

引文格式: 王富鑫, 付明杰, 钱健行, 等. $TiB_w/TA15$ 复合材料板材组织及力学性能研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(10): 95-101.
WANG Fuxin, FU Mingjie, QIAN Jianhang, et al. Microstructure and mechanical properties of $TiB_w/TA15$ composite sheet[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(10): 95-101.

$TiB_w/TA15$ 复合材料板材组织及力学性能研究

王富鑫¹, 付明杰¹, 钱健行^{1,2}, 曾元松¹, 韩秀全¹

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;
2. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

[摘要] TiB_w 增强钛基复合材料具有优异的高温性能, 在飞行器蒙皮、框梁等多种构件中具有广阔的应用前景。以 $TiB_w/TA15$ 复合材料为对象, 研究了轧制变形对 $TiB_w/TA15$ 复合材料组织及性能影响行为。采用金相显微镜及扫描电镜分析了轧制变形后 $TiB_w/TA15$ 复合材料板材组织, 发现轧制变形后板材组织较为细小, 增强相分布较为均匀, 但存在因增强相断裂、破碎形成的微小缺陷。对其力学性能分析发现轧制变形后板材室温、高温拉伸性能与原始板坯相比强度提升 10% 以上, 室温塑性由 4.8% 提升到 8%; 板材 650℃ 高温持久性能与板坯相当, 轧制变形对高温持久性能影响较小。

关键词: $TiB_w/TA15$ 复合材料; 轧制变形; 板材; 组织; 力学性能

Microstructure and Mechanical Properties of $TiB_w/TA15$ Composite Sheet

WANG Fuxin¹, FU Mingjie¹, QIAN Jianhang^{1,2}, ZENG Yuansong¹, HAN Xiuquan¹

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

[ABSTRACT] TiB whisker reinforced titanium matrix composite has a wide range of potential applications in aircraft skin, frame beam and other components due to its excellent high temperature performance. The effect of rolling deformation on the microstructure and properties of $TiB_w/TA15$ composite was studied. The microstructure of $TiB_w/TA15$ composite sheets was analyzed by OM and SEM. It was found that the microstructure of $TiB_w/TA15$ composite sheet is fine, and TiB whiskers are uniform distributed. But the micro cracks formed by the deformation of TiB_w phase are obviously observed. By analyzing the mechanical properties, it was found that the tensile strength of $TiB_w/TA15$ composite sheet is 10% higher than that of the slab at room temperature and 600–650℃. The tensile strain at room temperature increases from 4.8% to 8% after rolling deformation. The high temperature endurance property of $TiB_w/TA15$ composite sheets is similar with that of the slab. While rolling deformation has little effect on the high temperature durability.

Keywords: $TiB_w/TA15$ composite; Rolling deformation; Sheet; Microstructure; Mechanical property

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.10.095

随着飞行器飞行速度的不断提升, 飞行器蒙皮、框梁等多种构件服役温度也随之大幅提高, 对使用温度在 600℃ 以上的轻质耐高温结构材料的需求愈加迫切。而 600℃ 是目前已应用的长时使用钛合金的最高使用温度, 高温合金虽具有较高的使用温度但其密度较大, 增量明显。非连续增强 (TiB 、 TiC) 钛基复合材料拥有高

强度和耐热性能及抗蠕变性能, 使用温度与基体相比可提高 100~150℃, 且具有良好的组织及性能设计和调控性^[1-2], 是一种理想的轻质耐高温结构材料, 有望满足航空航天领域对轻质耐高温结构材料的迫切需求^[3]。

在非连续增强钛基复合材料增强相中, TiB 具有高弹性模量、高稳定性, 且与基体的密度和热膨胀系数相

近, TiB_w 作为增强相的钛基复合材料研究较多^[4-5]。目前, TiB_w 增强钛基复合材料主要采用熔铸法和粉末冶金法制备^[4,6-7]。但钛基复合材料熔铸法制备的材料组织比较粗大,粉末冶金法得到的材料致密度有待提高,两种方法制备的材料力学性能不够理想^[5,8],均需进行合理的热变形加工处理,主要有锻造、挤压和轧制等工艺^[9-15]。Zhang 等^[16]对铸态 TiB/Ti 复合材料进行了锻造变形,对其组织分析发现铸态 TiB/Ti 复合材料中较高长径比的 TiB_w 发生断裂。由于基体和增强相在锻造过程中发生不协调变形,在增强相端部会形成微孔。目前已有较多熔铸法制备的钛基复合材料轧制变形研究,如 Zhang 等^[17]研究了轧制温度对钛基复合材料组织及性能的影响,分别在 $\alpha + \beta$ 相区(1020℃)和 β 相区(1110℃)进行了轧制变形,得到了细小的等轴组织及片层组织,拉伸强度及塑性均有提高。网状 TiB_w 增强钛基复合材料因其增强相分布特殊,其轧制变形对组织及力学性能影响仍不清楚,相关研究较少,黄陆军等^[18]初步研究了轧制变形对网状 $TiB_w/TC4$ 复合材料组织及性能的影响,发现随轧制变形量增大,钛基复合材料内部 TiB_w 断裂及与基体脱粘现象增加,抗拉强度及延伸率受内部缺陷影响先增大后减小。

综上所述,轧制变形对 TiB_w 增强钛基复合材料组织及性能均有重要影响,但对大变形轧制后网状 TiB_w 增强钛基复合材料组织演变、增强相分布及力学性能变化目前还未开展深入研究。本文以网状 $TiB_w/TA15$ 复合材料为研究对象,进行 TiB_w 增强钛基复合材料薄板轧制过程中组织及力学性能研究,以期为非连续增强钛基复合材料在航空航天耐高温领域的应用提供理论和技术支持。

1 试验及方法

以 3.5% (体积分数,本文同) $TiB_w/TA15$ 复合材料为研究对象,选用 75~150 μm 的 TA15 球形粉和 1~3 μm 的 TiB_2 粉进行低能球磨+热压烧结制备,球磨工艺选择 200r/min/5:1/8h,热压烧结温度 1300℃,烧结时间 1h。3.5% $TiB_w/TA15$ 复合材料相变点为 1010℃左右^[19],黄陆军等^[18]在 1150℃进行了 $TiB_w/TC4$ 复合材料轧制研究,发现大变形时板材边缘易开裂,结合其试验结果,试验选择轧制温度为 1200℃,以期在更高温度下消除轧制裂纹。在热压烧结得到的锭坯上切取 26mm 厚板坯,在 1200℃保温 30min,进行多次火次多道次轧制,每次火次间 1200℃保温 20min,获得 2~3mm 厚板材。

在轧制好的板材轧制表面及纵截面上分别切取组织试样,经腐蚀、抛光后通过 Olympus 金相显微镜、ZEISS-SUPRA55 场发射扫描电子显微镜进行显微组

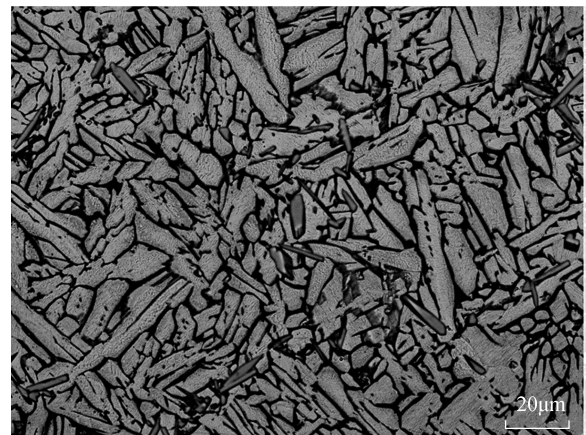
织分析;对轧制得到的钛基复合材料板材,在板材中部区域沿轧制方向取室、高温拉伸及持久性能试样,进行室、高温拉伸及高温持久性能测试。将试样断口侧面腐蚀、抛光后进行组织观察。

2 结果与讨论

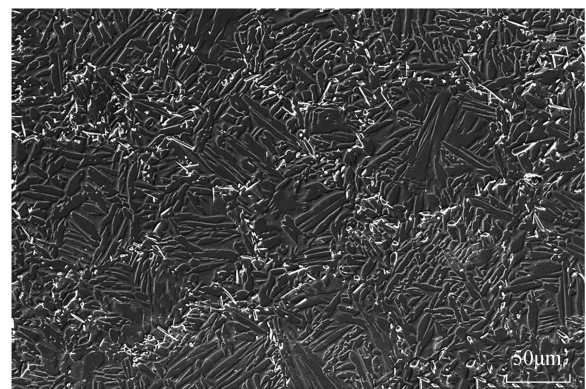
2.1 轧制变形对 $TiB_w/TA15$ 复合材料组织影响

图 1 为烧结得到的 $TiB_w/TA15$ 复合材料板坯组织图片,从图 1 (a) 中可观察到烧结态组织由粗大的等轴 α 相和 TiB_w 增强相组成,从图 1 (b) 中可明显观察到由白色 TiB_w 相构成的网状结构。由于 $TiB_w/TA15$ 复合材料板坯是在 β 相区烧结后炉冷制备得到,冷却速率较小,使得其组织转变较为完全,且 α 相有足够时间长。 TiB_w 增强相则由 TiB_2 相与 Ti 在 TA15 粉末颗粒边界处反应形成直径 50~100 μm 的网状结构。

图 2 为轧制得到的 $TiB_w/TA15$ 复合材料板材组织,经轧制变形后,板材组织由短 TiB_w 相和细小片层组织构成,与图 1 中板坯原始组织相比,由于轧制温度在 β 相变点以上,初始 α 相完全消失,最终变成为转变 β 组



(a) 烧结态组织



(b) 网状结构

图1 $TiB_w/TA15$ 复合材料锭坯组织

Fig.1 Microstructure of $TiB_w/TA15$ composite ingot

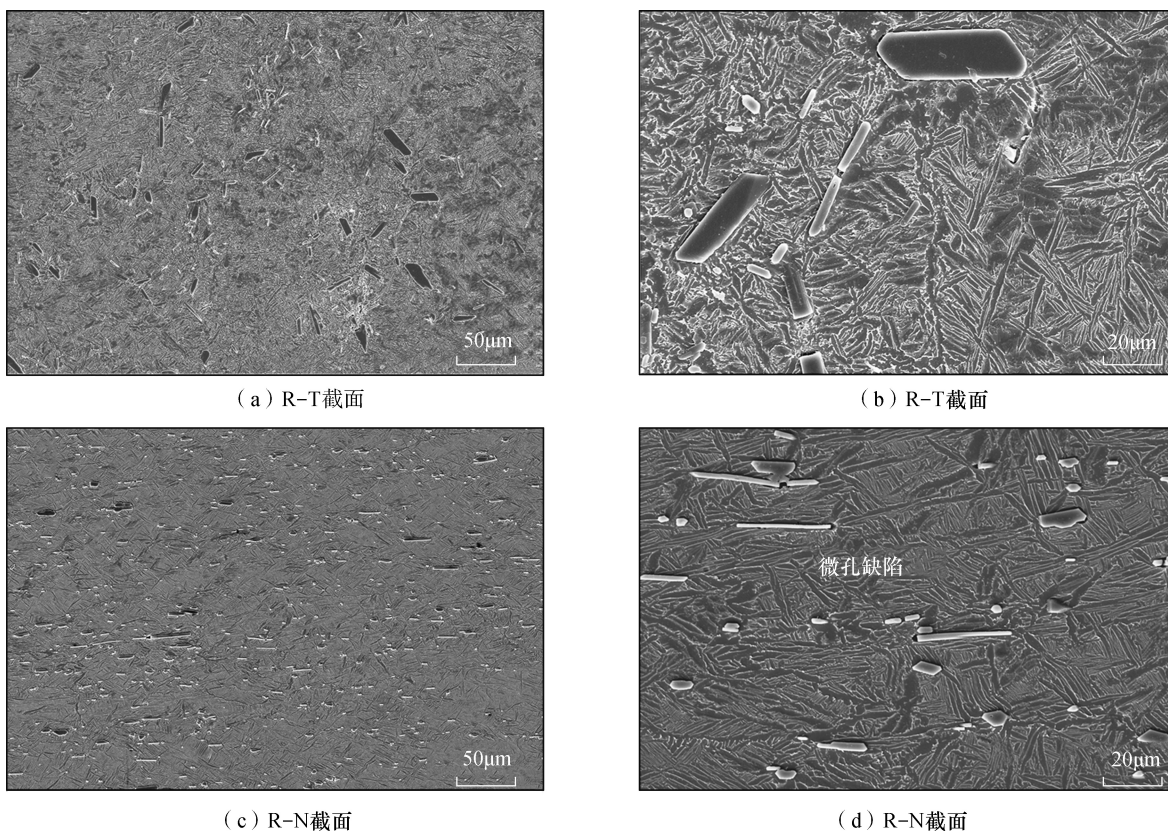


图2 $\text{TiB}_w/\text{TA15}$ 复合材料板材组织
Fig.2 Microstructure of $\text{TiB}_w/\text{TA15}$ composite sheets

织,片层明显细化, TiB_w 发生断裂现象,尺寸减小^[19]。从图2(a)和(c)可观察到轧制变形后, $\text{TiB}_w/\text{TA15}$ 复合材料板材中 TiB_w 相趋向于均匀分布,已观察不到网状形态。在 TiB_w 相中间断裂处及端部可观察到因变形过程中增强相破碎或与基体脱粘形成的微孔洞等缺陷,如图2(d)所示。

2.2 $\text{TiB}_w/\text{TA15}$ 复合材料板材力学性能研究

图3为 $\text{TiB}_w/\text{TA15}$ 复合材料板材轧向室温拉伸性能数据。 $\text{TiB}_w/\text{TA15}$ 复合材料板材室温抗拉强度达到1220MPa,延伸率达到8%。与原始板坯相比(室温抗拉强度和延伸率最大值分别为1100MPa和4.8%),板材强度及延伸率均有提升。这是因为在轧制变形时 TiB 晶须虽会受到载荷力而发生折断及破碎现象,晶须分布均匀导致增强相连通度降低,使得增强效果减弱,但热轧制变形也会使基体产生形变强化及热处理强化效果,远远抵消了增强相变化导致的强度降低,这与文献[19]研究结果相一致。同时,因基体组织细化及 TiB 晶须增强相分布均匀性增大,带来了复合材料整体塑性的提高,最终导致热轧制变形后板材强塑性的整体提升。图4为 $\text{TiB}_w/\text{TA15}$ 复合材料板材轧向高温拉伸性能数据。在600℃时,板材抗拉强度在740MPa左右,延伸率达到

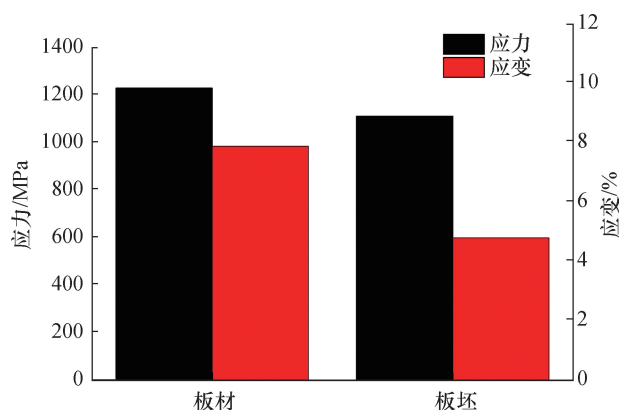


图3 $\text{TiB}_w/\text{TA15}$ 复合材料板材室温拉伸性能
Fig.3 Tensile properties of $\text{TiB}_w/\text{TA15}$ composite sheets at room temperature

13.8%;板坯抗拉强度在600MPa左右,延伸率为14.1%。在650℃时,板材抗拉强度在580MPa左右,延伸率为25%;板坯抗拉强度约为522MPa,延伸率约为18%。强韧性全面提高主要是轧制变形细化了基体组织及增强相,并使得增强相分布更加均匀,这些因素会对塑性有明显提升作用;由Hall-Petch公式可知,组织的细化可使得材料强度提升,同时轧制变形也会产生形变强化效

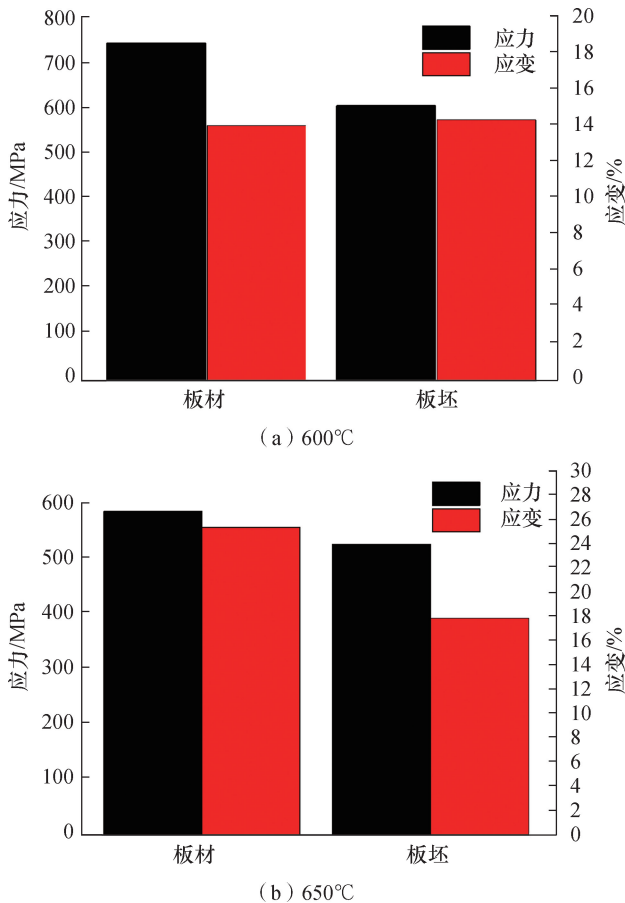
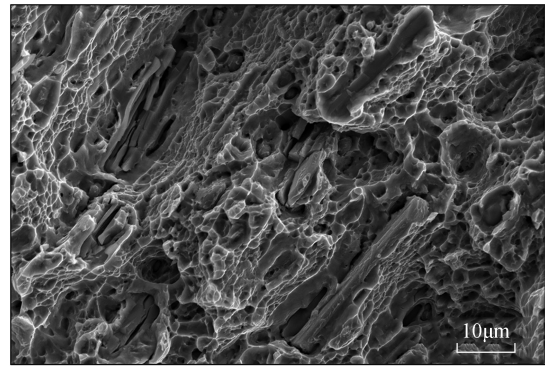


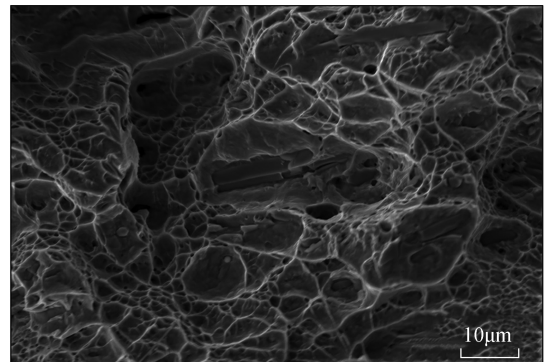
图4 TiB_w/TA15复合材料板材高温拉伸性能
Fig.4 High temperature tensile properties of TiB_w/TA15 composite sheets

果,这些因素综合作用抵消了网状结构破坏所引起的强度下降。

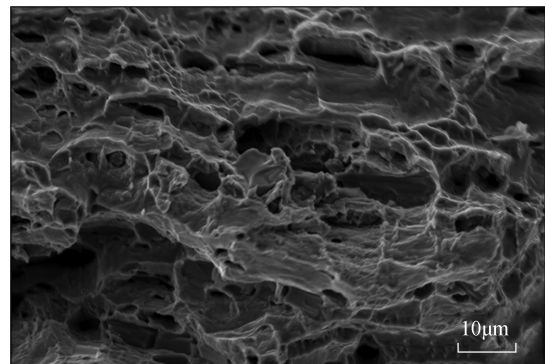
为深入分析 TiB_w/TA15 复合材料板材拉伸性能变化规律,对其断口组织进行了研究,图 5 为 TiB_w/TA15 复合材料板材拉伸断口组织图片。从图 5 中观察到,室温断口中存在 TiB_w 断裂及破碎形成的光滑平面及深入内部的二次裂纹, TiB 晶须呈脆性断裂, TiB 晶须附近 TA15 合金基体变形过程中被撕裂形成韧窝,为韧性断裂,如图 5 (a) 所示; 高温断口中仍存在 TiB_w 断裂形成的光滑表面,但相比室温断口明显较少,同时高温断口中具有较多较深的韧窝,与室温断口相比,高温下基体变形形成的韧窝明显较大,且撕裂棱较多。随着温度升高,韧窝及撕裂棱随之增大增多。断口结果与板材拉伸塑性变化规律相一致。这主要是随着温度升高, TA15 基体变形能力增强,在较高温度下基体可承受更大变形而不断裂,反映到断口上即为韧窝尺寸增大,基体变形开裂导致的撕裂棱增多。从拉伸断口侧面也可观察到,在室温拉伸时,断口侧面存在增强相断裂及增强相端部



(a) 室温



(b) 600°C

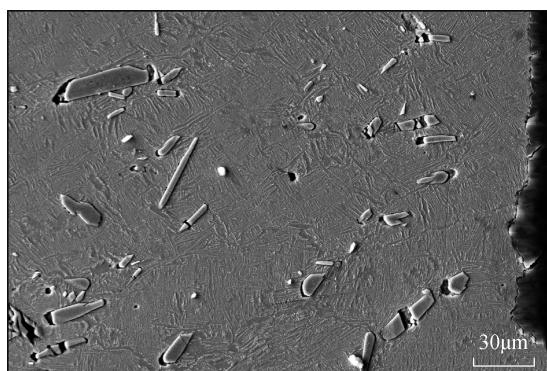


(c) 650°C

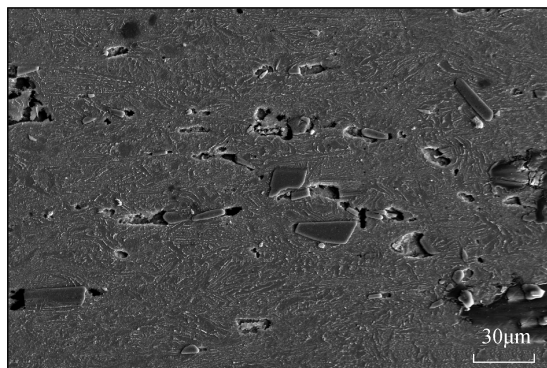
图5 TiB_w/TA15复合材料板材拉伸断口组织
Fig.5 Tensile fracture microstructure of TiB_w/TA15 composite sheets

与基体脱粘形成的孔洞,如图 6 (a) 所示; 在 600°C 高温拉伸时,断口侧面孔洞多由增强相与基体脱粘所导致,增强相破碎形成的孔洞明显减少,如图 6 (b) 所示; 在 650°C 高温拉伸时,断口侧面孔洞基本存在于增强相端部,由增强相与基体脱粘所导致,如图 6 (c) 所示; 这主要是随着温度升高,增强相及基体变形能力均增强,基体与增强相的协调变形能力也随之提高,增强相内部应力集中现象减弱,不易破碎、断裂; 而增强相与基体变形能力相差较大,裂纹更易在两者界面处形成, TiB_w/TA15 复材板材失效形式由增强相破碎、断裂转变为增

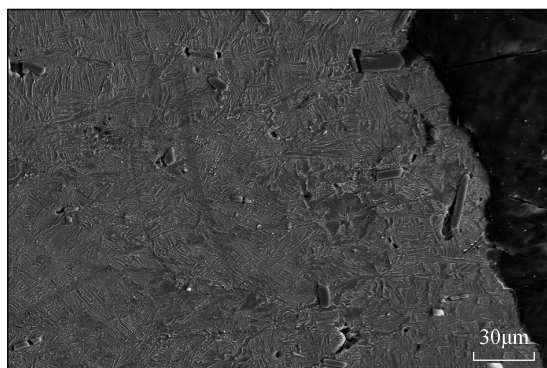
强相与基体脱粘^[20],并最终形成孔洞。Zhang等^[21]研究了3.5% TiB_w/TA15复合材料拉伸性能,网状钛基复材断口多沿网状增强相区域扩展,为类沿晶断裂形式,基体组织参与变形程度较小,在拉伸断口侧面形成的孔洞较少;而轧制变形后钛基复材内部增强相不再以连续网状形式存在,增强相断裂形成的裂纹扩展在基体处受阻,且基体组织相对细小,协同变形能力较好,以韧性断裂为主,因此轧制变形后板材塑性明显优于板坯塑性。通过以上分析还发现,增强相分布变化可改变钛基复材裂纹扩展形式,对材料断裂失效具有重要影响。



(a) 室温



(b) 600 °C



(c) 650 °C

图6 TiB_w/TA15板材拉伸断口侧面组织Fig.6 Side microstructure of tensile fracture of TiB_w/TA15 composite sheets

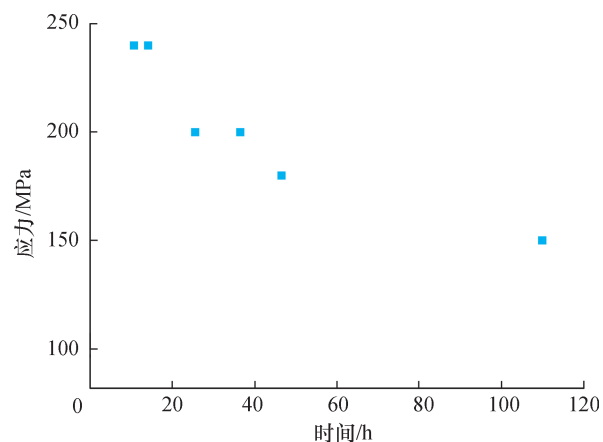
对TiB_w/TA15复合材料板材的高温持久性能进行分析,研究了650 °C高温下不同应力条件的持久性能。发现在240MPa轴向拉应力下,板材持续时间为9~14h,在200MPa轴向拉应力下,板材持续时间大于25h,当应力进一步降低到150MPa时,板材持续时间达到110h。而TiB_w/TA15复合材料烧结板坯在650 °C 240MPa条件下持续时间为10h。这表明经过大变形量轧制后,TiB_w/TA15复合材料高温持久性能没有发生明显变化,如图7所示。

在前文组织分析时,发现轧制变形后板材中会存在部分微孔洞,为研究微孔洞对板材持久性能影响,对板材持久试样断口侧面进行了分析表征,如图8所示。持久断口扩展路径较为曲折,断口处以基体断裂为主,增强相断裂及增强相与基体脱粘导致的断口区域较少,如图8(a)所示。对断口附近的组织进行分析发现,经过长时承载试验后,组织中出现较多的孔洞,在基体内部和增强相与基体界面处均存在。增强相处形成缺陷原因主要是因基体与增强相变形能力不同,增强相在载荷作用下沿受力方向滑动形成部分缺陷,但增强相附近区域承载能力仍强于基体,缺陷并未向周围扩展,因此板材内部变形导致的微缺陷对长时受力时裂纹形成及扩展影响较小,如图8(b)所示。结合持久试验结果分析,认为因轧制变形导致的微孔洞及裂纹等缺陷对板材高温持久性能影响较小。

3 结论

以TiB_w/TA15复合材料为对象,研究了轧制变形对其组织及性能影响,具体如下:

(1) TiB_w/TA15复合材料经过轧制变形后组织为由粗大的网篮组织转变为细小的片层组织;增强相分布相对均匀,已无网状排布形式,但增强相破碎、断裂后存在

图7 TiB_w/TA15复合材料板材650 °C持久性能Fig.7 Endurance properties of TiB_w/TA15 composite sheets at 650 °C

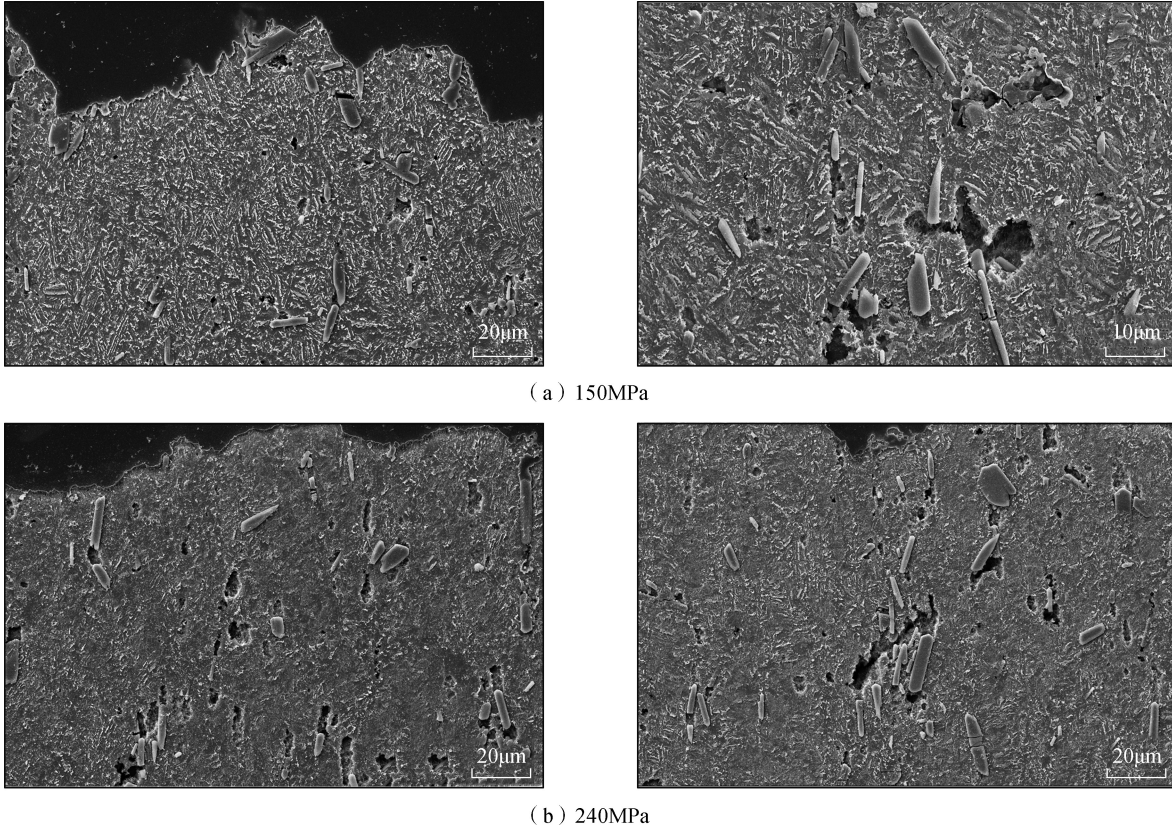


图8 TiB_w/TA15板材650℃持久断口侧面组织

Fig.8 Side microstructure of endurance fracture of TiB_w/TA15 composite sheets at 650℃

微孔洞等缺陷。

(2) TiB_w/TA15 复合材料轧制后板材室、高温拉伸强塑性均有提升,与原始板坯拉伸性能相比,其室温、高温拉伸强度提高 10% 以上,室温塑性提高 60% 以上。

(3) TiB_w/TA15 复合材料轧制后 650℃高温持久性能与板坯相当,通过持久组织及性能对比分析,发现轧制变形导致的微孔洞对高温持久性能影响较小。

参考文献

[1] 黄陆军,耿林,彭华新. 钛合金与钛基复合材料第二相强化[J]. 中国材料进展, 2019, 38(3): 214-222.
 HUANG Lujun, GENG Lin, PENG Huaxin. Strengthening and toughening mechanisms of the second phase in titanium alloys and titanium matrix composites[J]. Materials China, 2019, 38(3): 214-222.
 [2] 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[J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 1-12.
 WU Gaohui, KUANG Zeyang. Opportunities and challenges for metal matrix composites in the context of equipment upgrading[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(2): 1-12.
 [3] 倪嘉,柴皓,史昆,等. 颗粒增强钛基复合材料的研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(Z2): 369-373.
 NI Jia, CHAI Hao, SHI Kun, et al. Research progress of titanium

matrix composites reinforced by particle[J]. Materials Review, 2019, 33(Z2): 369-373.
 [4] HUANG L, QIAN M, LIU Z, et al. In situ preparation of TiB nanowires for high-performance Ti metal matrix nanocomposites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 735: 2640-2645.
 [5] RAVI CHANDRAN K S, PANDA K B, SAHAY S S. TiB_w-reinforced Ti composites: Processing, properties, application prospects, and research needs[J]. Journal of Metals, 2004, 56(5): 42-48.
 [6] LU W J, XIAO L, GENG K, et al. Growth mechanism of in situ synthesized TiB_w in titanium matrix composites prepared by common casting technique[J]. Materials Characterization, 2008, 59(7): 912-919.
 [7] ZHANG N, SUN D, HAN X, et al. Effect of spark plasma sintering temperatures on microstructure and mechanical properties of in-situ(La₂O₃+TiB)/Ti₂AlNb composites with a tailored three-dimensional network architecture[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 772: 138769.
 [8] 韩远飞,孙相龙,邱培坤,等. 颗粒增强钛基复合材料先进加工技术研究进展[J]. 复合材料学报, 2017, 34(8): 1625-1635.
 HAN Yuanfei, SUN Xianglong, QIU Peikun, et al. Research and development of processing technology on particulate reinforced titanium matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(8): 1625-1635.
 [9] SRINIVASAN R, MIRACLE D, TAMIRISAKANDALA S. Direct rolling of as-cast Ti-6Al-4V modified with trace additions of

boron[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 487(1-2): 541-551.

[10] LÜ Z D, ZHANG C J, FENG H, et al. Effect of heat treatment on microstructure and tensile properties of 2vol% TiCp/near- β Ti composite processed by isothermal multidirectional forging[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 761: 138064.

[11] GUO X, WANG L, WANG M, et al. Effects of degree of deformation on the microstructure, mechanical properties and texture of hybrid-reinforced titanium matrix composites[J]. Acta Materialia, 2012, 60(6-7): 2656-2667.

[12] RASTEGARI H A, ASGARI S, ABBASI S M. Producing Ti6Al4V/TiC composite with good ductility by vacuum induction melting furnace and hot rolling process[J]. Materials & Design, 2011, 32(10): 5010-5014.

[13] QU J, ZHANG C, ZHANG S, et al. Relationships among reinforcement volume fraction, microstructure and tensile properties of (TiB_w+TiCp)/Ti composites after ($\alpha + \beta$) forging[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 701: 16-23.

[14] 吕维洁. 原位自生钛基复合材料研究综述[J]. 中国材料进展, 2010, 29(4): 41-48.

LU Weijie. An overview on the research of in situ titanium matrix composites[J]. Materials China, 2010, 29(4): 41-48.

[15] HUANG L J, GENG L, WANG B, et al. Effects of extrusion and heat treatment on the microstructure and tensile properties of in situ TiB_w/Ti6Al4V composite with a network architecture[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012, 43(3): 486-491.

[16] ZHANG C, KONG F, XIAO S, et al. Evolution of microstructural characteristic and tensile properties during preparation of TiB/Ti composite sheet[J]. Materials & Design, 2012, 36: 505-510.

[17] ZHANG C J, GUO C X, ZHANG S Z, et al. The effect of rolling temperature on the microstructure and mechanical properties of 5vol% (TiB_w+TiC_p)/Ti composites[J]. Journal of Metals, 2020, 72(3): 1376-1383.

[18] 黄陆军, 唐骛, 戎旭东, 等. 热轧制变形对网状结构 TiB_w/Ti₆Al₄V 复合材料组织与性能的影响[J]. 航空材料学报, 2013, 33(2): 8-12.

HUANG Lujun, TANG Ao, RONG Xudong, et al. Effects of hot rolling deformation on microstructure and mechanical properties of TiB_w/Ti₆Al₄V composites with network microstructure[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013, 33(2): 8-12.

[19] ZHANG R, WANG D, HUANG L, et al. Effects of heat treatment on microstructure and high temperature tensile properties of TiB_w/TA15 composite billet with network architecture[J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 679: 314-322.

[20] 张长江, 张树志, 侯赵平, 等. (TiB_w+TiCp)/Ti 复合材料的高温拉伸力学行为与失效机理[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(11): 2287-2295.

ZHANG Changjiang, ZHANG Shuzhi, HOU Zhaoping, et al. Tensile mechanical behavior and failure mechanism of (TiB_w+TiCp)/Ti composites at elevated temperature[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(11): 2287-2295.

[21] ZHANG R, WANG D, HUANG L, et al. Effects of heat treatment on microstructure and high temperature tensile properties of

TiB_w/TA15 composite billet with network architecture[J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 679: 314-322.

通讯作者: 曾元松, 研究员、博士, 研究方向为钛合金塑性成形, E-mail: yszengnantes@yahoo.com.

(责编 台系)

(上接第94页)

参考文献

[1] 张曙. 工业 4.0 和智能制造[J]. 机械设计与制造工程, 2014, 43(8): 1-5.

ZHANG Shu. The industry 4.0 and intelligent manufacturing[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2014, 43(8): 1-5.

[2] 石磊, 杨叔子, 刘延林, 等. 一种智能加工中心的设计与原型构造[J]. 华中理工大学学报, 1995(6): 66-69.

SHI Lei, YANG Shuzi, LIU Yanlin, et al. Prototype design of an intelligent machining center[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1995(6): 66-69.

[3] 梁建成, 李圣怡, 温熙森, 等. 机床智能加工的体系结构[J]. 国防科技大学学报, 1994, 16(2): 24-28.

LIANG Jiancheng, LI Shengyi, WEN Xisen, et al. Intelligent machining system structure of machine tool[J]. Journal of National University of Defense Technology, 1994, 16(2): 24-28.

[4] 鄢萍, 阎春平, 刘飞, 等. 智能机床发展现状与技术体系框架[J]. 机械工程学报, 2013, 49(21): 1-10.

YAN Ping, YAN Chunping, LIU Fei, et al. Development status and technical system framework for smart machine tool[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(21): 1-10.

[5] 骆金威, 李飞, 卢大伟. 航空结构件智能化加工设备的发展方向[J]. 航空制造技术, 2017, 60(6): 51-54.

LUO Jinwei, LI Fei, LU Dawei. Future directions of intelligent machining equipment for aeronautic structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(6): 51-54.

[6] 邵泽明, 关大力. 数控机床智能化技术[J]. 航空制造技术, 2015, 58(5): 46-49.

SHAO Zeming, GUAN Dali. Intelligent technology of CNC machine tools[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(5): 46-49.

[7] 周延佑, 陈长年. 智能机床——数控机床技术发展新的里程碑—IMTS2006 观后感之一[J]. 制造技术与机床, 2007(4): 43-46.

ZHOU Yanyou, CHEN Changnian. Intelligent machine new landmark of development on machine tool technology: Review of IMTS 2006(I)[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2007(4): 43-46.

[8] LIU Y D, GUO X G, LI W, et al. An intelligent NC program processor for CNC system of machine tool[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2007, 23(2): 160-169.

通讯作者: 唐敦兵, 教授、博士生导师, 研究方向为智能制造系统、制造系统与自动化、数字化设计与制造, E-mail: d.tang@nuaa.edu.cn.

(责编 逸飞)