

核燃料锆合金条带材研究进展

许恒新^{1,2}, 丁郁航², 李洁², 高权^{1,2}, 陈秋羽², 李豪^{1,2}, 周宣², 李宇力²

(1. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

(2. 西安西部新锆科技股份有限公司, 陕西 西安 710299)

摘要: 锆合金条带材是反应堆核燃料组件中格架、弹簧及相关结构件的关键材料, 其质量稳定性是决定核燃料组件服役可靠性与安全性的关键因素。本文系统综述了锆合金条带材在关键制备工艺及工程应用性能方面的研究进展, 涵盖变形加工工艺、表面质量控制、织构与第二相粒子及其对冲制性能的影响等内容; 介绍了国际主流锆合金条带材制造商的技术发展现状, 并展望了未来技术发展趋势, 旨在为该领域工程应用研究提供参考。

关键词: 锆合金条带材; 加工工艺; 织构; 第二相粒子; 冲制性能

中图分类号: TG146.4⁺14

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2026)04-042-07

Research Progress on Zirconium Alloy Strips for Nuclear Fuel

Xu Hengxin^{1,2}, Ding Yuhang², Li Jie², Gao Quan^{1,2}, Chen Qiuyu², Li Hao^{1,2}, Zhou Xuan², Li Yuli²

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2. Xi'an Western Energy Material Technologies Co., Ltd., Xi'an 710299, China)

Abstract: Zirconium alloy strips are critical materials for grid spacers, springs, and associated structural components of nuclear fuel assemblies, and their quality stability is a critical factor determining the in-service reliability and safety of the fuel assemblies. This paper systematically reviews the research progress on the key manufacturing processes and engineering performance of zirconium alloy strips, covering deformation processing technologies, surface quality control, texture and second-phase particle characteristics, and their effects on stamping performance. In addition, the current technological status of major international manufacturers is introduced, and future development trends are discussed. This review aims to provide a valuable reference for engineering applications in this field.

Keywords: zirconium alloy strips; processing technologies; texture; second-phase particles; stamping performance

格架是反应堆堆芯的重要结构部件, 主要为燃料棒提供支撑与定位作用, 维持各个燃料棒之间的合理间距, 确保反应堆内工况下水流及热流的均匀传导。通常, 格架(如图1所示)^[1]由4个外条带及数十个内条带焊接而成, 这些内外条带组成了格架的最基本单元——栅元。若组成格架的任意一个栅元出现变形或尺寸超差, 均可能导致其他栅元产生变形, 进而造成燃料棒夹持力分布不均匀。在堆内极其严苛的工况环境下, 夹持力不均匀以及条带材成形后产生的微裂纹均会加速燃料棒的疲劳、磨损及破裂, 从而急剧增加核泄漏风险。因此, 在实际生产中, 核燃料元件制造厂

对条带材的成形质量(开裂、压痕)、尺寸均匀性、精度和稳定性提出了十分严苛的要求。

格架通常由锆合金条带材经冲制、组装及焊接等一系列工艺加工而成。锆合金具有较小的热中子吸收截面、优异的耐腐蚀性能及力学性能^[2-4], 是反应堆中应用较为广泛的金属材料。目前, 反应堆中应用最为广泛的是M5和Zr-4合金带材^[1,5-7], 其加工工艺通常包括熔炼、锻造、热轧、冷轧、退火及抛光等多个关键环节。不同工艺环节会显著影响条带材的板形、表面质量、微观组织、织构分布及第二相粒子形态, 进而导致力学性能和冲制性能呈现各向异性。尤其在冲制加工过程中, 若存在应力集中、表面缺陷或第二相析出与粗化, 易在模具作用下发生裂纹萌生与扩展, 严重影响格架制造的一致性与成品率。与锆合金管材

收稿日期: 2026-01-11

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2024CY-GJHX-16)

通信作者: 许恒新(1992—), 男, 工程师。

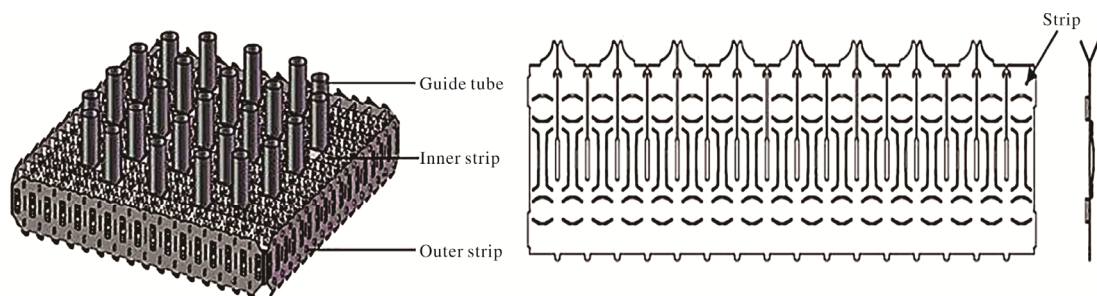
图1 核燃料组件格架示意图^[1]

Fig.1 Schematic illustration of nuclear fuel assembly grids

的研究相比,国内针对条带材的研究相对不足,尤其是冲制性能与加工工艺之间的关联机制^[8-12]仍需进一步探究。国际上,美国华昌公司(ATI Wah Chang)和法国法马通公司(Framatome)在条带材制备工艺与合金体系优化方面积累了丰富的经验,其成果在压水堆燃料组件中得到广泛应用,为我国相关研究提供了重要借鉴。

本文从锆合金条带材的加工工艺、板形控制、表面质量、组织与第二相粒子控制及冲制性能研究进展等方面进行系统综述,介绍国际领先企业的工艺积累与应用实践,并展望面向未来高燃耗需求的条带材发展趋势。

1 加工工艺研究进展

1.1 热轧工艺

锆合金条带材的热轧工序主要是将厚板坯减薄至冷轧所需的中间带卷规格,同时实现晶粒细化、板形改善,并初步形成组织特征。该工艺过程涉及温度、相变、组织及力学性能等复杂多变量因素的耦合作用,因此对热轧温度、轧制工艺参数及板形控制提出了更高要求。近年来的研究^[13-15]表明,合理控制热轧温度、轧制速度以及各道次压下量等参数,可有效减少边浪、翘曲等板形缺陷,促进再结晶均匀化,从而获得板形良好、平整度优良的带材。

北京科技大学曹媛^[13]针对锆合金板带多轧程、多道次热轧过程开展了深入研究,建立了轧件-轧辊一体化三维有限元模型,系统研究了工业轧制规程下的板形演化规律,得出以下结论:①多轧程累计温降导致锆合金变形抗力持续升高,进而使辊系弹性变形的横向分布均匀性显著降低;②压下量分配不合理是诱发边浪、复合浪形及镰刀弯等板形缺陷的根本原因;③轧辊磨损与弯辊力对锆板板形的调控作用有限,这是锆合金热轧板形较钢材更难控制的内在机理。此外,西安西部新锆科技股份有限公司及西部钛业有限责任公司等单位基于ASTM标准,共同起草了GB/T 21183

—2017《锆及锆合金板、带、箔材》,该标准对锆及锆合金板、带、箔材的力学性能、尺寸偏差及平整度等方面作出了规定。

在组织调控方面,热轧总变形量、轧制温度及 β 淬火板坯厚度等^[16-23]均会影响锆合金条带材的组织取向:随着热轧总变形量的增大,法向组织取向因子增大,横向和轧向组织取向因子减小。西屋公司在专利^[17]中公开了一种“不淬火+高温热轧(约900℃)”工艺,可获得横向组织因子为0.3~0.6的条带材,以弥补堆内强辐照导致格架对燃料棒夹持力不足的问题。然而,西北有色金属研究院武宇等^[18]认为,在 $\alpha+\beta$ 两相区上限或更高温度下进行热轧开坯,虽有利于提高横向组织取向因子,但会损害Zr-4合金成品带材的耐腐蚀性能。

1.2 冷轧工艺

条带材冷轧时通常需要对张力进行控制,适当的张力有利于改善板形并减小局部厚度不均。当张力过低时,带材在轧制区内易发生横向不均匀变形,从而产生中浪或边浪。将前、后张力分别稳定在材料屈服强度的25%~35%和20%~30%范围内,并结合轧辊倾斜、弯辊等手段,能够有效“熨平”带材,获得良好的平面度;但张力过高则会引起表面划伤、裂边、颈缩或开裂^[24]。

一般来说,冷轧工艺不会改变热轧板材的组织类型。图2为冷轧和 α 相区低温热轧后锆合金板材的(0002)极图^[25]。从图2可以看出,锆合金经冷轧和 α 相区低温热轧后,大部分晶粒的[0002]基轴集中分布在与轧制方向垂直的ND-TD平面上,并且偏离轧制面法向30°左右。这主要是在低温区轧制变形时,主要的变形滑移系为 $\{10\bar{1}0\} \langle 1\bar{2}10 \rangle$,主要形成[0002]基轴沿轧制面法向取向的组织。较大的冷轧变形量会提高材料强度,但同时使组织逐渐集中于 $\{0001\} \langle 1\bar{2}10 \rangle$ 基面取向,导致性能各向异性增强。强基面

织构会引起材料厚度方向的塑性降低, 冲制过程中极易引发裂纹沿垂直方向扩展。因此, 冷轧工艺需在强度与塑性之间寻求平衡。通常通过分道次轧制与控制压下率来获得既能满足尺寸精度要求又具有良好冲制性能的组织状态。Guo 等^[26]研究表明, 大应变变形时, Zr-4 合金典型轧制织构的形成依赖于基面滑移的开启, 且冷轧变形量越大, 织构强度越大。Murty 等^[2]研究表明, 织构集中度随冷轧变形量增大而显著增强, 导致冲制加工性能下降。章勋亮等^[27]进一步证实, 多轧程冷轧结合中间退火可有效改善各向异性, 使带材兼具高强度与良好塑性。

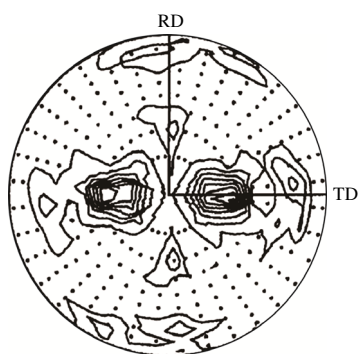


图2 锆合金板材经冷轧及 α 相区低温热轧后的(0002)极图^[25]

Fig.2 (0002) pole figure of zirconium alloy sheet after cold rolling and low-temperature hot rolling in α -phase field

1.3 退火工艺

退火工艺通常包括中间退火和成品退火两类。中间退火一般安排在多道次冷轧之间, 其主要作用是消除加工硬化、恢复材料塑性并促进再结晶。退火温度过低将导致再结晶不充分, 材料延展性不足; 退火温度过高则可能引起晶粒异常长大与织构过度弱化, 不利于尺寸精度与冲制性能控制。此外, 中间退火不仅改善了板形与厚度均匀性, 还通过调节织构演化路径抑制了强基面织构的形成, 从而有效降低冲制过程中因各向异性而导致的开裂风险。彭倩等^[28]研究指出, 中间退火可通过促进织构随机化来削弱基面织构集中度, 从而改善厚度方向塑性。Yang 等^[29]对 Zr-Nb 合金的研究表明, 适宜的中间退火温度(约 580~600 °C)能够在保持强度的同时显著提高延展性, 降低冲制过程中出现裂纹的几率。

成品退火的主要目的是获得稳定的再结晶组织、细小的第二相粒子及合理的织构分布。再结晶程度直接决定晶粒大小及织构随机化水平: 完全再结晶组织通常表现出较好的各向同性及优异的冲制性能; 不完全再结晶则可能残留畸变织构和亚结构, 降低冲制性

能的均匀性^[30-35]。锆合金中常见的第二相粒子包括 β -Nb、Zr(Fe,Cr)₂ 等, 其尺寸、形貌与分布对耐蚀性、吸氢率及力学性能具有重要影响。均匀且弥散分布的细小粒子有助于抑制位错运动, 提升材料强度; 而粗化或沿晶界析出的粒子则容易诱发裂纹萌生。热轧与退火温度是调节第二相粒子形态的关键工艺参数。较高的退火温度可促进 Zr(Fe,Cr)₂ 粒子粗化; 粗大的第二相粒子在辐照条件下可能成为应力集中点, 加速裂纹萌生, 进而降低材料的耐蚀性。低温退火则有助于保持晶粒及第二相粒子细小均匀分布(见图 3a、3b), 改变部分晶粒取向(见图 3c), 从而显著改善合金的耐蚀性能和抗吸氢能力^[32]。

1.4 表面处理工艺

在锆合金带材的工业化制备过程中, 热轧后带卷与成品退火后带卷通常均需进行表面处理, 如喷丸、酸洗、校平和修磨等。虽然二者的目的均为改善表面质量与尺寸稳定性, 但在工艺侧重点和作用上存在差异。对于热轧后带卷, 由于高温变形过程中不可避免地形成较厚的氧化皮及富氧脆化层, 且表层可能伴随轧制烧损、微裂纹及不均匀残余应力分布, 因此喷丸常作为首道工序, 用于机械去除疏松氧化皮、破碎致密氧化层并暴露基体金属, 为后续酸洗创造有利条件。随后采用以 HF + HNO₃ 体系为代表的化学酸洗工艺, 能够有效溶解氧化物(主要为 ZrO₂)并去除受污染的表层, 使热轧带卷表面获得较为均匀、清洁的状态, 同时使潜在的表面缺陷得以显现, 便于质量判定与后续修整。由于热轧后带卷往往还存在一定的板形缺陷和几何不稳定性, 校平工序通过小塑性变形的方式重新分配残余应力、改善平直度和厚度均匀性, 并辅以局部修磨, 可进一步去除酸洗后暴露的表面凹坑、划伤以及表层压入的夹杂等缺陷, 从而降低表面粗糙度并提升整体表面一致性, 为后续冷加工或中间退火提供稳定的基础。相比之下, 成品退火后带卷的表面处理更多服务于最终使用性能和质量一致性控制。退火过程中带材表面可能形成再氧化层或轻微变色层, 因此通常需通过轻度喷丸或酸洗去除退火氧化物, 以保证成品表面的洁净度和稳定的化学状态。此阶段的校平工序主要用于消除退火应力释放后可能出现的翘曲或波浪等板形缺陷, 确保带材满足核用结构件对平直度和尺寸精度的严格要求。此外, 往往还需进行精细修磨或抛光处理, 以进一步降低表面粗糙度、削弱应力集中源, 从而提升疲劳性能并降低冲制裂纹产生的概率。总体而言, 热轧后表面处理侧重于“去除缺陷与为后续加工创造条件”, 而成品退火后表面处理则强调“稳定最终状态与保障性能”。二者共同构成锆合金

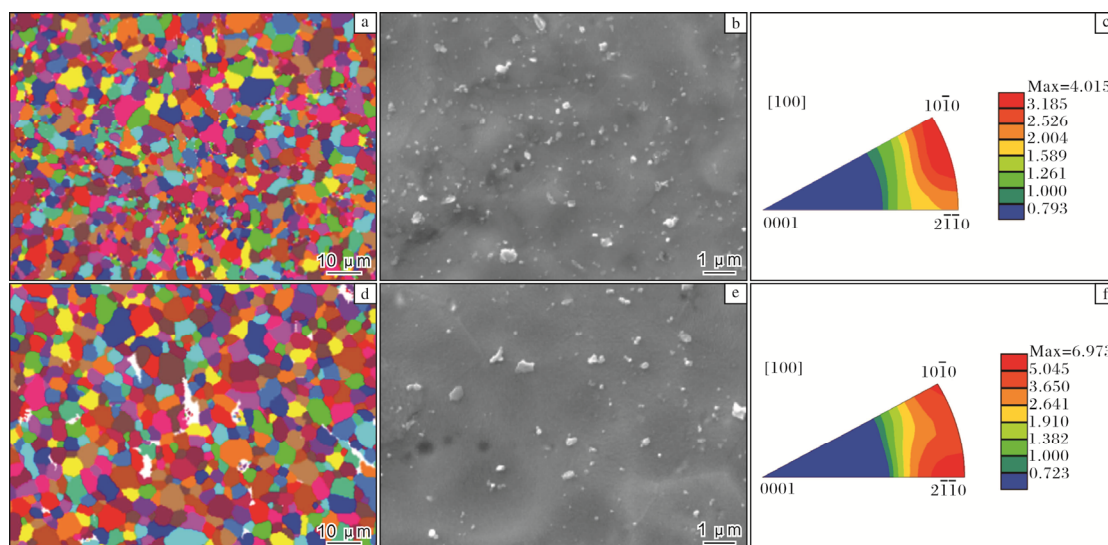


图 3 新型锆合金带材在不同退火温度下的晶粒形貌、第二相分布及反极图^[32]

Fig.3 Grain morphologies (a, d), second-phase distribution (b, e), and IPFs (c, f) of the new zirconium alloy strip at different annealing temperatures: (a–c) 400 °C; (d–f) 650 °C

条带材高质量制造过程中不可或缺的关键环节,这一规律已在锆合金加工与表面质量研究中得到多次验证^[36]。

1.5 组织及工艺参数对冲制性能的影响

组织是决定锆合金条带材性能各向异性的核心因素。冷轧过程中, α -Zr 晶体易形成强烈的基面组织,而退火过程则可能促进组织随机化。组织分布的定量表征常采用 Kearns 因子,其数值越接近 0.33,表示组织越趋于各向同性。过度集中的基面组织会显著降低厚度方向的塑性,使材料在冲制过程中更易发生开裂。因此,通过合理设计变形加工工艺和退火制度实现组织的工程化调控,是提高条带材性能一致性的关键。蒋朋松等^[37]采用有限元模拟与试验验证相结合的方法,研究了带材性能参数对其冲制成形的影响,揭示了硬化指数与屈服比对带材壁厚分布均匀性及最大应变的影响规律,提出了保证薄板带材稳定冲制的关键性能指标及其控制范围。Liu 等^[38]基于有限元和粘塑性自洽(VPSC)

模拟,通过调控轧制压下量和退火温度,得到不同初始组织的 Zr-4 合金带材,其(0001)极图及法向 Kearns 因子(F_n)如图 4 所示,等效应变图、成形极限图和成形极限曲线如图 5 所示。研究发现, Zr-4 合金带材的初始组织对其冲压成形性能影响显著:当 F_n 值为 0.606 时,带材在冲压过程中始终处于安全区;当 F_n 值增加至 0.680 和 0.690 时,成形件底部圆角处存在轻微的开裂风险,但并未发生实际开裂;当 F_n 值为 0.700 时,底部圆角处出现开裂区;而当 F_n 值进一步增至 0.722 时,该区域开裂范围明显扩大。上述分析表明,底部圆角处的开裂倾向随 F_n 值增大而加剧。鉴于此,为防止 Zr-4 合金带材冲压开裂,须将其 F_n 值控制在 0.7 以下。

另一方面,在冲制成形过程中,工艺参数(如冲制速度、压边力以及冲制间隙等)会对带材最终的成形性能产生重要影响。Jin 等^[39]研究发现,较高的冲制速度可获得更好的成形性能。Zein 等^[40]通过数值模拟和实

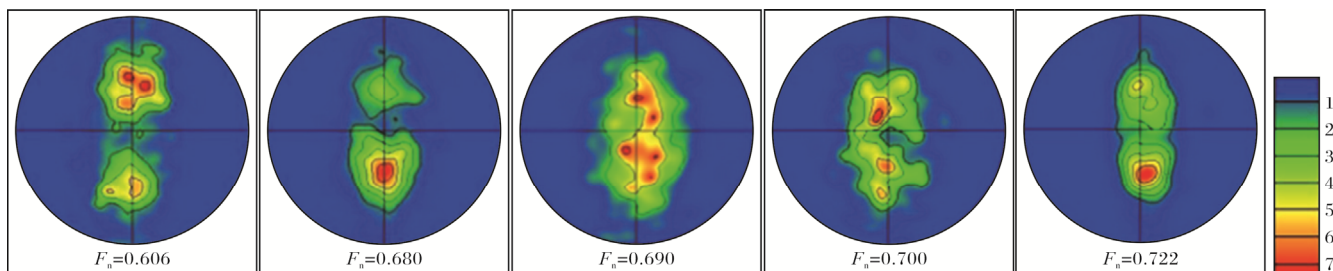


图 4 不同初始组织 Zr-4 合金带材的(0001)极图及法向 Kearns 因子^[38]

Fig.4 (0001) pole figures and normal Kearns factors of Zr-4 alloy sheets with different initial textures

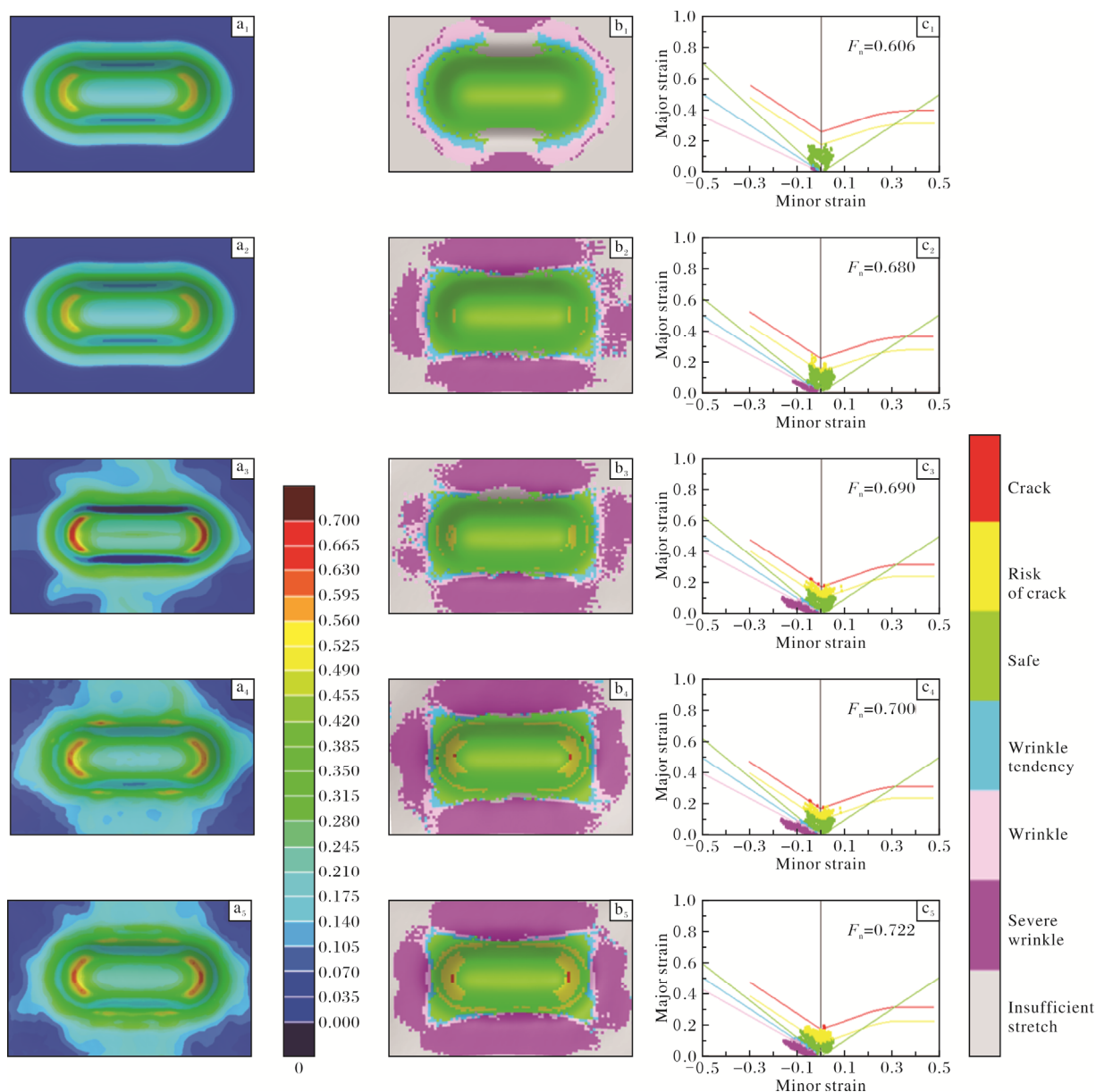


图5 不同初始组织 Zr-4 合金板材的等效应变图、成形极限图和成形极限曲线^[38]

Fig.5 Equivalent strain diagrams (a₁-a₅), forming limit maps (b₁-b₅) and forming limit curves (c₁-c₅) of Zr-4 alloy sheets with different initial textures: (a₁, b₁, c₁) $F_n = 0.606$; (a₂, b₂, c₂) $F_n = 0.680$; (a₃, b₃, c₃) $F_n = 0.690$; (a₄, b₄, c₄) $F_n = 0.700$; (a₅, b₅, c₅) $F_n = 0.722$

验建立了深冲过程中厚度减薄与工艺参数之间的关系,发现增加压边力通常会加剧减薄,甚至导致破裂。Chang 等^[41]研究发现,随着剪切间隙的增大,形成了尺寸更大且分布广泛的孔洞,降低了剪切边缘的成形性,可能导致薄板在成形过程中萌生裂纹,并增大应力集中区域开裂风险。

2 锆合金带材制备技术现状

锆合金带材制备技术主要由少数具备核级锆材全流程制造能力的企业和研究机构主导^[42-44],其技术体系普遍覆盖高纯原料制备、合金熔炼、热冷轧成形、

退火及表面精整等关键环节。美国华昌公司、法国法马通公司是核燃料组件和高端耐蚀结构件的长期供应商,代表着锆合金带材制备的国际最高水平,其产品单卷质量可达 200 kg,且冲制成形合格率高、产品稳定性强。总体来看,国际先进制造商的制备技术并非片面追求单一工序的技术突破,而是更加注重全流程协同优化:通过严格的杂质控制与合金设计奠定材料基础,并结合完整的热-冷加工机械处理路径及严格的表面质量控制,实现织构与力学性能的可控调节。在此基础上,重点强化以下三方面工艺细节控制:① 合金熔炼与成分均匀化,严格控制 O、N、H 等间隙元

素含量,以满足核级锆合金的严苛标准;②热加工参数与中间退火制度的精细化设计,以获得均匀的细晶组织和稳定的各向异性;③中间及成品阶段的表面处理与精整技术(包括喷丸、酸洗、校平和精磨),以降低表面缺陷与残余应力对最终性能的不利影响。上述研究与工程实践共同构成了当前国际上锆合金条带材制备技术的发展主线,也反映出该领域由“可制造”向“高一致性、高可靠性”方向持续演进的总体趋势。

3 结 语

锆合金条带材作为核燃料组件格架及相关结构件的关键材料,其制备质量和服役性能对核燃料组件的安全性、可靠性具有重要影响。近年来,国内围绕锆合金条带材的加工工艺、表面质量控制、组织与织构调控及冲制性能等方面开展了大量研究,在提高锆合金条带材尺寸精度、表面质量及综合力学性能方面取得了显著进展。然而,随着核燃料向高燃耗、长寿命及复杂服役环境方向发展,对锆合金条带材的工艺精细化程度、织构稳定性、抗腐蚀与抗辐照性能的一致性等方面提出了更高的要求。未来研究应进一步将应用需求与材料设计、制备工艺和服役性能评价紧密耦合,通过引入多尺度表征技术与寿命预测模型,推动锆合金条带材向更高安全裕度和更长服役寿命方向发展。

参考文献 References

- [1] 雷从一. 锆合金条带成形机理及冲制工艺优化[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
- [2] Murty K L, Charit I. Texture development and anisotropic deformation of zircalloys[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2006, 48(4): 325-359.
- [3] 任全耀, 陈杰, 赵瑞瑞, 等. 新型定位格架夹持结构的力学特性研究[J]. *原子能科学技术*, 2020, 54(12): 2411-2417.
- [4] 王言眸, 张聪惠, 朱文光, 等. 锆合金带状腐蚀研究进展[J]. *钛工业进展*, 2022, 39(2): 42-48.
- [5] Doriot S, Verhaeghe B, Béchade J L, et al. Microstructural evolution of M5^{TM7} alloy irradiated in PWRs up to high fluences — comparison with other Zr-based alloys[M]// *Zirconium in the Nuclear Industry: 17th International Symposium*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2005: 1-41.
- [6] Kim K T. Evolutionary developments of advanced PWR nuclear fuels and cladding materials[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2013, 263: 56-69.
- [7] Motta A T, Couet A, Comstock R J. Corrosion of zirconium alloys used for nuclear fuel cladding[J]. *Annual Review of Materials Research*, 2015, 45: 311-343.
- [8] 赖相鹏, 周源, 池雪丰, 等. 国产核燃料锆合金格架刚凸冲制工艺参数优化[J]. *核科学与技术*, 2025, 13(2): 99-109.
- [9] Kim M, Rickhey F, Lee H, et al. Analytical determination of forming limit curve for zirlo and its experimental validation[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, 23: 122-129.
- [10] 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.
- [11] Dong J X, Deng S Y, Xie W L, et al. Effect of initial texture on the formability of Zircaloy-4 sheet in stamping with FEM-VPSC modeling[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 33: 7448-7457.
- [12] Lei C Y, Mao J Z, Zhou D W, et al. Effect of annealing treatments on forming performance of zirconium alloys[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2022, 32(9): 2908-2921.
- [13] 曹媛. 核用锆合金板带多轧程多道次热轧板形控制研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
- [14] Zong Y Y, Gen Q F, Jiang H W, et al. High and low temperature deformation behavior of different orientation hot-rolled annealed zircaloy-4[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, 27(3): 1203-1216.
- [15] Yuan F, Li G, Han F, et al. Shear deformation behavior of zircaloy-4 alloy plate[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2020, 774: 138914.
- [16] 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[J]. *金属世界*, 2017(4): 28-31.
- [17] Barberis P, Simonot C. Method of producing a flat zirconium alloy product, flat product thus obtained and a nuclear plant reactor grid which is made from said flat product: US008137488B2[P]. 2005-04-21.
- [18] 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[J]. *稀有金属材料与工程*, 2012, 41(12): 2238-2242.
- [19] 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[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(17): 36-39+43.
- [20] 贾玉振, 邱军, 杨忠波. 轧制工艺对 N36 锆合金带材微观结构的影响[J]. *金属热处理*, 2020, 45(11): 148-154.
- [21] 陈建伟, 栾佰峰, 柴林江, 等. Zr-Sn-Nb 新型锆合金板材加工过程中不均匀组织与织构演变[J]. *金属学报*, 2012, 48(4): 393-400.
- [22] 杨合, 詹梅. 材料加工过程实验建模方法[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.

- [23] Gao H T, Kong C, Yu H L. Light weight metal laminates via (hot, cold and cryogenic) roll bonding: a review[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(2): 337-356.
- [24] 杨利坡, 张海龙, 张永顺. 高端冷轧箔带形状/性能协同测控现状及趋势预测[J]. 金属学报, 2021, 57(3): 295-308.
- [25] 李麦海, 王兴. 铝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.
- [26] Guo W B, Li G P, Yuan F S, et al. Texture development and mechanical behavior of Zircaloy-4 alloy plates fabricated by cold rolling and annealing[J]. Materials Science and Engineering A, 2021, 807: 140846.
- [27] 章勋亮, 张聪惠, 朱文光, 等. 第二相粒子的析出演变及其对铝合金的影响研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(8): 2608-2621.
- [28] 彭倩, 沈保罗. 铝合金的组织及其对性能的影响[J]. 稀有金属, 2005, 29(6): 903-907.
- [29] Yang Z N, Wang X B, Liu F, et al. Effect of intercritical annealing temperature on microstructure and mechanical properties of duplex Zr-2.5Nb alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 776: 242-249.
- [30] Ihn N. An investigation of structural strength of PWR fuel assembly spacer grid with fuel rod clad[J]. Annals of Nuclear Energy, 2024, 195: 110124.
- [31] 周鼎, 黄聪聪, 李天勇, 等. 压水堆燃料组件定位格架刚度估算及误差来源分析[J]. 原子能科学技术, 2025, 59(3): 691-699.
- [32] 周惦武, 武丹花, 汪浩, 等. 退火温度对新型铝合金薄板带材析出相和组织的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(1): 150-155.
- [33] Cox B. Some thoughts on the mechanisms of in-reactor corrosion of zirconium alloys[J]. Journal of Nuclear Materials, 1990, 170(1): 1-10.
- [34] 陈春光. 我国核电用铝合金材料产业化的现状与发展[J]. 上海有色金属, 1998, 19(2): 53-57.
- [35] 赵文金, 周邦新, 苗志, 等. 我国高性能铝合金的发展[J]. 原子能科学技术, 2005, 39(S1): 2-9.
- [36] Coleman C E. The Metallurgy of Zirconium[M]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2022: 281-283.
- [37] 蒋朋松, 周惦武, 邓振鹏, 等. 铝合金薄板带材冲制成形研究[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(1): 46-51.
- [38] Liu H, Song H W, Deng S Y, et al. Study on formability improvement of Zr-4 sheets based on texture optimization[J]. Metals, 2024, 14(6): 725.
- [39] Jin C K, Jang C H, Kang C G. Die design method for thin plates by indirect rheo-casting process and effect of die cavity friction and punch speed on microstructures and mechanical properties[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 224: 156-168.
- [40] Zein H, El Sherbiny M, Abd-rabou M, et al. Thinning and spring back prediction of sheet metal in the deep drawing process[J]. Materials & Design, 2014, 53: 797-808.
- [41] Chang Y, Han S, Li X D, et al. Effect of shearing clearance on formability of sheared edge of the third-generation automotive medium-Mn steel with metastable austenite[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 259: 216-227.
- [42] Romero J, Hallstadius L, Owaki M, et al. Evolution of Westinghouse fuel cladding[C]//Proceedings of the International Conference on Light Water Reactor Fuel Performance. Sendai, Japan, 2014: 14-17.
- [43] Garde A M, Comstock R J, Pan G, et al. Advanced Zirconium Alloy for PWR Application[C]//Zirconium in the Nuclear Industry: 16th International Symposium. Chengdu, 2012: 784-800.
- [44] Xu L, Xiao Y, Van Sandwijk A, et al. Production of nuclear grade zirconium: a review[J]. Journal of Nuclear Materials, 2015, 466: 21-28.

专利信息

一种点阵散热结构用耐 600 °C 高韧钛合金增材制备方法

申请号: CN202610500721.1

申请日: 2026-04-16

申请公布日: 2026-06-12

申请公布号: CN122184388A

申请人: 西北有色金属研究院

摘要: 本发明公开了一种点阵散热结构用耐 600 °C 高韧钛合金增材制备方法, 包括以下步骤: ① 进行数字化建模并精细化模型剖分, 进行路径规划; ② 预热不锈钢基板, 抽真空后通入惰性保护气体; ③ 将钛合金粉末装入送粉设备中; ④ 输入电子束增材制造参数; ⑤ 进行电子束增材制造; ⑥ 炉冷至室温, 得到高温钛合金点阵散热工件。本发明针对高温钛合金通常存在铸造缺陷多、强度低、韧性差等缺点, 提出一种适用于高温钛合金点阵散热结构的电子束增材制造方法。该方法通过对不锈钢基板进行处理并控制电子束增材制造参数, 有效避免了疏松、缩孔等常见铸造缺陷, 且微观组织细小均匀, 具有良好的强度和韧性, 在航空装备领域具有广阔的应用前景。