

张力退火对Zr4合金织构和再结晶行为的影响

朱广伟 赵乙丞 赵帆 齐鹏 张志豪

Effect of stress annealing on texture and recrystallization behavior of Zr-4 alloy

ZHU Guang-wei, ZHAO Yi-cheng, ZHAO Fan, QI Peng, ZHANG Zhi-hao

引用本文:

朱广伟, 赵乙丞, 赵帆, 齐鹏, 张志豪. 张力退火对Zr4合金织构和再结晶行为的影响[J]. 工程科学学报, 2020, 42(9): 1174-1181. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2019.09.27.004

ZHU Guang-wei, ZHAO Yi-cheng, ZHAO Fan, QI Peng, ZHANG Zhi-hao. Effect of stress annealing on texture and recrystallization behavior of Zr4 alloy[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(9): 1174–1181. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2019.09.27.004

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.09.27.004

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

第二相粒子与织构对高强Cu-Ni-Si系合金薄板各向异性的影响

Effects of precipitates and texture on the anisotropy of high-strength Cu-Ni-Si alloy sheets

工程科学学报. 2017, 39(6): 867 https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.06.008

终轧温度对600 MPa级高钛高成型性铁素体--珠光体酸洗带钢组织与织构的影响

Effect of FDT on microstructure and crystallographic texture of 600 MPa grade high-titanium high-formability ferrite-pearlite pickling steel

工程科学学报. 2019, 41(1): 104 https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.01.011

析出强化与孪晶强化在Fe-24Mn-3Si-3Al TWIP钢退火过程中的作用机制

Mechanism of precipitation strengthing and twinning strengthing in annealing process of Fe-24Mn-3Si-3Al TWIP steel 工程科学学报. 2017, 39(6): 854 https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.06.006

新型粉末高温合金多火次等温锻造过程中晶粒细化机制

Mechanism of grain refinement of an advanced PM superalloy during multiple isothermal forging 工程科学学报. 2019, 41(2): 209 https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.02.007

Si含量对高硅电工钢热变形与动态再结晶行为的影响

Effect of Si content on hot deformation behavior and dynamic recrystallization of high silicon electrical steel 工程科学学报. 2019, 41(3): 332 https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.03.006

低温取向硅钢常化工艺和渗氮工艺对组织、织构和磁性能的影响

Effects of normalizing process and nitriding process on the microstructure, texture, and magnetic properties in low-temperature grain-oriented silicon steel

工程科学学报. 2019, 41(5): 610 https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.05.007

工程科学学报,第 42 卷,第 9 期: 1174-1181, 2020 年 9 月 Chinese Journal of Engineering, Vol. 42, No. 9: 1174-1181, September 2020 https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.09.27.004; http://cje.ustb.edu.cn

张力退火对 Zr-4 合金织构和再结晶行为的影响

朱广伟^{1,2)},赵乙丞^{1,2)},赵 帆^{1,2)},齐 鹏³⁾,张志豪^{1,2)∞}

 1)北京科技大学新材料技术研究院,北京 100083 2)北京科技大学材料先进制备技术教育部重点实验室,北京 100083 3)国核宝钛锆业 股份公司,宝鸡 721013
 ☑通信作者, E-mail: ntzzh2279@163.com

摘 要 以易控的工艺条件为基础,通过设计简易实验装置来模拟锆合金在实际生产中的张力退火过程.采用 X 射线衍射 (XRD)和电子背散射(EBSD)技术,对不同温度和不同张力下退火处理后的 Zr-4 合金织构和再结晶行为进行研究.结果表明,施加外加应力和提高退火温度可显著改变再结晶织构演化过程.随着外加应力值的增加以及退火温度的升高,锆合金的 主要织构 (īzī5)[10ī0] 总量减少,极密度减弱,从而导致材料各向异性减小;外加应力和退火温度对材料再结晶过程中小角 度晶界数量以及再结晶比例产生了显著影响,随着外加应力的增加以及退火温度的升高,材料内部发生动态回复和再结晶, 位错和亚结构逐渐消失,材料再结晶过程中的小角度晶界数量明显减少,材料的再结晶过程加快,材料的再结晶比例显著提高.外加应力的施加以及退火温度的升高均有利于材料内部再结晶过程的加速进行.研究结果对 Zr-4 合金退火处理优化有 指导作用,为解决锆合金在工程应用中所遇到的问题提供了科学基础.

关键词 锆合金;退火;应力;织构;再结晶

分类号 TG146.4+14

Effect of stress annealing on texture and recrystallization behavior of Zr-4 alloy

ZHU Guang-wei^{1,2)}, ZHAO Yi-cheng^{1,2)}, ZHAO Fan^{1,2)}, QI Peng³⁾, ZHANG Zhi-hao^{1,2)}⊠

1) Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Key Laboratory for Advanced Materials Processing (MOE), University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

3) State Nuclear Bao Ti Zirconium Industry Company, Baoji 721013, China

Corresponding author, E-mail: ntzzh2279@163.com

ABSTRACT The texture of Zr–4 alloy not only affects its irradiation growth performance, but also affects mechanical properties, stress corrosion cracking, and water-side corrosion. Therefore, it is important to control the texture of Zr–4 alloy during processing. The effect of the applied external stress, annealing temperature, and annealing time on texture evolution and recrystallization of Zr–4 alloy is still unclear. Based on controllable process conditions, the stress annealing process of zirconium alloy in practical production was simulated by designing a simple experimental device. The texture and recrystallization behavior of Zr–4 alloy after annealing at different temperatures and stresses were studied by X-ray diffraction (XRD) and electron backscatter diffraction (EBSD) techniques. The results show that applying external stress and increasing annealing temperature significantly change the evolution of recrystallized texture. With an increase in stress and annealing temperature, the texture of the zirconium alloy ($\overline{1215}$)[$10\overline{10}$], and the polar density decreases, thereby resulting in a decrease in material anisotropy. The annealing temperature has a significant effect on the amount of small-angle grain boundary and recrystallization occur inside the material. The sub-structures in dynamic recovery and the dislocation sub-structures in the grains that undergo dynamic recrystallization gradually disappear. The small-angle grain boundary in the material

recrystallization process is reduced significantly. The process is accelerated and the recrystallization ratio of the material is significantly increased. The application of applied external stress and the increase of annealing temperature are beneficial to the acceleration of the internal recrystallization process of the material. The main results from this paper can guide the optimization of annealing treatment of Zr–4 alloy, and provide a scientific basis for solving the problems encountered in the engineering application of Zr–4 alloy.

KEY WORDS Zr-4 alloy; annealing; stress; texture; recrystallization

随着我国核电事业的发展,反应堆结构材料和燃料的国产化是必然趋势. 锆合金凭借其优异的核性能、良好的抗水侧腐蚀性能、适中的力学性能以及较低的热中子吸收截面,被广泛用作核反应堆内包壳材料和堆芯结构材料^[1-5]. 由于锆合金是密排六方结构金属,具有有限滑移系,在制备过程中很容易产生织构^[6-8]. 研究表明, Zr-4 合金织构不仅会对其辐照生长性能产生影响,还会影响其力学性能、应力腐蚀开裂和水侧腐蚀(疖状腐蚀)性能,因此在加工过程中控制锆合金织构十分重要^[9-12].

Zr-4合金板材用于制造压水堆燃料组件的定 位格架,经堆内中子长期辐照后会引起格架条带 伸长,产生弹簧应力松弛的问题,从而造成定位格 架对燃料棒的夹持力逐渐减小.因此,为了解决辐 照伸长问题,需要进一步研究 Zr-4合金板材织构 的演变,减少 Zr-4合金板材各向异性^[13-14].目前,国 内外开展的有关锆合金织构控制的研究主要围绕 着轧制和热处理工艺,其研究的对象主要为挤压 管坯和热轧板材,而对于冷轧带材织构的研究报 道较少,尚不能实现对锆合金织构的精确预测^[15-17]. 相关研究^[18-19]表明,退火过程中施加外加应力可 以有效改变锆合金或铝合金的织构演变和再结晶 过程,但是没有说明应力退火过程中外加应力、退 火温度以及退火时间对锆合金织构演变以及再结 晶过程的具体影响.

本文以易控的工艺条件为基础,通过设计简 易实验装置模拟锆合金在实际生产中的张力退火 过程,研究了外加应力、退火温度和保温时间等 对 Zr-4 合金织构演变和再结晶行为的影响,为 Zr-4 合金的生产制备提供了科学基础.

1 实验材料与方法

研究材料取自商用 Zr-4 合金板材,其化学成 分(质量分数)为:1.30%Sn-0.18%Fe-0.08%Cr,其 余为 Zr.板材尺寸为 1320 mm×25 mm×2 mm,对板 材进行总压下量为 60% 的冷轧,随后沿轧制方向 取如图 1 所示尺寸的试样.为了模拟实际生产的 连续张力退火过程,设计如图2所示的装置进行 应力退火实验,通过改变该装置下方外加载荷来 控制应力值,实验方案如表1所示.在退火后的样



Fig.2 Schematic of the stress-annealing experimental device

表1 实验参数

Table 1	Experimental	narameters
I abit I	Lapermentai	parameters

Annealing temperature/ $^{\circ}$ C	Holding time/min	External stress/MPa
580	3	0
580	3	3
580	6	3
580	3	9
610	3	0
610	3	3
610	3	9
640	3	0
640	3	3
640	3	9

品中心部位取样,打磨抛光后采用 XRD 衍射仪测 定宏观织构.随后,将机械抛光后的样品进行电解 抛光,抛光液的体积比为甲醇:乙二醇单丁醚:高 氯酸=3:1:1,抛光电压为20V,时间为60s,温度 为-30℃,电解抛光后迅速放入酒精中进行超声震 荡脱膜^[20].使用 ZEISS Merlin 型扫描电子显微镜对 电解抛光试样进行 EBSD 数据采集,使用 Channel 5 取向分析系统分析数据.

2 结果与讨论

2.1 应力退火对 Zr-4 合金织构的影响

图 3 展示了冷轧态和不同工艺参数应力退火 后的样品织构取向分布函数图(ODF,取 *q*₂=0°, 30°两个截面表示取向)以及密排六方结构 ODF 标



图 3 应力退火处理后 Zr-4 板材取向分布函数. (a)冷轧态; (b)580 ℃, 0 MPa; (c)580 ℃, 3 MPa; (d)580 ℃, 9 MPa; (e)610 ℃, 0 MPa; (f)610 ℃, 3 MPa; (g)610 ℃, 9 MPa; (h)640 ℃, 0 MPa; (i)640 ℃, 3 MPa; (j)640 ℃, 9 MPa; (k)重要取向

Fig.3 Orientation distribution function of Zr-4 sheet after stress annealing: (a) cold rolled sheet; (b) 580 °C, 0 MPa; (c) 580 °C, 3 MPa; (d) 580 °C, 9 MPa; (e) 610 °C, 0 MPa; (f) 610 °C, 3 MPa; (g) 610 °C, 9 MPa; (h) 640 °C, 0 MPa; (i) 640 °C, 3 MPa; (j) 640 °C, 9 MPa; (k) important orientation position



图 4 不同温度下应力退火后 Zr-4 合金主要织构组分极密度变化 Fig.4 Polar density variation of main texture components of Zr-4 alloy after stress annealing at different temperatures

准图的重要取向位置^[21-22]. $\varphi_1, \Phi, \varphi_2$ 为表示晶体 取向的欧拉空间直角坐标系的三个变量. 从图 3(a) 中可以看到,原始冷轧态板材具有较强的{0001}基 面纤维织构,说明 Zr-4 合金带材在冷轧变形的过 程中主要发生基面滑移,基面织构以{0001}<1010> 取向为主^[23-24]. 如图 3(b)、(c)、(d)所示,在 580 ℃ 退火,不施加外力时,基面纤维织构{0001}<1010> 逐渐弱化并消失,而在 \u03c61=0°, \u03c6=30°, \u03c62=0°附近形 成较强的(1215)[1010]织构;施加3MPa外加应力后, (1215)[1010] 织构强度基本保持不变,并在 φ1=30°、 60°, Φ=0°, φ₂=0°附近形成相对较弱的{0001}<2110> 基面织构;随着外加应力的增大,{0001}<2110>基 面织构逐渐减弱直至消失, (1215)[1010] 织构总量 逐渐减少. 由此可见外加应力对于 Zr-4 板材织构 具有显著影响,随着外加应力值的增加,锆合金的 织构逐渐弱化. 在 610 ℃ 和 640 ℃ 进行应力退火 时,也显示出相似的规律.

图 4 给出了不同温度下应力退火过程中 Zr-4 合金主要织构组分极密度随着外加应力和退火温 度变化的过程.退火后,{0001}<1010>织构极密度 减小直至消失,(1215)[1010]织构极密度迅速增加, 随着外加应力的施加以及温度的升高,其极密度 逐渐减小.随着外力的增加,主要织构(ī2ī5)[10ī0] 极密度逐渐减弱,随着退火温度的升高,主要织构 的极密度也呈现出相似的变化规律.外加应力的 增加以及温度的升高均导致织构的极密度减弱, 从而导致材料各向异性减小,更加有利于 Zr-4 板 材的冲压成型,使冲压成型的定位格架的各向异性 较小,保证其在核反应堆中具有较长的使用寿命.

图 5 为在退火温度为 580 ℃ 时施加 3 MPa 应 力进行不同时间退火处理后的取向分布函数图. 退火 3 min 时,织构主要成分为(ī2ī5)[10ī0],继续 延长保温时间至 9 min 后,织构主要成分及其强弱 不发生明显变化.应力退火过程中保温时间对 Zr-4 合金板材织构演变并未产生较大影响.

2.2 应力退火对 Zr-4 合金再结晶行为的影响

图 6 为冷轧态和不同工艺参数应力退火后的 反极图取向分布图. 在退火过程中材料内部发生 了不同程度的动态回复及动态再结晶,其组织由 原来的冷轧后变形态的大晶粒逐渐演变成等轴晶 粒. 从图 6(a)可以看出原始冷轧板材组织主要以 变形态大晶粒为主,从图 6(b)可以看出在 580 ℃ 条件下经过常规退火后,材料内部开始发生动态 回复,晶界处开始形成亚晶.如图 6(c)所示,当在 退火过程中施加 3 MPa 的外加应力时, 亚晶数量 相比常规退火后减少,并且在晶界处形成新的无 畸变等轴晶粒,这是因为回复阶段形成的亚晶,其 相邻亚晶边界通过位错运动逐渐转移到其他亚晶 界上,导致亚晶边界的消失和亚晶的合并,合并后 的亚晶逐渐转化为大角度晶界,通过迅速移动清 除位错,留下无畸变晶粒. 从图 6(d)可以看出退火 过程中当外加应力增加到9MPa时,材料内部开 始发生再结晶,晶界处形成无畸变等轴晶,逐渐开 始消耗周围的变形基体,并且逐渐长大. 当温度升 高至 610 ℃ 时,随着外加应力的增加,材料的再结 晶程度增大,无畸变等轴晶取代变形晶粒,新晶粒 互相吞食而长大. 退火温度升高至 640 ℃ 时, 材料 的再结晶程度进一步增大,施加外力后,晶粒进一 步长大.



图 5 580 ℃ 条件下不同保温时间退火处理后 Zr-4 板材取向分布函数. (a)保温 3 min; (b)保温 9 min

Fig.5 Orientation distribution function of the Zr-4 sheet after annealing at different holding times at 580 °C: (a) holding 3 min; (b) holding 9 min



图 6 不同应力退火处理后 Zr-4 板材取向成像图. (a) 冷轧态; (b) 580 ℃, 0 MPa; (c) 580 ℃, 3 MPa; (d) 580 ℃, 9 MPa; (e) 610 ℃, 0 MPa; (f) 610 ℃, 3 MPa; (g) 610 ℃, 9 MPa; (h) 640 ℃, 0 MPa; (i) 640 ℃, 3 MPa; (j) 640 ℃, 9 MPa

Fig.6 Orientation imaging of the Zr–4 sheet after different stress annealing treatments: (a) cold rolled sheet; (b) 580 °C, 0 MPa; (c) 580 °C, 3 MPa; (d) 580 °C, 9 MPa; (e) 610 °C, 0 MPa; (f) 610 °C, 3 MPa; (g) 610 °C, 9 MPa; (h) 640 °C, 0 MPa; (i) 640 °C, 3 MPa; (j) 640 °C, 9 MPa

图 7 展示了再结晶晶粒尺寸(以 15°的取向 差识别晶粒)分布图. 退火处理后晶粒尺寸发生明 显变化,原始冷轧态晶粒平均直径约为 2.3 µm, 580 ℃ 常规退火处理后小尺寸晶粒(直径<2 μm) 数量缓慢上升,小尺寸晶粒个数占晶粒总个数的 百分数从 67.04% 上升至 71.69%, 直径在 2~4 μm 的晶粒数量减少,晶粒平均直径约为1.31 µm. 这 主要是由于晶粒内部发生动态回复,产生较多的 尺寸较小的晶核. 施加 3 MPa 应力后, 小尺寸晶粒 数量缓慢减少,小尺寸晶粒个数占晶粒总个数的百 分数从 67.04% 减少至 63.43%, 直径在 2~4 µm 的 晶粒缓慢减少,晶粒平均直径约为1.55 µm. 当外 加应力从 3 MPa 增加到 9 MPa 时, 小尺寸晶粒显 著减少,小尺寸晶粒个数占晶粒总个数的百分数 从 63.43% 减少至 35.96%, 晶粒平均直径约为 3.04 µm, 随着外加应力的增加,材料内部发生再结晶过程, 晶粒开始长大,导致小尺寸晶粒数量减少,晶粒尺 寸增大. 在 610 ℃ 和 640 ℃ 进行应力退火时, 也显 示出相似的规律,小尺寸晶粒数量逐渐减少,大尺 寸晶粒逐渐增多.

图 8 展示了晶界取向差分布图.其晶界取向 差角度主要在 2°左右出现峰值.不同应力退火处 理后其小角度晶界比例统计结果如表 2 所示.实 验结果表明,随着外加应力的增加,退火温度的升 高,其小角度晶界比例逐渐减少,材料内部亚晶界 合并,再结晶进程加快. Chakravarity 等^[25] 曾研究 了不同成分的锆合金在热加工过程中的动态再结 晶,研究表明:动态回复、动态再结晶和超塑性变 形是锆合金在热加工过程中发生的主要复原机 制,本实验中, Zr-4 合金板材在应力退火过程中发 生动态回复和再结晶,发生回复的亚组织及发生 再结晶的晶粒内部存在位错亚结构,这也是导致 常规退火过程中小角晶界较多的原因,随着外应 力的施加,再结晶程度加大,晶粒内部的亚组织和 位错亚结构逐渐消失,从而使得小角度晶界比例 逐渐降低.

图 9 展示了冷轧态和不同工艺参数应力退火 后的再结晶比例.580 ℃ 条件下常规退火后再结 晶比例约为 7%,应力退火后,再结晶比例增加到 10% 左右,随着外加应力的增加,再结晶比例进一 步增加到 52%;在 610 ℃ 和 640 ℃ 条件下,呈现相 同的趋势,再结晶比例随着应力的增大而逐渐增 加,但是在 610 ℃ 条件下,随着应力的增大,再结 晶比例增速较快,而在 640 ℃ 条件下,再结晶比例 均为 90% 以上,再结晶程度较高.

综上可知,在再结晶退火过程中外加应力的 施加,有利于材料的再结晶的进行,导致晶体内部 小尺寸晶粒数量逐渐减少,大尺寸晶粒逐渐增多, 晶粒内部的亚组织和位错亚结构逐渐消失,小角 度晶界比例逐渐降低,再结晶晶粒比例也显著上



图 7 不同应力退火处理后 Zr-4 板材再结晶晶粒尺寸分布图.(a)冷轧态;(b)580 ℃,0 MPa;(c)580 ℃,3 MPa;(d)580 ℃,9 MPa;(e)610 ℃, 0 MPa;(f)610 ℃,3 MPa;(g)610 ℃,9 MPa;(h)640 ℃,0 MPa;(i)640 ℃,3 MPa;(j)640 ℃,9 MPa

Fig.7 Recrystallization grain size distribution of Zr-4 plate after different stress annealing treatments: (a) cold rolled sheet; (b) 580 °C, 0 MPa; (c) 580 °C, 3 MPa; (d) 580 °C, 9 MPa; (e) 610 °C, 0 MPa; (f) 610 °C, 3 MPa; (g) 610 °C, 9 MPa; (h) 640 °C, 0 MPa; (i) 640 °C, 3 MPa; (j) 640 °C, 9 MPa 9 MPa



图 8 不同应力退火处理后 Zr-4 板材取向差分布图. (a)冷轧态; (b) 580 ℃, 0 MPa; (c) 580 ℃, 3 MPa; (d) 580 ℃, 9 MPa; (e) 610 ℃, 0 MPa; (f) 610 ℃, 3 MPa; (g) 610 ℃, 9 MPa; (h) 640 ℃, 0 MPa; (i) 640 ℃, 3 MPa; (j) 640 ℃, 9 MPa

Fig.8 Zr–4 plate orientation difference distributions after different stress annealing treatments: (a) cold rolled sheet; (b) 580 °C, 0 MPa; (c) 580 °C, 3 MPa; (d) 580 °C, 9 MPa; (e) 610 °C, 0 MPa; (f) 610 °C, 3 MPa; (g) 610 °C, 9 MPa; (h) 640 °C, 0 MPa; (i) 640 °C, 9 MPa

表2 不同应力退火处理后其小角度晶界比例统计结果

Annealing temperature/°C	External stress/MPa	Small angle grain boundary ratio/%
Rolled sheet	0	68
580	3	49
580	3	46
580	6	38
610	3	40
610	3	31
610	3	17
640	3	22
640	3	21
640	3	14





Fig.9 Statistical diagram denoting the recrystallization ratio of the Zr–4 sheet after different stress annealing treatments

升. 退火温度的升高也同样有利于材料内部再结 晶过程的加速进行.

3 结论

(1)应力退火过程中,施加外加应力和提高退 火温度可显著改变再结晶结构演化过程.随着外 加应力值的增加以及退火温度的升高,锆合金的 主要织构(1215)[1010]总量减少,极密度减弱,从 而导致材料各向异性减小.保温时间对 Zr-4 合金 板材织构演变并未产生较大影响.

(2)应力退火过程中,外加应力和退火温度对 材料再结晶过程中小角度晶界产生显著影响.随 着外加应力值的增加以及退火温度的升高,材料 再结晶过程中的小角度晶界明显减少.

(3)应力退火过程中,外加应力的施加和退火

温度的升高可以显著改善Zr-4合金的再结晶行 为,加快材料的再结晶过程,提高材料的再结晶 比例.

参考文献

- Wang L X, Zhang X Y, Xue X Y, et al. Study on the microstructure and texture of zirconium alloy tube. *Rare Met Mater Eng*, 2013, 42(1): 153
 (王丽霞, 张喜燕, 薛祥义, 等. 锆合金挤压管坯的组织及织构研 究. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(1): 153)
- [2] Ni J, Zhao Y C, Wang L, et al. Microstructure of Zircaloy–4 alloy during β phase quenching and determination of critical quenching diameter of its rods. *Nucl Mater Energy*, 2018, 17: 158
- [3] Zhang Y, Zhang C, Yuan G H, et al. Effect of second phase particles on the hydrogen absorption properties of Zr Sn Nb zirconium alloys. *Rare Met Mater Eng*, 2019, 48(8): 2507
 (张寅,张诚,袁改焕,等.第二相对Zr–Sn–Nb系锆合金吸氢性能的影响. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(8): 2507)
- [4] Ni J, Wang L, Zhang Z H, et al. Interfacial heat transfer behavior between Zr-4 alloy and H13 die Steel. *Rare Met Mater Eng*, 2019, 48(5): 1579
 (倪嘉, 王练, 张志豪, 等. Zr-4合金与H13模具钢的界面换热行)

为研究. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(5): 1579) [5] Zhao Y C, Zhu G W, Qi P, et al. Measurement of friction factor in plastic forming of Zr-4 alloy based on ring compression and

extrusion-simulation. *Chin J Eng*, 2020, 42(02): 209 (赵乙丞,朱广伟,齐鹏,等.基于圆环压缩和挤压-模拟法的 Zr-4合金塑性成形摩擦因子测定.工程科学学报, 2020, 42(02): 209)

 [6] Li M H, Wang X. The deformation mechanism of zirconium alloy and evolution discipline of its alloys plates texture. *Titanium Ind Prog*, 2012, 29(6): 6
 (李麦海, 王兴. 锆合金变形机理及其板材织构演化规律. 钛工

业进展, 2012, 29(6): 6)

- [7] Wang Y N, Huang J C. Texture analysis in hexagonal materials. Mater Chem Phys, 2003, 81(1): 11
- [8] Liu C Z, Li G P, Chu L H, et al. Texture and yielding anisotropy of zircaloy–4 alloy cladding tube produced by cold pilger rolling and annealing. *Mater Sci Eng A*, 2018, 719: 147
- [9] Xu B, Yu J H, Sun G C, et al. Influence of Process for Zr-4 Alloy Plate and Strip Texture. *Met World*, 2017(04): 28
 (徐滨, 于军辉, 孙国成, 等. 影响Zr-4合金板带材织构的工艺因素. 金属世界, 2017(04): 28)
- [10] Peng Q, Shen B L. Texture of zirconium alloy and its effects on properties. *Chin J Rare Met*, 2005, 29(6): 903
 (彭倩, 沈保罗. 锆合金的织构及其对性能的影响. 稀有金属, 2005, 29(6): 903)
- [11] Wu Y, Yao X N, Tian F, et al. Effect of rolling technology on texture orientation and corrosion performance of Zr-4 zirconium alloy strips. *Rare Met Mater Eng*, 2012, 41(12): 2238

(武宇,姚修楠,田锋,等. 轧制工艺对Zr-4合金带材织构取向及 腐蚀性能的影响. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(12): 2238)

- [12] Zhao L K, Li X N, Yue Q, et al. Effect of processing technology on microstructure of Zr-4 alloy hot rolled plates. *Hot Working Technol*, 2018, 47(17): 36
 (赵林科,李小宁,岳强,等.加工工艺对Zr-4合金热轧板材微观 组织的影响. 热加工工艺, 2018, 47(17): 36)
- [13] Fuloria D, Kumar N, Jayaganthan R, et al. Microstructural and textural characterization of Zircaloy –4 processed by rolling at different temperatures. *Mater Charact*, 2017, 127: 296
- [14] Wang W G, Zhou B X. Texture controlling of zircaloy plate. Nucl Power Eng, 1994, 15(2): 158
 (王卫国,周邦新. 锆合金板织构的控制. 核动力工程, 1994, 15(2): 158)
- [15] Wang W G, Zhou B X. Effect of rolling temperature on the textures of Zircaloy-4 plate. *Nucl Power Eng*, 1996, 17(3): 255
 (王卫国,周邦新. 轧制温度对Zr-4合金板织构的影响. 核动力工程, 1996, 17(3): 255)
- [16] Li X N, Wang K S, Yu J H, et al. Effects of finishing annealing temperature on deformation texture and mechanical properties of Zr-4 zirconium alloy tube. *Rare Met Cemented Carbides*, 2018, 46(4): 73
 (李小宁, 王块社, 于军辉, 等. 成品退火温度对Zr-4锆合金管材 变形织构和力学性能的影响. 稀有金属与硬质合金, 2018,

46(4): 73)[17] Zeng Q H, Luan B F, Chapuis A, et al. Evolution of

- [17] Zeng Q H, Edul D F, enapuls A, et al. Evolution of crystallographic texture of zirconium alloy during hot deformation. *Rare Met Mater Eng*, 2019, 48(8): 2393
- [18] Saintoyant L, Legras L, Brechet Y. E?ect of an applied stress on the recrystallization mechanisms of a zirconium alloy. *Scripta*

Mater, 2011, 64(5): 418

- [19] Bhaumik S, Molodova X, Gottstein G. Effect of stress on the annealing behavior of severely plastically deformed aluminum alloy 3103. *Mater Sci Eng A*, 2010, 527(21-22): 5826
- [20] Zeng Q H. Microstructure and Texture Evolution during Hot Compression of Zirconium Alloy with Different Initial Orientation[Dissertation]. Chongqing: Chongqing University, 2018

(曾庆辉.初始取向对锆合金热压缩变形微观组织及织构演变的影响[学位论文].重庆:重庆大学,2018)

- [21] Jiang Y B. Applied Fundamental Research of the High-density Electropulsing on the Manufacturing of AZ91 Magnesium Alloy Strip[Dissertation]. Beijing: Tsinghua University, 2010 (姜雁斌. 高能电脉冲在制备AZ91 镁合金中的应用基础研究[学 位论文]. 北京: 清华大学, 2010)
- [22] Mao W M, Yang P, Chen L. Material Texture Analysis Principle and Detection Technology. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007

(毛卫民,杨平,陈冷.材料织构分析原理与检测技术.北京:治 金工业出版社,2007)

- [23] Chen X. Microstructure and Texture Evolution of Zr-4 Alloy in Deformation and Subsequent Annealing[Dissertation]. Chongqing: Chongqing University, 2018
 (陈欣. Zr-4 合金变形及退火过程中组织与织构演变[学位论 文]. 重庆: 重庆大学, 2018)
- [24] He W J, Chapuis A, Chen X, et al. Effect of loading direction on the deformation and annealing behavior of a zirconium alloy. *Mater Sci Eng A*, 2018, 734: 364
- [25] Chakravarty J K, Kapoor R, Sarkar A, et al. Dynamic recrystallization in zirconium alloys. J ASTM Int, 2010, 7(8): 1