

应变速率对 TP-650 钛基复合材料 拉伸力学行为的影响

李 伟¹, 宋卫东¹, 宁建国¹, 毛小南²

(1. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

2. 西北有色金属研究院, 西安 710016)

摘 要: 研究 TiC 颗粒增强钛基复合材料 TP-650 室温拉伸状态下的应变率效应。通过与基体材料对比的准静态和动态拉伸力学实验, 并利用扫描电镜 SEM 观察断口形貌特征, 分析 TiC 颗粒增强钛基复合材料的拉伸力学行为。结果表明: 应变率对颗粒增强钛基复合材料的力学行为具有较复杂的影响。在准静态下, 基体和复合材料都非常接近理想弹塑性材料, 且由于 TiC 颗粒的加入, TP-650 钛复合材料较基体表现出较好的增强效果; 在高应变率下, 复合材料的力学性能并不优于基体材料的, 且表现出较高的脆性; 复合材料和基体材料在不同应变率条件下都不呈现单调的应变率效应。

关键字: TiC; 钛基复合材料; TP-650 钛基复合材料; 应变率效应; 拉伸断裂

中图分类号: TG146.4

文献标志码: A

Effect of strain rate on tensile mechanical behavior of TP-650 titanium matrix composite

LI Wei¹, SONG Wei-dong¹, NING Jian-guo¹, MAO Xiao-nan²

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Northwest Institute for Non-ferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: The strain rates effect of TiC-particle-reinforced titanium matrix composite TP-650 was investigated under room temperature tensile conditions. The quasi-static and dynamic tensile properties of the TP-650 composite were compared with those of the matrix. The morphologies of fracture surfaces of both the matrix and the composite were observed by scanning electron microscopy (SEM). The result shows that the strain rates exert complex effects on the mechanical behavior of particle-reinforced titanium matrix composite. Under the quasi-static conditions, both the behaviors of the matrix and the composite are similar to those of the ideal elastic-plastic materials. The composite has better reinforcing effect than the matrix due to the addition of the TiC particles. While under the high strain rate, the mechanical characteristics of the composite are not obviously superior to those of the matrix, and the composite shows a higher brittleness than the matrix. The composite and matrix do not show monotonic strain-rate effect under different strain rates.

Key words: TiC; titanium matrix composite; TP-650 titanium matrix composite; strain rate effect; tensile fracture

钛基复合材料以比强度和比刚度高以及优良的抗氧化性和耐高温性等性能, 得到迅速的发展, 被认为

是最具前途的金属基复合材料之一, 可用于超音速宇航飞行器和下一代航空发动机上^[1]。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2010CB8327006); 国家自然科学基金资助项目(10625208); 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室自主研究课题(ZDKT10-03a)

收稿日期: 2009-08-25; **修订日期:** 2009-12-18

通信作者: 宋卫东, 副教授, 博士; 电话: 010-68914048; E-mail: swdgh@bit.edu.cn

钛基复合材料可以分为纤维增强和颗粒增强材料。由于连续纤维增强钛基复合材料具有各向异性、制备工艺复杂、不易二次加工,其发展受到限制。颗粒增强钛基复合材料的强化效果虽不如纤维增强钛基复合材料的,但是却克服了上述缺点,成为目前材料的研究热点^[2]。近年来,关于 TiC 颗粒增强钛基复合材料的复合技术、加工工艺和力学性能等方面的研究较多。粉末冶金和熔铸法是制备颗粒增强钛基复合材料的主要方法^[3-4]。西北有色金属研究院开发了一种预处理熔铸工艺(Pretreatment melting process, PTMP),能够使粒子和基体达到良好的冶金结合^[3]。对于颗粒增强钛基复合材料加工工艺开展的研究表明,锻造^[5]和热处理^[6-7]等工艺对材料组织形态和力学性能都会造成重要影响。对颗粒增强钛基复合材料力学性能的研究表明,颗粒增强钛基复合材料在低应变率下具有较高的拉伸断裂强度^[8-9]和较好的耐高温性能^[10-11],断裂表现为脆性断裂^[12],并且以粒子脱粘形式为主^[13]。且由于 TiC 颗粒增强钛基复合材料具有较好的耐疲劳^[14]和抗蠕变^[15]特性,因而具有良好的机械性能。

但目前对于颗粒增强钛基复合材料性能的研究主要围绕准静态特性展开,对动态性能研究得比较少,未考虑应变率对钛基复合材料力学性能的影响。然而,在实际的航空航天工程应用中,对其动态力学性能的研究就显得十分重要。本文作者以西北有色金属研究院研制的 TiC 颗粒增强钛基复合材料 TP-650 为研究对象,系统地研究颗粒增强钛基复合材料的动态力学性能;对 TP-650 和基体材料分别进行准静态和动态对比拉伸实验,给出不同应变率下 TP-650 的应力—应变曲线;并用 SEM 观察分析动态断口形貌,通过实验结果分析复合材料的增强机制、断裂机制以及率敏感性的特点,以期了解颗粒增强钛基复合材料的动态响应特性。

1 实验

1.1 实验材料

实验材料为西北有色金属研究院自行研究的 TiC 颗粒增强钛基复合材料 TP-650。其基体材料是在 IMI834 的基础上调整的六元合金,增强相为 TiC 颗粒,平均粒度为 5 μm 。

复合材料 TP-650 采用 PTMP 法^[3]制备。增强相颗粒弥散分布,界面反应层稳定,其反应宽度控制在 3 μm 以下,无脆性相产生,颗粒的体积分数为 3%。复合材料经过 800 $^{\circ}\text{C}$ 保温 1 h, AC 热处理。

1.2 实验过程

准静态单向拉伸实验在伺服式疲劳实验机 MTS810 上进行,应变率选取为 10^{-3} s^{-1} 和 10^{-4} s^{-1} ;动态冲击拉伸实验在旋转盘式杆型冲击拉伸实验机上 (SHTB) 进行,应变率选取为 200 s^{-1} 、 500 s^{-1} 和 1000 s^{-1} 。每组实验重复 5 次,选择其中重复性较好的结果进行平均。

采用扫描电镜观察基体和复合材料在准静态和动态拉伸时的断口形貌。实验在冷场发射扫描电子显微镜上进行,采用二次电子图像,加速电压为 15 kV,井深为 4 mm,分辨率为 1.0 nm。

2 结果

2.1 准静态拉伸

图 1 所示为基体和复合材料 TP-650 的准静态拉伸应力—应变曲线。由图 1 可看出,在两种准静态应变率下,基体和复合材料 TP-650 的应力—应变曲线都非常接近理想态的,几乎没有应变硬化。其不同之处是基体材料有较明显的屈服,而复合材料没有明显的屈服现象。同时,基体和复合材料 TP-650 均初步表现出正的应变率敏感性,随着应变率的提高,两种材料的屈服强度和抗拉强度均有所提高,但提高不是很明显。比较两种材料可以看出,复合材料 TP-650 的抗拉强度和屈服强度较基体的都有所提高,但伸长率有所降低,复合材料的断裂应变只有 6% 左右。

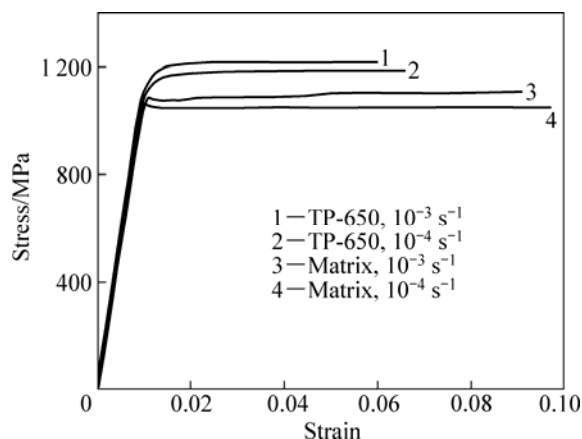


图 1 准静态拉伸的应力—应变曲线

Fig.1 Stress—strain curves of quasi-static tensile tests

2.2 动态拉伸

提高应变率将使材料的变脆倾向增大,表现出与准静态时不同的力学特性。图 2 所示为 TP-650 和基体

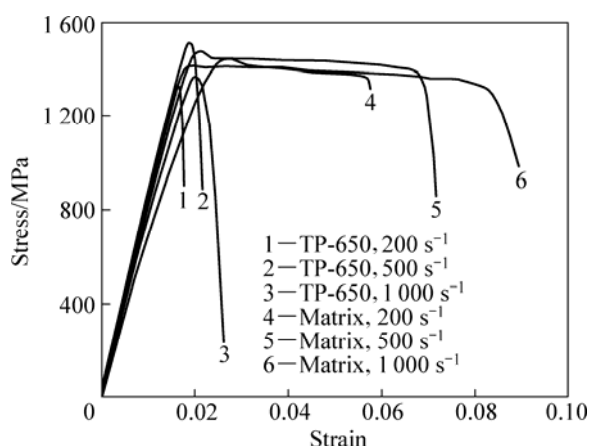


图2 动态拉伸的应力—应变曲线

Fig.2 Stress—strain curves of dynamic tensile tests

动态时的应力—应变曲线。由图2可看出,基体材料在动态冲击下,变形经历了线弹性阶段、非线性弹性阶段、应力跌落阶段和应变软化阶段,分别对应于裂纹的弹性变形、稳定扩展、失稳扩展和汇合等微观机制。

复合材料动态拉伸表现出明显的脆性。与基体相比,材料在动态冲击下,只有线弹性和非线性弹性两个阶段,几乎没有塑性变形,就迅速断裂,且抗拉强度也没有比基体有明显提高,其原因必然与加入的TiC粒子和应变率有关。

2.3 断口形貌

图3所示为准静态下复合材料TP-650和基体材料的拉伸断口形貌。由图3可看出,基体材料断口有明显的剪切唇、放射区和纤维区,并且可以判断裂纹源,微观上呈现等轴韧窝,韧窝内有溶质粒子析出(见图3(a)和(c));复合材料TP-650断口没有剪切唇,裂纹源在试件表面附近,微观上观察到兼有结晶状小刻面和韧性撕裂棱,TiC颗粒周围是裂纹萌生的主要地带,可以看到次裂纹(见图3(b)和(d))。根据断口的形貌特征可以判断,在准静态下,基体材料为韧窝断裂,而复合材料断口表现为准解理断裂,并且伴有二次裂纹的复杂形式。

基体材料动态下的断裂依然表现为韧性断裂的特点(见图4),与其动态力学响应相一致;而且可以发现,随着应变率的增大,韧窝尺寸及深浅均变小,析出的溶质粒子也变少。这是因为应变率越高,瞬间局部能量增加越多,显微孔洞增加迅速,裂纹的萌生和扩展速度都随着应变率的提高而有所增加,很多韧窝内溶质粒子来不及析出就断裂。

在高应变率下(见图5),复合材料断口上都呈现出“人字形”的花样,高倍下观测存在着结晶状小刻面,几乎没有撕裂棱,代之的是二次解理,这与复合材料几乎没有经历塑性变形阶段就断裂的力学特点相吻合。随着应变率的增加,“人字纹”越来越明显。

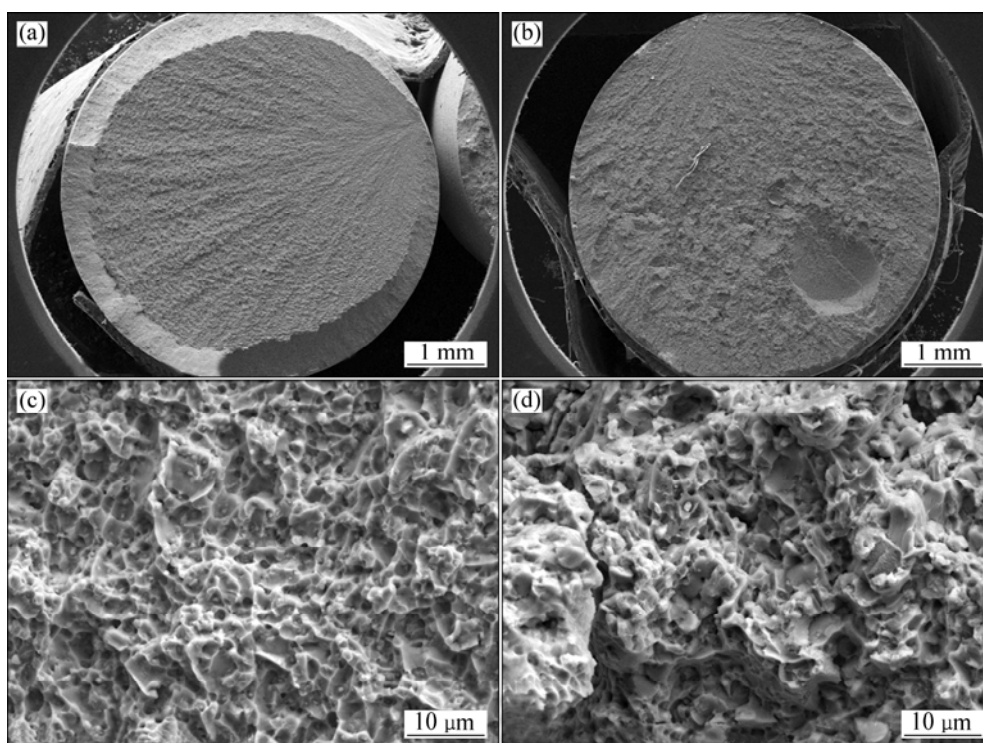


图3 准静态拉伸断口的形貌

Fig.3 Morphologies of quasi-static tensile fracture surfaces of matrix ((a), (c)) and TP-650 ((b), (d))

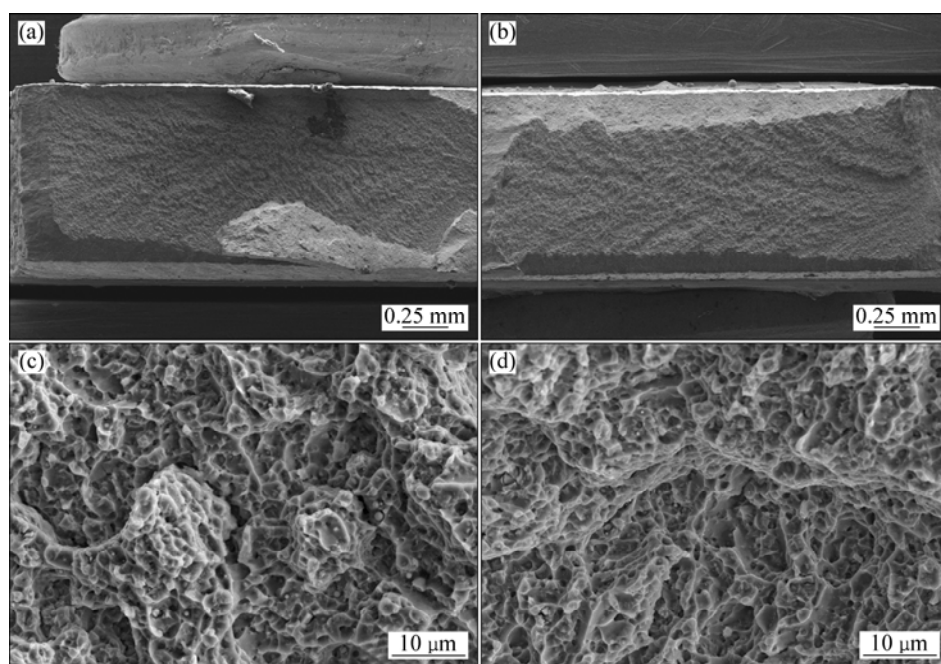


图 4 应变率为 $1\,300\text{ s}^{-1}$ 和 250 s^{-1} 时基体的动态拉伸断口形貌

Fig.4 Morphologies of dynamic tensile fracture surfaces of matrix at strain rate of $1\,300\text{ s}^{-1}$ ((a), (c)) and 250 s^{-1} ((b), (d))

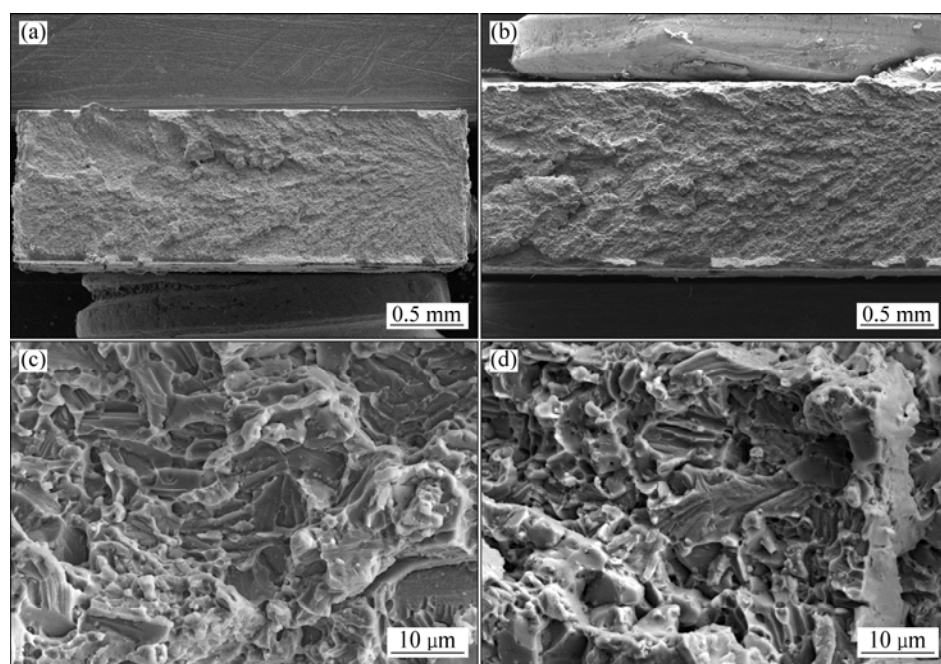


图 5 应变率为 $1\,000\text{ s}^{-1}$ 和 250 s^{-1} 时复合材料 TP-650 动态拉伸断口的形貌

Fig.5 Morphologies of dynamic tensile fracture surfaces of TP-650 at strain rate of $1\,000\text{ s}^{-1}$ ((a), (c)) and 250 s^{-1} ((b), (d))

3 分析与讨论

3.1 应变率的影响

准静态下材料变形是均匀的，而动态下材料的变形是非均匀的，存在严重的局部性。而复合材料中增

强粒子的加入，由于颗粒和基体两相之间的变形不匹配，更加大了这种局部不均匀性。图 6 所示为复合材料 TP-650 和基体材料的应力—应变曲线。由图 6 可以看出，复合材料 TP-650 和基体材料都有随着应变率的提高而出现刚度逐渐降低的现象，这也是局部变形不均匀的表现。且通过比较可看出，应变率对复合材料力学性能造成的影响比较大，除了应变率强化以外，

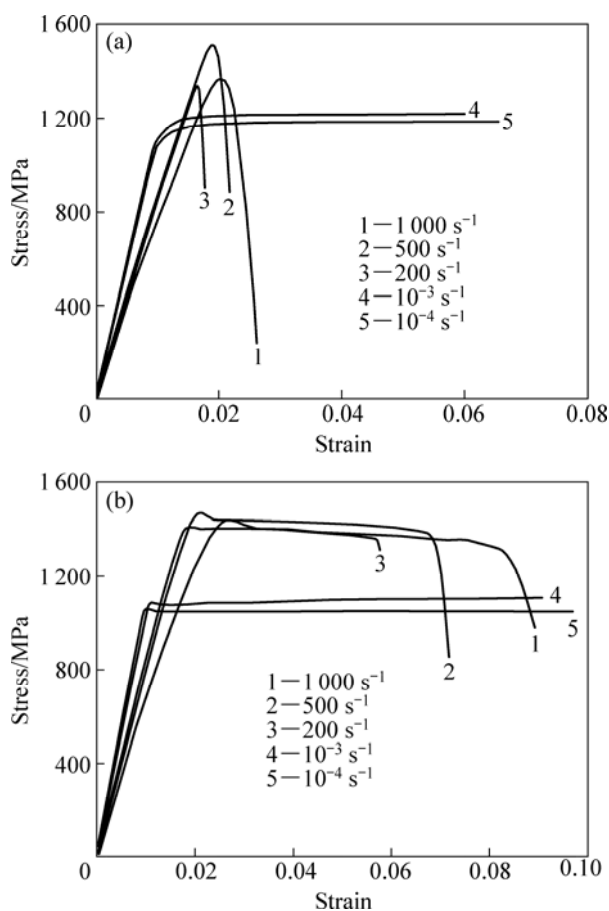


图6 复合材料 TP-650 和基体材料的应力—应变曲线

Fig.6 Stress—strain curves of composite TP-650 (a) and matrix (b)

由于 TiC 粒子的存在,极大地阻碍了裂纹的扩展,使塑性很大幅度的降低。

复合材料在变形时,容易在颗粒界面产生应力集中,从而形成不均匀的变形位错源,释放位错环,使界面上的形变应力集中得以松弛;与此同时,高密度的位错互相缠绕反应,最终形成位错胞结构。在准静态下,这些位错胞结构阻碍裂纹的扩展,强化基体,使得复合材料具有比基体更高的强度,但是同时却降低了塑性。在动态下,随着应变率的增加,在颗粒周围的基体中,尤其在尖角处产生高密度的位错和位错亚结构,这种高密度的位错在颗粒尖角处产生高度的应力应变集中,在材料中逐步产生强化相与基体界面的损伤、强化相本身的开裂或大沉淀粒子的损伤,从而导致复合材料的高应变率下的强度低于基体材料的。

从图6还可以判断,复合材料和基体都不是单调的应变率敏感性材料,抗拉强度在应变率为 500 s^{-1} 时达到最大。在高应变率下,根据可能功原理^[16]和能量

守恒原理可推导,在裂纹扩展时,外力做功 W 正比于应力 σ 和微裂纹长度 a 的积,即

$$W \propto \sigma a \quad (1)$$

而该功 W 又正比于应变率的平方,即

$$W \propto (\dot{\epsilon})^2 \quad (2)$$

可得

$$\dot{\epsilon} \propto \sqrt{\sigma a} \quad (3)$$

当应变率提高时,随着裂纹尺寸的增加,传统的应变率效应就可能会出现反复,且由于增强粒子的加入,使得复合材料的这种差异明显大于基体的。

3.2 断裂机制

基体材料的断裂形式是典型的韧性断裂,遵循微孔聚集断裂机制。单轴拉伸时,当应力超过材料的屈服强度时发生塑性变形,产生颈缩形成三向应力状态。在三向应力作用下,在沉淀相、夹杂物与金属界面处分离产生微孔,在外力不断作用下,孔洞长大连接,形成韧窝断裂。

在复合材料中,增强粒子是主要的承载者。对于复合材料 TP-650,高硬、高强度的 TiC 颗粒的加入,从整体上减小材料内部裂纹尖端附近的塑性变形区。同时由于 TiC 颗粒的存在,导致位错在界面处塞积,产生较大的应力集中,使位错运动变得更加困难,降低了复合材料整体的塑性,使复合材料的韧性变差,材料变脆。

当 TiC 颗粒周围的应力集中增加到某个临界值时,就会导致 TiC 与基体的脱粘,或者会使原本有缺陷的 TiC 粒子断裂,成为最初的裂纹源。随着应力的增加,小裂纹在基体材料的准解理面内以台阶的方式扩展成人字纹花样。在准静态时,复合材料最后在发生塑性变形严重的地方以撕裂的形式断裂,形成很多撕裂棱。在高应变率下,以基体的二次解理来连接不同的解理面。

4 结论

1) 在准静态下,基体和复合材料 TP-650 都非常接近理想弹塑性材料,几乎没有应变硬化效应。但是由于 TiC 颗粒的加入,TP-650 钛基复合材料的强度明显高于基体的,但材料的延性有所降低。

2) 在高应变率下,基体材料和复合材料 TP-650 的变形都呈现局部不均匀性,而复合材料中增强粒子的加入,由于颗粒和基体两相之间的变形不匹配,更加大了这种局部不均匀性,表现出明显的脆性。

3) 应变率对于 TiC 颗粒增强钛基复合材料力学行为的影响较复杂, 复合材料 TP-650 和基体都不是单调的应变率敏感性材料, 抗拉强度在应变率 500 s^{-1} 时达到最大, 其原因与能量转化和裂纹扩展有关。

4) 基体材料的断裂形式是典型的韧性断裂, 遵循微孔聚集断裂机制。TP-650 钛基复合材料的断裂, 在准静态下, 表现为准解理断裂的特征; 在高应变率下, 呈现典型的脆断, 几乎没有塑性变形阶段。

REFERENCES

- [1] HUNT M. MMCs for exotic needs[J]. *Composite Material Science*, 1992, 104(4): 53–62.
- [2] 罗国珍. 钛基复合材料的研究与发展[J]. *稀有金属材料与工程*, 1997, 26(2): 1–7.
LUO Guo-zhen. Recent development of titanium metallic matrix composites[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 1997, 26(2): 1–7.
- [3] 曾泉浦, 王彰默, 毛小南, 伍本德, 陆峰. 颗粒增强钛基复合材料的研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 1991, 20(6): 33–38.
ZENG Quan-pu, WANG Zhang-mo, MAO Xiao-nan, WU Ben-de, LU Feng. Investigation of particle reinforced Ti based composites[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 1991, 20(6): 33–38.
- [4] LIU Y, CHEN L F, TANG H P, LIU C T, LIU B, HUANG B Y. Design of powder metallurgy titanium alloys and composites[J]. *Mater Sci Eng A*, 2006, 418: 25–35.
- [5] 马凤仓, 吕维洁, 覃继宁, 计波, 张荻. 锻造对(TiB+TiC)增强钛基复合材料组织和高温性能的影响[J]. *稀有金属*, 2006, 30(2): 236–240.
MA Feng-cang, LU Wei-jie, QIN Ji-ning, JI Bo, ZHANG Di. Effect of forging on microstructure and mechanical properties of (TiB+TiC)/Ti composite[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2006, 30(2): 236–240.
- [6] 邓超, 毛小南, 曾卫东, 张鹏省. 热处理对颗粒增强钛基复合材料高温拉伸性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2005, 34(S3): 244–246.
DENG Chao, MAO Xiao-nan, ZENG Wei-dong, ZHANG Peng-sheng. Effect of heat treatment on tensile properties of particulate-reinforced Ti matrix composites at elevated temperature[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2005, 34(S3): 244–246.
- [7] 毛小南, 周廉, 周义刚, VASSEL A, 张鹏省, 于兰兰. TP-650 颗粒增强钛基复合材料的性能与组织特性[J]. *稀有金属材料与工程*, 2004, 33(6): 620–623.
MAO Xiao-nan, ZHOU Lian, ZHOU Yi-gang, VASSEL A, ZHANG Peng-sheng, YU Lan-lan. Characteristic of principle properties and microstructure of TP-650 particles reinforced titanium matrix composites[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2004, 33(6): 620–623.
- [8] LU W J, ZHANG D, ZHANG X N, WU R J, SAKATA T, MORI H. Microstructure and tensile properties of in situ (TiB+TiC)/Ti6242 composites prepared by common casting technique[J]. *Mater Sci Eng A*, 2001, 311: 142–150.
- [9] YANG Z F, LU W J, QIN J N, ZHANG D. Microstructure and tensile properties of in situ synthesized (TiC+TiB+Nd₂O₃)/Ti-alloy composites at elevated temperature[J]. *Mater Sci Eng A*, 2006, 425: 185–191.
- [10] 邓超, 毛小南, 曾卫东, 张鹏省. 流变应力对颗粒增强钛基复合材料高温拉伸性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2005, 34(S3): 90–92.
DENG Chao, MAO Xiao-nan, ZENG Wei-dong, ZHANG Peng-sheng. Effect of strain rate on flow stress of particulate-reinforced Ti matrix composites at elevated temperature[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2005, 34(S3): 90–92.
- [11] 张鹏省, 毛小南, 于兰兰, 赵永庆, 邓超. TP-650 钛基复合材料的高温性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2005, 34(S3): 114–117.
ZHANG Peng-sheng, MAO Xiao-nan, YU Lan-lan, ZHAO Yong-qing, DENG Chao. The thermal performances of TP-650 titanium matrix composite[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2005, 34(S3): 114–117.
- [12] 毛小南, 周廉, 曾泉浦, 魏海荣. TiC 颗粒增强钛基复合材料的形变断裂[J]. *稀有金属材料与工程*, 2000, 29(4): 217–220.
MAO Xiao-nan, ZHOU Lian, ZENG Quan-pu, WEI Hai-rong. Deformational fracture of titanium matrix composites reinforced by TiC particles[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2000, 29(4): 217–220.
- [13] ANTONIO A M, JORGE F, TELMO R. An investigation of the fracture behaviour of diffusion-bonded Ti6Al4V/TiC/10p[J]. *Composites Science and Technology*, 2006, 66: 2063–2068.
- [14] FORINGER M A, ROBERTSON D D, MALL S. A micromechanistic-based approach to fatigue life modeling of titanium-matrix composites[J]. *Composites Part B*, 1997, 28: 507–521.
- [15] LU W J, ZHANG D, ZHANG X N, WU R J, SAKATA T, MORI H. Creep rupture life of in situ synthesized (TiB+TiC)/Ti matrix composites[J]. *Scripta Materialia*, 2001, 44: 2449–2455.
- [16] 陈明祥. 弹塑性力学[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 152–155.
CHEN Ming-xiang. Elasticity and plasticity[M]. Beijing: Science Press, 2007: 152–155.

(编辑 李艳红)