

Zr-Sn-Nb合金带材力学性能各向异性研究

崔怡然, 杨忠波, 刘然超, 邓传东, 王晓敏, 邱 军, 徐春容

Study on Anisotropy of Mechanical Properties of Zr-Sn-Nb Alloy Strip

Cui Yiran, Yang Zhongbo, Liu Ranchao, Deng Chuandong, Wang Xiaomin, Qiu Jun, and Xu Chunrong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2023.S1.0131>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

焊后热处理对SA517 Gr.F焊接接头力学性能与组织的影响

Effect of PWHT on Mechanical Properties and Microstructure of SA517 Gr.F Welded Joint

核动力工程. 2020, 41(6): 202-206

氢化物取向对Zr-4包壳管室温拉伸和爆破性能的影响

Effect of Hydride Orientation on Tensile and Bursting Properties of Zr-4 Cladding Tubes at Room Temperature

核动力工程. 2019, 40(1): 60-64

锆合金原位离子辐照条件下的位错环演化研究

Study on the Evolution of Dislocation Loop under Zirconium Alloy In-Situ Ion Irradiation

核动力工程. 2021, 42(6): 248-253

U-10Mo/Zr单片式燃料元件堆内稳态热-力学性能研究

Research on In-Pile Thermo-Mechanical Performance for U-10Mo/Zr Monolithic Fuel Element under Steady Condition

核动力工程. 2021, 42(6): 254-260

沉淀硬化马氏体不锈钢热老化脆化的热电势检测研究

Study on Thermoelectric Power Measurement to Thermal Aging Effect of Precipitation-Hardened Martensitic Stainless Steel

核动力工程. 2019, 40(6): 135-139

超高温下核级316H不锈钢材料基础特性研究

Research on Fundamental Characteristics of Nuclear Grade 316H Stainless Steel at Ultra High Temperature

核动力工程. 2021, 42(4): 270-276



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2023)S1-0131-06; DOI:10.13832/j.jnpe.2023.S1.0131

Zr-Sn-Nb 合金带材力学性能各向异性研究

崔怡然, 杨忠波, 刘然超, 邓传东, 王晓敏, 邱军, 徐春容

中国核动力研究设计院反应堆燃料及材料重点实验室, 成都, 610213

摘要: 为探究 Zr-Sn-Nb 合金带材结构对其不同方向力学性能的影响, 采用电子背散射衍射技术 (EBSD) 和拉伸试验分别对成品退火态 Zr-0.85Sn-1Nb-0.3Fe 合金带材的织构及不同方向力学性能进行系统分析。结果表明, 合金带材中形成了典型的基面双峰织构, 导致了力学性能的各向异性。随拉伸加载方向与轧制方向 (RD) 夹角的增大, 带材主要滑移系的 Schmid 因子呈下降趋势, 使得滑移系开启难度增大, 屈服强度和屈服比增大, 抗拉强度和硬化指数降低, Zr-Sn-Nb 合金带材在 RD 上具有相对较好的冲压成形能力。

关键词: Zr-0.85Sn-1Nb-0.3Fe 合金带材; 织构; 力学性能

中图分类号: TL341 **文献标志码:** A

Study on Anisotropy of Mechanical Properties of Zr-Sn-Nb Alloy Strip

Cui Yiran, Yang Zhongbo, Liu Ranchao, Deng Chuandong,
Wang Xiaomin, Qiu Jun, Xu Chunrong

Science and Technology on Reactor Fuel and Materials Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: In order to explore the influence of the texture of the Zr-Sn-Nb alloy strip on its mechanical properties in different directions, the texture and mechanical properties in different directions of the finished annealed Zr-0.85Sn-1Nb-0.3Fe alloy strip were systematically analyzed by Electron Backscatter Diffraction (EBSD) and tensile test. The results showed that the typical bimodal basal texture was formed in the alloy strip, leading to the anisotropy of mechanical properties. With the increase of the angle between the loading direction and the RD (Rolling Direction), the Schmid factor of the main slip system in the strip showed a decreasing trend, which increased the opening difficulty of the slip system. Also the yield strength and yield ratio increased, while the tensile strength and work-hardening index decreased. As a result, the Zr-Sn-Nb alloy strip has relatively better stamping formability in the RD.

Key words: Zr-0.85Sn-1Nb-0.3Fe alloy strip, Texture, Mechanical properties

0 引言

锆合金以其低中子吸收截面和在高温高压水中良好的耐蚀性成为核反应堆燃料组件中重要的结构材料。定位格架是构成燃料组件的重要部件, 具有导向、维持燃料棒之间的横向间隔、搅混冷却剂及优化核反应堆堆芯热工、机械和水力性能

等作用^[1-2], 是决定燃料组件使用性能的关键部件之一。核电燃料组件定位格架材料最初为不锈钢或 Inconel 合金, 为提高中子经济性, 目前主要采用锆合金材料, 如法国 AFA3G 核燃料组件格架采用 M5 合金, 美国西屋 AP1000 燃料组件格架采用 Zr-4 及 ZIRLO 合金, 俄罗斯 VVER-

收稿日期: 2023-02-21; 修回日期: 2023-02-24

基金项目: 中核集团集中研发项目 (中核科发 [2022] 377 号)

作者简介: 崔怡然 (1999—), 女, 硕士研究生, 现主要从事核结构材料研究, E-mail: cuiyiran326@163.com

1000 燃料组件格架采用 E110 合金^[3-4]。所以采用高性能的新型锆合金作为格架材料是国际先进核电反应堆燃料组件的技术发展趋势之一。

定位格架用锆合金带材制备主要包括热冷变形加工热处理、带材冲压成形等工序。锆合金在室温下为具有密排六方 (hcp) 晶体结构 α -Zr, 滑移系较少^[5-6], 且孪晶在一定的应力应变条件下开启^[7], 因此其晶粒在合金带材加工过程中将择优取向而形成织构, 在力学性能上表明有明显的各向异性, 对成品合金带材的最终冲压过程造成影响。冷变形与再结晶态锆合金带材均具有基面双峰织构^[8], 但再结晶退火将使晶粒绕 c 轴旋转 30°, 使得冷变形中 $\langle 10\bar{1}0 \rangle // RD$ (轧制方向) 的织构转变为 $\langle 11\bar{2}0 \rangle // RD$ ^[9]。目前文献中已经报道了 Zr-Sn、Zr-Sn-Nb 等锆合金带材力学性能的各向异性以及对后续冲压的影响^[10-12], 但有关具体织构与力学性能各向异性间关系的研究较少。因此, 本文通过研究 Zr-0.85Sn-1Nb-0.3Fe 合金带材微观组织及不同方向的力学性能, 分析了合金带材性能的各向异性。

1 试验

本研究中所选材料为名义成分 Zr-0.85Sn-1Nb-0.3Fe 的新型锆合金, 选取其经过吨级铸锭制备、锻造、均匀化处理、轧制及退火后厚度为 0.6 mm 的成品带材进行测试。

沿合金带材不同方向 (偏离 RD 0°、30°、45°、60°、90°) 进行取样, 上述方向与法向 (ND) 所成表面为试样观察面。对该表面逐步进行机械磨抛和震动抛光, 使用配比为 $H_2SO_4 : HNO_3 : H_2O : HF = 15 : 30 : 45 : 10$ 的溶液对所得试样进行酸洗, 以获得光亮平整无应力层的电子背散射衍射技术 (EBSD) 观察表面, 采用 FEI Nova Nano SEM 400 型场发射扫描电镜和牛津 HKL Channel 5 EBSD 系统观察不同位向试样的组织和织构, 对所采集数据进行分析。按照 GB/T 228.1 沿上述方向对带材进行拉伸试样的取样, 取样方式及尺寸如图 1 所示, 确保拉伸试样表面无缺口裂纹或毛刺以避免应力状态的改变对拉伸造成影响。每个方向选取 2 个平行样以确保试验数据的准确性, 采用 WDW-100C 电子万能试验机对其进行室温拉伸试验。

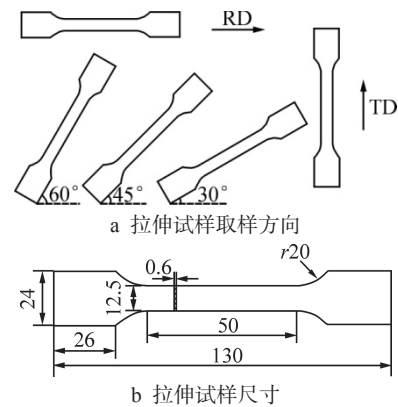


图 1 拉伸试样取样方向及尺寸示意图 mm
Fig. 1 Diagram of Sampling Direction and Size of Tensile Specimen

TD—横向; r—半径

2 结果与讨论

2.1 微观组织

图 2 显示了 Zr-0.85Sn-1Nb-0.3Fe 合金带材偏离 RD 0° 和 90° 时与 ND 所成表面上的取向重构图。可以看出, 成品退火后带材不同位向上的晶粒基本呈细小等轴状, 晶粒特征无明显差异, 说明再结晶充分且组织较为均匀。然后将 2 个方向上的晶粒尺寸进行对比 (图 3) 结果后发现 0° 方向上小尺寸晶粒 ($< 2.5 \mu m$) 的数量明显少于 90° 方向, 而较大尺寸晶粒 ($> 2.5 \mu m$) 的数量则多于 90° 方向。因此 0° 方向观察面上具有更多的大尺寸晶粒, 推测带材中的部分晶粒仍保持一定的冷轧变形后的纤维状特征, 此种纤维状晶粒的纵向截面积更大, 从而导致了 RD-ND 面上较大的晶粒尺寸。对于精轧后退火态的锆合金板材, 由于具有 $\{0001\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$ 的基面双峰织构, 且 c 轴由 ND 向 TD 倾斜 20°~40°, 而在轴比同样小于理想值 (1.633) 的钛合金板材中已经观察到, 具有 $\langle 0002 \rangle // TD$ 织构的晶粒在冷轧过程中易于变形^[13], 因此锆合金板材中具有不同取向的晶粒在精轧过程中变形难易程度也各不相同, 从而导致晶粒组织变形不均匀。在随后的退火过程中, 易变形晶粒处将优先发生再结晶晶粒的形核, 而难以变形的晶粒由于累积的位错储存能较低, 无法为再结晶提供足够的驱动力, 从而在再结晶退火处理后仍具有沿 RD 拉长的纤维状特征。

图 4 中的极图及反极图 (IPF) 配色的取向成像图表征出了带材的整体织构, 成品退火后的锆合金带材表现为典型基面双峰织构, 且沿 RD

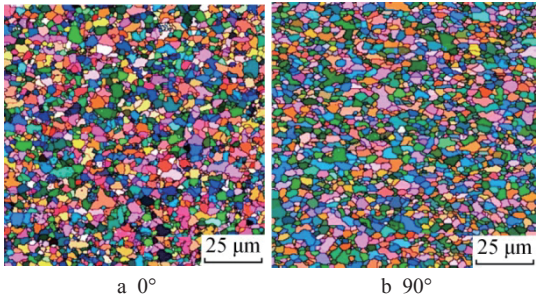


图2 Zr-0.85Sn-1Nb-0.3Fe 合金带材偏离 RD 不同角度观察面的取向重构图

Fig. 2 Orientation Image of Zr-0.85Sn-1Nb-0.3Fe Alloy Strip Deviating from RD at Different Angles

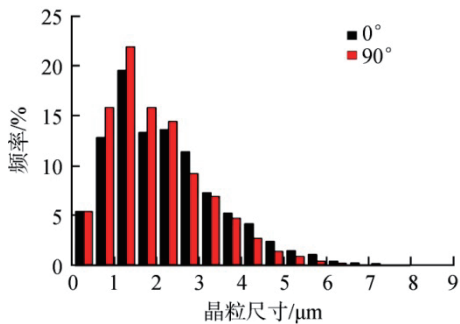


图3 Zr-0.85Sn-1Nb-0.3Fe 合金带材偏离 RD 不同角度观察面的晶粒尺寸分布

Fig. 3 Grain Size Distribution of Zr-0.85Sn-1Nb-0.3Fe Alloy Strip Deviating from RD at Different Angles

具有 $\langle 10\bar{1}0 \rangle // RD$ 和 $\langle 11\bar{2}0 \rangle // RD2$ 种取向,这2种取向在带材中均匀分布,强度相当。将不同位向观察面上再结晶组织在图5中表示出来,不同位向观察面上均发生了较为充分的再结晶,偏离RD0°、45°和90°样品的再结晶分数分别为82.1%、92.4%和95.8%。其中在0°样品表面上观察到较其他位向观察面上更多的黄色亚结构组织,尽管

其再结晶分数已经达到80%以上,但仍低于其他位向,这与前述中难变形晶粒再结晶驱动力不足相一致。基于再结晶行为的“定向形核理论”,在冷变形锆合金带材的回复阶段已经形成了具有低密度缺陷的亚结构,当亚结构与变形基体间取向差较小时,则难以作为再结晶晶核长大^[14]。

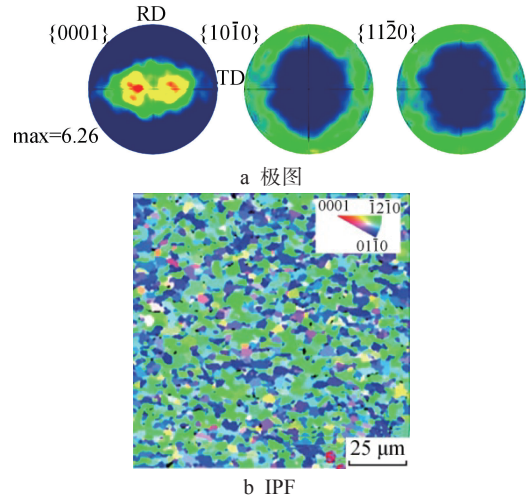


图4 Zr-0.85Sn-1Nb-0.3Fe 合金带材的极图及 IPF
Fig. 4 Polar Figure and IPF Figure of Zr-0.85Sn-1Nb-0.3Fe Alloy Strip

2.2 力学性能

图6为Zr-Sn-Nb合金带材在室温拉伸试验中沿偏离RD不同角度的方向加载时所获得工程应力应变曲线。可以看出,沿不同方向加载的带材样品在拉伸过程中均经历了弹性、屈服、强化和颈缩4个阶段(以0°方向为例:oa段为弹性阶段;ab段为屈服阶段;bc段为强化阶段;cd段为颈缩阶段);不同样品的工程应力应变曲线

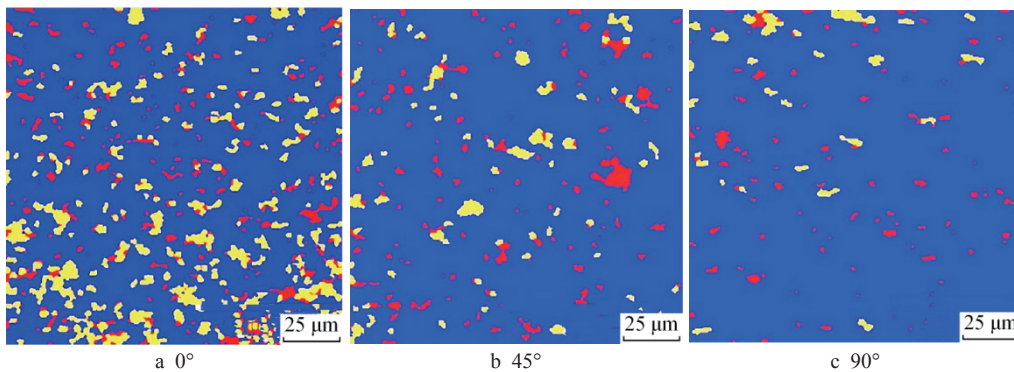


图5 Zr-0.85Sn-1Nb-0.3Fe 合金带材偏离 RD 不同角度观察面的再结晶组织

Fig. 5 Recrystallization Structure of Zr-0.85Sn-1Nb-0.3Fe Alloy Strip Deviating from RD at Different Angles

蓝色—完全再结晶;红色—形变基体;黄色—亚结构

在弹性阶段处相似。此外，该曲线上拉伸应力达到最大值后的下降阶段反映出带材具有明显的颈缩，此时拉伸试样标距段的横截面积变小，真实应力将明显高于图6中工程应力，因此使用原始横截面积计算所得的工程应力应变曲线将不再适于准确描述试样的拉伸过程。于是绘制其真实应力应变曲线如图7所示，可以看出在0°和30°方向上、60°和90°方向上样品的真应力应变曲线相似，但在进入屈服阶段后，随着拉伸方向与RD的夹角从0°增大至90°，由于锆合金带材的各向异性和hcp结构金属滑移系的有限性，沿不同方向进行的拉伸将开启不同的塑性变形机制，导致其力学性能的差异，因此拉伸曲线特征发生明显变化。

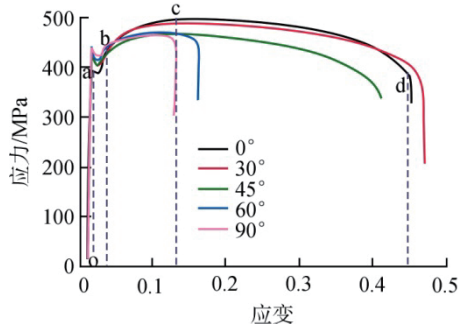


图6 Zr-0.85Sn-1Nb-0.3Fe合金带材沿偏离RD不同角度的方向加载时的工程应力应变曲线

Fig. 6 Engineering Stress-strain Curves of Zr-0.85Sn-1Nb-0.3Fe Alloy Strip Loaded in Directions Deviating from RD at Different Angles

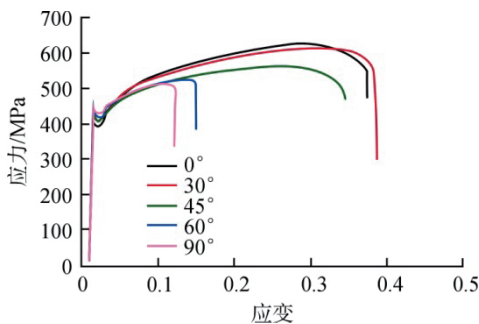


图7 Zr-0.85Sn-1Nb-0.3Fe合金带材沿偏离RD不同角度的方向加载时的真实应力应变曲线

Fig. 7 True Stress-strain Curves of Zr-0.85Sn-1Nb-0.3Fe Alloy Strip Loaded in Directions Deviating from RD at Different Angles

根据上获的真实应力应变曲线，可按照式(1)计算其硬化指数(n)和强化系数(K)，相关结果如表1所示。

表1 锆合金带材偏离RD不同角度方向上的 n 和 K
Tab. 1 n and K of Zr-Sn-Nb Alloy Strip Deviating from RD at Different Angles

| 力学性能参数 | 0° | 30° | 45° | 60° | 90° |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| n | 0.123 | 0.103 | 0.091 | 0.074 | 0.063 |
| K | 755.42 | 701.39 | 649.12 | 619.73 | 596.39 |

$$R = Ke^n \quad (1)$$

式中， R 为真应力； e 为真应变。其中 n 对应拉伸试样经过屈服点后继续变形时的应变硬化情况， n 值较大的试样其应变硬化效应更显著，使得材料变形更加均匀，从而具有更好的冲压成形性能。从表1中可以看出，随着拉伸试样与RD夹角的增大， n 逐渐降低，表明其冲压成形性能不断下降，与试样的屈强比所反映的规律相一致。

图8为Zr-0.85Sn-1Nb-0.3Fe合金带材沿偏离RD不同角度方向的力学性能，其中抗拉强度(R_m)随着与RD夹角的增大而减小，屈服强度($R_{p0.2}$)随着夹角的增大而增大，这与文献报道^[15]的锆合金薄板屈服强度和断裂强度的各向异性相一致。另外，屈强比较小的带材具有更好的

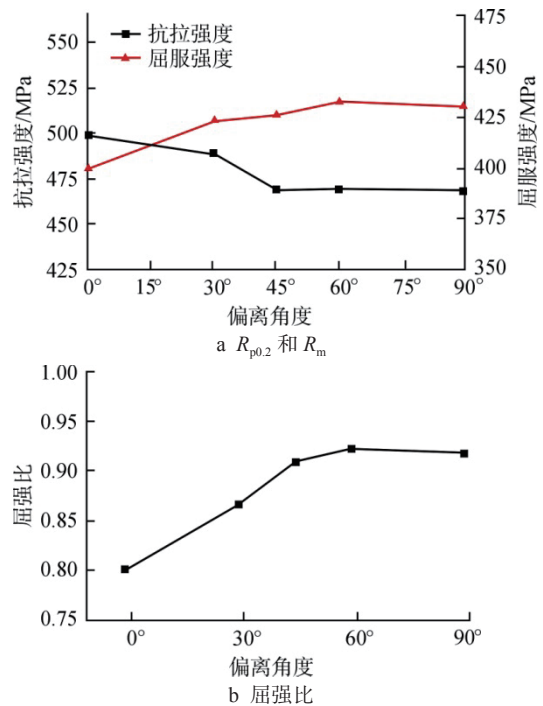


图8 Zr-0.85Sn-1Nb-0.3Fe合金带材偏离RD不同角度方向的力学性能

Fig. 8 Mechanical Properties of Zr-0.85Sn-1Nb-0.3Fe Alloy Strip Deviating from RD at Different Angles

冲制稳定性, 由 R_m 和 $R_{p0.2}$ 计算样品的屈服比发现, 屈服比随着夹角的增大而增大, 因此 Zr-Sn-Nb 合金带材在 RD 上的冲制性能相对较好。

2.3 锆合金带材力学性能与织构的关系

锆合金带材经冷轧变形后将获得沿 RD 拉长的纤维状晶粒, 同时导致晶粒转动从而择优取向形成织构, 外力做功中的一小部分转变为位错储存能被保存下来, 成品带材由冷变形态经再结晶退火处理得到, 热处理后带材再结晶较为充分, 晶粒基本为细小的等轴晶, 但同时晶粒的不同取向也使得变形不均匀, 当局部区域变形量较小时, 再结晶驱动力不足阻碍了晶界迁移, 导致成品带材中仍存在少数沿 RD 拉长的纤维状晶粒和亚结构, 因此锆合金带材沿 RD 具有更高的拉伸强度。

锆合金带材在拉伸过程中的塑性变形依靠滑移和孪晶进行, 当某个滑移系上的分切应力达到临界分切应力时, 该滑移系启动, 分切应力的计算为:

$$\tau_r = \frac{P}{A_0} \cos \varphi \cos \lambda \quad (2)$$

式中, P 为加载力; A_0 为样品的横截面积; φ 为加载方向与滑移面法线夹角; λ 为加载方向与滑移方向夹角。该式中 $\cos \varphi \cos \lambda$ 即为 Schmid 因子, Schmid 因子的值越大, 则滑移越容易开启。

当锆合金带材以滑移机制实现塑性变形时, 其中最易开启的滑移系为柱面滑移, 即 $\{10\bar{1}0\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$ 滑移, 其次为 $\{0002\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$ 基面滑移和 $\{11\bar{2}1\}$ 或 $\{10\bar{1}1\}$ 面上的锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移。研究表明, 对于塑性较好的锆合金带材, $\langle c+a \rangle$ 滑移主要发生在 $\{10\bar{1}1\}$ 面上^[16], 对比不同方向加载时 3 种主要滑移系的 Schmid 因子, 可以发现, 柱面滑移和锥面滑移的 Schmid 因子在 0.4~0.5 的区间范围内出现了明显的集中分布特征 (图 9~图 10), 而基面滑移的 Schmid 因子则在 0~0.5 范围内离散分布 (图 11), 因此对 Zr-Sn-Nb 锆合金带材实施不同方向加载的过程中, 带材的滑移过程主要通过柱面滑移 $\{10\bar{1}0\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$ 和锥面滑移 $\{10\bar{1}1\} \langle 2\bar{1}13 \rangle$ 实现。当锆合金带材沿 0° 方向加载时, 柱面滑移和锥面滑移的 Schmid 因子均具有最大的峰值 (0.495, 0.485) 和占比 (12.3%, 13.9%)。随着加载角度的增大, 柱面滑移 Schmid 因子的峰值和占比逐渐降低, 锥面滑移

Schmid 因子的峰值和占比则在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内下降明显, 而在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 范围内无明显差别。可见沿 RD 拉伸时柱面滑移和锥面滑移均更易启动, 促进了带材沿 RD 的塑性变形。综合 2 种滑移系特征, 带材的塑性变形能力随该夹角的增大而降低, 且在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内变化明显, 这与屈服比的变化规律相一致。

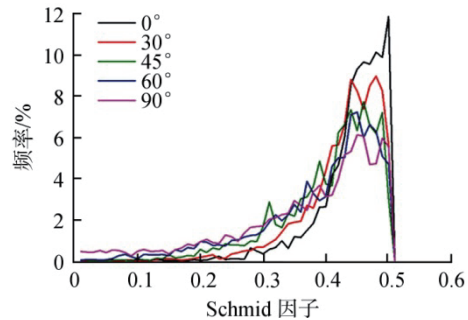


图 9 不同加载方向上柱面滑移 $\{01\bar{1}0\} \langle \bar{2}110 \rangle$ 的 Schmid 因子分布图

Fig. 9 Schmid Factor Distribution of Prismatic Slip $\{01\bar{1}0\} \langle \bar{2}110 \rangle$ in Different Loading Directions

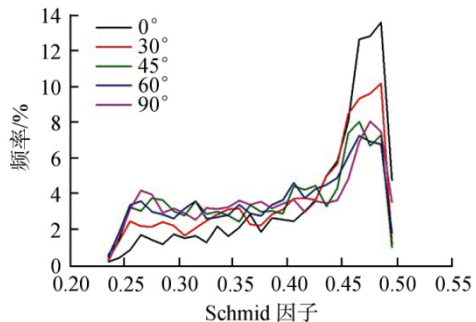


图 10 不同加载方向上锥面滑移 $\{0001\} \langle \bar{2}110 \rangle$ 的 Schmid 因子分布图

Fig. 10 Schmid Factor Distribution of Pyramidal Slip $\{0001\} \langle \bar{2}110 \rangle$ in Different Loading Directions

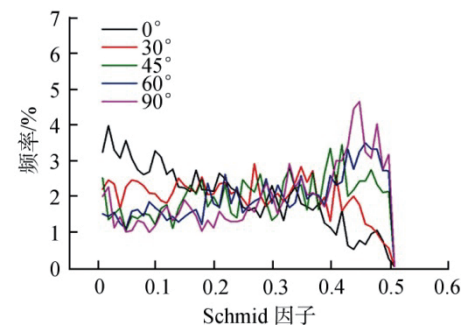


图 11 不同加载方向上基面滑移 $\{01\bar{1}0\} \langle \bar{2}113 \rangle$ 的 Schmid 因子分布图

Fig. 11 Schmid Factor Distribution of Basal Slip $\{01\bar{1}0\} \langle \bar{2}113 \rangle$ in Different Loading Directions

除滑移外, 锆合金带材在室温拉伸过程中晶体沿 $\langle 0001 \rangle$ 方向所受应力状态的不同将导致不同类型孪晶的开启, 拉应力状态促进 $\{10\bar{1}2\}\langle 10\bar{1}\bar{1} \rangle$ 拉伸孪晶的开启, 压应力状态则促进 $\{11\bar{2}2\}\langle \bar{1}\bar{1}23 \rangle$ 压缩孪晶的开启。再结晶退火后锆合金带材中主要为 $\{0001\}\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 和 $\{0001\}\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 两种织构, c 轴倾向于沿ND分布, 且从ND向TD倾斜 $20^\circ\sim 40^\circ$ 。锆合金带材在拉伸过程中的受力为沿ND受压, 若仅考虑压缩孪晶, 则沿不同方向拉伸时其压缩孪晶开启的难易程度几乎无差别。而对于拉伸孪晶, 由锆合金带材的退火织构可知, c 轴除沿ND取向, 更倾向于沿TD取向而不是RD, 因此拉伸孪晶在锆合金带材沿TD拉伸时更易开启, 从而在基体中积累位错。但目前的研究认为孪晶在锆合金室温塑性变形机制中所占比例很小, 在柱面滑移难以开启时才会起到重要作用^[15], 而图9已经表明柱面滑移易开启, 因此锆合金带材力学性能的各向异性主要受不同方向拉伸时滑移机制的影响, 最终导致锆合金带材在RD上具有更高的拉伸强度和更低的屈服强度。

3 结论

本研究采用EBSD技术和室温拉伸试验研究了成品退火态Zr-Sn-Nb合金带材不同方向上的织构和力学性能, 得出以下结论:

(1) Zr-Sn-Nb合金带材偏离RD不同角度方向与ND所成表面上晶粒组织均为细小的等轴状晶粒, 冷轧过程中晶粒的不均匀变形使得 0° 方向上存在部分仍保持一定纤维状特征的晶粒, 但整体上晶粒特征差异不明显。

(2) Zr-Sn-Nb合金带材在力学性能上表现出各向异性, 随加载方向从 0° 逐渐增大至 90° 的过程中, 屈服强度增大而抗拉强度降低, 屈强比增大且硬化指数降低, 均表明带材在 0° 方向上具有相对较好的冲压成形性能。

(3) Zr-Sn-Nb合金带材在室温拉伸条件下的塑性变形机制主要为柱面滑移, 其次是锥面滑移, 随加载方向从 0° 逐渐增大至 90° , 柱面滑移和锥面滑移的Schmid因子基本呈下降趋势, 使得滑移系开启的难度增大, 最终导致带材的塑性变形能力随之降低。

参考文献:

- [1] 李峰, 王丹. 定位格架电阻焊熔核偏移工艺优化[J]. *自动化与仪器仪表*, 2019(3): 151-153.
- [2] 王雄, 杜代全, 曾小康, 等. VVER反应堆燃料组件流动传热特性CFD分析[J]. *核动力工程*, 2018, 39(3): 6-9.
- [3] 杨晓东. AFA 3G及其它高性能燃料组件[J]. *原子能科学技术*, 2003(S1): 15-20.
- [4] SOLONIN M I, BIBILASHVILI Y K, SOKOLOV N B, et al. Development of alternative fuel assembly for WWER-1000 reactor[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1997, 173(1-3): 327-331.
- [5] YAGNIK S, GARDE A. Zirconium alloys for LWR fuel cladding and core internals[M]//ODETTE G R, ZINKLE S J. *Structural Alloys for Nuclear Energy Applications*. Amsterdam: Elsevier, 2019: 247-291.
- [6] AKHTAR A. Prismatic slip in zirconium single crystals at elevated temperatures[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1975, 6(6): 1217-1222.
- [7] TEWARI R, KRISHNA K V M, NEOGY S, et al. Zirconium and its alloys: properties and characteristics [J]. *Comprehensive Nuclear Materials (Second Edition)*, 2020, 7: 284-302.
- [8] WANG Y N, HUANG J C. Texture analysis in hexagonal materials[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2003, 81(1): 11-26.
- [9] BALLINGER R G, LUCAS G E, PELLOUX R M. The effect of plastic strain on the evolution of crystallographic texture in Zircaloy-2[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1984, 126(1): 53-69.
- [10] 刘榕镇. 新型锆合金薄板带材冲制性能及其影响因素研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [11] 邓振鹏. 新锆合金薄板带材的可冲性及冲制工艺优化[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [12] 李麦海, 王兴. 锆合金变形机理及其板材织构演化规律[J]. *钛工业进展*, 2012, 29(6): 6-10.
- [13] 张世进, 李凯, 易丹青, 等. 冷轧TA5钛合金退火过程的再结晶行为及织构演变[J]. *金属热处理*, 2022, 47(2): 1-8.
- [14] 毛卫民, 赵新兵. 金属的再结晶与晶粒长大[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994: 159.
- [15] 彭倩, 沈保罗. 锆合金的织构及其对性能的影响[J]. *稀有金属*, 2005, 29(6): 903-907.
- [16] 栾佰峰, 余泓冰, 黄天林, 等. 锆合金变形机制研究评述[J]. *稀有金属材料与工程*, 2012, 41(S2): 357-360.

(责任编辑: 张明军)