

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.6108

升温速率对锆合金管材氢化物析出的影响

程绍杨¹, 严孟元¹, 惠泊宁^{1,2}, 陈彪², 李金山²

(1. 西安西部新锆科技股份有限公司 陕西 西安 710299 2. 西北工业大学 凝固技术全国重点实验室 陕西 西安 710072)

摘要: 锆合金因综合性能优异而被广泛用作轻水堆的燃料包壳材料。核反应堆运行期间, 包壳不可避免地从中高温冷却剂中吸氢。传统认知认为, 在无外部载荷作用下, 氢化物倾向于沿管材周向析出; 仅当施加外部拉应力时才会发生再取向形成径向氢化物。然而, 本研究表明, 在无外部机械载荷条件下, 过高的升温速率亦可诱发显著的氢化物再取向行为。实验结果显示, 当升温速率提升至 20 °C/min 时, 管材外壁形成宏观可见的径向氢化物聚集区, 呈现特征性的“太阳斑”状形貌。分析表明, 快速升温在管壁厚度方向上建立了陡峭的温度梯度, 致使外壁因受内壁约束而产生动态环向拉应力; 该应力场不仅驱动固溶氢向高拉应力区发生“上坡扩散”, 更诱导氢化物在过饱和状态下垂直于拉应力方向择优析出。

关键词: 锆合金; 氢化物; 升温速率; 再取向

中图分类号: TG146.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)08-0888-06

Effect of Heating Rate on Hydride Precipitation in Zirconium Alloys

CHENG Shaoyang¹, YAN Mengyuan¹, HUI Boning^{1,2}, CHEN Biao², LI Jinshan²

(1. Xi'an Western Energy Material Technologies Co., Ltd., Xi'an 710299, China; 2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Zirconium alloys are widely used as fuel cladding in light water reactors because of their optimal combination of mechanical strength, corrosion resistance, and low neutron absorption cross-section. During operation, cladding inevitably absorbs hydrogen from the high-temperature coolant. Conventionally, hydride precipitates exhibit a circumferential orientation under stress-free conditions, and reorientation into a radial morphology is traditionally attributed to sustained tensile hoop stress. Here, it is demonstrated that pronounced hydride reorientation can occur under stress-free conditions, triggered solely by rapid thermal transients. The experimental results reveal that at a heating rate of 20 °C/min, a localized, radially oriented hydride aggregation zone—resembling a “sunspot”—emerges on the outer cladding surface. Mechanistic analysis indicates that rapid heating establishes a steep through-thickness temperature gradient, which, under deformation compatibility, forces the expanding outer wall to be constrained by the inner wall and consequently drives a dynamic circumferential tensile stress gradient. This transient gradient drives solute hydrogen toward regions of higher tensile stress via uphill diffusion and triggers rapid precipitation in the supersaturated matrix, preferentially aligning hydrides perpendicular to the principal tensile axis.

Key words: zirconium alloys; hydride; heating rate; reorientation

锆合金由于其独特的低热中子吸收截面、良好的综合力学性能和卓越的耐高温腐蚀性能而广泛应用于核反应堆中的核燃料包壳管^[1-2]。在堆内服役时, 锆合金包壳吸收其与冷却水腐蚀反应产生的氢。当氢浓度超过极限固溶度时, 会以氢化锆的形式析出^[3-5]。脆性氢化物显著影响锆合金包壳管的力学性能和耐腐蚀性能, 严重危害核燃料包壳的结构

完整性^[6-8]。

氢化物的析出伴随着显著的局部体积膨胀, 以最常见的 δ -氢化物为例, δ -氢化物与周围 α -Zr 之间的晶格参数错配具各向异性^[9-10]。对于满足 $(0001)_\alpha // (111)_\delta$ 、 $\langle 11\bar{2}0 \rangle_\alpha // \langle 110 \rangle_\delta$ 取向关系的基面 δ 氢化物, 基面沿 $[0001]_\alpha$ c 轴的膨胀应变为 +7.25%, 沿 $[11\bar{2}0]_\alpha$ 为 +4.76%, 沿 $[1\bar{1}00]_\alpha$ 为 +4.58%。对于满足 $(0001)_\alpha //$

收稿日期: 2026-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(U25B20112)

作者简介: 程绍杨, 1979 年生, 硕士, 高级工程师。主要从事核燃料研究工作。Email: WEM2026001@163.com

引用格式: 程绍杨, 严孟元, 惠泊宁, 陈彪, 李金山. 升温速率对锆合金管材氢化物析出的影响[J]. 铸造技术, 2026, 47(8): 888-893.

CHENG S Y, YAN M Y, HUI B N, CHEN B, LI J S. Effect of heating rate on hydride precipitation in zirconium alloys[J]. Foundry Technology, 2026, 47(8): 888-893.

$\{111\}_{\delta} <11\bar{2}0>_{\alpha} // <110>_{\delta}$ 和 $<10\bar{1}0>_{\alpha} // <110>_{\delta}$ 取向关系的棱柱面 δ 氢化物,沿 $[0001]_{\alpha}$ 的错配应变为 -7.10%,沿 $[10\bar{1}0]_{\alpha}$ 的错配应变为 +20.70%。与具有最小应变容纳能的基面氢化物相比,棱柱面氢化物析出引起的较大应变会直接导致沿着 $\{10\bar{1}0\}$ 棱柱面解理开裂^[11]。宏观上,氢化物的形态可分为周向和径向。与含有周向氢化物的管材相比,含有径向氢化物时更容易发生裂纹扩展^[6,12]。

铝合金包壳管在制备过程中,会通过控制冷轧工艺与矫直工艺,将氢化物取向控制在沿管材的周向分布。然而在管材制备或使用过程中如果施加较大的环向拉应力,铝合金管材的氢化物取向会沿着拉应力方向发生变化,氢化物取向会转变为径向分布。目前关于应力诱导氢化物再取向已有较多报道^[13-17]。值得注意的是,氢化物的析出本质上是受氢扩散与相变动力学控制的复杂过程,除了应力场外,温度场的变化也同样起着决定性作用。然而,现有研究多聚焦于恒温或常规升温条件下的应力效应,极少关注温度急剧变化这一非平衡热力学过程对氢化物析出行为的影响。基于此,本文利用光学显微镜、扫描电镜等表征手段,研究不同升温速率条件下析出氢化物的形貌、分布特征。基于所获得的结果,可以通过升温速率对应力分布的影响来解释氢化物的析出及应力诱导再取向。

1 实验材料与方法

采用 Zr-Sn-Nb 合金,其名义成分为 Zr-1.0Sn-1.0Nb-0.3Fe-0.11O(质量分数,%)。首先将海绵锆添加中间合金压制备为电极,随后进行 3 次真空自耗电弧熔炼,熔炼后进行锻造,接着实施 β 相均匀化处理与淬火,之后进行热挤压,再经过 5 道次冷轧及每道次轧制后退火处理,最终制备出尺寸为 $\phi 9.5$ mm(外径) $\times 0.57$ mm(壁厚)的成品管材。本实验所用管材均未经矫直,不存在矫直应力。

利用高压气相渗氢装置进行充氢^[18]。将管段置于 2% H_2 +98%Ar(体积分数)的混合气氛中,充氢压力为 0.75 MPa。为精准剥离变量,设计了 3 组对照实验:保持冷却速率(2 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$)和保温温度(400 $^{\circ}\text{C}$)不变,将升温速率分别设为 5、10、15 和 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$;同时设置了改变保温温度(400~600 $^{\circ}\text{C}$)和冷却速率(2~20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$)的辅助对照组,如表 1 所示。使用 LECO H836 型氧氮氢分析仪测量 3 个平行样品的氢含量,氢分析仪的测量误差约为 0.020 0% $\pm$ 0.001 5%。不同升温速率条件下的样品经机械抛光后,使用 10%HF+10% H_2O_2 +80% HNO_3 (体积分数)的溶液进行腐蚀,使

表1 充氢实验热处理参数

Tab.1 Heat treatment parameters of the hydrogenation experiment

Sample	Heating rate /($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)	Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Hold time /h	Cooling rate /($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)
No.1	5	400	2	2
No.2	5	500	2	2
No.3	5	600	2	2
No.4	10	400	2	2
No.5	15	400	2	2
No.6	20	400	2	2
No.7	5	400	2	5
No.8	5	400	2	10
No.9	5	400	2	20

用 Zeiss Axio Imager OM 观察氢化物形貌和分布。氢化物取向因子(F_n^{45})的统计遵循 ASTM-B811-13 标准。使用 5% $HClO_4$ +95% C_2H_5OH (体积分数)的混合溶液对样品电解抛光 30 s,通过 TESCAN MIRA4 SEM 背散射电子(backscattered electron, BSE)、电子背散射衍射(electron backscattering diffraction, EBSD)表征氢化物微观形貌、相结构。

2 实验结果及讨论

2.1 升温速率诱发氢化物再取向

图 1 对比了 9 组样品的氢化物形貌。图 2 统计了保温温度、升温速率、冷却速率对铝合金管材氢含量和氢化物取向因子的影响。结果表明,在 400~600 $^{\circ}\text{C}$ 范围内改变保温温度(图 1a~c),氢化物始终保持周向分布,取向因子稳定在 0.08 左右,仅氢含量略有增加;而在 5~20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 范围内改变冷却速率(图 1g~i),氢化物逐渐细化且分布更均匀,取向因子仅小幅增加至 0.17。然而,当升温速率从 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 提升至 10~20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时(图 1d~f),氢化物形貌呈现剧烈演变,大量氢化物转变为径向分布并相互连接,取向因子大幅增加至 0.50。上述结果有效排除了保温温度和冷却速率的潜在影响,证实升温速率是驱动无应力条件下氢化物再取向的关键因素。同时,鉴于铝合金充氢温度(400 $^{\circ}\text{C}$)低于常规再结晶退火温度^[19-20],充氢过程中基体织构和晶粒尺寸保持稳定,未发生显著演变。

2.2 氢化物宏观形貌演变

为进一步阐明高升温速率诱导再取向的微观机制,本文对比分析了低、高升温速率下管材样品横截面的组织形貌。在 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的常规升温下(图 3a),氢化物析出呈现典型的“无应力”特征:氢化物以细小孤立团簇形态均匀弥散分布于基体中,且以晶内析出为主导(占比约 67.2%)。此时,受基体织构控制,相

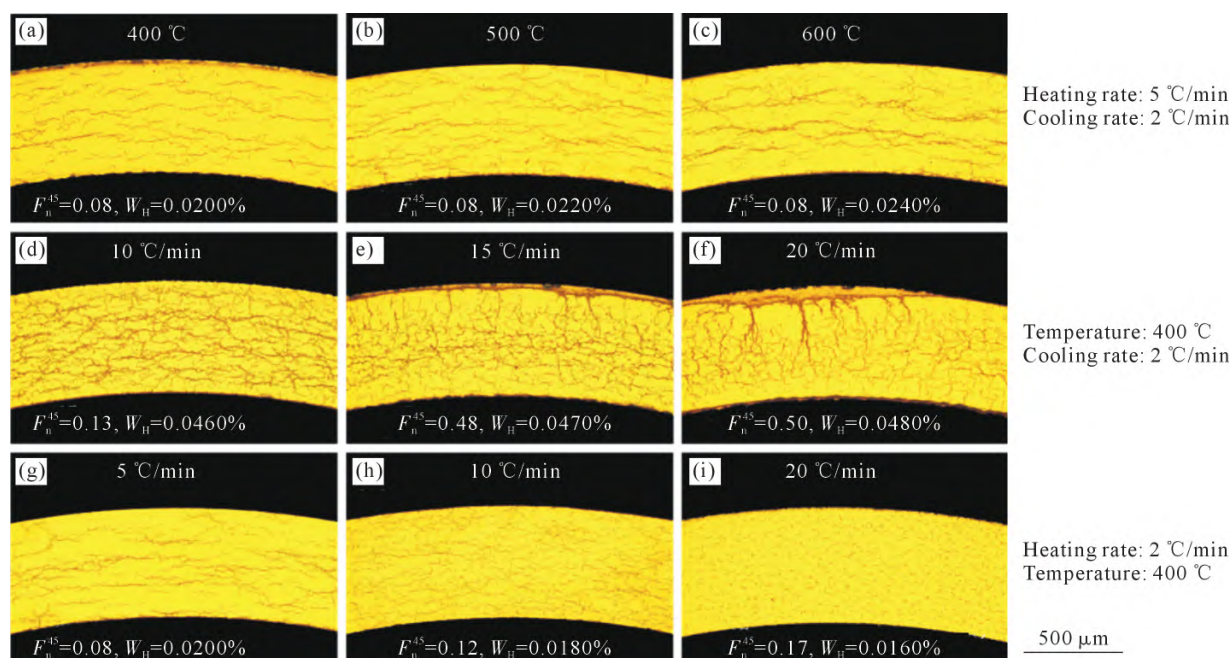


图1 不同充氢条件下锆合金管材中氢化物形貌:(a) No.1; (b) No.2; (c) No.3; (d) No.4; (e) No.5; (f) No.6; (g) No.7; (h) No.8; (i) No.9

Fig.1 Hydride morphologies in zirconium alloy tubes under different hydrogen charging conditions: (a) No.1; (b) No.2; (c) No.3; (d) No.4; (e) No.5; (f) No.6; (g) No.7; (h) No.8; (i) No.9

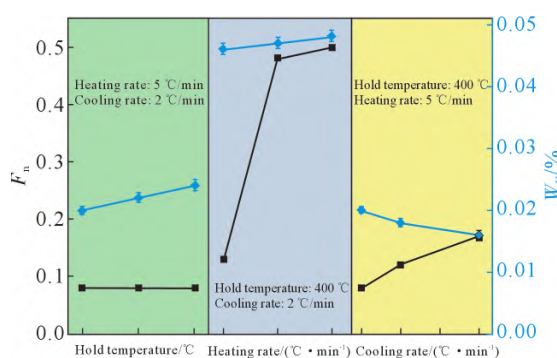


图2 充氢参数对锆合金管材中氢含量和氢化物取向因子的影响

Fig.2 Effect of the hydrogen charging parameters on the hydrogen content and orientation factor of the zirconium alloy tubes

邻晶粒内的氢化物倾向于沿阻力最小路径通过穿晶方式相互连接,整体呈现低风险的周向分布特征,且管壁内外侧形貌未见显著差异。

然而,当升温速率增加至 20 °C/min 时,氢化物的分布发生显著变化,呈现出强烈的“非对称性”与“局部化”特征(图 3b)。管壁内外两侧表现出截然不同的演化行为:靠近内壁区域,氢化物数量急剧减少,连通性显著降低,仅分布有少量细小的孤立团簇;与之形成鲜明对比的是,外壁区域氢化物发生显著的聚集与粗化,大量氢化物片层相互桥接、堆叠,形成了贯穿多个晶粒的大尺寸径向氢化物簇。低倍观察显示,这些高密度径向氢化物团簇在外壁局部区域密集排布,宏观形貌呈现为特征性的“太

阳斑”状。对其中两处典型区域的测量结果表明,其径向尺寸分别达到 340 和 247 μm,约占总壁厚的 1/2。

对析出位置的定量统计分析揭示了另一个关键转变:高升温速率下,氢化物在晶界处的析出倾向显著增强,内壁区域晶界析出比例增加至 52.67%以上。这些大尺寸径向氢化物团簇边缘的片层主要与晶界相切或直接依附于晶界生长。这种析出位置由“晶内主导”向“晶界依附”的转变,主要归因于高升温速率诱导的局部拉应力场在晶界处诱发了应力集中。鉴于氢化物析出伴随显著的体积膨胀,该应力集中显著降低了形核能垒,确立了晶界作为择优形核位点的地位;而晶界作为快速扩散通道的作用,则主要辅助促进了氢原子向这些应力集中区的快速富集。

2.3 升温速率驱动氢化物再取向的微观机制

随着加热速率的提升,锆合金管材中的氢含量从 0.020 0%增至 0.048 0%,显著超出了锆合金的固溶度极限。依据氢化物析出与溶解随温度变化的规律^[21],400 °C 时锆合金的氢溶解固溶度极限(terminal solid solubility for dissolution, TSSD)约为 0.018%。据此推断:对于 No.1 样品(氢含量为 0.020 0%),在升温 and 保温阶段,氢原子可完全固溶于基体中,仅在随后的冷却过程中以氢化物形式析出。相反,对于 No.4、No.5 和 No.6 样品,其氢含量远超 TSSD,故而在加热与保温阶段,仅有约 0.018% 的氢原子处于固溶状态(约占总氢含量的 39%);剩余部分则以氢化物形式存在

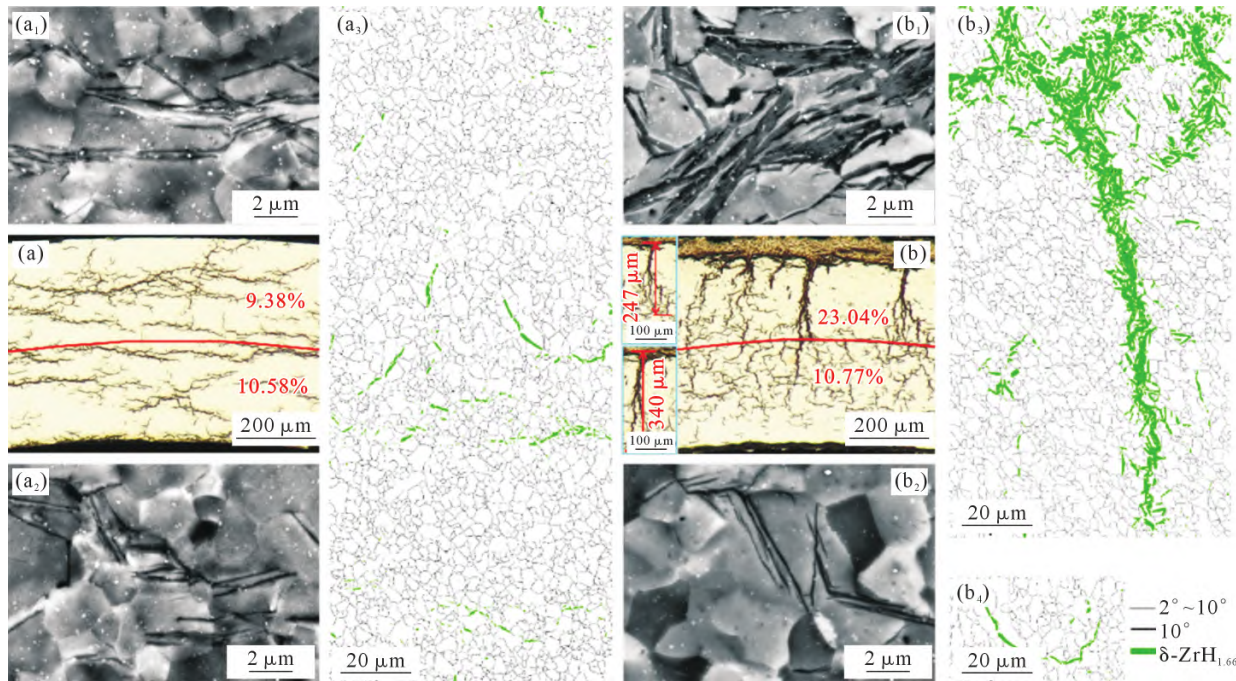


图3 不同升温速率下氢化物分布:(a) 5 °C/min;(b) 20 °C/min;(a₁, b₁) 管外壁侧氢化物簇形貌;(a₂, b₂) 管内壁侧氢化物簇形貌;(a₃) 氢化物与晶界的 EBSD 图;(b₃, b₄) 管外壁侧和内壁侧氢化物与晶界的 EBSD 图

Fig.3 Hydrogen distribution under heating rates: (a) 5 °C/min; (b) 20 °C/min; (a₁, b₁) the morphology of hydrogen clusters on the outer wall of the tube; (a₂, b₂) the morphology of hydrogen clusters on the inner wall of the tube; (a₃) EBSD image of hydrogen and grain boundaries; (b₃, b₄) EBSD images of hydrogen and grain boundaries on the outer and inner walls of the tube

于基体中。鉴于仅有固溶态氢原子在冷却析出过程中具备发生再取向的条件, No.4、No.5 和 No.6 样品中的径向氢化物主要来源于加热过程中过饱和氢诱导的氢化物析出。

在排除外部机械载荷作用的条件下, 管材在快速升温过程中呈现出的“外壁径向/内壁周向”氢化物分布特征^[22], 构成了一个关键的力学诠释问题。鉴于该分布特征与经典环向“外拉内压”应力场作用下的结果高度吻合(图 4), 推测管材内部必然存在一种等效的内生应力场。究其机制, 快速热输入在管壁径向建立了陡峭的温度梯度。这种径向温差导致

内外层自由热膨胀失配, 破坏了管材截面的变形协调性; 为维持几何连续性, 管材截面自发形成特定的应力自平衡状态: 即外壁产生环向拉应力, 内壁承受环向压应力。

进一步分析表明, 该非均匀应力场构成了驱动氢原子迁移的势场。在化学势梯度的驱动下, 氢原子背离压应力区, 向静水拉应力集中的外壁发生上坡扩散。外壁局部的氢富集不仅克服了析出热力学势垒, 且在拉应力诱导下, 氢化物择优以径向析出以最大程度释放弹性应变能; 而内壁因氢原子贫化且受压应力拘束, 仅保留少量的周向分布。

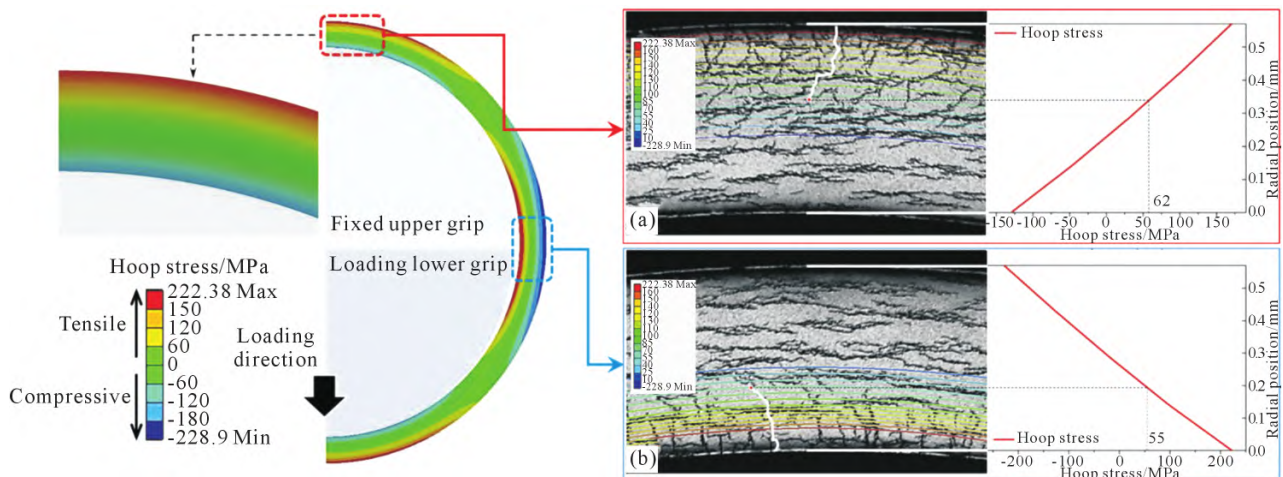


图4 锆合金管材沿管壁的应力分布及氢化物形貌:(a) 12 点方向;(b) 3 点方向^[22]

Fig.4 Stress distribution along the wall of the zirconium alloy tubes and the hydride morphology: (a) 12 o'clock; (b) 3 o'clock^[22]

在反应堆实际运行中,包壳管由内部裂变产热主导,固有形成“内热外冷”的温度梯度。基于变形协调机制,该温度场会在管壁内自发建立起“内壁受压、外壁受拉”的非均匀热应力分布。本研究首次从实验层面确证了具有重要安全启示的微观机制:在无外部机械载荷介入的条件下,仅由非均匀热膨胀引发的瞬态热应力,其量级已足以驱动氢化物发生重分布与取向恶化。依据本研究阐明的“温度梯度→膨胀失协→热应力场→氢上坡扩散与取向演化”机制路径,一旦反应堆出现异常热瞬态(如局部功率激增或冷却条件突变),管壁内部因热惯性产生的陡峭温度梯度将诱发强烈的非均匀热应力场,打破管内氢分布的初始平衡。在“内热外冷”工况下,外壁处于拉应力区,氢受应力梯度驱动向外壁急剧偏聚;尤为关键的是,拉应力场促使氢化物由环向(安全取向)向径向(危险取向)发生不可逆转变。这种径向氢化物作为垂直于管壁面的内生裂纹源,极易在环向拉应力作用下沿径向扩展,显著削弱管壁有效承载面积,导致包壳局部抗拉强度与断裂韧性急剧下降,极大增加了包壳穿透性开裂与脆性失效风险。

这表明,极端热瞬变不仅带来热力学挑战,其诱发的内部热应力场本身即构成了诱发氢致脆化的关键因素。因此,在构建核级锆包壳服役行为预测与安全寿命评估模型时,必须将热应力驱动氢化物径向取向化及其引发的局部脆化机制,作为动态耦合劣化效应纳入关键考量。

3 结论

(1)在无应力加载条件下,当升温速率由 5 °C/min 增加至 10 °C/min 时,氢化物已出现再取向迹象;而在高温升温速率(>15 °C/min)下,氢化物发生显著的周向-径向再取向,并在管材外壁形成“太阳斑”状粗大径向氢化物集群。

(2)快速升温在管壁厚度方向上制造了非均匀温度梯度,导致外壁产生动态环向拉应力梯度。该热应力不仅提供了再取向的力学驱动力,还诱导氢原子向外壁高应力区发生“上坡扩散”并过饱和析出。

参考文献:

- [1] 刘承新. 锆合金在核工业中的应用现状及发展前景[J]. 稀有金属快报, 2004(5): 21-23.
- [2] ZINKLE S J, WAS G S. Materials challenges in nuclear energy[J]. Acta Materialia, 2013, 61(3): 735-758.
- [3] 公维佳, 梁森茂, 张敬翊, 李时磊, 孙勇, 李中奎, 李金山. 冷却速率对锆合金氢化物析出的影响[J]. 金属学报, 2024, 60(9): 1155-1164.

- GONG W J, LIANG S M, ZHANG J Y, LI S L, LI Z K, LI J S. Effect of cooling rate on hydride precipitation in zirconium alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2024, 60(9): 1155-1164.
- [4] LARCOIX E, MOTTA A T, ALMER J D. Experimental determination of zirconium hydride precipitation and dissolution in zirconium alloy[J]. Journal of Nuclear Materials, 2018, 509: 162-167.
- [5] 白伟, 王文科, 王智辉, 闫国庆, 张建东, 王力军. 氢含量对氢化锆相结构和残余应力的影响[J]. 稀有金属, 2024, 48(1): 138-144.
- BAI W, WANG W K, WANG Z H, YAN G Q, ZHANG J D, WANG L J. Phase structure and residual stress of zirconium hydride with different hydrogen contents[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2024, 48(1): 138-144.
- [6] 郭晓明, 尹泓卜, 胡述伟, 邱玺, 蒲曾坪, 肖忠. 锆合金中氢化物析出对包壳力学性能的影响研究[J]. 科技视界, 2024, 14(12): 37-43.
- [7] 陈乐, 许江涛, 王朋飞, 李顺平, 戴训, 刘肖. 氢含量对锆合金蠕变-疲劳行为的影响及机理研究[J]. 有色金属工程, 2024, 14(4): 43-50.
- CHEN L, XU J T, WANG P F, LI S P, DAI X, LIU X. Study on the effect and mechanism of hydrogen content on the creep fatigue behavior of zirconium alloy [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(4): 43-50.
- [8] 刘潇雅, 马雁, 张智鑫. 氢化物对锆拉伸性能影响的分子动力学研究[J]. 核技术, 2025, 48(5): 218-224.
- LIU X Y, MA Y, ZHANG Z X. Molecular dynamics study of the influence of hydrides on the tensile properties of zirconium[J]. Nuclear Techniques, 2025, 48(5): 218-224.
- [9] 曾文, 栾佰峰, 刘娜. 锆合金中的氢化物相及氢化物取向[J]. 材料工程, 2018, 46(6): 11-18.
- ZENG W, LUAN B F, LIU N. Hydride phases and hydride orientation in zirconium alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(6): 11-18.
- [10] LIN X H, BEYERLEIN I J, HAN W Z. Annealing cracking in Zr and a Zr-alloy with low hydrogen concentration[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 182: 165-175.
- [11] HONG X Y, MA F Q, ZHANG J Y, DU D H, TIAN H, XU Q, ZHOU J, GONG W J. Effect of hydride orientation on tensile properties and crack formation in zirconium alloy cladding tubes[J]. Journal of Nuclear Materials, 2024, 596: 155120.
- [12] 徐春容, 赵文金, 邓治国, 徐蒋明. 锆合金包壳管氢化物应力再取向研究概述[J]. 热加工工艺, 2016, 45(12): 19-22, 27.
- XU C R, ZHAO W J, DENG Z G, XU J M. Review of research on stress reorientation of hydrides in zirconium alloy cladding tube[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(12): 19-22, 27.
- [13] 周邦新, 蒋有荣. Zr-4 管中氢化物分布的应力再取向研究[J]. 核动力工程, 1992, 13(5): 66-69.
- ZHOU B X, JIANG Y R. A study of the stress reorientation of hydride in Zircaloy-4 tube[J]. Nuclear Power Engineering, 1992, 13(5): 66-69.
- [14] 张伟, 王旭峰, 杨锋, 张海芹, 雷江, 焦康. 矫直工艺对 Zr-Sn-Nb 系合金管材氢化物取向的影响[J]. 钛工业进展, 2019, 36(6): 42-46.
- ZHANG W, WANG X F, YANG F, ZHANG H Q, LEI J, JIAO K. Effect of straightening process on hydride orientation of Zr-Sn-Nb

- alloy tube[J]. Titanium Industry Progress, 2019, 36(6): 42-46.
- [15] 佟昕昕,王强,袁改焕,储林华,张天广,麻凯. 径向压扁变形对 Zr-4 合金管材氢化物取向的影响[J]. 钛工业进展, 2018, 35(4): 44-47.
- TONG X X, WANG Q, YUAN G H, CHU L H, ZHANG T G, MA K. Influence of radial flattening on hydride orientation of Zr-4 alloy tube[J]. Titanium Industry Progress, 2018, 35(4): 44-47.
- [16] 成亚辉,孙阳平,翟建宇. 冷变形工艺对锆合金包壳管氢化物取向的影响[J]. 金属功能材料, 2015, 22(3): 53-56.
- CHENG Y H, SUN Y P, ZHAI J Y. Effect of cold pilgering reduction on hydride orientation of zirconium alloy cladding tube [J]. Metallic Functional Materials, 2015, 22(3): 53-56.
- [17] 谢梦,徐春容,陈善华,陈乐,戴训. 环向应力及热循环对 N36 管材氢化物应力再取向的影响研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(8): 90-93, 96.
- XIE M, XU C R, CHEN S H, CHEN L, DAI X. Effect of hoop stress and thermal cycling on hydride reorientation of N36 alloy cladding[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(8): 90-93, 96.
- [18] 惠泊宁,梁伟,周军,刘海明,文惠民,李帆,尚筱迪,卫强,刘蛟,杨耀虎. 一种核用锆合金材料高压气相渗氢装置与方法: CN202210587863.8[P]. 2024-02-23.
- HUI B N, LIANG W, ZHOU J, LIU H M, WEN H M, LI F, SHANG X D, WEI Q, LIU J, YANG Y H. A high-pressure gas-phase hydrogen permeation apparatus and method for a nuclear-grade zirconium alloy material: CN202210587863.8[P]. 2024-02-23.
- [19] 贾玉振,邱军,程竹青,杨忠波. 最终退火温度对 N36 合金管材微观结构和性能的影响[J]. 核动力工程, 2023, 44(S1): 163-167.
- JIA Y Z, QIU J, CHENG Z Q, YANG Z B. Effect of final annealing temperature on microstructure and properties of N36 alloy tube [J]. Nuclear Power Engineering, 2023, 44(S1): 163-167.
- [20] 潘钱付,蒋明忠,戴训,王贯春,黄照华,赵文金. 退火方式对 N36 锆合金包壳管性能的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(12): 135-138.
- PAN Q F, JIANG M Z, DAI X, WANG G C, HUANG Z H, ZHAO W J. Influence of annealing processes on properties of N36 zirconium alloy cladding tube[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(12): 135-138.
- [21] MOTTA A T, CAPOLUNGO L, CHEN L Q, CINBIZ M N, DAYMOND M R, KOSS D A, LACROIX E, PASTORE G, SIMON P C A, TONKS M R, WIRTH B D, ZIKRY M A. Hydrogen in zirconium alloys: A review [J]. Journal of Nuclear Materials, 2019, 518: 440-460.
- [22] LEE J M, KIM H A, KOOK D H, KIM Y S. A study on the effects of hydrogen content and peak temperature on threshold stress for hydride reorientation in Zircaloy-4 cladding[J]. Journal of Nuclear Materials, 2018, 509: 285-294.

(责任编辑:杨浩雪)