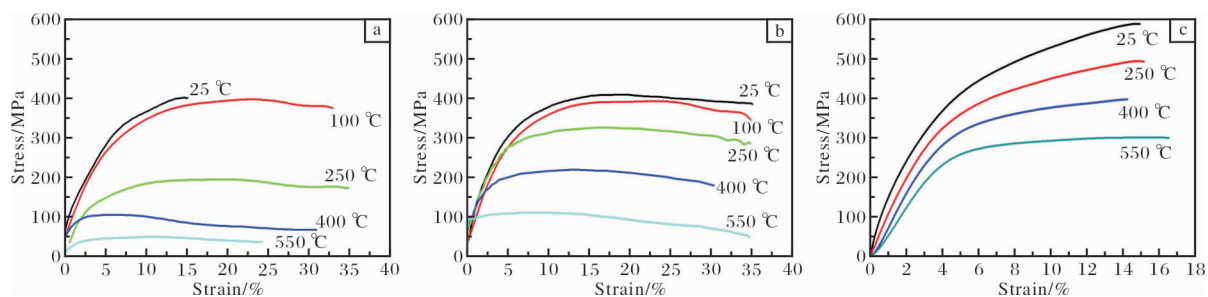


图2 不同应变率下TC4_网/Al复合材料的应力-应变曲线

Fig. 2 Strain-stress curves of TC4_{Mesh}/Al composite at different strain rates: (a) 0.001 s⁻¹; (b) 1 s⁻¹; (c) 1500 s⁻¹

而各应变率下峰值流变应力随温度下降的幅度不同。在应变率 0.001 s⁻¹时,复合材料的峰值流变应力由室温时的 391 MPa 降低到 550 °C 时的 49 MPa,降低了 87.5%,而在 100 °C 和 250 °C 之间峰值流变应力下降的幅度最大,如图 2a 所示。在应变率 1 s⁻¹时,复合材料的峰值流变应力由室温时的 408 MPa 降低到 550 °C 时的 112 MPa,降低了 72.5%,在 100 ~ 550 °C 之间峰值流变应力下降的幅度相当,如图 2b 所示。在应变率 1500 s⁻¹时,复合材料的峰值流变应力由室温时的 593 MPa 降低到 550 °C 时的 301 MPa,降低了 49.2%,降幅明显减小,如图 2c 所示。

2.3 应变率对复合材料压缩性能的影响

由图 2 可知,TC4_网/Al 复合材料的峰值流变应力基本随着应变率的增加而升高,表现为正向应变率敏感性。并且随着温度的升高,应变率效应明显上升。在室温下,当应变率由 0.001 s⁻¹提高至 1 s⁻¹时,峰值流变应力基本不变,当应变率为 1500 s⁻¹时,峰值流变应力有了明显提高。而在高温下,当应变率由 1 s⁻¹提高至 1500 s⁻¹时,峰值流变应力均明显提高。Hong 等^[14-16]采用式(1)对材料应变率的敏感特性进行量化描述:

$$m = \frac{\sigma_d - \sigma_s}{\sigma_s} \frac{1}{\ln(\dot{\epsilon}_d / \dot{\epsilon}_s)} \quad (1)$$

式中： m 为应变率敏感性； σ_d 为动态流变应力； σ_s 为准静态流变应力； $\dot{\epsilon}_d$ 为动态变形的应变率； $\dot{\epsilon}_s$ 为参考应变率。

图 3 给出了 TC4_网/Al 复合材料的应变率敏感系数随温度的变化曲线。从图 3 可以看出，应变率敏感系数随着温度的升高而增大，且在低应变率下的敏感系数更高。

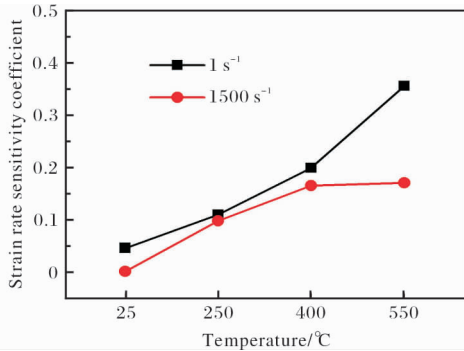


图 3 TC4_网/Al 复合材料应变率敏感系数随温度的变化曲线

Fig. 3 Curves of strain rate sensitivity coefficient vs. temperature of TC4_网/Al composite

2.4 TC4_网/Al 复合材料的宏观损伤

图 4 给出了 TC4_网/Al 复合材料压缩后试样的宏观照片。从图 4 可以看到，静态压缩时(应变率为 0.001、1 s⁻¹)，当试验温度 ≤ 100 °C 时，试样均沿与轴向大约呈 45° 方向的斜面发生破坏，但是当温度 ≥ 250 °C 时，试样没有破坏而发生了鼓肚变形。动态压缩(应变率 1500 s⁻¹)时，无论在室温还是在高温，复合材料均没有发生破坏。

2.5 温度和应变率对微观组织的影响规律

图 5 给出了应变率为 0.001 s⁻¹ 时 TC4_网/Al 复合



图 4 TC4_网/Al 复合材料经不同应变率压缩后的宏观照片

Fig. 4 Photos of TC4_{Mesh}/Al composite after compression at different strain rates: (a) 0.001 s⁻¹; (b) 1 s⁻¹; (c) 1500 s⁻¹

材料在不同温度下压缩后的 SEM 照片。室温压缩时，试样沿着与压缩方向呈 45° 方向发生了严重的剪切变形，基体中的晶粒沿 45° 方向被严重拉长且 TC4 钛合金纤维被剪切成几部分(图 5a)。此外，在 TC4-Al 界面反应层和 (Fe, Mn) Al₆ 相中形成了大量裂纹。界面相与 (Fe, Mn) Al₆ 均为脆性相，在压缩过程中以形成裂纹的方式协调变形。在 250 °C 压缩时，变形特征与室温时不同，试样只是发生了鼓肚变形，这是由于温度的升高剪切破坏程度减小(图 5b)。试验温度提高到 400 °C 时，无论在 TC4-Al 界面还是在 (Fe, Mn) Al₆ 相中均没有裂纹形成(图 5c)。同时，由于温度超过了铝合金基体的再结晶温度，加之变形速率较低，变形时间较长，基体具备了发生动态再结晶的条件，故原始晶界上形成了 10 μm 左右的等轴晶(见图 5c 中右下角的放大图)。

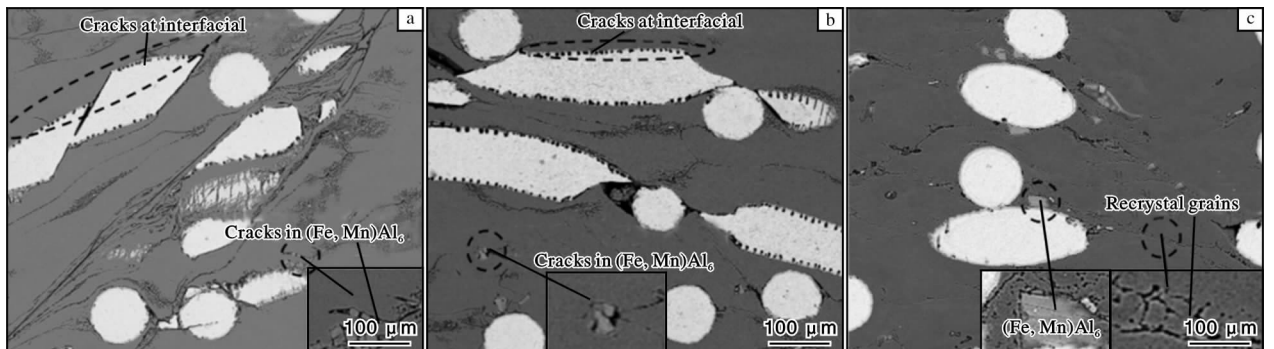


图 5 应变率为 0.001 s⁻¹ 时 TC4_网/Al 复合材料在不同温度下压缩后的 SEM 照片

Fig. 5 SEM microstructures of TC4_{Mesh}/Al composite after compression at different temperatures and under strain rate of 0.001 s⁻¹: (a) 25 °C; (b) 250 °C; (c) 400 °C

图6为应变率为 1 s^{-1} 时, $\text{TC4}_{\text{网}}/\text{Al}$ 复合材料在不同温度下压缩后的SEM照片。试验温度为 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, TC4-Al 界面反应层和 $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Al}_6$ 相中均形成了大量裂纹(图6a)。同时, 在纤维和基体界面处有剥离, 主要是由于压缩速率较大, 界面处的应力集中难以在短时间消除。试验温度提高到 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 与应变率为 0.001 s^{-1} 时的组织不同(图5c), 无论在 TC4-Al 界面上还是在 $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Al}_6$ 相中均有裂纹形成(图6b)。尽管试验温度超过了铝合金基体的再结晶温度, 但由于变形速率较高, 变形时间较短, 所以铝合金基体并没有发生动态再结晶。再结晶晶核的多边化过程需要位错运动, 变形速率较高时, 位错来不及运动, 因而只是有晶粒的拉长。需要指出的是, 在图6中可以看到 TC4 钛合金纤维的界面是椭圆形的, 这是由于切取压缩试样时没有沿着纤维的横向剖开。

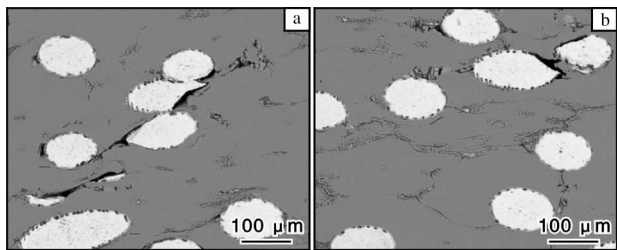


图6 应变率为 1 s^{-1} 时 $\text{TC4}_{\text{网}}/\text{Al}$ 复合材料在不同温度下压缩后的SEM照片

Fig. 6 SEM microstructures of $\text{TC4}_{\text{Mesh}}/\text{Al}$ composite after compression at different temperatures and under strain rate of 1 s^{-1} : (a) $250\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $400\text{ }^{\circ}\text{C}$

图7给出了应变率为 0.001 s^{-1} 时, $\text{TC4}_{\text{网}}/\text{Al}$ 复合材料在不同温度下压缩后的TEM照片。在室温下压缩后, 铝合金基体中形成了高密度位错和滑移带, 如图7a所示。当试验温度为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 低应变速率导致了位错运动进而发生了多边化, 说明在此温度变形时主要发生了动态回复, 如图7b所示。经 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 压缩后, 铝合金基体中形成了尺寸约 500 nm 的动态再结晶晶粒, 如图7c所示。在图7b中没有观察到动态再结晶晶粒主要是由于再结晶晶粒较小所致。当压缩温度升高到 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 动态再结晶晶粒长大, 如图7d所示。

图8给出了应变率为 1 s^{-1} 时, $\text{TC4}_{\text{网}}/\text{Al}$ 复合材料分别在 250 、 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 压缩后的TEM照片。经 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 压缩后, 铝合金基体中呈现出拉长的带状晶粒, 而

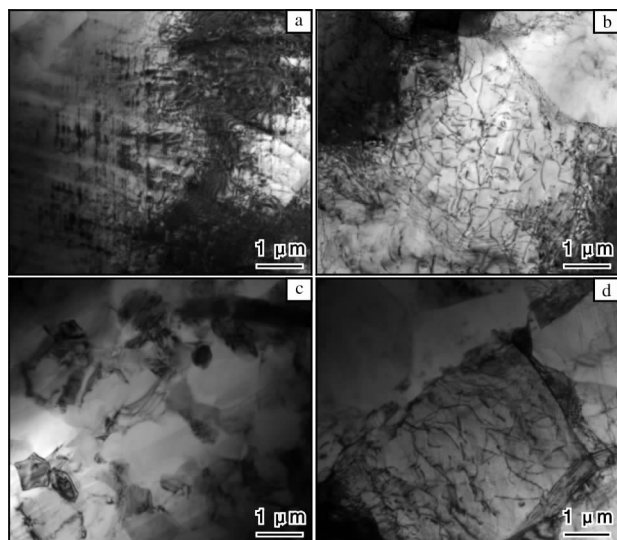


图7 应变率为 0.001 s^{-1} 时 $\text{TC4}_{\text{网}}/\text{Al}$ 复合材料在不同温度下压缩后的TEM照片

Fig. 7 TEM microstructures of $\text{TC4}_{\text{Mesh}}/\text{Al}$ composite after compression at different temperatures and under strain rate of 0.001 s^{-1} : (a) $25\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $100\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $250\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $400\text{ }^{\circ}\text{C}$

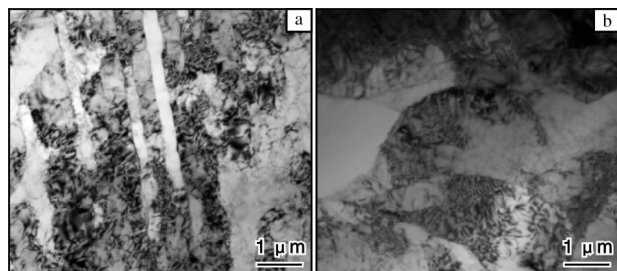


图8 应变率为 1 s^{-1} 时 $\text{TC4}_{\text{网}}/\text{Al}$ 复合材料在不同温度下压缩后的TEM照片

Fig. 8 TEM microstructures of $\text{TC4}_{\text{Mesh}}/\text{Al}$ composite after compression at different temperatures and under strain rate of 1 s^{-1} : (a) $250\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $400\text{ }^{\circ}\text{C}$

非等轴晶(图8a), 说明铝合金基体并没有发生再结晶。而经 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 压缩后, 铝合金基体中形成了亚晶粒, 亚晶粒内部有大量未回复的位错(图8b), 这表明此时虽然变形速率较大, 变形时间较短, 但还是发生了动态回复。

由图5~图8可知, 应变率对 $\text{TC4}_{\text{网}}/\text{Al}$ 复合材料微观组织的影响较为明显, 主要有2个方面: ①应变速率增大, 变形时间缩短, 在高温变形过程中难以完成动态再结晶; ②应变率增大, 造成 TC4-Al 界面应力集中, 在高温变形过程中这些应力难以释放, 故形成界面开裂。

3 结 论

(1) TC4_网/Al 复合材料的峰值流变应力随着温度的升高而降低, 随着应变率的增加而升高, 表现为正向应变率效应。此外, 应变率敏感系数随着温度的升高而增大。

(2) TC4_网/Al 复合材料进行准静态压缩(应变率 $\leq 1 \text{ s}^{-1}$), 当温度 $\leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 试样均沿与压缩轴方向大约呈 45° 方向的斜面发生破坏; 当温度 $\geq 250 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 试样没有破坏而发生鼓肚变形。采用霍普金森压杆装置对复合材料进行动态压缩(应变率 1500 s^{-1}) 时, 无论在室温还是高温下, 均未发生破坏。

(3) 应变率为 0.001 s^{-1} 时, 在室温压缩后, TC4_网/Al 复合材料试样沿着与压缩轴方向呈 45° 方向发生了严重的剪切变形; 沿着该方向, Al 合金基体中的晶粒被严重拉长且 TC4 钛合金纤维被剪切成几部分, 并在 TC4-Al 界面反应层和 (Fe, Mn) Al₆ 相中形成了大量裂纹。当温度提高到 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 无论在 TC4-Al 界面上还是在 (Fe, Mn) Al₆ 相中均没有形成裂纹, 基体发生了动态再结晶。

参考文献 References

- [1] 张伟, 庞宝君, 张泽华. 航天器微流星体及空间碎片防护结构性能分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(5): 603 - 606.
- [2] Guo Q, Sun D L, Han X L, et al. Microstructure characterization of Al matrix composite reinforced with Ti-6Al-4V meshes after compression by scanning electron microscope and transmission electron microscope[J]. Micron, 2012, 43(2/3): 278 - 284.
- [3] 王晓哲, 葛鹏, 卢广轩, 等. TC4 金属纤维多孔材料在硫酸介质中的腐蚀规律研究[J]. 合成纤维工业, 2020, 43(3): 43 - 47.
- [4] Zhu D Z, Luo M Q, Chen S Q, et al. Properties and hypervelocity impact damage of TiB₂ particles reinforced 2024Al aluminum alloy thin targets[J]. Southern Metals, 2016, 34(5): 45 - 57.
- [5] Zhu D Z, Chen W P, Li Y Y, et al. Damage mechanism of (2D-TiF)/Al composites against hypervelocity impact[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2011, 40(10): 1804 - 1807.
- [6] Miqoi N, Pomarede P, Meraghni F, et al. Detection and evaluation of barely visible impact damage in woven glass fabric reinforced polyamide 6.6/6 composite using ultrasonic imaging, X-ray tomography and optical profilometry[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2021, 130(3): 43 - 52.
- [7] Fierro G P M, Meo M. Nonlinear elastic imaging of barely visible impact damage in composite structures using a constructive nonlinear array sweep technique[J]. Ultrasonics, 2018, 90: 125 - 143.
- [8] Dong S L, Ye Z Y, Geng H B, et al. Damage of Ti-6Al-4V alloy induced by hypervelocity impact[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2011, 48(2): 256 - 265.
- [9] Zhu D Z, Chen G Q, Wu G H, et al. Hypervelocity impact damage to Ti-6Al-4V meshes reinforced Al-6Mg alloy matrix composites[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 500(1/2): 43 - 46.
- [10] Song T F, Jiang X S, Shao Z Y, et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of diffusion-bonded joints of titanium TC4 (Ti-6Al-4V) and Kovar (Fe-29Ni-17Co) alloys[J]. Journal of Iron and Steel Research(International), 2017, 24(10): 1023 - 1031.
- [11] Xu L, Cui Y Y, Hao Y L, et al. Growth of intermetallic layer in multi-laminated Ti/Al diffusion couples[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 435 - 436: 638 - 647.
- [12] Loo van F J J, Rieck G D. Diffusion in the titanium aluminium system - I: interdiffusion between solid Al and Ti or Ti-Al alloys[J]. Acta Metallurgica, 1973, 21(1): 61 - 71.
- [13] Wagner C. The evaluation of data obtained with diffusion couples of binary single-phase and multiphase systems[J]. Acta Metallurgica, 1969, 17(2): 99 - 107.
- [14] Hong S I, Gray III G T, Lewandowski J J. Dynamic deformation behavior of Al-Zn-Mg-Cu alloy matrix composites reinforced with 20 Vol. % SiC[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1993, 41(8): 2337 - 2351.
- [15] Bao G, Lin Z. High strain rate deformation in particle reinforced metal matrix composites[J]. Acta Materialia, 1996, 44(3): 1011 - 1019.
- [16] Balch D K, O'Dwyer J G, Davis G R, et al. Plasticity and damage in aluminum syntactic foams deformed under dynamic and quasi-static conditions[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 391(1/2): 408 - 417.