

等通道双转角挤压及热处理N36锆合金析出行为及机理研究

李萍, 王嘉伟, 张澳, 许海峰, 薛克敏

(合肥工业大学 材料科学与工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 形变热处理是细化核反应堆包壳材料Zr-Sn-Nb-Fe (N36) 合金沉淀相尺寸、促进其弥散分布, 进而提升服役性能的有效手段。本研究对N36合金进行了450 °C下4道次等通道双转角挤压(equal channel double angular pressing, ECDAP)大变形和580 °C保温4~8 h时效处理。采用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)对沉淀相尺寸、数量、成分及分布进行了表征。结果表明: 时效处理促进了 $(\text{Zr,Nb})_2\text{Fe}$ 沉淀相粒子析出, 经过580 °C保温4~8 h的时效处理后, 初始样析出的沉淀相粒子平均尺寸由76 nm增加至88 nm。4道次变形样析出的沉淀相粒子平均尺寸由41 nm增加至51 nm, 并且析出一定数量尺寸在20~40 nm的 $(\text{Zr,Nb})_2\text{Fe}$ 相。等通道双转角挤压试样中含有较多的位错和缺陷, 为后续时效处理过程中沉淀相粒子的析出提供形核点, 并为合金元素提供了短途扩散通道, 从而促进沉淀相粒子细小弥散析出。本研究为提升N36合金综合性能提供新的思路。

关键词: Zr-Sn-Nb-Fe合金; 等通道双转角变形; 时效处理; 沉淀相

中图分类号: TG146.4⁺14

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2025)10-2653-07

1 引言

Zr-Sn-Nb-Fe (N36)合金作为最重要的工程结构材料之一, 具有热中子吸收截面小、强度高, 在高温高压水中具有良好的耐腐蚀性、较高的导热性能的优点^[1-2], 广泛应用于核电反应堆的包壳材料组件。核电技术的发展对其综合性能提出了更高要求^[3-4]。

大塑性变形(severe plastic deformation, SPD)是细化晶粒、促进沉淀相细小弥散分布进而提升材料综合性能的有效手段^[5]。作为典型的SPD方法, 等通道双转角工艺(equal channel double angular pressing, ECDAP)在等径角挤压工艺(equal channel angular pressing, ECAP)的基础上增加了一个转角, 将一次大应变剪切变形变成了两次应变相对较小的剪切变形。从而解决了传统ECAP工艺存在的冲头偏载和低塑性难变形材料难成形等问题^[6-7]。本课题组^[8]前期对纯钨烧结体的单道次等通道双转角挤压进行了有限元模拟和工艺实验, 分析了纯钨在ECDAP过程中的变形行为。与ECAP相比, ECDAP模具受力更均匀, 并且在相同参数下改善了冲头的偏移载荷。纯钨在经过ECDAP挤压后, 试样晶粒大小从10 μm 被细化至1.77 μm , 强度从403 MPa提高到497 MPa。

时效处理可以有效促进N36锆合金沉淀相析出, 从而

提升材料的力学性能和耐蚀性能。刘文庆^[9]发现锆合金在580 °C退火后析出两种类型的沉淀物, 一种是不规则的Zr-Nb-Fe相, 另一种是椭圆相 $\beta\text{-Zr}$; 众多研究表明^[10-11], 锆合金中当沉淀相粒子的尺寸低于100 nm时对于锆合金耐腐蚀性能的提升是有益的, 热处理前对试样进行变形可以增加析出相的形核位置, 从而促进其弥散析出。

本研究通过对N36合金开展不同的ECDAP变形和时效处理实验, 探索大变形和时效处理条件对N36合金沉淀相析出行为的影响, 分析有利沉淀相细小弥散析出的影响因素和机理, 为发展高性能N36锆合金制备工艺提供理论基础和依据。

2 实验

实验材料为Zr-Sn-Nb-Fe合金, 成分(wt%)为Sn 1.0, Nb 1.0, Fe 0.3, O 0.1, 其余为Zr。初始组织如图1所示, 该合金的初始组织中有完整清晰的原始 β 晶粒, 其中的 α 晶界清晰、平直且连续, 晶内的片层状马氏体 α 呈现出丛状分布。

将原始棒料加工为尺寸为20 mm×20 mm×70 mm的试样。在课题组自主研发的RZU200HF压扭液压机上对N36合金块状试样进行多道次等通道双转角挤压, 挤压温度和挤压速度分别为450 °C和0.25 mm/s, 两个转角角

收稿日期: 2024-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(52475342, 51975175, U23B20100)

作者简介: 李萍, 女, 1973年生, 博士, 教授, 合肥工业大学材料科学与工程学院, 安徽 合肥 230009, E-mail: li_ping@hfut.edu.cn

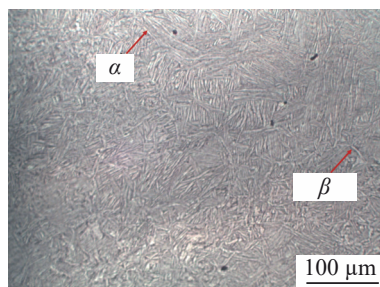


图1 N36 锆合金初始显微组织

Fig.1 Original microstructure of N36 alloy

度均为 135° 。然后对变形试样分别进行 580°C 保温 4、6 和 8 h 真空时效处理,升温速度为 $10^\circ\text{C}/\text{min}$,冷却方式为炉冷。沿试样横截面切取剪切变形区进行微观组织表征。金相观察时先对试样进行预磨、抛光,然后用 $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=3:6:9$ 进行腐蚀,在金相显微镜 XJP-6A 上对试样晶粒形貌进行观察。采用 Zeiss SIGMA-300 场发射扫描电子显微镜对试样的沉淀相形貌分布进行分析,电压为 15 kV。采用透射电子显微镜 (FEI,TECNAI G2 S-TWIN F20 型) 对热处理后试样的位错分布和沉淀相类型进行表征,实验中使用的双喷雾溶液为 93% 乙醇+7% 高氯酸,温度为 -25°C ,电压为 30 V。

3 结果与讨论

3.1 基体组织分析

图 2 为不同 ECDAP 变形道次-时效时间下 N36 锆合金显微组织的金相照片。合金经过时效处理后在 β 晶界

处发现了尺寸较大的团簇状黑色板条。每个团簇由几个或几十个平行板条组成,团簇之间交错分布,在晶界处的簇状组织也分布较多^[12-14]。随着变形道次增加,板条细化程度越明显,4 道次变形样板条宽度最小,一道次变形样其次,初始样板条宽度尺寸最大。

α 板条宽度决定了合金内部板条界面的面积,板条宽度越窄,单位体积内的板条界面面积越大且分布弥散,对塑性变形过程中的位错运动阻碍效果显著增加,从而起到提升合金力学性能的作用。本研究通过 Image Pro Plus 软件对不同 ECDAP 变形道次-时效时间下的片层厚度进行了统计,如图 3 所示。变形样片层厚度要显著低于初始样。其中初始样片层厚度较大,在 $2\sim 7\ \mu\text{m}$ 之内每个宽度范围都存在一定数量的板条,并且少量板条的厚度大于 $8\ \mu\text{m}$,一道次变形样片层厚度变小,主要集中于 $2\sim 4\ \mu\text{m}$,而 4 道次变形样片层厚度进一步降低,主要集中于 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 。

3.2 相析出

图 4~图 6 为不同 ECDAP 变形道次-时效时间下 N36 锆合金显微组织的 SEM 照片。时效处理后 N36 合金初始样主要组成为 α 相和 β 相,初始样中的片层 α 相沿不同方向平直分布在 β 板条之间,残留的 β 相则均匀分布在片层 α 晶界处。时效 4 及 6 h 后合金内部组织没有发生明显变化,沉淀相析出数极少。这是因为初始样内部含有的位错和缺陷极少,可供沉淀相粒子形核点不多,因此沉淀相粒子形核析出需要更多的能量。并且初始样内还存在粗大的原始 β 晶粒,其尺寸为 $5\sim 8\ \mu\text{m}$,如图 4a 所示。当

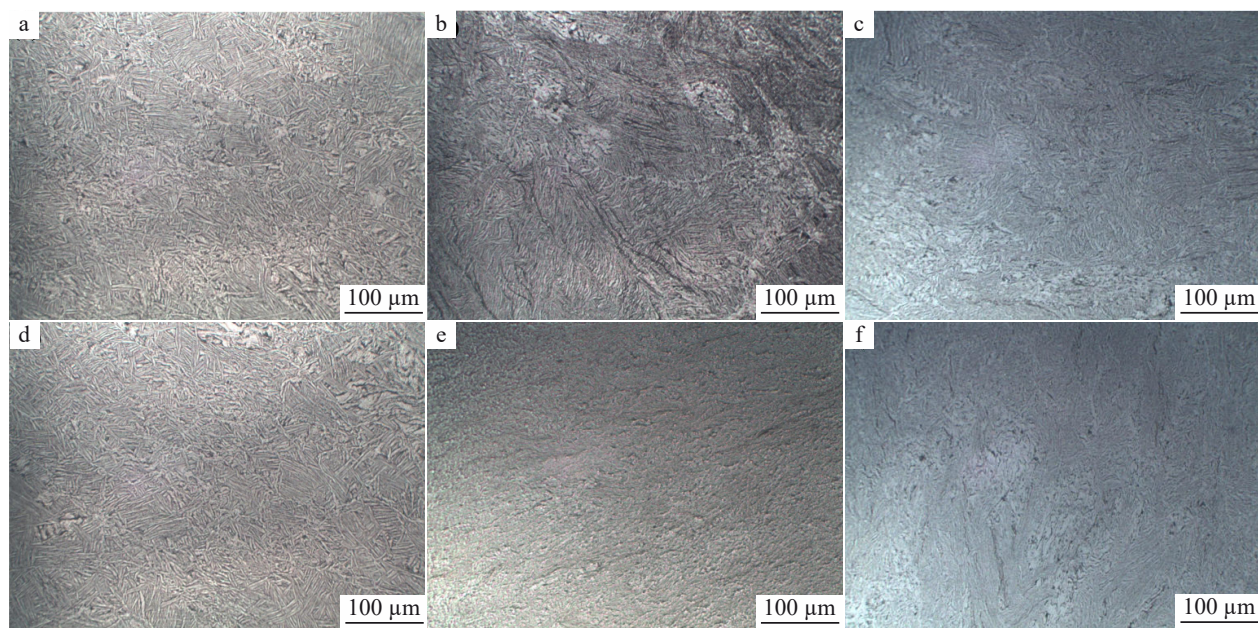


图2 不同ECDAP变形道次-时效时间下N36 锆合金金相照片

Fig.2 OM images of N36 zirconium alloy under different ECDAP deformation passes and aging time: (a) $580^\circ\text{C}/4\ \text{h}$ -original sample, (b) $580^\circ\text{C}/4\ \text{h}$ -1 pass, (c) $580^\circ\text{C}/4\ \text{h}$ -4 passes, (d) $580^\circ\text{C}/8\ \text{h}$ -original sample, (e) $580^\circ\text{C}/8\ \text{h}$ -1 pass, and (f) $580^\circ\text{C}/8\ \text{h}$ -4 passes

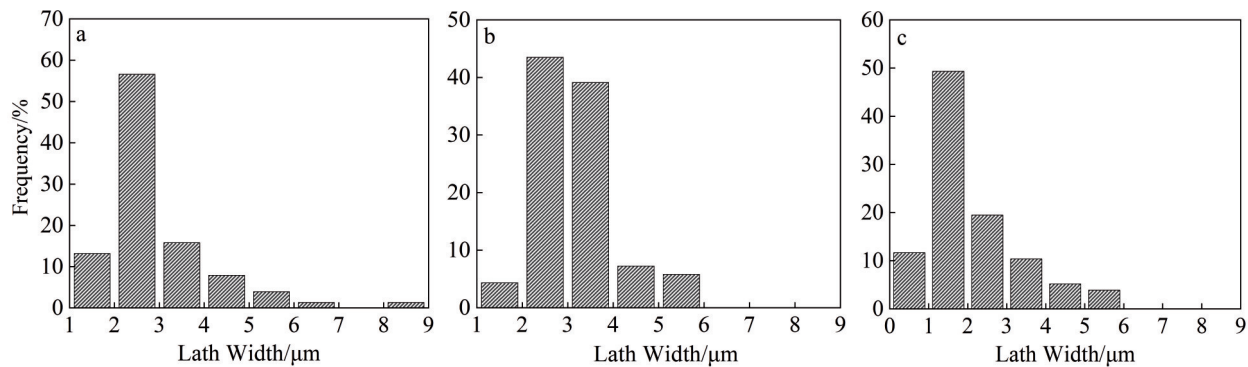


图3 不同ECDAP变形道次-580 ℃/8 h时效后板条宽度分布
Fig.3 Lath width distributions after different ECDAP deformation passes -580 ℃/8 h aging: (a) original sample, (b) 1 pass, and (c) 4 passes

时效时间达到8 h时可以看到板条β相逐渐分解,内部出现少量白色细小沉淀相。这是因为合金元素会在板条界面或晶界等能量较高的地方扩散偏聚,从而易于沉淀相形核长大,如图4c所示。

一道次变形试样经580 ℃时效处理后,沉淀相粒子主要沿板条β晶界析出,且随着保温时间延长,板条β相逐渐分解,在8 h时几乎看不到完整的板条结构,如图5c所示。另外,随着保温时间延长,沉淀相粒子析出数量增多、尺寸增加。这是因为ECDAP变形使合金中含有较多的位错和缺陷,为沉淀相粒子提供更多的形核点,并且位错和缺陷给元素的扩散提供了短途通道,因此促进了随后热处理过程中合金元素的扩散。当基体中局部合金元素浓度达到临界值时,沉淀相粒子析出,该过程的机理见图7。在合金仅经过一道次变形后,当时效时间延长至8 h,合金中的沉淀相粒子一直呈线性排列。这是因为当合金热处理前变形量较低时,使短途扩散通道和新的形核点较少,所以沉淀相粒子大部分仍然存在于原有位置,沿板条方向分布^[15]。在合金基体中,晶界移动或旋转时将绕过沉淀相粒子。

4道次变形试样经580 ℃时效处理后,沉淀相粒子析出数量进一步增多,并且尺寸更为细小。这是因为更高的变形量使板条宽度更为细小。由于板条界面处能量较高,沉淀相优先在板条界面处形核,导致析出的沉淀相粒

子尺寸减小。当时效保温时间相同时,变形量越大,也有助于沉淀相粒子的弥散化分布^[16]。对比图5与图6,当时效时间延长至8 h,4道次变形后析出的沉淀相粒子线性分布特征都不明显。这是因为较高的变形量合金内部引入高密度的位错和缺陷,从而使元素短途扩散通道及新形核点数量增多,所以沉淀相粒子在热处理中可以有效减小尺寸并弥散化分布^[17-18]。

图8为4道次-580 ℃/4、8 h下N36锆合金的沉淀相粒子形貌。沉淀相粒子不仅在板条边界处析出,也在β晶内析出,其尺寸约为47 nm,形貌呈椭球状,低于在板条界面处析出的沉淀相粒子尺寸。由于铁元素和铌元素在基体中的溶解度很低,分别只有0.001%和0.3%,因此极易形成沉淀相粒子。对其进行EDS分析可以发现,该区域含有Zr、Fe、Nb 3种合金元素,其中Zr元素含量为79.74at%, Fe元素含量为7.21at%, Nb元素含量为13.6at%,根据Nb/Fe元素比值(约为2)推测可能为(Zr, Nb)₂Fe相。随着保温时间延长至8 h,β晶内析出沉淀相粒子数量增多,其尺寸为30~48 nm。部分沉淀相相邻甚至“重叠”。对其进行EDS分析如表1所示,可以发现,其元素含量不同于580 ℃/4 h的沉淀相, Nb元素含量随着时效时间延长缓慢增加,其Nb/Fe元素比值在1.0左右波动,推测可能为Zr(Nb, Fe)₂相。Zr(Nb, Fe)₂相与(Zr, Nb)₂Fe相对锆合金的耐腐蚀性能提升都是有益的,并且

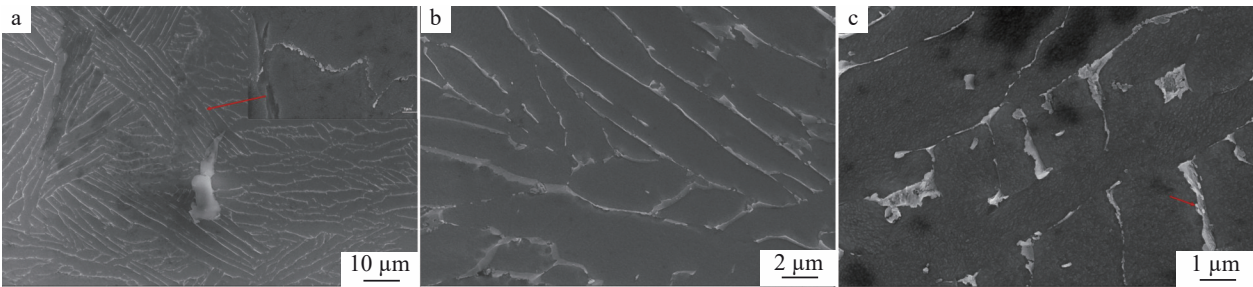


图4 初始N36锆合金不同保温时间后的表面形貌SEM照片
Fig.4 SEM images of initial N36 zirconium alloy surface after different holding time: (a) 580 ℃/4 h, (b) 580 ℃/6 h, and (c) 580 ℃/8 h

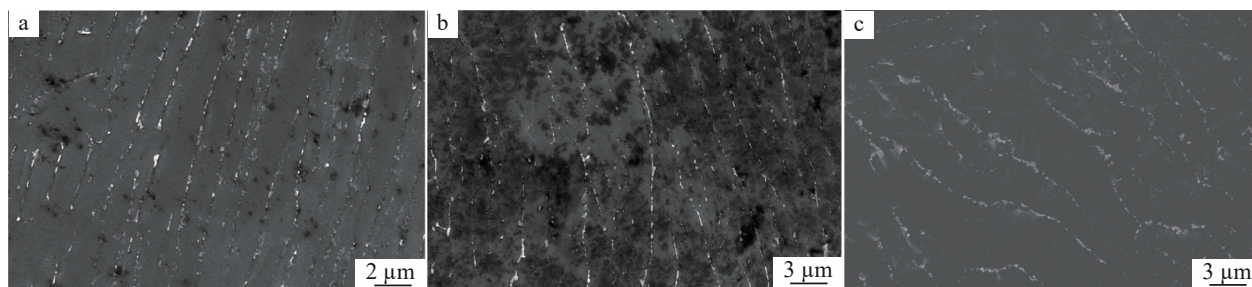


图5 1道次-不同保温时间下N36锆合金的表面形貌SEM照片

Fig.5 SEM images of N36 zirconium alloy surface after 1 pass and different holding time: (a) 580 °C/4 h, (b) 580 °C/6 h, and (c) 580 °C/8 h

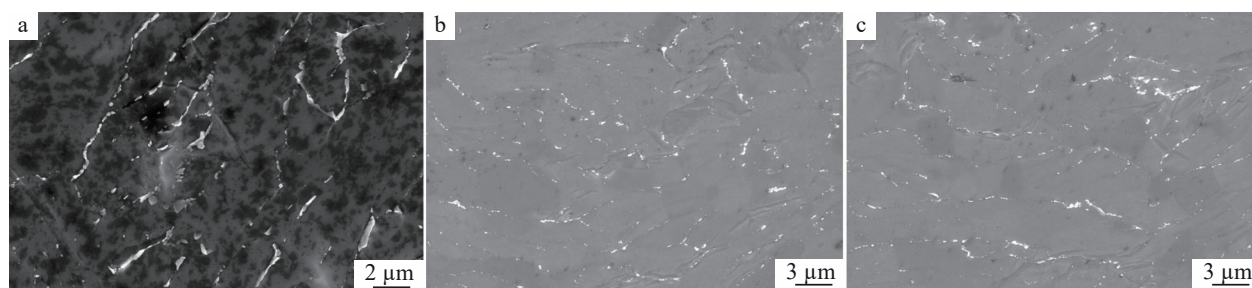


图6 4道次-不同保温时间下N36锆合金的表面形貌SEM照片

Fig.6 SEM images of N36 zirconium alloy surface after 4 passes and different holding time: (a) 580 °C/4 h, (b) 580 °C/6 h, and (c) 580 °C/8 h

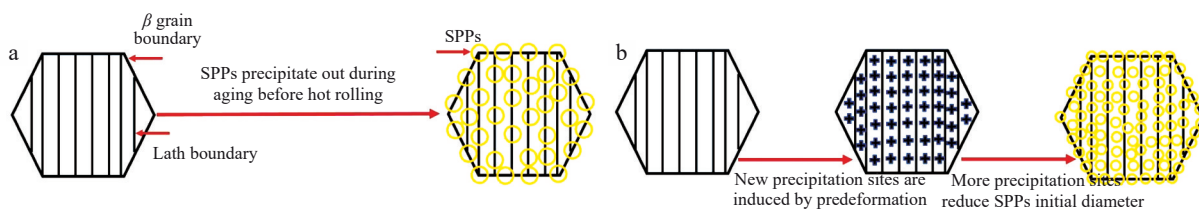


图7 锆合金中沉淀相粒子析出示意图

Fig.7 Schematic diagrams of precipitation of precipitate phase particles in zirconium alloy before (a) and after (b) ECDAP deformation

(Zr,Nb)₂Fe 相提升程度高于 Zr(Nb,Fe)₂ 相。

图9列出了不同ECDAP变形道次-时效时间下沉淀相粒子平均尺寸的统计结果。随着时效时间的延长,沉淀相粒子尺寸逐渐增加。在580 °C时效4~8 h后,初始样沉淀相尺寸由76 nm增至88 nm,1道次变形样沉淀相尺寸由64 nm增至75 nm;4道次变形样沉淀相尺寸由41 nm

增至51 nm。因此ECDAP变形可以有效改善锆合金中沉淀相粒子的平均尺寸,变形量越大,沉淀相粒子尺寸更为细小,分布也更均匀。

使用Image-Pro Plus软件对每种样品的SEM图片进行统计分析,计算出沉淀相粒子的体积分数如图10所示。随着变形道次的增加和时效时间的延长,沉淀相粒子体积

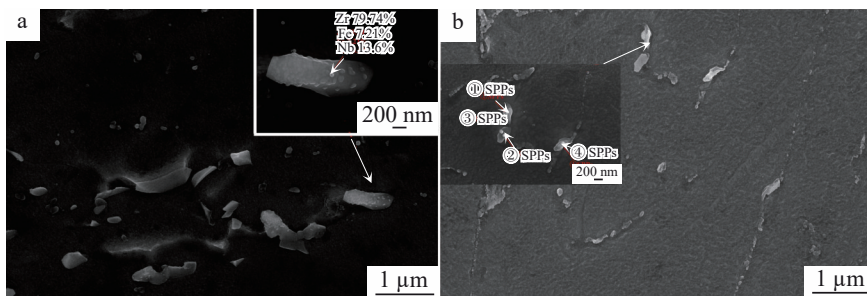


图8 4道次-不同保温时间下N36锆合金的沉淀相粒子

Fig.8 Precipitated phase particles of N36 zirconium alloy under 4 passes and different holding time: (a) 580 °C/4 h and (b) 580 °C/8 h

表 1 4 道次变形样在 580 °C 时效 8 h 后的沉淀相粒子元素含量
Table 1 Content of precipitate phase particle element in samples after 4 passes of deformation and aging at 580 °C for 8 h (at%)

Precipitate phase particle	Zr	Fe	Nb	Sn
①	76.04	14.43	10.35	0.18
②	78.33	11.37	10.01	0.29
③	73.43	15.84	10.68	0.06
④	70.30	13.00	16.60	0.10

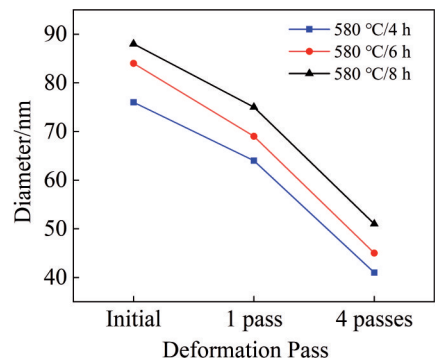


图 9 不同 ECDAP 变形道次-时效时间下沉淀相粒子平均尺寸统计
Fig.9 Statistical results of average particle size of precipitate phase under different ECDAP deformation passes and aging time

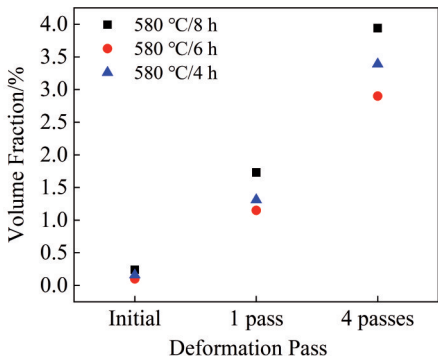


图 10 不同 ECDAP 变形道次-时效时间下沉淀相粒子体积分数
Fig.10 Volume fraction of precipitate phase particles under different ECDAP deformation passes and aging time

分数越大。在 580 °C 保温 4~8 h 时,初始样沉淀相体积分
数由 0.1% 增至 0.24%,1 道次变形样沉淀相体积分
数由 1.15% 增至 1.73%;4 道次变形样沉淀相体积分
数由 2.9% 增至 3.94%。随着变形道次的增加,累积应变量逐渐增大,
晶粒被有效细化,位错密度升高,可供沉淀相形核点数量
也增多,因此沉淀相体积分逐渐增加^[19-22]。1 道次的沉
淀相体积分相对初始样而言提升很小,一道次变形后,
累积应变与 4 道次相比较小,晶粒内部位错和缺陷较少,4
道次变形时,位错缺陷累积程度已经非常大。

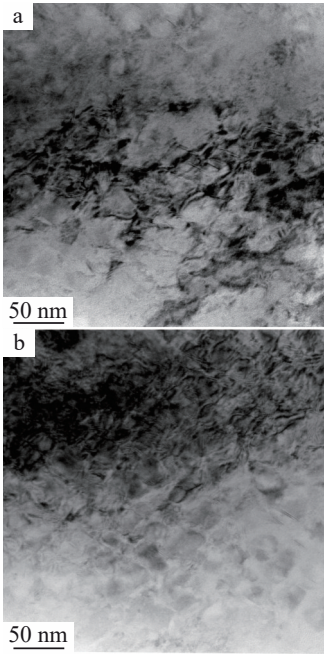


图 11 不同 ECDAP 变形道次-保温 8 h 后的位错形貌
Fig.11 Dislocation morphologies of samples with different ECDAP deformation passes after holding for 8 h: (a) 1 pass, and (b) 4 passes

3.3 位错及沉淀相

不同成分和结构的沉淀相对 N36 合金的性能有不同的
影响,为了进一步研究变形时效析出沉淀相的种类和
结构,本研究主要针对 4 道次变形时效样品进行了 TEM
观察和分析。图 11 为不同 ECDAP 变形道次-保温 8 h 下
N36 合金的组织形貌,在合金经过时效处理后,内部的位
错重新排列和调整,位错密度逐渐下降,但是 4 道次变形
样的位错密度依旧大于一道次变形样。图 12 为 ECDAP
4 道次-580 °C/8 h 时效处理后 N36 锆合金的 TEM 组织形
貌。对图 12a 处的沉淀相粒子进行衍射花样分析和能谱
分析,发现其是结构为面心立方 (fcc) 的 (Zr,Nb)₂Fe 相。
透射模式下时效组织中可以观察到板条 β 相,板条界面
已经变得模糊。在晶粒内部还可以观察到明显的位错线
(图 12b 中黄色箭头所指),这说明时效 8 h 并不能使合金
内部位错全部消失。沿板条界面发现黑色衬度区域,且
区域宽度较小,为 20~40 nm,推测可能为时效过程中析
出的沉淀相。为了进一步证实该区域的成分和晶体结
构,对其进行能谱分析,其元素含量如表 2 所示。该区域
含有 Zr、Fe 和 Nb 3 种合金元素,为了确定具体的沉淀相
种类,对②处进行衍射花样分析,如图 12c 所示,根据衍
射花样和元素比例(约为 2)可判断其为 Zr(Nb,Fe)₂ 相。
当保温时间延长至 8 h 时,(Zr,Nb)₂Fe 相和 Zr(Nb,Fe)₂ 相同
时存在于 4 道次变形样中。

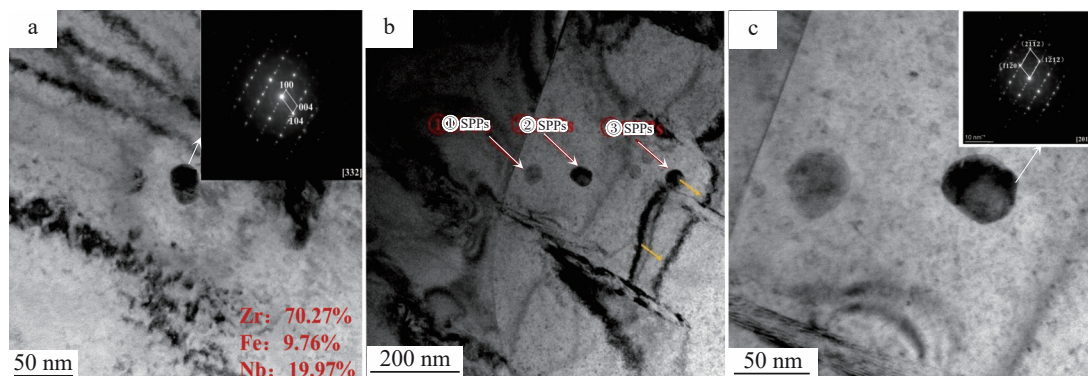


图 12 4道次变形样在 580 °C 时效 8 h 后的 TEM 分析

Fig.12 TEM analyses of the sample after 4 passes of deformation and aging at 580 °C for 8 h: (a) (Zr,Nb)₂Fe phase and SAED pattern, (b) TEM image, and (c) Zr(Nb,Fe)₂ phase and SAED pattern

表 2 图 12b 中沉淀相元素含量

Table 2 Content of precipitate phase in Fig.12b (at%)

Precipitate phase particle	Zr	Fe	Nb	Sn
①	55.22	19.45	25.33	0
②	45.23	22.59	31.88	0
③	64.80	13.39	21.81	0

4 结论

1) N36 合金在等通道双转角挤压变形及时效处理后, 4道次变形样板条宽度显著低于初始样。初始样片层厚度较大, 主要集中于 2~7 μm, 并且少量板条的厚度大于 8 μm, 而 4道次变形样片层厚度得到显著降低, 主要集中于 1~2 μm。

2) N36 合金在等通道双转角挤压变形及时效处理后, 部分板条 β 相分解。沉淀相沿着板条界析出, ECDAP 变形有助于将沉淀相的分布从晶界连续分布转变为晶界半连续、晶内弥散分布的形式。

3) 随着时效时间延长, 沉淀相粒子的平均尺寸增大, 初始样经不同保温时间的时效处理后, 沉淀相粒子平均尺寸由 76 nm 增加至 88 nm, 沉淀相体积分数由 0.1% 增至 0.24%。4道次变形样沉淀相粒子平均尺寸由 41 nm 增加至 51 nm, 沉淀相体积分数由 2.9% 增至 3.94%。引入变形后, 基体内部的位错缺陷可为沉淀相提供形核点, 为合金元素的扩散提供短途通道, 从而使沉淀相粒子得到显著细化, 且变形量越大, 细化程度越高。4道次变形样经 4~8 h 保温后析出的沉淀相类型分别是 (Zr,Nb)₂Fe 相和 Zr(Nb,Fe)₂ 相。

参考文献

References

[1] Wang Biao(王彪), Zhang Chunyu(张纯禹), Ma Xianfeng(马显锋) et al. *Chinese Science: Physics, Mechanics, Astronomy*(中国

科学: 物理学、力学、天文学)[J], 2019, 49(11): 6

- [2] Wang Depeng(王德鹏), Li Yifeng(李毅丰), Liang Xue(梁雪) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(2): 753
- [3] Yang Z G, Gong Y, Yuan J Z. *Materials and Corrosion*[J], 2012, 63: 7
- [4] Wang Xufeng(王旭峰), Li Zhongkui(李中奎), Zhou Jun(周军) et al. *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2012, 41(2): 71
- [5] Valiev R Z, Langdon T G. *Metallurgical & Materials Transactions A*[J], 2011, 42: 2942
- [6] Azushima A, Kopp R, Korhonen A et al. *CIRP Annals*[J], 2008, 57(2): 716
- [7] Rao V S, Kashyap B, Prabhu N et al. *Material Science and Engineering A*[J], 2008, 486(1): 341
- [8] Li Ping, Duan Zihao, Wu Tao et al. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2020, 49(9): 3012
- [9] Liu Wenqing(刘文庆), Lei Ming(雷鸣), Geng Xun(耿讯) et al. *Atomic Energy Science and Technology*(原子能科学技术)[J], 2007, 41(6): 712
- [10] Tewari R, Srivastava D, Dey G K et al. *Journal of Nuclear Materials*[J], 2008, 383(1–2): 153
- [11] Garner A, Hu Jing, Harte A et al. *Acta Materialia*[J], 2015, 99: 259
- [12] Kim H G, Jeong Y H. *Journal of Nuclear Materials*[J], 2006, 118: 77
- [13] Kim H G, Jeong Y H, Kim T H. *Journal of Nuclear Materials*[J], 2004, 326(2–3): 125
- [14] Huang Jiansong(黄建松), Pei Wen(裴文), Xu Shitong(徐诗彤) et al. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2024, 60(4): 509
- [15] Bossis P, Pêcheur D, Hanifi K. *Journal of ASTM International* [J], 2006, 3: 494
- [16] Toffolon-Masclet C, Barberis P, Brachet J C et al. *Journal of ASTM International*[J], 2005, 2(5): 1
- [17] Zhu Wei(朱伟), Wang Zhen(王桢), Wu Lu(吴璐) et al. *Modern Applied Physics*(现代应用物理)[J], 2023, 14(1): 187
- [18] Zhilyaev A P, Langdon T G. *Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 53(6): 893
- [19] Fattahi M, Hsu C Y, Ali A O et al. *Heliyon*[J], 2023, 9(12):

e22559

[20] Massih A R, Andersson T, Witt P *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2003, 322(2–3): 138

[21] Burgers W G. *Physica*[J], 1934, 1(7): 561

[22] Obasi G C, Fonseca J Q D, Rugg D *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2013, 576: 272

Research on Precipitation Behavior and Mechanism of N36 Zirconium Alloy by Equal Channel Double Angular Pressing and Heat Treatment

Li Ping, Wang Jiawei, Zhang Ao, Xu Haifeng, Xue Kemin

(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Thermoforming treatment is an effective method to refine the precipitate size of N36 alloy, promote its dispersion distribution, and improve its service performance in nuclear reactor cladding materials. In this study, Zr-Sn-Nb-Fe (N36) alloy subjected to 4 passes of equal channel double angular pressing (ECDAP) at 450 °C for large deformation and aging treatment at 580 °C for 4–8 h. The microstructures were characterized by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) and transmission electron microscope (TEM). The results show that aging treatment promotes the precipitation of $(\text{Zr,Nb})_2\text{Fe}$ precipitate phase particles, and after aging treatment at 580 °C for 4–8 h, the average size of the precipitate phase particles in the initial sample increases from 76 nm to 88 nm. The average size of precipitate phase particles in the samples after 4 passes of deformation increases from 41 nm to 51 nm, and a certain amount of $(\text{Zr,Nb})_2\text{Fe}$ phase with a size of 20–40 nm is precipitated. ECDAP sample contains a large number of dislocations and defects, which provide nucleation points for the precipitation of precipitate phase particles during subsequent aging treatment and a short diffusion channel for alloying elements, thereby promoting the fine dispersion and precipitation of precipitate phase particles. This study provides new ideas for improving the comprehensive performance of N36 alloy.

Key words: Zr-Sn-Nb-Fe alloy; equal channel double angular pressing; aging treatment; precipitate phase

Corresponding author: Xue Kemin, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, P. R. China, Tel: 0086-551-62905110, E-mail: xuekm@hfut.edu.cn