

多层梯度超细晶粒钛强韧化机理研究

刘佳文¹, 方红梅¹, 曹丽丽¹, 张亚², 杨登科^{1*}

(1. 浙江科技学院机械与能源工程学院, 浙江 杭州 310023; 2. 浙江师范大学工学院, 浙江 金华 321004)

摘要:针对超细晶粒金属在室温下韧性及加工硬化性能较差的问题,利用低温轧制和表面机械研磨处理工艺,设计和制备了金属材料的微观多层梯度结构,提高了超细晶钛的力学性能及加工硬化能力。通过对多层梯度超细晶粒钛的微观结构观察和试样力学性能测试,结合试样断后截面及表面分析观察,结果表明,多层梯度化微观结构可以提高超细晶金属的加工硬化能力,实现更为缓和的应力分布,从而提高工件失效裂纹的抵抗力。在此基础上提出了一个断裂力学模型来解释多层梯度化结构的止裂效应。

关键词:超细晶材料; 钛; 增韧; 多层结构; 梯度结构

中图分类号: TF823, TG113.25

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2023)03-0093-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.03.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Study on the strength and toughness mechanism of multilayered gradient ultrafine-grained titanium

Liu Jiawen¹, Fang Hongmei¹, Cao Lili¹, Zhang Ya², Yang Dengke^{1*}

(1. School of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China; 2. College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, Zhejiang, China)

Abstract: In view of the poor toughness and work hardening performance of ultra-fine grained (UFG) metals at room temperature, we designed and prepared the micro multilayer hierarchical structure (MHS) of metal materials using low-temperature rolling and surface mechanical attrition treatment (SMAT) processes, which improved the mechanical properties and work hardening ability of UFG Ti. The microstructure observation and mechanical properties testing, combined with fracture surface analysis, show that the multilayer gradient microstructure can improve the work hardening ability of ultrafine-grained metal, achieving a more moderate stress distribution and an improved resistance of the workpiece to failure cracks. A fracture mechanics model is proposed to explain the crack arrest effect of the MHS.

Key words: ultrafine-grained materials, Ti, toughening, multilayered structure, gradient structure

0 引言

当材料的晶粒尺寸减小到超细晶粒 (ultrafine-

grained, UFG) 或纳米 (nanograined, NG) 晶粒尺度, 其机械强度将提高几个数量级^[1]。这是由于材料晶粒细化后, 晶界大量聚集导致强度得到了巨大的提

收稿日期: 2022-11-03

基金项目: 浙江省重点研发计划项目 (2021C01084)。

作者简介: 刘佳文, 1997 年出生, 男, 江西新余人, 硕士研究生, 主要研究高性能金属材料, E-mail: 2541160167@qq.com;

* 通讯作者: 杨登科, 1978 年出生, 男, 教授, 硕士生导师, E-mail: dkyang@issp.ac.cn。

升,且大量的晶界阻碍了晶格中位错的形成和移动,从而提高了屈服能力。尽管超细晶粒和纳米晶粒材料具有优异的机械强度和硬度,但大多数材料的塑性非常有限^[2-3]。这一缺点导致其适用性有限,在承载中极易发生断裂失效。通常在不显著降低强度的情况下,对超细晶金属增韧的几种方法包括:产生原位形成的非均匀复合微观结构^[4],在高应变率或较低温度下改善其力学性能^[5],以及制备具有大角度晶界和低位错密度的纳米晶粒结构^[6]。

轧制或喷丸处理产生的表面变形会在材料表层产生残余应力。对于韧性断裂的传统金属材料,表面残余应力可以提高材料的疲劳强度,但是对加工硬化能力的强化作用不明显^[7]。对于脆性材料,如陶瓷和无机玻璃,是通过脆性断裂方式而失效,表面残余应力能提高其断裂强度^[8]。超细晶粒材料具有较低的敏感性和延展性,这与传统陶瓷或玻璃相似。众所周知,超细晶粒材料的宏观塑性变形是通过剪切带的形成和演化完成的,其中大量塑性流动集中在一个相当狭窄的区域内^[1-3]。当前对陶瓷或玻璃中层状结构和残余应力的应用,以及在传统粗晶金属中实现梯度结构^[9-10]的研究比较广泛,但对超细晶粒或纳米晶粒金属中的多层梯度化和表面残余应力增韧机理却少有研究。此外,在过去十几年中,许多研究人员已成功通过大变形制造了超细晶粒钛^[11-12]。

表面机械研磨处理是材料表面纳米化的有效方法之一,它由中科院金属研究所卢院士团队首创,并成功应用于多种金属材料^[12]。表面机械研磨可实现由外到内的材料晶粒尺寸梯度分布,但是单纯采用表面机械研磨技术,只会在钛表面实现纳米化晶粒,无法达到超细晶粒梯度效果。笔者将低温冷轧和表面机械研磨处理结合起来应用于商用纯钛,用来制备多层梯度化超细晶粒。以此研究多层化和梯度化对其力学性能的影响,同时提供力学模型揭示多层梯度化结构超细晶粒钛的强韧机制,为开发高强度、高韧性的纳米/超细晶粒材料提供了有价值的试验结果及理论依据。

1 试验过程

将平均晶粒尺寸约为 60 μm 的 2 级商用钛板在实验室中从 36 mm 厚低温轧制至 5 mm 厚,每次轧制量约 2 mm。在每道轧制之前,将钛板浸入液氮中浸泡 15 min 以降低温度。使用热电偶分别测

量工件轧制前后的温度为 $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在冷轧过程中,沿着轧制工件厚度分布的剪切应力将极大地影响晶粒细化,导致晶粒尺寸在轧制工件的厚度上呈现梯度分布。在后续表面机械研磨处理中,这种晶粒梯度分布效应将被进一步加强。冷轧后,工件内部由等轴晶粒组成,晶粒尺寸为 50 ~ 250 nm。然后将工件平行于轧制方向切割成尺寸为 5 mm \times 5 mm \times 90 mm 的样品。随后在样品的四个侧面依次进行表面机械研磨处理,此工艺在低真空 ($10^5 \sim 10^2\text{ Pa}$) 中进行,使用硬化不锈钢球(直径 8 mm),每侧振动频率为 50 Hz,持续 60 min。为避免机械能导致样品表面温度升高,每运行 10 min,停留 15 min。

室温下利用 Instron 100 kN 力学性能测试机,将尺寸为 5 mm \times 5 mm \times 10 mm 的试样以 $5\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 的应变率沿轧制方向进行压缩测试。多层梯度钛的横截面抛光至 0.5 μm 后采用纳米压痕系统和 Berkovich 金刚石探针进行纳米压痕试验,应变速率为 $5\times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$,最大载荷为 20 mN。使用扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM, 蔡司 Supra 55 VP, 工作电压为 10 kV),透射电镜 (transmission electron microscope, TEM, JEOLJEM 2100, 工作电压为 200 kV) 对样品进行微观结构观察。透射电镜试样取于样品表面 20、60、500 μm 深度的区域。然后将透射试样研磨至厚度约为 40 μm ,最后在 Gatan PIPS 系统中进行低能离子抛光和穿孔。各层的残余应力-深度分布测试^[13-14]在 45 kV/35 mA 条件下工作的 X 射线衍射仪中进行。

2 试验结果与讨论

2.1 多层梯度钛的显微组织特征

微观结构研究表明,经低温轧制和表面机械研磨处理的钛,其表面由三个不同的晶粒层组成(图 1):外部非晶纳米晶混合层(A/NC,厚度为 30 μm)、中间纳米晶粒层(NG,厚度为 60 μm)和最内部的超细晶粒芯(UFG)。透射电镜图 2 揭示了最外层非晶纳米晶混合层的微观结构由明亮的非晶基体和弥散的纳米晶组成。(图 2 右上方插图是非晶相的选区衍射图,左下方插图是纳米晶体的选区衍射图)。图 3 表明了中间层由平均尺寸为 40 nm 的纳米晶粒组成。(图 3 中左上方插图是其相应的选区衍射图案)。通过图 4 可知,最内部的芯层由超细等轴晶组成,晶粒尺寸分布在 50 ~ 250 nm。

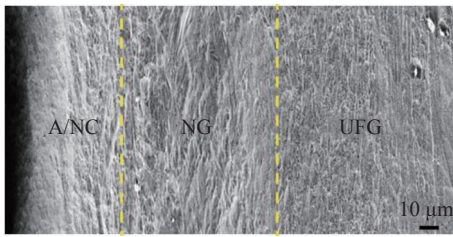


图 1 多层梯度超细晶粒钛试样横截面的扫描电镜图像
Fig. 1 SEM image of the lateral surface of MHS Ti specimen

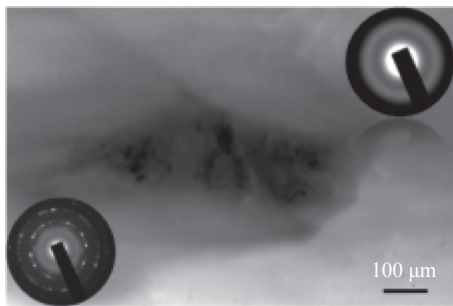


图 2 表面以下 20 μm 处的微观结构透射电镜亮场图像
Fig. 2 TEM bright-field (BF) image of the microstructures 20 μm below the top surface

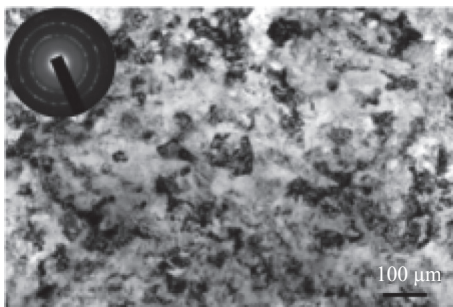


图 3 表面以下 60 μm 处微观结构透射电镜亮场图像
Fig. 3 TEM BF image of the microstructure 60 μm below the top surface

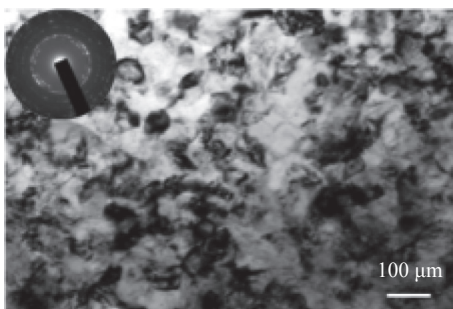


图 4 超细晶粒核的透射电镜亮场图像
Fig. 4 TEM BF image of the UFG core

图 5 为最大载荷为 20 mN 时, 多层梯度钛横截面上的平均纳米压痕硬度和压痕模量 (纳米压痕硬度和压痕模量值取 10 次测量的平均值)。通过纳米压痕试验得到硬度和模量从外层到内层逐渐降低,

这与多层梯度的微观结构特征一致。图 6 显示了多层梯度钛与均匀超细晶粒钛的工程应力-应变曲线。图 6 表明, 通过多层梯度化结构, 多层梯度超细晶粒钛的强度和韧性明显提高^[15]。

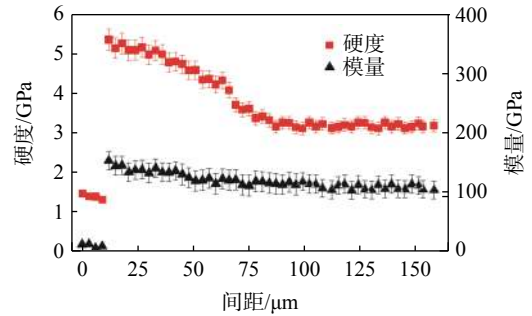


图 5 最大载荷为 20 mN 时, 多层梯度钛横截面上的平均纳米压痕硬度和压痕模量

Fig. 5 Average indentation hardness and modulus on across the cross-section of MHS Ti with a maximum load of 20 mN

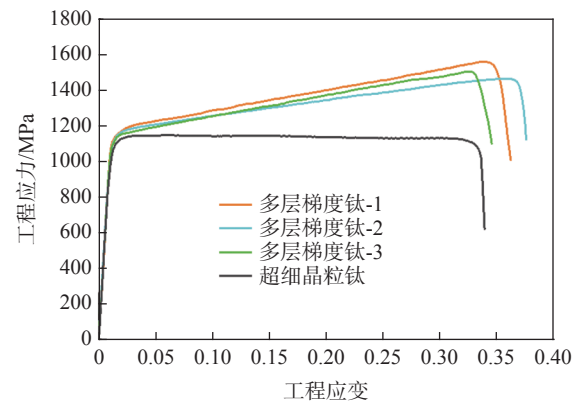


图 6 多层梯度超细晶粒钛和均匀超细晶粒钛的工程应力-应变曲线

Fig. 6 Engineering stress-strain curves of MHS Ti and uniform UFG Ti

该特性与各层的微观结构相关, 由于表面机械研磨处理工艺的特点是从试样表面到其核心的应变和应变率逐渐降低, 因此各连续层之间的晶粒尺寸逐渐增加。与沉积或涂层产生的其他多层系统相比, 目前的多层微观结构没有层间的弹性失配和分层, 这是控制裂纹限制的两个关键因素。各层之间连接且具有梯度, 层内和层间的梯度为应力传递和重新分布提供了过渡区域, 从而减轻了界面破坏, 阻止了裂纹扩展并增加了负载阻力^[16]。

2.2 变形试样与断裂面

为了深入了解多层梯度超细晶粒钛增韧机理, 将试样的一个侧面去除非晶纳米晶粒混合层和纳米晶粒层, 并抛光至镜面, 然后进行压缩试验。如

图 7(a) 所示, 在超细晶粒层中可以观察到明显的局部剪切区域, 而纳米晶粒层在 5% 的应变后显示出均匀的形态, 没有任何局部剪切。蓝色圆圈表示超细晶粒芯中的局部剪切区域, 这一观察结果表明, 局部剪切起始于超细晶粒层而不是纳米晶粒层。图 7(b) 显示了超细晶粒层和纳米晶粒层界面处堆积的局部剪切, 表明其起源于超细晶粒芯的局部剪切, 随着变形量增加, 在纳米晶粒层和超细晶粒层的

界面处堆积并受阻。图 8 显示了光学显微镜下的一条失效裂纹, 该裂纹在整个超细晶粒堆芯上扩展, 但在变形 30% 后, 在纳米晶粒层和超细晶粒芯界面处停止并分叉。以上试验观察结果表明, 纳米晶粒层具有显著的阻碍变形能力, 并且在压缩变形期间, 裂纹在超细晶粒芯中起源并随着变形量的增大优先向纳米晶粒层扩展^[16]。

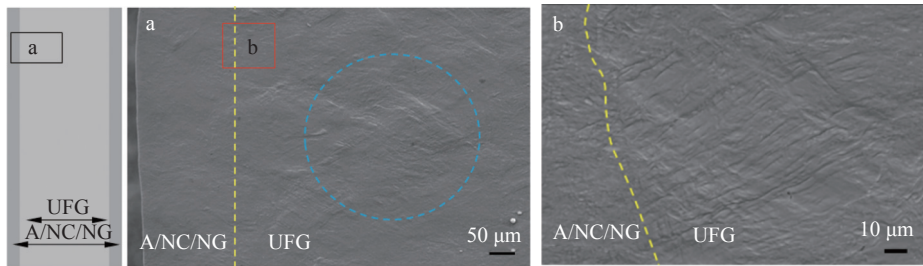


图 7 (a) 为抛光侧面的扫描电镜形貌, (b) 为红框区域的高倍 SEM 图像
Fig. 7 SEM image of the polished side (a), and high-magnification SEM image of the red box area (b)

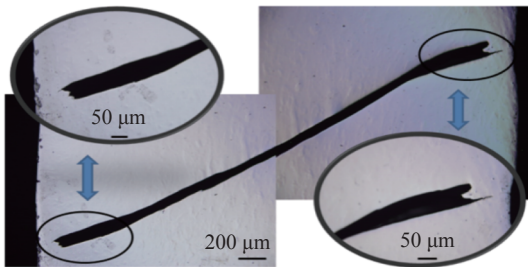


图 8 失效裂纹在整个超细晶粒芯中扩展的光学显微镜观察
Fig. 8 Optical microscope image of a fatigue crack propagation across the entire UFG core

如图 7 所示, 在最初的压缩变形期间, 超细晶粒芯中产生的局部剪切在纳米晶粒层停止。微观力学梯度结构实现了更为平缓的应力分布, 阻止了界面失效。因此, 在图 7 和图 8 中未观察到分层和界面失效。5% 变形应变后测得纳米晶粒层/超细晶粒芯界面区域的残余应力为拉伸应力, 约为 940 MPa, 大约比其原始值高 250 MPa(图 9, 深度约为 150 μm)。纳米晶粒层/超细晶粒芯界面区域残余应力的增加是由 5% 的变形应变引起的。合理的解释是纳米晶粒层的弹性极限高于超细晶粒芯^[17-18]。卸载后, 纳米晶粒层具有较高的弹性极限, 其趋势是向着被压缩方向恢复, 但因为层间连接处存在梯度结构, 纳米晶粒层的恢复受到了超细晶粒核心的阻碍, 因此不存在结构突变和分层。因此, 超细晶粒芯将纳米晶粒层变形为压缩状态, 从而产生残余拉伸应力^[19-20]。

界面处的拉应力场干扰了裂纹尖端的应力因子, 导致裂纹扩展应力强度的降低, 从而在界面处形成剪切局部化堆积和微裂纹分叉。因此, 在纳米晶粒层/超细晶粒芯界面上裂纹扩展所需的外加应力增加, 从而提高了材料的韧性。

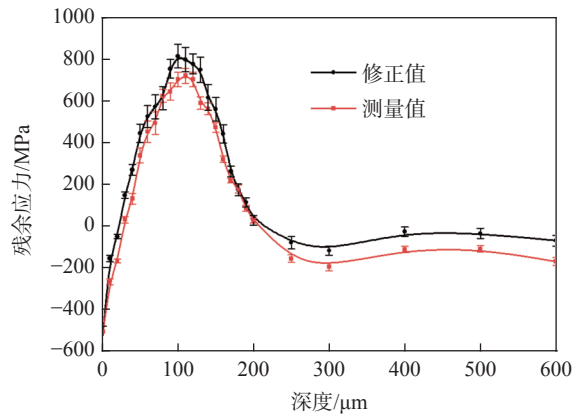


图 9 多层梯度钛层测量的残余应力-深度剖面
Fig. 9 The residual stress–depth profile measured through the layers of MHS Ti

2.3 残余应力与断裂力学模型

通过低温轧制和表面机械研磨处理, 可以将复杂的残余应力引入材料表面。多层梯度钛的残余应力-深度剖面如图 9 所示, 为了表明轧制残余应力的分布, 根据文献 [13-14] 对测量得到的应力分布进行了修正。可以看到, 在最外的非晶/纳米晶混合层和最内的超细晶粒芯出现压应力, 在纳米晶粒层/超

细晶粒层界面出现较大拉应力。但如图 8 显示, 裂纹在纳米晶粒层/超细晶粒芯界面处受阻并分叉。根据以上试验结果, 笔者提出了一种断裂力学模型来解释纳米晶粒层/超细晶粒芯界面的止裂效应。

图 10 是用于计算止裂应力强度因子的叠加应力场示意。假设大小为 σ_t 的残余拉应力作用在厚度为 t_1 的加强层(A/Nc 层和 NG 层)上, 大小为 σ_c 的残余压应力作用在厚度为 t_2 的超细晶粒芯上。整个试样受到大小为 σ_a 的外加压应力的作用。分析基于计

算支持裂纹扩展的应力强度因子 K 。设跨越纳米晶粒层/超细晶粒芯界面的裂纹长度为 $2a$, 相对于水平线的倾斜角为 β 。图 10(a) 中所示的应力可由 (b) 和 (c) 中所示的应力叠加形成。当裂纹延伸至纳米晶粒层/超细晶粒芯界面区域($t_2 \leq 2a \leq t_2 + 2t_1$)时, 如图 10(d) 所示。平行于试样的应力可分解为两个分量: 垂直于倾斜裂纹的法向应力 σ_y 和与 σ_y 相切的剪应力 τ_x 。这两个应力分量为: $\sigma_y = \sigma \cos^2\beta$ 和 $\tau_x = \frac{\sigma}{2} \sin 2\beta$ 。

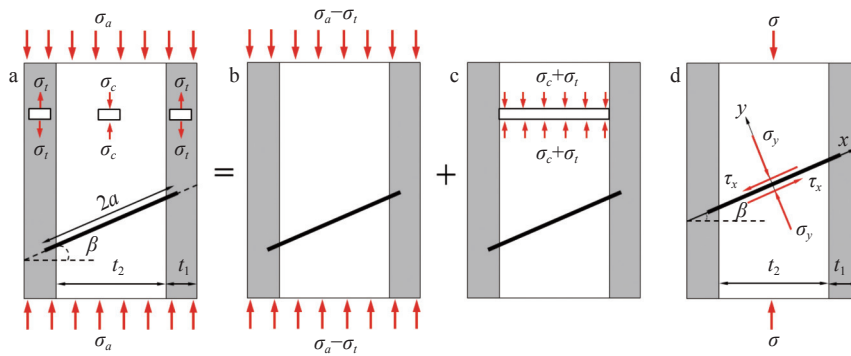


图 10 用于计算止裂应力强度因子的叠加应力场示意

Fig. 10 Schematic illustration of the superimposed stress field used to calculate the stress intensity factor of the arrested crack

图 10(a) 中裂纹的应力强度因子 K_a 可由图 10(b) 和 (c) 中所示的两个应力场叠加得到。根据叠加原理^[20-21], 应力强度因子 K_a 是由 K_b 和 K_c 分解应力场产生的应力之和, 如式(1)所示:

$$K_a = K_b + K_c \quad (1)$$

K_b 是外加在整个试样上, 大小为 $\sigma_a - \sigma_t$ 的压应力场的应力强度因子(图 10(b))。 K_c 是施加在超细晶粒芯上, 大小为 $\sigma_c - \sigma_t$ 的压应力场的应力强度因子(图 10(c))。

K_b 的应力强度因子如式(2)、(3)所示:

$$K_{1b} = (\sigma_a - \sigma_t) \cos^2\beta \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

$$K_{IIb} = \frac{(\sigma_a - \sigma_t)}{2} \sin 2\beta \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

K_c 的强度因子表示如式(4)、(5)所示^[22]:

$$K_{1c} = (\sigma_c + \sigma_t) \cos^2\beta F_{I1} \left(\frac{a}{W} \right) \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

$$K_{IIc} = \frac{(\sigma_c + \sigma_t)}{2} \sin 2\beta F_{II1} \left(\frac{a}{W} \right) \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

式中, a 为裂纹长度(mm); W 为构件宽度(mm), 此处 $W = (t_2 + 2t_1) / \cos\beta$; $\sigma_c = \sigma_t t_1 / t_2$ 。 F_{I1} 和 F_{II1} 是裂纹长度与试样宽度之比的函数^[22]。因为试样在变形过程中没有

分层现象, 所以压应力和拉应力在各层处于平衡状态, 即: $\sigma_t t_1 + \sigma_c t_2 = 0$, $\sigma_c = \sigma_t \frac{t_1}{t_2}$ 。代入公式(1)~(5), 整理可得式(6)、(7):

$$K_{Ia} = \sigma_a \cos^2\beta \sqrt{\pi a} + \sigma_t \cos^2\beta \sqrt{\pi a} \left[F_{I1} \left(1 + \frac{t_1}{t_2} \right) - 1 \right] \quad (6)$$

$$K_{IIa} = \frac{\sigma_a}{2} \sin 2\beta \sqrt{\pi a} + \frac{\sigma_t}{2} \sin 2\beta \sqrt{\pi a} \left[F_{II1} \left(1 + \frac{t_1}{t_2} \right) - 1 \right] \quad (7)$$

式中, K_{Ia} 是压缩应力 σ_a 下倾斜裂纹的 I 型应力强度因子, 该因子表达了在压应力场中, 此类条件下裂纹的闭合特性^[23]。根据 $F_{I1} < 1$ 和 $t_1 t_2 \rightarrow 0$, 式(6)中的第二项 $\left(\sigma_t \cos^2\beta \sqrt{\pi a} \left[F_{I1} \left(1 + \frac{t_1}{t_2} \right) - 1 \right] \right)$ 为负值, 因此当裂纹扩展到纳米晶粒/超细晶粒芯界面层时, 会降低 I 型应力强度因子 K_{Ia} 。 K_{IIa} 是大小为 σ_a 的压应力场中的倾斜裂纹的模式 II 应力强度因子, 代表裂纹沿着扩展方向的剪切力^[23]。由于式(7)第二项 $\left(\frac{\sigma_t}{2} \sin 2\beta \sqrt{\pi a} \left[F_{II1} \left(1 + \frac{t_1}{t_2} \right) - 1 \right] \right)$ 小于零, 因此意味着在裂纹扩展到纳米晶粒和超细晶粒芯界面区域后, II

型应力强度因子 K_{Ic} 随之减少。

通过降低 I 型应力强度因子 K_{Ic} , 纳米晶粒层/超细晶粒层界面将减小裂纹的闭合效应。因此, 移动裂纹尖端将变宽, 模式 II 应力强度因子的降低增加了材料对裂纹扩展的抵抗力^[24-25]。图 7 证明了纳米晶粒层/超细晶粒层界面层对裂纹屏蔽的影响, 以及由此产生的断裂韧性。其中裂纹扩展在纳米晶粒层和超细晶粒层区域附近变宽、分叉和停止。这些试验观察结果表明, 纳米晶粒层和超细晶粒层界面区域对裂纹的扩展起了屏蔽作用。受力模型(式(6)和式(7))从理论上解释这种裂纹屏蔽作用是通过减少裂纹扩展的应力强度因子实现的。纳米晶粒层和超细晶粒层界面区域导致裂纹“穿透”加强层所需的最小应力增加, 从而使材料增韧并改善了其加工硬化性能^[26]。

3 结论

通过上述微观结构和失效分析, 得到以下结论:

1) 多层梯度钛的微观结构从上表面到试样中心, 依次为非晶纳米晶混合层、纳米晶粒层和超细晶粒层。

2) 非晶纳米晶混合层和纳米晶粒层对强化多层梯度钛的加工硬化起了重要作用。纳米晶粒层/超细晶粒层界面区域的止裂效应导致所需的外加应力增加, 从而导致裂纹无法“突破”加强层。

3) 在单轴压缩过程中, 纳米晶粒层中的塑性变形比超细晶粒层中的变形更加均匀。裂纹首先出现在超细晶粒层中, 然后向纳米晶粒层扩展。

4) 多层梯度超细晶粒结构的整体变形和加工硬化响应是由多层结构以及层内和层间微观结构梯度所提供的强化效应造成的。

通过设计超细晶粒钛的多层梯度化微观结构, 提高了材料的加工硬化能力。该材料设计原理也可应用于其他金属材料。笔者提出的多层和梯度化设计思路为开发高强度和优良加工硬化能力的超细晶粒材料提供了有价值的理论依据。

参考文献

- [1] Lei Manjiang. Corrosion fatigue properties of UFG CP Ti prepared by compound refinement [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.
(雷漫江. 复合细化制备超细晶工业纯钛的腐蚀疲劳行为研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.)
- [2] Yang Yu. Study on microstructure evolution of ultrafine crystallization of TA2 industrial pure titanium[J]. Light Industry Technology, 2020, 36(2): 45-46.
(杨羽. TA2工业纯钛超细晶化的组织演化规律研究[J]. 轻工科技, 2020, 36(2): 45-46.)
- [3] Zhao Pengcheng. A study on the mechanism of temperature and stress induced recrystallization and grain growth of ultrafine grained CP Ti[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2020.
(赵鹏程. 温度及应力诱发超细晶工业纯钛再结晶与晶粒长大的机理研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2020.)
- [4] Ma Weijie, Yang Xirong, Luo Lei, et al. Dynamic recrystallization model of ultra-fine grained pure titanium under combined deformation[J]. Journal of Materials Research, 2020, 34(3): 217-224.
(马炜杰, 杨西荣, 罗雷, 等. 复合形变超细晶纯钛的动态再结晶模型[J]. 材料研究学报, 2020, 34(3): 217-224.)
- [5] Murzaev R T, Bachurin D V, Mukhametgalina A A, et al. Ultrasonic treatment of ultrafine-grained titanium[J]. Physics Letters A, 2020, 384(35): 126906.
- [6] Zhang D Y, Qiu D, Gibson M A. et al. Author correction: Additive manufacturing of ultrafine-grained high strength titanium alloys[J]. Nature, 2020, 582(7811): E5.
- [7] Zhuang Limin. Study on the microstructure and properties of ultrafine grain pure Cu, pure Al and Cu/Al multilayer composite plates prepared by accumulative roll forming[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2015.
(庄丽敏. 累积叠轧法制备的超细晶纯Cu、纯Al及Cu/Al多层复合板组织与性能的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.)
- [8] Li Jianguo, Guo Yazhou, Li Yulong, et al. Preparation and mechanical properties of ultra-fine grained pure titanium at room temperature[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(3): 681-687.
(李建国, 郭亚洲, 李玉龙, 等. 常温下超细晶纯钛的制备及其力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(3): 681-687.)
- [9] Nokhrin A V, Andreev P V, Likhnikskii C V, et al. Studying corrosion resistance of weld joints of ultrafine-grained titanium alloys[J]. Iop Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1014(1): 012037.
- [10] Daniel Wojtas, Krzyzstof W, Robert C, et al. Microstructure strength relationship of ultrafine-grained titanium manufactured

- by unconventional severe plastic deformation process[J]. *Journal of Alloy and Compounds*, 2020, 837: 155576.
- [11] Liu Detong. Study on microstructure evolution and thermal stability of ultrafine-grained pure titanium after high pressure torsion treatment [D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2015.
(刘德同. 高压扭转处理超细晶纯钛微观组织演变及热稳定性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.)
- [12] Feng Fan, Xin Haitao, Wu Yulu, *et al.* Effect of different roughening treatments on surface properties of ultrafine-grained pure titanium[J]. *Journal of Practical Stomatology*, 2017, 33(2): 168–173.
(丰帆, 辛海涛, 吴玉禄, 等. 不同粗化处理对超细晶纯钛表面性能的影响[J]. *实用口腔医学杂志*, 2017, 33(2): 168–173.)
- [13] Noyan I C, Cohen J B. Residual stresses measurement by diffraction and interpretation [M]. New York: Springer-Verlag, 1987.
- [14] Díaz N E Vives, Schacherl R E, Zagonel L F, *et al.* Influence of the microstructure on the residual stresses of nitrated iron–chromium alloys[J]. *Acta Materialia*, 2007, 56(6): 1196–1208.
- [15] Yang Y. Study on microstructure evolution of ultrafine crystallization of TA2 industrial pure titanium[J]. *Journal of Physics:Conference Series*, 2022, 2229(1): 012003.
- [16] Chong Yan, Tsuru Tomohito, Guo Baoqi, *et al.* Ultrahigh yield strength and large uniform elongation achieved in ultrafine-grained titanium containing nitrogen[J]. *Acta Materialia*, 2022, 240: 118356.
- [17] Yang Xirong, Wang Liyuan, Hao Fengfeng, *et al.* Fretting fatigue properties of ultrafine grained pure titanium[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(10): 3433–3438.
(杨西荣, 王立元, 郝凤凤, 等. 超细晶纯钛的微动疲劳特性[J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49(10): 3433–3438.)
- [18] Liu Xiaoyan, Liu Kuijun, Yang Xirong, *et al.* Fatigue crack propagation behavior of ultrafine-grained pure titanium[J]. *Journal of Materials Research*, 2020, 34(6): 417–424.
(刘晓燕, 柳奎君, 杨西荣, 等. 超细晶纯钛疲劳裂纹的扩展行为[J]. *材料研究学报*, 2020, 34(6): 417–424.)
- [19] Liu Jianlong. Study on plastic micro forming and size effect of ultrafine grain titanium[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2016.
(刘建龙. 超细晶纯钛塑性微成形及其尺寸效应研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2016.)
- [20] Zhang Zhiwei. Study on plastic behavior of high strength ultrafine grained metallic materials [D]. Ma'anshan: Anhui University of Technology, 2020.)
(张志伟. 高强度超细晶金属材料塑性行为研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2020.)
- [21] Peng Shaochi, Jing Laiwang, Wu Di, *et al.* Analytical solution of stress intensity factor at the closed crack tip of a circular hole plate under compression[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2022, 33(6): 159–166.
(彭绍驰, 经来旺, 吴迪, 等. 受压圆孔板的闭合裂纹尖端应力强度因子解析解[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(6): 159–166.)
- [22] Zhang Zhengguo. Calculation of stress intensity factor K of Griffith crack in orthotropic plate by superposition principle and symmetry anti symmetry principle $K_I K_{II}$ [J]. *Engineering Mechanics*, 1985, (1): 6–24.
(张正国. 应用叠加原理和对称—反对称原理计算正交各向异性板Griffith裂纹的应力强度因子 $K_I K_{II}$ [J]. *工程力学*, 1985, (1): 6–24.)
- [23] Nikonenko A V, Popova N A, Nikonenko E L, *et al.* Phase composition of ultrafine-grained titanium after aluminum ion implantation[J]. *Russian Physics Journal*, 2021, 64: 302–308.
- [24] Chen W J, Xu J, Liu D T, *et al.* Thermal stability of ultrafine-grained pure titanium processed by high pressure torsion[J]. *Materials Science Forum*, 2021, 1016: 338–344.
- [25] Yang Xirong, Yang Yuxin, Liu Xiaoyan, *et al.* Effect of strain ratio on low cycle fatigue behavior of composite ultrafine grained pure titanium[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(9): 3136–3142.
(杨西荣, 杨雨欣, 刘晓燕, 等. 应变比对复合细化超细晶纯钛低周疲劳行为的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49(9): 3136–3142.)
- [26] Zhang Zipeng, Song Xu, Li Xiaoqiang, *et al.* Research progress of mechanical treatment technology for metal ultrafine grain surface[J]. *Precision Forming Engineering*, 2021, 13(4): 159–171.
(张子鹏, 宋旭, 李小强, 等. 金属超细晶表面机械处理技术研究进展[J]. *精密成形工程*, 2021, 13(4): 159–171.)