

表面机械滚压对 Zr-4 合金组织和力学性能的影响

辛超, 徐巍, 孙巧艳, 肖林, 孙军

(西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 采用表面机械滚压对退火态 Zr-4 合金进行表面纳米化处理并对其微观组织和力学性能开展了系统研究。滚压处理在 Zr-4 合金表面形成纳米/超细晶及变形层的厚度与滚压道次、每道次滚压深度有关; 对 Zr-4 合金优化后的滚压参数为每道次滚压深度 40 μm 、滚压 8 道次, 获得从表面到心部由纳米晶、超细晶、变形组织和心部原始粗晶连续梯度变化的组织形貌, 其纳米/超细晶层的厚度约为 100 μm , 变形层的厚度约为 300 μm 。Zr-4 合金经滚压处理后, 表层显微硬度显著提高; 屈服强度和抗拉强度分别为 352 和 600 MPa, 各提高了 7% 和 9%, 延伸率略有降低。用混合法则计算了 Zr-4 合金表面滚压处理后的屈服强度, 与实验值吻合。

关键词: Zr-4 合金; 表面纳米化; 力学性能; 表面机械滚压

中图分类号: TG146.4⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)07-1954-07

锆合金具有低的热中子吸收截面($0.18 \pm 0.02 \times 10^{-28} \text{m}^2$)、良好的力学性能和耐腐蚀性能而被广泛用作核动力反应堆中的结构材料和燃料包壳^[1]。作为燃料包壳的锆合金是核安全的第 1 道防护层, 直接关系到核动力的安全性和先进性^[2]。但随着核动力反应堆技术向着提高燃料燃耗 (65GW d/t) 及热效率和安全可靠性的方向发展, 传统的燃料包壳锆合金 (Zr-2 和 Zr-4 合金) 不能满足核工业发展的要求。为此世界各国都在对传统锆合金进行改良, 一方面通过改变合金成分设计新型锆合金, 像俄罗斯的 E110 (Zr-1.0Nb-0.05O-0.01Fe-0.01Hf) 合金^[3,4], 法国的 M5 (Zr-1.0Nb-0.12O) 合金^[5,6] 和美国的 ZIRLO (Zr-1.0Sn-1.0Nd-0.1Fe) 合金^[7] 等都获得了比传统 Zr 合金更好的堆内性能且已经投入了工程应用。我国也开发了 NZ2 (Zr-1.0Sn-0.3Nb-0.3Fe-0.1Cr) 和 NZ8 (Zr-1.0Sn-1.0Nb-0.3Fe) 新型锆合金^[8,9], 但仍处于研发测试阶段。目前除了发展新型锆合金, 另一种途径就是通过改变加工工艺来优化传统 Zr 合金, 提高其综合性能 (耐腐蚀性能、力学性能和抗辐照损伤性能) 以满足核动力技术发展的性能要求。其中表面纳米化技术因为能有效提高材料综合力学性能和良好的工程应用前景而备受关注^[10-13]。

鉴于工程材料的失效 (疲劳断裂、磨损和腐蚀等) 通常始于零件表面, 因此改变材料表面的组织结构, 可以提高材料的整体力学性能。中科院金属所 K. lu

(卢柯) 院士和法国特鲁瓦技术大学 J. Lv (吕坚) 教授于 1999 年联合提出了表面纳米化 (Surfacenanocrystallization, SNC) 的概念^[14], 即通过剧烈塑性变形在材料表面制备一定厚度纳米结构层, 旨在改善表层组织和性能而提高材料的整体力学性能和环境服役行为。已有研究表明表面纳米化可有效提高材料的拉伸性能^[15]、疲劳性能^[16] 和耐腐蚀性能^[17]。目前采用的剧烈塑性变形实现材料表面纳米化的方式有很多种, 如卢柯院士研究的表面机械研磨 (SMAT)、表面机械碾压 (SMGT)、表面机械滚压 (SMRT)^[18-23] 及超声波喷丸^[24,25], 江苏大学鲁金忠教授研究的激光喷丸 (LSP)^[26,27], 燕山大学研发的表面循环滚压 (SCRT)^[28] 等。在以上技术中, 表面机械滚压的优点主要是可获得更厚的变形层和更低的粗糙度^[23]。西安建筑科技大学的张聪惠教授用表面机械研磨的方式在 Zr-4 合金表面实现了纳米化, 表面硬度显著提高^[29,30]。

Zr-4 合金作为核燃料包壳材料, 是重要的核用锆合金之一, 通过表面纳米化的方式提高其综合性能具有重要意义。本研究采用退火态 Zr-4 合金对其表面进行机械滚压处理, 通过调整工艺参数 (滚压道次和每道次滚压深度), 研究滚压参数对 Zr-4 合金表层组织的影响, 获得了较为理想的表面纳米化组织形貌, 并测试了表面纳米/超细晶层及滚压后 Zr-4 合金的力学性能, 为优化 Zr-4 合金的综合力学性能提供实验支持。

收稿日期: 2016-07-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51471129, 51321003); 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) (2014CB644003)

作者简介: 辛超, 男, 1988 年生, 博士生, 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 陕西 西安 710049, E-mail: xincho2013@stu.xjtu.edu.cn

1 实验

实验选用由西北有色金属研究院提供的再结晶退火态的 Zr-4 合金棒材（直径为 16 mm），其具体化学成分见表 1。Zr-4 合金原始组织如图 1 所示，其平均晶粒尺寸为 10 μm。

采用表面机械滚压工艺进行滚压处理，试样表面受到刀具的径向压力和摩擦力，使得局部发生剧烈的塑性变形而导致表面纳米化。

具体的实验参数为：试样转速 $v_1=0.22$ m/s (710 r/min)；压头移动速率 $v_2: 0.33$ mm/s；每道次的滚压深度 a_p : 20、40、60 μm；加工道次：4、6、8 或 10 次（压头从一端移动到另一端往返 1 次为 1 个道次）。选用 ZEISS (Axio Vert.A1) 倒置金相显微镜对不同工艺参数试样截面进行组织观察，使用 JEM-200CX 型透射电子显微镜观察距滚压表面不同深度的微观组织。显微硬度测试采用 HXD-1000TMC/LCD 型显微维氏硬度计，载荷为 1.96 N，保载时间为 15 s。块体试样（尺寸标准如图 2a）的拉伸试验在 INSTRON 1195 型万能电子拉伸试验机上进行，应变速率为 5.6×10^{-4} s⁻¹。表层薄膜试样（尺寸如图 2b）的拉伸试验在长春新科 WDW-10 型万能电子拉伸试验机上进行，应变速率为 1.04×10^{-3} s⁻¹。选用 Hitachi-SU6600 型扫描电子显微镜对滚压截面组织及拉伸断口形貌进行分析。

2 结果与讨论

2.1 表面滚压参数对 Zr-4 合金表层组织的影响

图 3a~3c 是在相同的滚压道次（8 道次）下改变每道次滚压深度（ a_p ）对 Zr-4 合金表层组织的影响。结果表明，在相同加工道次（8 道次）下，随着每道

表 1 Zr-4 合金化学成分

Table 1 Chemical composition of Zr-4 alloy (wt%)

Element	Sn	Fe	Cr	Zr
Content	1.55	0.22	0.085	Bal.

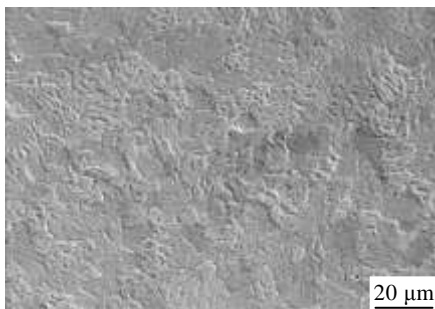


图 1 退火态 Zr-4 合金原始组织形貌

Fig.1 Microstructure of annealed Zr-4 alloy

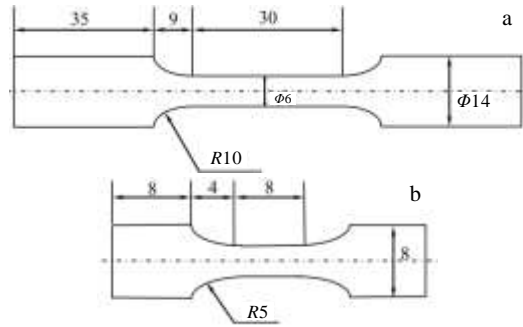


图 2 Zr-4 合金拉伸试样尺寸图

Fig.2 Sketch of tensile samples of Zr-4 (Unit: mm): (a) bulk sample and (b) thin film sample of NG/UFG layer

次滚压深度的增加（从 20 到 40 μm），细化变形区深度也随之增加。但当每道次滚压深度为 60 μm 时，细化变形区的深度没有明显增加，而是在变形区和基体中间出现了开裂现象（如图 3c 的箭头所指区域），这是由于变形区的应变沿深度方向呈梯度分布，且梯度随每道次滚压深度的增加而增大，而心部基体不发生变形，两部分组织的应变差异产生内应力从而导致开裂。从图 3b, 3d~3f 观察发现在相同滚压深度（ $a_p=40$ μm）下，随着加工道次的增加（从 4 道次到 8 道次），细化变形区深度也随之增加。但当次数达到 10 道次时，细化变形区的深度没有明显增加，而是在滚压表面出现了局部脱皮现象（如图 3f 的箭头所指区域），这是由于滚压处理促使表面晶粒细化至纳米级后，硬度高而塑性差导致表面进一步变形困难而出现表层局部开裂。每道次滚压深度和滚压道次的增加导致材料表层中孪晶和位错密度增加，即出现加工硬化层，使得表层进一步塑性变形的阻力增大。因此，变形层厚度并没有随每道次滚压深度和滚压道次的增加而线性增加，而是趋于一个稳定范围（400~500 μm）。综上比较不同工艺参数对 Zr-4 合金表面纳米化的组织形貌，认为每道次滚压深度为 40 μm，滚压 8 道次是试验中最为理想的工艺参数，Zr-4 合金表面既获得了最大的应变量和最深的变形区，同时还没有开裂。

2.2 Zr-4 合金表面滚压后表层组织形貌特征

图 4 是 Zr-4 合金试样经过表面滚压处理（8 道次，每道次滚压深度 40 μm）后的横截面 SEM 组织照片。由图可见，试样的组织从表面到心部大体可分为 3 个区域：纳米/超细晶区、变形区和基体。图 4 中的 A 区域即为纳米/超细晶区，厚度约 100 μm。变形区可以看到晶界（如图 4 中的 B 区域，厚度约为 300 μm），但晶界严重扭曲变形，晶粒呈不规则形状分布。而基体为退火态的原始组织，晶粒主要为长条或等轴状（如

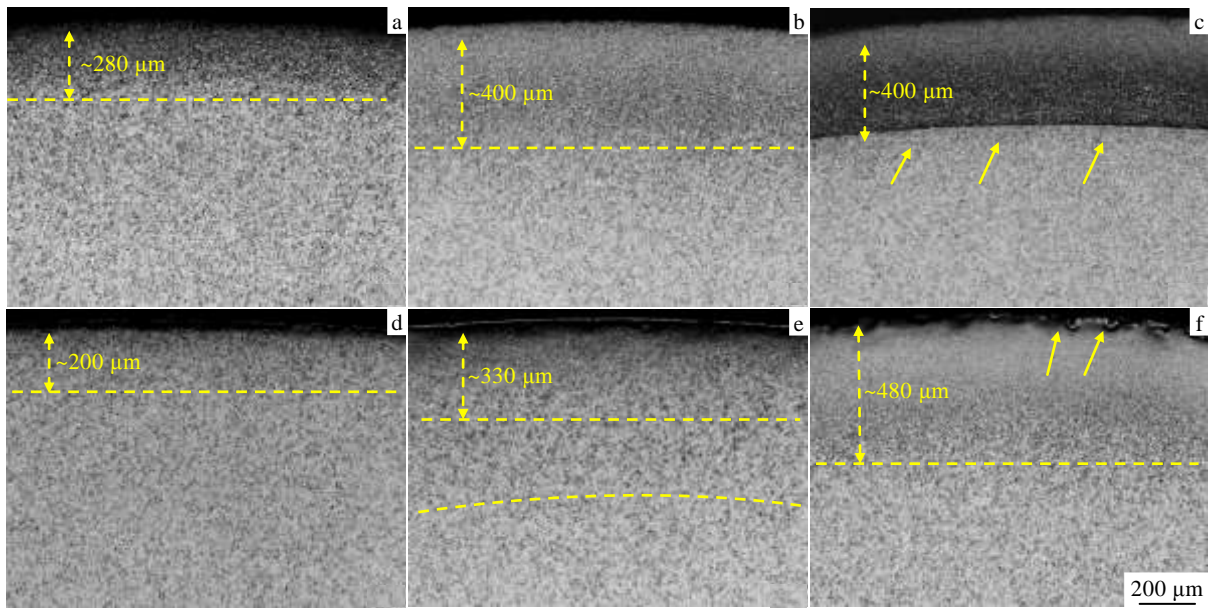


图 3 Zr-4 合金经不同工艺参数滚压后横截面的组织形貌

Fig.3 Cross-section morphologies of the Zr-4 alloy after SMRT with different process parameters: (a) 8 passes and $a_p=20 \mu\text{m}$; (b) 8 passes and $a_p=40 \mu\text{m}$; (c) 8 passes and $a_p=60 \mu\text{m}$; (d) 4 passes and $a_p=40 \mu\text{m}$; (e) 6 passes and $a_p=40 \mu\text{m}$; (f) 10 passes and $a_p=40 \mu\text{m}$



图 4 Zr-4 合金经表面滚压处理（8 道次，每道次滚压深度为 40 μm）后的横截面 SEM 组织

Fig.4 Cross-section SEM morphology of the Zr-4 alloy sample after the SMRT (8 passes and $a_p=40 \mu\text{m}$)

图 4 中的 C 区域)。从图 4 中可以看到，从表面到心部的晶粒尺寸随深度的增加而逐渐增大，呈连续变化的梯度结构。

2.3 Zr-4 合金表面滚压后表层组织在透射电子显微镜下的形貌特征

图 5 是 Zr-4 合金经滚压处理（8 道次，每道次滚压深度为 40 μm）后，距表面不同深度的 TEM 照片及相应的选区电子衍射花样。如图 5a 是距表面 30~70 μm 处的微观组织，绝大部分晶粒呈等轴状，晶粒取向随机分布且晶界清晰，滚压过程中在变形表面产生的热效应和大应变促使表层组织发生了回复和动态再结晶。统计多张该深度的透射照片得到平均晶粒尺寸为 196 nm（如图 5b），认为在滚压表面已形成纳米晶和

超细晶。图 5c 是距表面 70~110 μm 处的微观组织。大部分晶粒呈长轴状，晶粒取向比较接近且部分晶粒内位错密度很高，统计多张该深度的 TEM 照片得到平均晶粒尺寸为 417 nm（如图 5d），认为在该深度主要形成超细晶。图 5e 是距表面 110~150 μm 处的微观组织。晶粒内出现相互平行的多个孪晶，且孪晶的宽度均小于 1 μm。图 5f 是距表面 300~340 μm 处的微观组织。晶粒内部出现粗大的孪晶，孪晶宽度超过 1 μm，经过标定为 $\{10\bar{1}2\}[\bar{1}011]$ 孪晶（见图 5g）。图 5h 是 Zr-4 合金的基体微观组织。由图可见，基体组织是粗大的原始晶粒，晶粒内部没有发现孪晶，仅有少量的位错。

通过对滚压处理 Zr-4 合金表面不同深度组织形貌

的观察分析发现：从表面到基体的组织呈梯度变化(如图 6 所示)，最表面深度约 100 μm 的纳米/超细晶区，

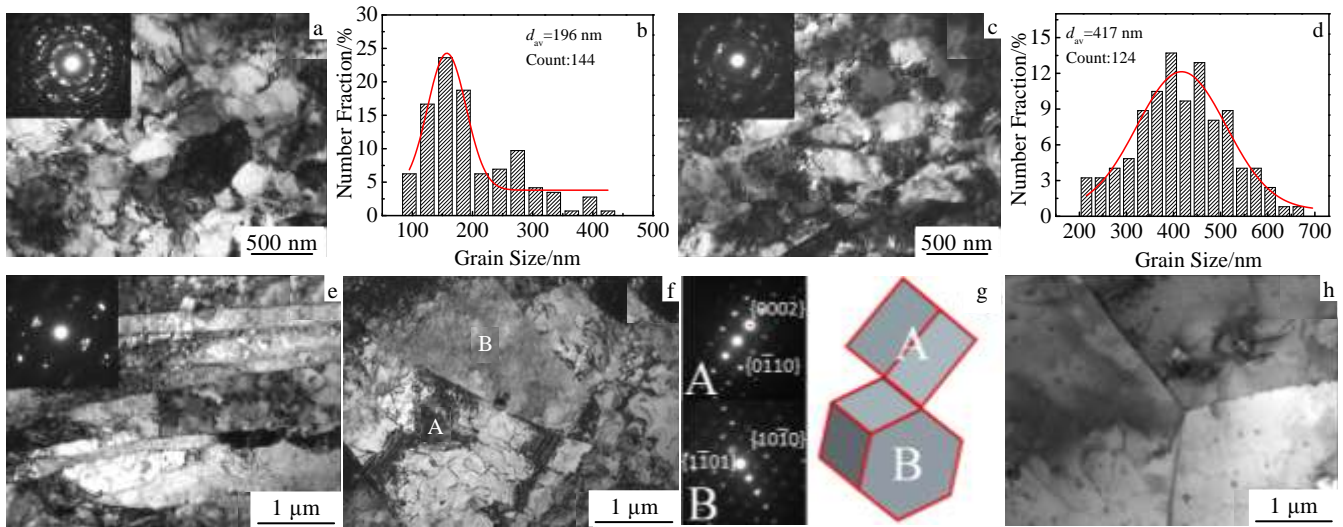


图 5 Zr-4 合金距表面不同深度的 TEM 照片、晶粒分布曲线及相应的 SAED 花样

Fig.5 TEM images, the grain size distributions and corresponding the SAED pattern of different depth of SMRTed Zr-4 alloy: (a) depth of 30~70 μm ; (b) the grain size distribution at depth of 30~70 μm ; (c) depth of 70~110 μm ; (d) the grain size distribution at depth of 70~110 μm ; (e) depth of 110~150 μm ; (f) depth of 300~340 μm ; (g) schematic illustration of twinning B and matrix A in Fig.5f; (h) coarse grain in matrix

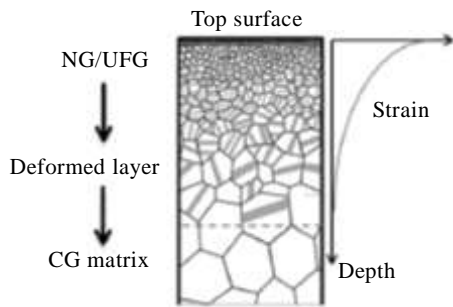


图 6 表面滚压处理组织梯度分布示意图

Fig.6 Schematic illustration of the distribution of the gradient microstructure by SMRT

以纳米晶和超细晶为主，还存在部分亚晶尚未发生动态再结晶，晶粒尺寸均小于 1 μm ；距表面深度 100~400 μm 的变形区，以孪晶变形为主，且变形程度随深度增加而逐渐减小；距表面深度超过 400 μm 的基体区，晶粒粗大且晶界平直，表明没有发生塑性变形。3 个区域组织形貌的梯度变化主要是由于应变连续改变造成的，应变在滚压表面均达到最大值，但随着深度的增加，压力和变形速率迅速减小，应变也降低。此外，尽管在滚压过程中采用冷却液进行冷却，但是在滚压表面变形区仍会产生热效应，并在变形区形成 1 个梯度分布的温度场，引起变形层的动态回复

和再结晶。应变量和温度的梯度分布共同导致了 Zr-4 合金表面组织的梯度分布特征。

2.4 Zr-4 合金表面滚压处理后的力学性能

2.4.1 显微维氏硬度

图 7 是不同工艺参数滚压处理后的 Zr-4 合金显微硬度从表面到心部的变化。整体的变化趋势是显微硬度随距表面深度的增加而逐渐降低，但不同工艺参数的降低幅度不同。如图 7a 所示，每道次滚压深度相同 ($a_p=40 \mu\text{m}$) 时，随着滚压道次的增加，显微硬度从表面到心部的降低幅度减小，硬化层的深度也随之增加。而滚压 8 道次和 10 道次的显微硬度随深度增加的变化趋势相近，如图 7b 所示，滚压道次相同 (8 道次) 时，随着每道次滚压深度的增加，显微硬度从表面到心部的降低幅度减小，硬化层的深度也随之增加。当每道次滚压深度为 60 μm 时，显微硬度随表面深度增加而降低的幅度最小且硬化层深度超过 500 μm ，但存在开裂现象。因此，从组织形貌观察和显微硬度分析可以得到滚压 8 道次。对于 Zr-4 合金的理想滚压次数为每道次滚压深度为 40 μm 、滚压 8 道次。

2.4.2 强度与塑性

图 8 是不同状态下 Zr-4 合金工程应力-应变曲线。

其中滚压表面 NG/UFG 试样（厚度为 100 μm）的屈服强度和抗拉强度分别为 676 和 755 MPa，延伸率为 2%，表现出了较低的塑性，这与纯钛^[15]、铜^[31]及 316L 不锈钢^[32]的结果相似。原始态粗晶 Zr-4 合金的屈服强度和抗拉强度分别为 329 和 553 MPa，延伸率为 28%。经滚压处理后，其 Zr-4 合金屈服强度和抗拉强度分别

压后强度用混合法则^[21]，因此滚压后 Zr-4 合金的屈服强度用混合法则进行计算，计算公式如下：

$$\sigma_y = \sigma_{sy} \cdot V_s + \sigma_{dy} \cdot V_d + \sigma_{my} \cdot V_m \quad (1)$$

式中， σ_{sy} 、 σ_{dy} 和 σ_{my} 分别代表表面 NG/UFG 层、变形层和基体粗晶的屈服强度， V_s 、 V_d 和 V_m 分别代表每层的体积分数，根据本实验中 NG/UFG 层、变形层的区域厚度分别为 100、300 μm 计算得到 V_s 、 V_d 和 V_m 分别为 3.3%、9.7% 和 87%。 σ_{sy} 和 σ_{my} 在本实验中分别测得为 676 和 329 MPa，变形层的组织形貌与原始粗晶态 Zr-4 合金发生加工硬化的组织形貌相似，因此变形层的屈服强度 σ_{dy} 可近似取原始粗晶态 Zr-4 合金的抗拉强度 553 MPa，根据混合法则计算得到滚压后的 Zr-4 合金的屈服强度为 362 MPa，与实验结果（352 MPa）接近。表层的纳米/超细晶、变形层和心部粗晶之间的协调变形使得 Zr-4 合金滚压后有良好的强塑性匹配。

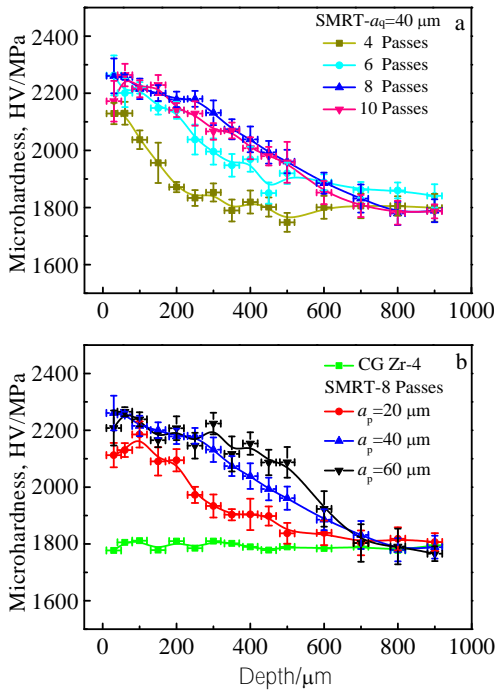


图 7 不同工艺参数滚压处理后的 Zr-4 合金显微硬度随着距表面深度的变化
Fig.7 Curves of microhardness with the increasing depth from surface by different parameters: (a) $a_p=40 \mu\text{m}$, and different passes; (b) 8 passes, and different a_p value

为 352 和 600 MPa，各提高了 7% 和 9%，而延伸率略有降低。Zr-4 合金滚压后强度的增加主要是由于表面纳米/超细晶层和变形层的强化作用。借鉴纯铜表面滚

2.4.3 断口形貌分析

图 9 是不同组织特征的 Zr-4 合金拉伸断口形貌。

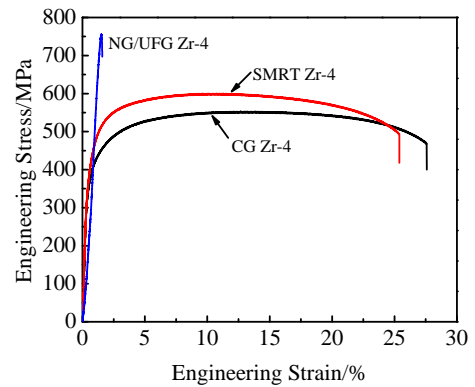


图 8 Zr-4 合金滚压处理 (SMRT) 与未滚压处理 (CG) 的拉伸工程应力-应变曲线
Fig.8 Tensile engineering stress-strain curves of SMRTed and CG Zr-4 alloy

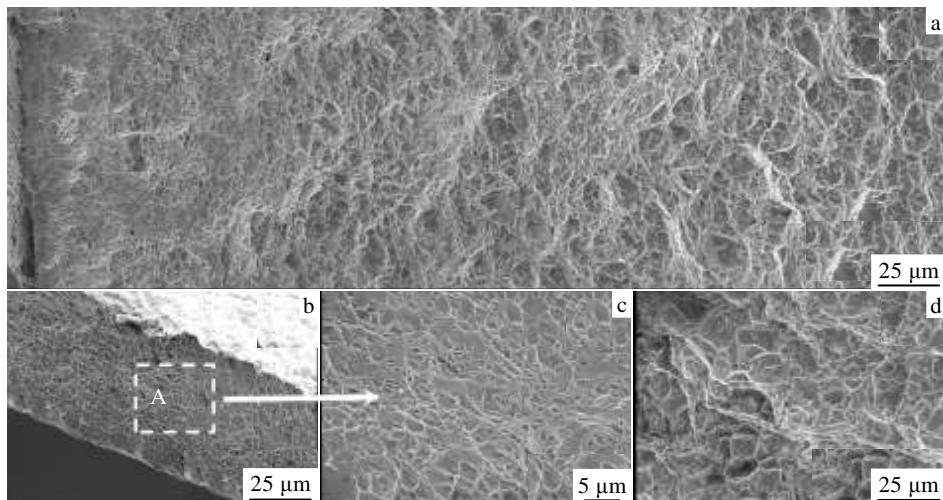


图9 不同组织特征的 Zr-4 合金拉伸断口形貌

Fig.9 SEM images of fracture surfaces of Zr-4 alloy with different microstructure characteristics: (a) SNC Zr-4 alloy, (b) NG/UFG Zr-4 alloy, (c) amplification of area A in Fig.9b, and (d) CG Zr-4 alloy

可见, 3 种不同组织特征的 Zr-4 合金的断裂方式都属于微孔聚集型断裂。图 9a 是表面纳米化 Zr-4 合金的断口形貌。表面的韧窝尺寸很小且韧窝坑很浅, 从表面到心部的韧窝尺寸不断增大。图 9b~9c 是 NG/ UFG Zr-4 试样的断口形貌。与表面纳米化 Zr-4 合金的表层断口形貌相似, 韧窝的平均尺寸为 1~2 μm , 而晶粒尺寸为纳米级和亚微米级, 小于韧窝的尺寸, 类似的结果也出现 K. S. Kumar 等人用电沉积制备的纳米镍中^[33]。原始粗晶 Zr-4 合金的断口形貌主要是大尺寸的韧窝(平均尺寸约为 10 μm , 见图 9d), 与 Zr-4 合金的原始晶粒尺寸接近。

3 结 论

1) 利用表面机械滚压技术在 Zr-4 合金表面制备梯度纳米层, 纳米晶/超细晶变形区深度超过 400 μm 。每道次滚压深度为 40 μm 、滚压 8 道次是 Zr-4 合金的理想表面机械滚压参数。

2) 表面机械滚压后的 Zr-4 合金从表面到心部的组织形貌呈连续梯度分布, 表面下深度约 100 μm 的纳米/超细晶区; 距表面深度 100~400 μm 的变形区。应变量和温度的梯度分布共同导致了 Zr-4 合金表面梯度分布的组织特征。

3) Zr-4 合金经表面滚压处理后, 屈服强度和抗拉强度分别提高了 7% 和 9%。延伸率略有降低, 表面的纳米/超细晶层的屈服强度和抗拉强度分别为 676 和 755 MPa。基于混合法则计算了 Zr-4 合金表面滚压后的屈服强度, 与实验值吻合。

参考文献 References

- [1] Xiong Bingkun(熊炳昆), Yang Xinmin(杨新民), Luo Fangcheng(罗方承) et al. *Zirconium, Hafnium and Their Compound Applications*(锆钍及其化合物应用)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002: 175
- [2] Park J Y, Kim H G, Jeong Y H et al. *J Nucl Mater*[J], 2004, 335: 433
- [3] Nikulin S A, Rozhnov A B, Gusev A Y et al. *J Nucl Mater*[J], 2014, 446: 10
- [4] Nikulin S A, Markelov V A, Gusev A Y et al. *J Nucl Mater*[J], 2013, 48: 187
- [5] Duriez C, Dupont T, Schmet B et al. *J Nucl Mater*[J], 2008, 380: 30
- [6] Hengstler-Eger R M, Baldo P, Beck L et al. *J Nucl Mater*[J], 2008, 423: 170
- [7] Hayashi H, Hashimoto N, Ohnuki S. *J Nucl Mater*[J], 2013, 442: 830
- [8] Zhang H X, Fruchart D, Hlil E K et al. *J Nucl Mater*[J], 2010, 396: 65
- [9] Zhang Haixia(章海霞), Xu Bingshe(许并社), Li Zhongkui(李中奎) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(5): 776
- [10] Liu Gang(刘刚), Yong Xingping(雍兴平), Lu Ke(卢柯). *China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2001, 14(3): 1
- [11] Xu Binshi(徐滨士), Ou Zhongwen(欧忠文), Ma Shining(马世宁). *China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2001, 14(3): 6
- [12] Han Jing(韩靖), Sheng Guangmin(盛光敏), Hu Guoxiong(胡国雄). *Materials Review*(材料导报)[J], 2007, 21(8): 2
- [13] Lu Ke(卢柯). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2015, 51(1): 1
- [14] Lu K, Lv J. *J Mater Sci Technol*[J], 1999, 15(3): 193
- [15] Wen M, Liu G, Gu J F et al. *Surf Coat Tech*[J], 2008, 202 (19): 4728
- [16] Villegas J C, Shaw L L, Dai K et al. *Philos Mag Lett*[J], 2005, 85(8): 427
- [17] Jellitia S, Richard C, Reira D et al. *Surf Coat Tech*[J], 2013, 224: 82
- [18] Tao N R, Wang Z B, Tong W P et al. *Acta Mater*[J], 2002, 50(18): 4603
- [19] Zhu K Y, Vassel A, Brisset F et al. *Acta Mater*[J], 2004, 52(14): 4101
- [20] Wang Z B, Lv J, Lu K. *Acta Mater*[J], 2005, 53(7): 2081
- [21] Fang T H, Li W L, Tao N R et al. *Science*[J], 2011, 331: 1587
- [22] Wang H T, Tao N R, Lu K. *Scripta Mater*[J], 2013, 68(1): 22
- [23] Huang H W, Wang Z B, Lv J et al. *Acta Mater*[J], 2015, 87: 150
- [24] Tao N R, Sui M L, Lv J et al. *Nanostruct Mater*[J], 1999, 11(4): 433
- [25] Wu X, Tao N, Hong Y, Xu B et al. *Acta Mater*[J], 2002, 50(8): 2075
- [26] Lu J Z, Luo K Y, Zhang Y K L et al. *Acta Mater*[J], 2010, 58(11): 3984

- [27] Lu J Z, Luo K Y, Zhang Y K *et al. Acta Mater*[J], 2010, 58(16): 5354
- [28] Yuan C, Fu R D, Zhang F C *et al. Mater Sci Eng A*[J], 2013, 565: 27
- [29] Zhang Conghui(张聪慧), Lan Xinzhe(兰新哲), Zhao Xicheng(赵西成) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(3): 511
- [30] Duan Xiaoge(段晓鹤), Zhao Xicheng(赵西成), Zhang Conghui(张聪慧) *et al. Materials for Mechanical Engineering*(机械工程材料)[J], 2009, 33(4): 89
- [31] Wang Y M, Wang K, Pan D *et al. Scripta Mater*[J], 2003, 48(12): 1581
- [32] Chen X H, Lv J, Lu K. *Scripta Mater*[J], 2005, 52(10): 1039
- [33] Kumar K S, Suresh S, Chisholm M F *et al. Acta Mater*[J], 2003, 51(2): 386

Effect of SMRT on Microstructure and Mechanical Properties of Zr-4 Alloy

Xin Chao, Xu Wei, Sun Qiaoyan, Xiao Lin, Sun Jun

(State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of as-annealed Zr-4 alloy subjected to surface mechanical rolling treatment (SMRT) were investigated. The effect of rolling passes and rolling depth per pass on the thicknesses of NG (nano grain)/UFG (ultrafine grain) layer and deformed layer in the SMRTed Zr-4 alloy were studied. The optimized process parameters are 8 passes and depth of 40 μm per pass. A gradient microstructure consisting of a NG/UFG layer of 100 μm in thickness, a deformed layer of 300 μm in thicknesses and a CG (coarse grain) layer are produced in the SMRTed Zr-4 alloy from the treated surface to the matrix. The microhardness on surface significantly increases due to SMRT. The yield stress and ultimate tensile strength of SMRTed Zr-4 alloy are 352 and 600 MPa, increased by 7% and 9%, respectively. And the elongation is slightly reduced. The yield strength 362 MPa calculated by the rule-of-mixture is similar to the experimental value.

Key words: Zr-4 alloy; surface nanocrystallization; mechanical properties; surface mechanical rolling treatment (SMRT)

Corresponding author: Sun Qiaoyan, Professor, State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China, E-mail: qysun@mail.xjtu.edu.cn