

挤压与拉拔

Zr-2.5Nb 合金反挤压扩孔工艺

曹康琪^{1,2}, 崔春娟¹, 李科元², 李新意², 周 宣², 张建军²

(1. 西安建筑科技大学 冶金工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安西部新铝科技股份有限公司, 陕西 西安 710299)

摘要: 为解决 Zr-2.5Nb 合金挤压锭坯制备材料利用率较低的问题, 通过 Deform-2D 有限元软件模拟分析了不同反挤压温度和反挤压速度对反挤压扩孔过程中的金属流动、温度场和反挤压力的影响。模拟结果表明: 当反挤压速度为 $15\sim 25\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 扩孔时锭坯的温度场较为均匀, 随着反挤压速度的增大, 锭坯温度场对应的温度值逐渐升高, 金属流动性更好; 当反挤压温度为 $810\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、反挤压速度为 $25\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 锭坯温度场的整体温差最小, 随着反挤压速度的增大, 反挤压力基本维持稳定。基于模拟结果, 采用反挤压温度为 $780\sim 810\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、反挤压速度为 $10\sim 80\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 进行试验。结果表明: 当反挤压温度分别为 780 和 $810\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、反挤压速度为 $60\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 不同反挤压温度对金属扩余重量无显著影响; 在反挤压温度不变的情况下, 随着反挤压速度的增加, 金属扩余重量减少并逐步趋于稳定, 当反挤压速度达到 $40\sim 60\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 反挤压扩孔时产生的金属扩余重量较轻, 材料利用率明显提高; 当采用反挤压温度为 $780\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、反挤压速度为 $60\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的工艺参数时, 所制备的管材的组织均匀性及力学性能均略有提升。

关键词: Zr-2.5Nb 合金; 反挤压扩孔; 反挤压温度; 反挤压速度; 反挤压力

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.08.011

中图分类号: TG379

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 08-0073-07

Backward extrusion reaming process of Zr-2.5Nb alloy

Cao Kangqi^{1,2}, Cui Chunjuan¹, Li Keyuan², Li Xinyi², Zhou Xuan², Zhang Jianjun²

(1. College of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

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

Abstract: In order to solve the problem of low material utilization rate in the preparation of Zr-2.5Nb alloy extrusion billet, the influences of different backward extrusion temperature and backward extrusion speed on metal flow, temperature field and backward extrusion force in the process of backward extrusion reaming were simulated and analyzed by finite element software Deform-2D, and the simulation results show that when the backward extrusion speed is $15\sim 25\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, the temperature field of billet during reaming is relatively uniform. Then, with the increasing of backward extrusion speed, the temperature value corresponding to the temperature field of billet gradually increases, and the metal fluidity become better. Furthermore, when the backward extrusion temperature is $810\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the backward extrusion speed is $25\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, the overall temperature difference of the billet temperature field is the smallest, and with the increasing of backward extrusion speed, the backward extrusion force basically remains stable. Finally, according to the simulation results, the extrusion test was carried out under the conditions of the backward extrusion temperature of $780\sim 810\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the backward extrusion speed of $10\sim 80\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. The results show that when the backward extrusion temperature is 780 and $810\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively, and the backward extrusion speed is $60\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, different backward extrusion temperatures have no significant effect on the metal expansion weight. Under the constant backward extrusion temperature, with the increasing of backward extrusion speed, the weight of metal oddments decreases and gradually tends to be stable. When the backward extrusion speed reaches $40\sim 60\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, the weight of metal oddments generated during the backward extrusion reaming is lighter, and the material utilization rate is significantly improved. However, when the backward extrusion temperature is $780\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the backward extrusion speed is $60\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, the micro-structure uniformity and mechanical properties of the prepared pipe are slightly improved.

Key words: Zr-2.5Nb alloy; backward extrusion reaming; backward extrusion temperature; backward extrusion speed; backward extrusion force

Zr-2.5Nb 合金具有较低的热中子吸收截面、抗

蠕变能力以及良好的堆内耐腐蚀性, 是一种重要的核级用锆合金, 其管材主要用于俄罗斯 RBMK、加拿大 CANDU6 重水堆^[1]等堆型中的压力管, 与压水堆中的反应堆压力容器的效果基本类似, 是确保核反应堆安全运行的保护屏障之一。我国秦山第三核电厂 CANDU6 重水堆机组均采用 Zr-2.5Nb 合金作为压力管材料, 每台机组包含 380 根压力管^[1-3]。目前秦山核电厂压力管材均依赖于进口, 由于近年来受国际关系及

收稿日期: 2024-04-19; 修订日期: 2024-07-09

基金项目: 中核集团“青年英才”计划 (CNNC2019QNYC-039);

陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目 (2022-KXJ-145)

作者简介: 曹康琪 (1989-), 男, 学士, 工程师

E-mail: ckqsnz462@126.com

通信作者: 崔春娟 (1972-), 女, 博士, 教授

E-mail: cuichunjuan@xauat.edu.cn

贸易壁垒的影响，Zr-2.5Nb 合金管材的进口愈发困难，国产化替代的需求迫在眉睫。因此，掌握该合金的加工工艺及制造流程具有重要的战略意义。

与正挤压相比，在反挤压过程中，金属温度场分布较均匀^[4]，挤压锭坯沿长度、截面上的组织更均匀、性能更稳定。当变形温度、反挤压速度适合时，反挤压扩孔锭坯的组织将优于原锻造锭坯组织^[5]。金属材料在反挤压时，材料与挤压筒间无相对运动，不产生摩擦热，反挤压后金属长度方向上的温差较小^[6]。Saibaba N 等^[7]就不同工艺路线对 Zr-2.5Nb 合金的组织与性能的影响进行了研究，将反扩孔挤压与皮尔格冷轧工艺对比发现，反挤压扩孔制备的管材头尾的组织及织构取向更加均匀。Nicolas Christodoulou^[8]研究了 Zr-2.5Nb 合金压力管加工工艺与辐照性能的关系，采用热挤压+20%冷加工工艺得到的压力管的抗辐照生长的性能更优。Saxena K K 等^[9]使用 Zr-2.5Nb 合金在 700~925 ℃ 之间进行了热压缩试验，田锋等^[10]对 750~850 ℃ 的高温流变行为进行了研究，确定了合理的热加工区间，对于选取热模拟参数提供了理论依据。本文拟对压力管用锻造态坯料 Zr-2.5Nb 合金反挤压扩孔过程进行 Deform 数值模拟，将模拟所获得的温度场

进行分析，根据分析结果和生产经验选取试验参数，旨在探索出最佳的反挤压热扩孔工艺参数。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料、工装、设备

本文采用 Zr-2.5Nb 合金锻造态锭坯，主要化学成分如表 1 所示，反挤压扩孔设计锭坯规格为 $\Phi 218\text{ mm}$ （外径） $\times \Phi 47\text{ mm}$ （内径） $\times 430\text{ mm}$ 。查阅相文献 [11]~文献 [13]，设计了与 40 MN 卧式挤压机相匹配的反挤压热扩孔模具，其中挤压筒尺寸为 $\Phi 220\text{ mm}$ ，扩孔针尺寸为 $\Phi 117\text{ mm}$ ，扩孔头尺寸为 $\Phi 46\text{ mm}$ ，扩孔用堵板尺寸为 $\Phi 200\text{ mm}$ （外径） $\times \Phi 47\text{ mm}$ （内径） $\times 15\text{ mm}$ ，如图 1 所示，其中， L_0 为锭坯原始长度， L 为反挤压锭坯延长时增加的长度， L_s 为反挤压完成后的锭坯长度。通过扩孔头前端的导向进入锭坯内孔，利用堵板防止扩

表 1 Zr-2.5Nb 合金的化学成分（%，质量分数）
Table 1 Chemical compositions of Zr-2.5Nb alloy
（%， mass fraction）

Nb	O	Zr
2.5~2.8	0.09~0.13	余量

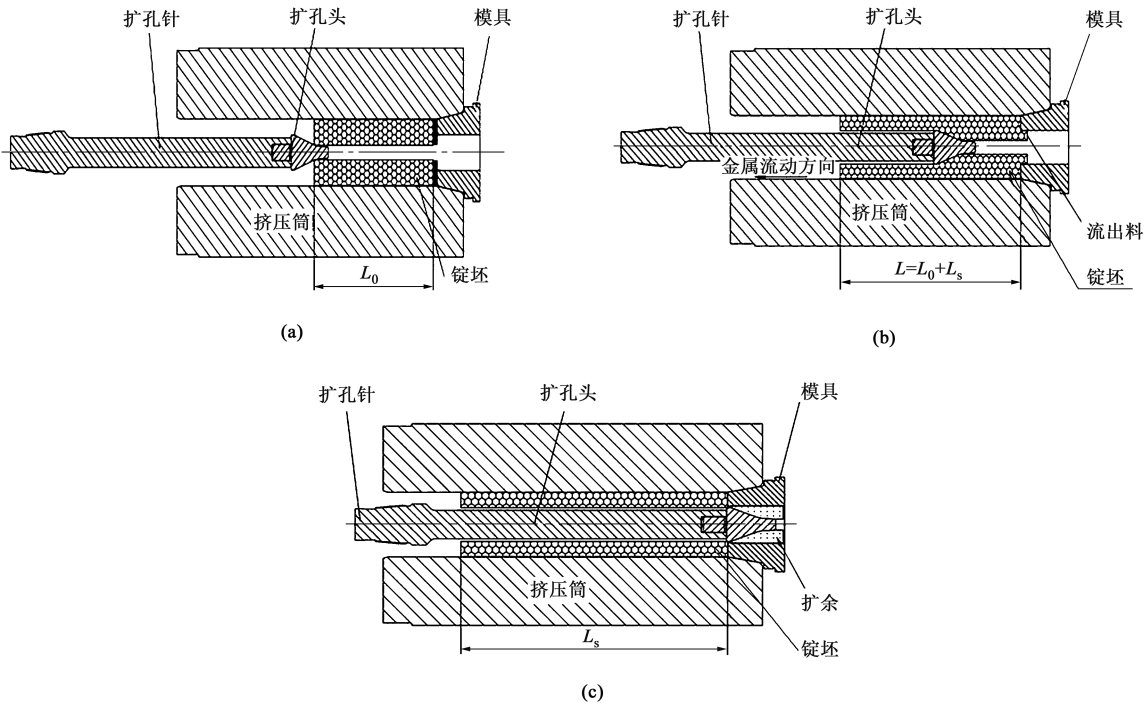


图 1 反挤压扩孔示意图

(a) 反挤压扩孔前 (b) 反挤压扩孔中 (c) 反挤压扩孔结束

Fig. 1 Schematic diagrams of backward extrusion reaming

(a) Before backward extrusion reaming (b) During backward extrusion reaming (c) End of backward extrusion reaming

孔时金属向前流出，扩孔头锥面与锭坯内孔接触并挤压，形成反扩孔作用力（图 1a），随着扩孔针向挤压模侧移动，实现金属锭坯反流（图 1b），在扩孔即将结束时，利用扩孔头锥面与模具定径带的尺寸差形成剪切力，冲断堵板及扩余（图 1c），从而实现整个反挤压扩孔过程。其中，挤压用模具的材质均为 H13 合金钢（4Cr5MoSiV1），堵板用材质为 45 钢。

1.2 研究方法

先进行 Deform 有限元分析，按照图 1 所示的反挤压扩孔模型，绘制相应的挤压筒、模具、锭坯、反挤压扩孔头、反挤压扩孔针尺寸，为模拟做准备，以确保模拟与实际挤压过程尽可能地接近。实际生产中的扩孔过程为：锭坯润滑→锭坯加热→锭坯传输→锭坯扩孔→锭坯冷却，反挤压扩孔模拟边界条件参数和工艺参数^[14]如表 2 所示。

采用热传导反问题法^[15]，结合实际生产中反挤压扩孔力峰值，按照换热系数计算方法^[16-17]，得到坯料与空气的热交换系数为 $10.8 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ ，此处考虑不同气温条件带来的变化，参数取整为 11，挤压过程的反挤压力 P 可以采用式（1）进行计算。

$$P = 1.5R_{\text{el}}(\ln\lambda + \mu \frac{4L_0}{D_1 - d_z}) \tag{1}$$

式中： R_{el} 为 Zr-2.5Nb 合金在 820 ℃ 下的屈服强度，取为 34.3 MPa^[18]； λ 为挤压比； μ 为摩擦因数，结合液态润滑剂的实际使用工况^[16]，取摩擦因数为 0.08； D_1 、 d_z 分别为挤压筒、扩孔头的直径。

由式（1）求得反挤压力为 5.56 MN，这与设备的实际加工能力接近，说明模拟参数的选取合理、

表 2 反挤压扩孔工艺模拟参数

Table 2 Simulation parameters of backward extrusion reaming process

参数	数值
网格类型	圆形
工件网格数	40000
每步间隔	20
工件锭坯材料	Zr-2.5Nb 合金
坯料与空气之间的热传递系数/ ($\text{N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)	11
坯料与工模具之间的摩擦因数	0.08
模具（反挤压扩孔针、反挤压扩孔头、挤压筒、挤压模）	刚体
反挤压温度/ $^\circ\text{C}$	750、780、810、840
保温时间/min	90
反挤压速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	5、10、15、20、25
模具（反挤压扩孔针、反挤压扩孔头、挤压模）预热温度/ $^\circ\text{C}$	350
挤压筒直径/mm	$\Phi 220$
管坯外径/mm	$\Phi 220$
管坯内径/mm	$\Phi 117$

可行。Deform 有限元模拟仿真方案按照反挤压温度为 750、780、810 和 840 ℃ 4 种条件设置^[19]，反挤压速度按照 5~25 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ （每增加 5 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 为一组，共 5 组）^[20]进行设计。

2 结果分析与讨论

2.1 Deform 有限元分析温度场

锭坯反挤压扩孔后，温度场与应变场云图呈对称分布，截面取点方式及数量如图 2 所示，提取数

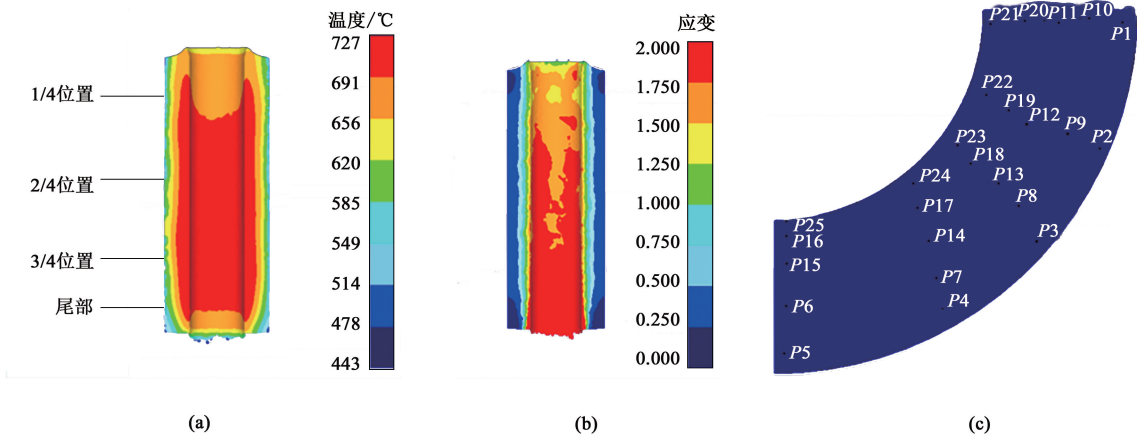


图 2 温度场云图（a）、应变场云图（b）和锭坯取点展开示意图（c）

Fig. 2 Temperature field nephogram (a), strain field nephogram (b) and unfolded diagram of point selection on billet (c)

据, 得到该截面的平均温度与平均应变。

图 3 为 Zr-2.5Nb 合金锭坯反挤压扩孔后的温度场变化趋势, 图 3 中 1/4 位置、2/4 位置、3/4 位置和尾部位置温度分别对应热扩孔锭坯的横截面 25 个点的温度场平均值。由图 3a~图 3d 可以看到, 随着反挤压速度的增大, 反挤压扩孔后锭坯温度场对应的温度值逐渐升高, 这是由于反挤压速度增大使得金属内部产生的变形热来不及扩散, 导致各个截面的温度场温度升高^[21]; 当反挤压温度为 750、810 和 840 ℃ 时, 锭坯不同位置的温度场, 呈现出从尾部至头部整体呈现先增大再逐步减小的规律。尾部温度场值较低是由于反挤压扩孔头刚进入锭坯中不久, 反挤压扩孔针与锭坯间的接触面积较小, 产生的摩擦热较低; 而

3/4 位置处的温度场值最高是由于此时反挤压扩孔头、反挤压扩孔针与锭坯间的摩擦热累积较大; 随着反挤压扩孔头、反挤压扩孔针逐渐向前运动, 头部和 2/4 位置的温度场值降低是由于前端锭坯与挤压模接触, 导致传导损失一定热量, 使得其温度场数值降低。

图 3b 和图 3c 也表明, 反挤压温度和反挤压速度对锭坯温度场的稳定性有一定影响。当反挤压温度为 780 ℃、反挤压速度为 15~25 mm·s⁻¹ 时, 锭坯从头部至尾部的温度场出现了波动, 相比图 3a、图 3d 的反挤压温度和反挤压速度在一定范围内趋于稳定。当反挤压温度为 810 ℃、反挤压速度为 25 mm·s⁻¹ 时, 锭坯整体温度场的温差最小。

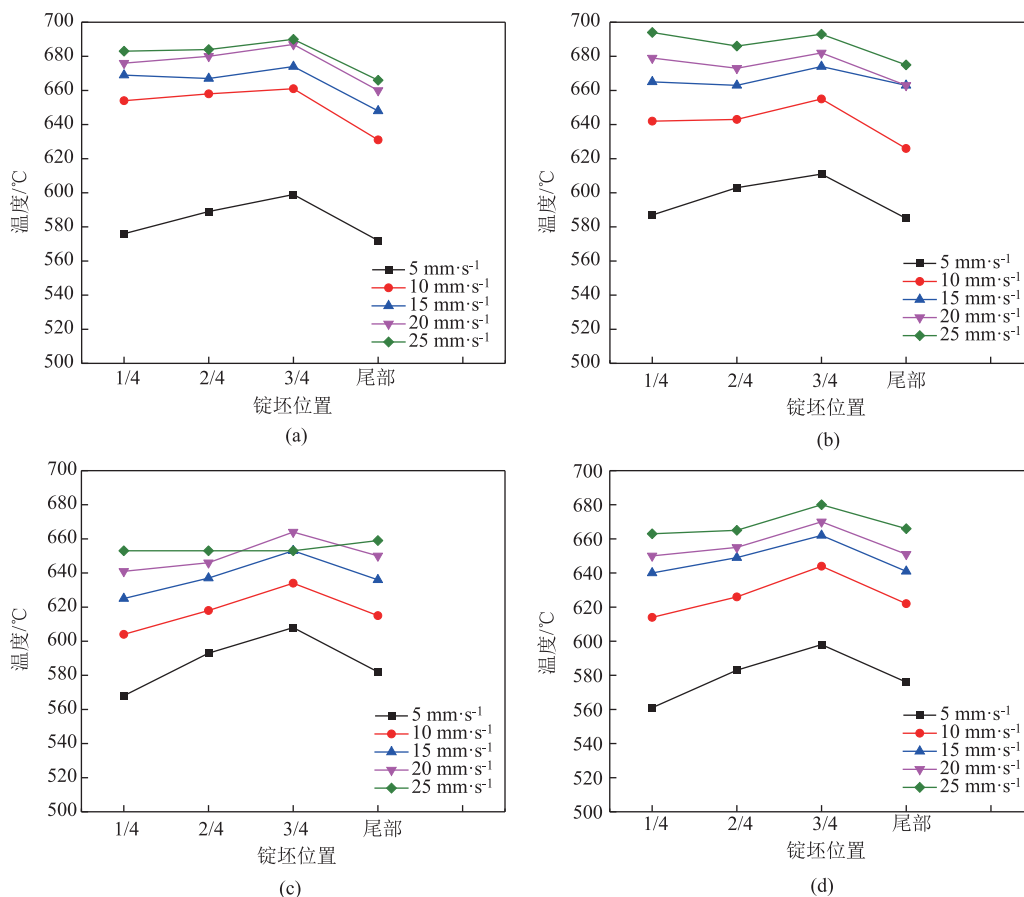


图 3 不同反挤压温度下锭坯不同位置的温度场变化趋势

(a) 750 ℃ (b) 780 ℃ (c) 810 ℃ (d) 840 ℃

Fig. 3 Changing trend of temperature field at different positions of billet under different backward extrusion temperatures

2.2 反挤压扩孔试验

基于 Deform 模拟结果显示, 反挤压温度定为 780 和 810 ℃, 结合实际生产效率, 将反挤压速度定为 10、40、60 和 80 mm·s⁻¹, 挤压锭内外表面使用 60 目石榴石喷砂处理, 使其形成均匀灰色磨砂

效果, 以提高润滑剂的粘附力, 使用石墨粉、二硫化钼、玻璃水等自制混合液态润滑剂^[16], 对挤压锭进行润滑。挤压锭、液态润滑剂均采用水浴加热方式进行预热, 设定水温温度为 65 ℃, 将液态润滑剂进行充分搅拌后, 使用喷壶对预热后的挤压锭喷涂

处理,利用锭坯余热烫干润滑剂,自然晾干 2 h 后挤压。使用立式高频感应炉加热锭坯,加热前预热底部磁场延长器温度至 450~500 ℃,以保证其升温及保温时的温度均匀性,达到设定试验温度(780 和 810 ℃)后再保温 5 min 进行挤压。按照图 1 所示模具设计尺寸进行反挤压扩孔试验,挤压模具、挤压筒预热温度要求见表 2。

2.2.1 反挤压速度对扩孔扩余重量的影响



(a)



(b)

图 4 反挤压扩孔后的锭坯 (a) 及扩余 (b)

Fig. 4 Billet (a) and oddments (b) after backward extrusion reaming

图 5 为反挤压速度为 10~80 mm·s⁻¹ 时反挤压热扩孔的扩余重量变化趋势图,扩孔挤压扩余形状基本一致。随着反挤压速度的增加,扩余重量逐渐减小且趋于稳定。这是由于:反挤压速度的增加导致反挤压扩孔头、扩孔针与锭坯内孔间的变形热增加,温度的升高使得变形抗力减小,使金属更易沿着扩孔头反向流动,使扩余重量逐渐减小;随着反挤压速度的逐渐增加,增加的变形热与锭坯本身的加热温度差值逐渐减小,金属的变形抗力已基本保持不变,从而导致扩余重量趋于稳定。

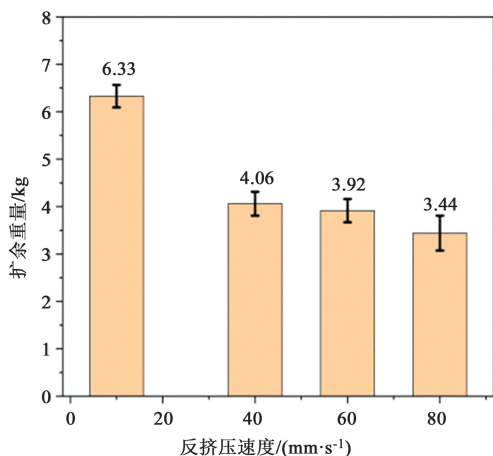


图 5 反挤压速度与扩余重量之间的关系

Fig. 5 Relationship between backward extrusion speed and oddment weight

采取反挤压温度为 780 ℃,以不同反挤压速度(10、40、60 和 80 mm·s⁻¹) 分别进行反挤压扩孔试验,根据挤压机操作界面显示,反挤压力在 6.5~7.2 MN 之间,说明不同反挤压速度基本对反挤压力无较大影响,扩孔锭坯内外表面均无明显挤压缺陷,质量良好。反挤压锭坯与扩孔扩余的实物图如图 4 所示,说明在相同的反挤压温度下,不同反挤压速度对锭坯内外表面质量、反挤压力的影响不显著。

2.2.2 反挤压温度对扩余重量的影响

分别采用不同反挤压温度,以相同的反挤压速度(60 mm·s⁻¹) 进行反挤压扩孔,扩余重量与反挤压温度之间的关系如图 6 所示。当反挤压温度为 780 和 810 ℃时,扩余重量分别为 3.92 和 3.94 kg,反挤压力分别为 6.8 和 6.2 MN。可见,反挤压力也与反挤压温度成一定趋势的反比例关系,不同反挤压温度下的扩余重量基本一致,这是由于:当锆合金锭坯的反挤压温度达到一定值时,反挤压扩孔头、反挤压扩孔针与坯料间的摩擦条件趋于稳定,导致摩擦变

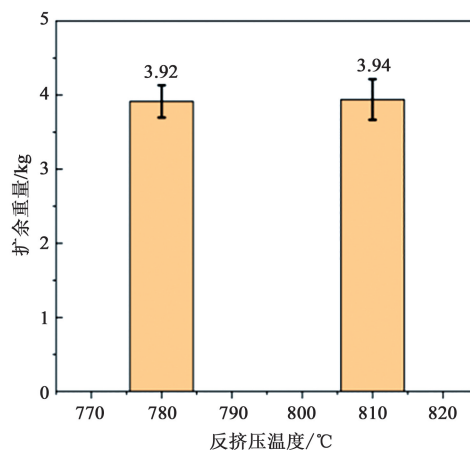


图 6 反挤压温度与扩余重量之间的关系

Fig. 6 Relationship between backward extrusion temperature and oddment weight

形热基本达到稳定值，此时的金属流动性区别不大。

2.2.3 反挤压扩孔对管材组织与力学性能的影响

为验证反挤压扩孔对管材组织及力学性能的影响，设计锭坯尺寸为 $\Phi 218\text{ mm}$ （外径） $\times \Phi 119\text{ mm}$ （内径） $\times 430\text{ mm}$ ，反挤压温度为 $780\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，反挤压速度为 $60\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，按照表 2 要求预热挤压工模具，一次正向挤压管材尺寸为 $\Phi 125\text{ mm}$ （外径） $\times \Phi 117\text{ mm}$ （内径） $\times L$ ，在对应挤压管材头部 200 mm 位置取样，进行组织、室温拉伸检验。采用 $\text{HF}:\text{H}_2\text{SO}_4:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}$ 的体积分数比为 $1:3:3:3$ 配置腐蚀液，使用 Olympus GX71 金相显微镜观察管材纵截面的显微组织，按照 GB/T 228.1—2021^[22] 中管材标准

试样的加工要求，使用 $\Phi 3\text{ mm}$ 标准棒状试样进行室温拉伸，设备选用日本进口 AG-XPlus 室温拉伸试验机。

采用一次正向挤压管材时，在沿金属挤压管材流动方向，出现了较为明显的流线组织及未完全破碎的大晶粒组织，如图 7a 和 7b 所示。使用相同的加热及挤压参数，反挤压扩孔后再进行管材正向挤压，获得的管材组织得到明显改善，如图 7c 和 7d 所示。沿纵向对两种工艺管材取样，进行室温拉伸检验，结果见表 3。反挤压扩孔挤压管材的强度、塑性均略优于一次正向挤压，这也与管材经过两次加热及挤压，其发生了两次回复与动态再结晶、管材的再结晶程度高有对应关系。

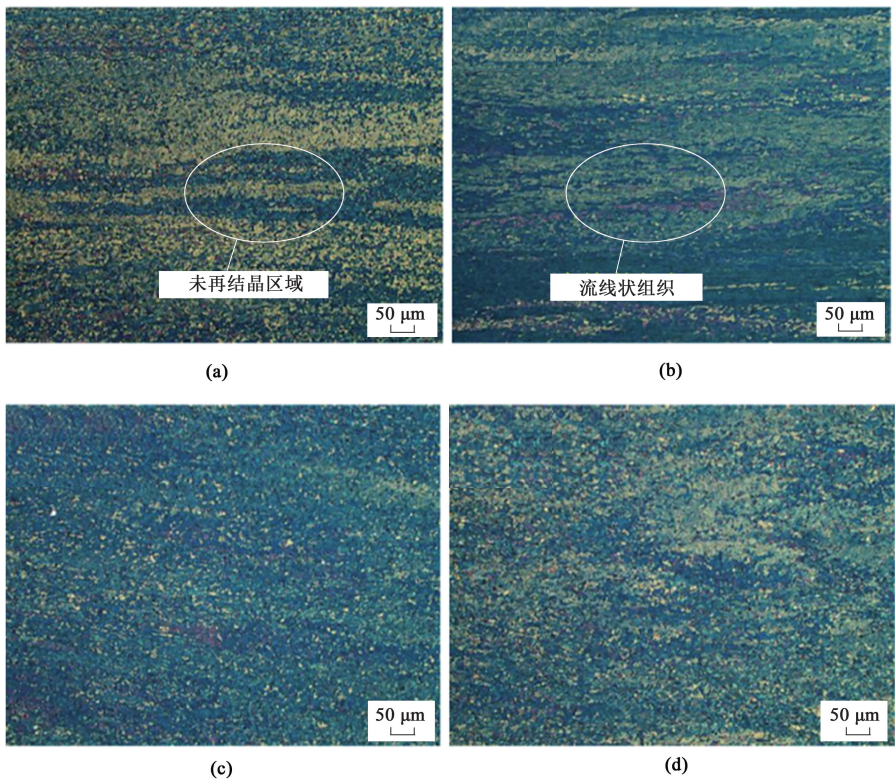


图 7 正挤压管材纵截面微观组织

(a) 一次正向挤压，管材头部 (b) 一次正向挤压，管材尾部 (c) 反挤压扩孔后正向挤压，管材头部
(d) 反挤压扩孔后正向挤压，管材尾部

Fig. 7 Microstructures of longitudinal section for forward extrusion pipe

(a) One-time forward extrusion, tube head (b) One-time forward extrusion, tube tail (c) Forward extrusion after backward extrusion reaming, tube head (d) Forward extrusion after backward extrusion reaming, tube tail

表 3 两种工艺下管材强度及塑性对比

Table 3 Comparison of strength and plasticity between pipes under two processes

工艺	抗拉强度	屈服强度	伸长率 $A/\%$
	R_m/MPa	R_{eL}/MPa	
一次正向挤压	654	439	18.5
反挤压扩孔+正向挤压	684	478	21.5

3 结论

(1) 当反挤压温度为 $780\sim 810\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、反挤压速度为 $15\sim 25\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，反挤压热扩孔锭坯的温度场较为均匀，可以为实际生产提供理论支撑。

(2) 反挤压温度对扩余重量无显著影响，随着反扩孔挤压速度的增加，扩余重量逐渐减小，当反挤压

速度达到 $40 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 扩余重量基本不发生变化。

(3) 反挤压温度为 $780 \sim 810 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、反挤压速度为 $40 \sim 60 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 扩孔挤压产生的扩余重量较轻, 金属损失小, 材料利用率最高。

(4) 当反挤压温度为 $780 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、反挤压速度 $60 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 采用反挤压扩孔工艺, 并再次采用正向挤压管材, 其头、尾部组织均匀, 几乎不存在沿纵向的未破碎的晶粒, 强度及塑性较一次正向挤压管材均略有提升。

参考文献:

- [1] 秋穗正, Norman C. Johnston. 秦山三期 CANDU 核电厂堆芯结构 [J]. 核动力工程, 1999 (6): 490-495.
Qiu S Z, Norman C. Johnston. Reactor core structure of qinshan phase III CANDU nuclear power plant [J]. Nuclear Power Engineering, 1999 (6): 490-495.
- [2] Cheadle B A, Coleman C E, Licht H. CANDU-PHW pressure tubes: Their manufacture, inspection, and properties [J]. Nuclear Technology, 1982, 57 (3): 413-425.
- [3] 郭丽娜, 韩华, 卞伟, 等. Zr-2.5Nb 合金压力管材料微观组织研究 [J]. 核动力工程, 2017, 38 (S1): 89-93.
Guo L N, Han H, Bian W, et al. Study on microstructure of Zr-2.5Nb pressure tube material [J]. Nuclear Power Engineering, 2017, 38 (S1): 89-93.
- [4] 周默. U 型铜材连续挤压等距扩展成型工艺基础研究 [D]. 大连: 大连交通大学, 2023.
Zhou M. Basic Research on Equidistant Expansion Forming Process of Continuous Extrusion of U-shape Strip [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2023.
- [5] 谢建新, 刘静安. 金属挤压理论与技术 [M]. 第 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
Xie J X, Liu J A. Metal Extrusion Theory and Technology [M]. 2nd Edition. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
- [6] 陈文泗. 铝合金反向挤压的特点及我国发展前景 [J]. 铝加工, 2016 (2): 42-44.
Chen W S. Backward extrusion characteristics for aluminum alloy and development prospect in China [J]. Aluminium Fabrication, 2016 (2): 42-44.
- [7] Saibaba N, Vaibhaw K, Neogy S, et al. Study of microstructure texture and mechanical properties of Zr-2.5Nb alloy pressure tubes fabricated with different processing routes [J]. Journal of Nuclear Materials, 2013, 440 (1-3): 319-331.
- [8] Nicolas Christodoulou. Zr-2.5Nb pressure tubes in CANDU reactors [J]. Pressurized Heavy Water Reactors, 2022 (7): 69-133.
- [9] Saxena K K, Sonkar S, Kumar R, et al. Effect of temperature and strain rate on deformation behavior of zirconium alloy: Zr-2.5Nb-0.5Cu [J]. Procedia Materials Science, 2014 (6): 188-193.
- [10] 田锋, 李帅, 周宣, 等. Zr-2.5Nb 合金高温流变行为及热加工图研究 [J]. 有色金属加工, 2024, 53 (1): 46-51.
Tian F, Li S, Zhou X, et al. Study on rheological behavior and hot working diagram of Zr-2.5Nb alloy at high temperature [J]. Nonferrous Metals Processing, 2024, 53 (1): 46-51.
- [11] 苏承龙, 李利盛, 黄新琼, 等. 一种热挤压坯料扩孔工艺 [P]. 中国: CN110976544A, 2020-04-10.
Su C L, Li L S, Huang X Q, et al. A processing of hot expand extrusion billet [P]. China: CN110976544A, 2020-04-10.
- [12] 李志勇, 拓雷锋, 张文魁, 等. UNS N06625 镍基合金管坯热扩孔工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (17): 137-140.
Li Z Y, Tuo L F, Zhang W K, et al. Research on hot expanding hole process of UNS N06625 nickel base alloy tube blank [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (17): 137-140.
- [13] 王国红, 赵国栋, 葛文中. 扩孔设备及扩孔工艺 [P]. 中国: CN106670301A, 2017-05-17.
Wang G H, Zhao G D, Ge W Z. Reaming equipment and hole expansion process [P]. China: CN106670301A, 2017-05-17.
- [14] 耿佩, 龚小涛, 陈文静, 等. Zr-2.5Nb 合金热变形行为研究 [J]. 精密成形工程, 2022, 14 (6): 65-70.
Geng P, Gong X T, Chen W J, et al. Hot deformation behavior of Zr-2.5Nb [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14 (6): 65-70.
- [15] 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 [J]. Nuclear Materials and Energy, 2018 (17): 158-163.
- [16] 赵帆, 赵乙丞, 齐鹏, 等. 铝合金热挤压用防护润滑剂的试制与性能 [J]. 工程科学学报, 2021, 43 (2): 232-238.
Zhao F, Zhao Y C, Qi P, et al. Trial manufacture and properties of protective lubricants for hot extrusion of zirconium alloy [J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43 (2): 232-238.
- [17] Ben Ammar Y, Aoufi A, Darrieulat M. Influence of the cooling rate on the texture and the microstructure of Zircaloy-4 studied by means of a Jominy end-quench test [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 556: 184-193.
- [18] Dureja A K, Sinha S K, Ankit Srivastava A, et al. Flow behaviour of autoclaved, 20% cold worked, Zr-2.5Nb alloy pressure tube material in the temperature range of room temperature to $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [J]. Journal of Nuclear Materials, 2011, 412: 22-29.
- [19] 周宣, 李科元, 李新意, 等. Zr-2.5Nb 压力管制造过程中的组织结构演变 (I) - α/β 相转变 [J]. 原子能科学技术, 2023 (12): 2409-2416.
Zhou X, Li K Y, Li X Y, et al. Microstructure of evolution during fabrication of Zr-2.5Nb pressure tube (I)- α/β phase transformation [J]. Journal of Atomic Energy Science and Technology, 2023 (12): 2409-2416.
- [20] 赵冠楠, 周宣, 王永东, 等. CANDU 压力管用 Zr-2.5Nb 合金热挤压的数值模拟研究 [J]. 热加工工艺, 2022, 51 (3): 104-107, 111.
Zhao G N, Zhou X, Wang Y D, et al. Study of numerical simulation of Zr-2.5Nb alloy hot extrusion for CANDU pressure tube [J]. Hot Working Technology, 2022, 51 (3): 104-107, 111.
- [21] 郭宝峰, 金森, 刘鑫刚, 等. 小规格 TiNiNb 管材的反向挤压成形工艺参数 [J]. 塑性工程学报, 2010, 17 (2): 50-55.
Guo B F, Jin M, Liu X G, et al. Research on process parameters of small size TiNiNb tube backward extrusion [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2010, 17 (2): 50-55.
- [22] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].
GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].