

同行专家业内评价意见书编号: 20250856087

## 附件1

# 浙江工程师学院（浙江大学工程师学院） 同行专家业内评价意见书

姓名: 李嘉豪

学号: 22260211

申报工程师职称专业类别（领域）: 材料与化工

浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）制

2025年05月16日

## 填表说明

一、本报告中相关的技术或数据如涉及知识产权保护  
、军工项目保密等内容，请作脱密处理。

二、请用宋体小四字号撰写本报告，可另行附页或增  
加页数，A4纸双面打印。

三、表中所涉及的签名都必须用蓝、黑色墨水笔，亲  
笔签名或签字章，不可以打印代替。

四、同行专家业内评价意见书编号由工程师学院填写  
，编号规则为：年份4位+申报工程师职称专业类别(领域)4  
位+流水号3位，共11位。

## 一、个人申报

(一) 基本情况【围绕《浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）工程类专业学位研究生工程师职称评审参考指标》，结合该专业类别(领域)工程师职称评审相关标准，举例说明】

### 1. 对本专业基础理论知识和专业技术知识掌握情况(不少于200字)

本人对本专业基础理论知识和专业技术知识掌握良好，研究课题与材料与化工专业紧密相关。本论文选择研究对象为 $\alpha$ -锆合金，由于具有热中子吸收截面低、抗辐照和耐腐蚀性能好等优点，是一种被运用在核反应堆的关键材料。然而成品 $\alpha$ -Zr合金的制成通常需要通过热轧、冷轧和退火等多道工序，可能会在此过程中形成织构，从而影响材料的力学性能。 $\alpha$ -Zr合金作为一种HCP结构的金属合金，其主要的变形机制包括滑移和孪生。 $\alpha$ -Zr合金滑移系有限且分布不均匀，不同变形条件下不同滑移系种类和数量的开动对材料的塑性变形起到了非常重要的作用。当滑移变形不足以协调塑性变形或者孪生变形相对有利时，孪生可以开启从而影响材料的力学性能。因此，深入理解滑移和孪生机制，包括研究材料不同初始微观组织特征及不同变形条件下，滑移系的开动及占比、滑移与孪晶之间的相互作用、孪晶形核机制与长大行为、退孪生行为、孪晶变体的选择机制，对于研究 $\alpha$ -Zr合金的微观结构演化和力学性能的关系尤为重要。因此本研究选取Zr-4合金和ZIRLO合金作为研究对象，通过离位力学测试和原位SEM-EBSD拉伸实验技术，深入地研究了 $\alpha$ -Zr合金在室温和高温下的塑性变形行为。

### 2. 工程实践的经历(不少于200字)

作为一名研究生，在真正走上工作岗位之前获得的大多是书本上的知识，无法从观察实践中获得实际的收获。通过在研究院中进行的专业实践，极大丰富拓展了我的眼界，增强了我解决实际问题的能力。项目初期申请书的撰写和原位实验的尝试非常困难，无法确保整个项目的可行性，需要通过实验验证。但我通过一步步的尝试积累经验，摸索实验方法和数据分析软件，查阅大量文献，慢慢对锆合金原位实验的分析更加深入了解。并与合作单位开展每月一次的项目进展汇报，根据需求对实验和分析方法进行改动。我也有机会能去到合作方参加会议交流，分享实验心得，这都是难能可贵的机会。最终我也完成了结题报告的撰写，项目得以结题。本研究采用了滑移迹线分析方法、晶内取向差角法、几何相容性因子分析方法等研究了锆合金室温和高温下的滑移和孪生行为，为工业领域锆合金的制备提供了非常宝贵的经验。

### 3. 在实际工作中综合运用所学知识解决复杂工程问题的案例（不少于1000字）

1. 通过离位与原位力学加载相结合的实验手段，分析了Zr-4合金室温不同应变速率和加载方式下的塑性变形行为。主要结论如下：

- (1) Zr-4合金沿RD拉伸和压缩时屈服强度均低于TD，极限抗拉强度均高于TD，屈服强度拉压不对称性低，极限抗拉强度和极限抗压强度呈现明显拉压不对称性。
- (2) 随着应变速率增加，拉伸和压缩时的屈服强度以及极限抗拉(压)强度均增大，而各加载方式下柱滑移和{10-12}孪晶SF的明显改变；RD拉伸柱滑移SF始终高于TD拉伸，RD压缩{10-12}孪晶SF始终高于TD压缩。
- (3) 对于织构演变而言，小应变下基面双峰织构特征明显，大应变时则趋于分散。RD拉伸和压缩时<01-10>//RD组分随应变增加变多；TD拉伸和压缩时<01-10>//TD组分随应变增加变多。

(4) Zr-4合金沿RD拉伸未发现孪晶激活，对于沿TD拉伸，孪晶在较宽角度范围内激活；对于TD和RD压缩，孪晶在较窄角度范围内激活，它们大多符合SF定律；TD拉伸和RD压缩时有利取向的晶粒更多，激活了更多数量孪晶。观察到了独立形核孪晶对、协同形核孪晶对以及孪晶传递孪晶对，高m和m' 以及孪晶取向和形貌高度对齐是大多数孪晶传递的准则。

2. 通过原位SEM-EBSD技术分析了Zr-4合金室温拉伸过程中的塑性变形机制。通过滑移迹线方法对滑移系的激活进行了统计性分析，并利用IGMA方法讨论了不同取向晶粒的滑移模式差异。深入探讨了孪晶的形核机制以及平行结构和交叉结构孪晶的生长过程。主要结论如下：

(1) 通过滑移迹线分析，变形最初由柱面滑移主导，在应变达到14%后转变为多种滑移模式共同主导，其中柱面滑移、锥面滑移、锥面1st< c+a>滑移、锥面2nd< c+a>滑移和基面< a>滑移的比例分别为73%、12.7%、11.1%、1.6%和1.6%。

(2) 考虑了每种滑移模式的CRSS与SF的比值，在观察到滑移迹线的晶粒中，近一半的晶粒滑移行为遵循SF定律，而其余晶粒中滑移系的激活则是由于局部应变集中导致的。

(3) 当孪晶形核临界应力低于整体施加的应力时，在具有高度有利取向的母晶晶粒中，即使在低应变条件下，也会形成slip-independent孪晶。当孪晶形核临界应力高于整体施加的应力时，由于相邻晶粒引起的局部高应变，将在具有相对有利取向的母晶晶粒中形成slip-assisted孪晶。

3. 通过原位SEM-EBSD表征方法观察和分析了ZIRLO合金室温和高温拉伸过程中的塑性变形机制。通过滑移迹线方法和IGMA方法对滑移系的激活进行了统计性分析，深入探讨了孪晶的形核机制，长大行为以及退孪生行为。主要结论如下：

(1) RT拉伸时，TD拉伸屈服强度高于RD拉伸，极限抗拉强度和伸长率低于RD拉伸；TD拉伸时，RT拉伸屈服强度和极限抗拉强度均高于430°C拉伸，伸长率远低于430°C拉伸。

(2) 随应变增加，TD-RT拉伸时柱滑移激活占比始终超过70%，部分锥滑移激活协调变形；RD-RT拉伸时柱滑移激活占比逐渐增加，14%应变占比超过90%，非常少数量锥滑移激活协调变形；TD-430°C拉伸时锥面1st< c+a>滑移占比最高，基面< a>滑移占比25%，柱面< a>滑移占比仅为22.7%。

(3) IGMA分布以及应变分布演变表明，TD-430°C拉伸时多个滑移模式共同协调变形，应变分布更均匀且KAM数值较低，表明了高温下的良好塑性和较低强度。

(4) TD-RT和RD-RT拉伸时孪晶形核机制大多数为slip-assisted，TD-430°C拉伸时孪晶形核机制则大多为slip-independent。且SF值为负值的孪晶形核也被发现，这可能是多个变形系统共同协调的结果。

(5) 孪晶生长速率各不相同，这与局部应变协调有关。单个晶粒中PP对和MP对孪晶对间m' 过低导致孪晶生长受阻。孪晶SF值和孪晶间m' 过低导致退孪生的发生。

(二) 取得的业绩(代表作)【限填3项,须提交证明原件(包括发表的论文、出版的著作、专利证书、获奖证书、科技项目立项文件或合同、企业证明等)供核实,并提供复印件一份】

1.

公开成果代表作【论文发表、专利成果、软件著作权、标准规范与行业工法制定、著作编写、科技成果获奖、学位论文等】

成果名称	成果类别 [含论文、授权专利(含发明专利申请)、软件著作权、标准、工法、著作、获奖、学位论文等]	发表时间/ 授权或申 请时间等	刊物名称 /专利授权 或申请号等	本人 排名/ 总人 数	备注
An investigation of slip and twinning behavior of a zirconium alloy during plastic deformation based on in-situ SEM-EBSD	权威期刊	2024年12月02日	Journal of alloys and compounds	1/7	

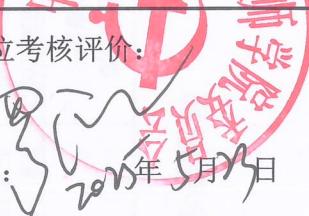
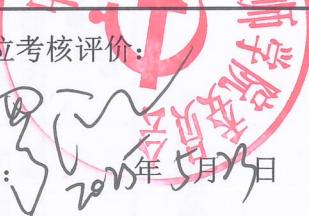
2. 其他代表作【主持或参与的课题研究项目、科技成果转化推广、企业技术难题解决方案、自主研发设计的产品或样机、技术报告、设计图纸、软课题研究报告、可行性研究报告、规划设计方案、施工或调试报告、工程实验、技术培训教材、推动行业发展中发挥的作用及取得的经济社会效益等】

**(三) 在校期间课程、专业实践训练及学位论文相关情况**

课程成绩情况	按课程学分核算的平均成绩: 87 分
专业实践训练时间及考核情况(具有三年及以上工作经历的不作要求)	累计时间: 1.1 年 (要求1年及以上) 考核成绩: 86 分
<b>本人承诺</b>	
个人声明: 本人上述所填资料均为真实有效, 如有虚假, 愿承担一切责任, 特此声明!	
申报人签名:	李嘉豪



## 二、日常表现考核评价及申报材料审核公示结果

日常表现 考核评价	<p>非定向生由德育导师考核评价、定向生由所在工作单位考核评价:</p> <p><input checked="" type="checkbox"/>优秀 <input type="checkbox"/>良好 <input type="checkbox"/>合格 <input type="checkbox"/>不合格</p> <p>德育导师/定向生所在工作单位分管领导签字(公章): </p> <p>2013年5月23日</p>
申报材料 审核公示	<p>根据评审条件, 工程师学院已对申报人员进行材料审核(学位课程成绩、专业实践训练时间及考核、学位论文、代表作等情况), 并将符合要求的申报材料在学院网站公示不少于5个工作日, 具体公示结果如下:</p> <p><input type="checkbox"/>通过 <input type="checkbox"/>不通过(具体原因: )</p> <p>工程师学院教学管理办公室审核签字(公章): </p> <p>年 月 日</p>

**浙江大学研究生院**  
**攻读硕士学位研究生成绩表**

学号: 22260211	姓名: 李嘉豪	性别: 男	学院: 工程师学院			专业: 材料与化工			学制: 2.5年		
毕业时最低应获: 24.0学分		已获得: 27.0学分			入学年月: 2022-09			毕业年月:			
学位证书号:			毕业证书号:						授予学位:		
学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质	学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质
2022-2023学年秋季学期	新时代中国特色社会主义理论与实践		2.0	94	公共学位课	2022-2023学年冬季学期	产业技术发展前沿		1.5	92	专业学位课
2022-2023学年秋季学期	工程技术创新前沿		1.5	87	专业学位课	2022-2023学年春季学期	科技创新案例探讨与实战		2.0	90	专业选修课
2022-2023学年秋季学期	金属学原理与先进合金材料		2.0	88	专业学位课	2022-2023学年春季学期	数学建模		2.0	90	专业选修课
2022-2023学年冬季学期	半导体材料中的杂质与缺陷		2.0	89	跨专业课	2022-2023学年春季学期	自然辩证法概论		1.0	80	公共学位课
2022-2023学年秋冬学期	工程伦理		2.0	86	公共学位课	2022-2023学年夏季学期	研究生英语基础技能		1.0	免修	公共学位课
2022-2023学年秋冬学期	研究生论文写作指导		1.0	89	专业学位课	2022-2023学年夏季学期	研究生英语		2.0	免修	公共学位课
2022-2023学年冬季学期	材料现代研究方法与应用实践		2.0	94	专业学位课		硕士生读书报告		2.0	通过	
2022-2023学年秋冬学期	高阶工程认知实践		3.0	81	专业学位课						

说明: 1. 研究生课程按三种方法计分: 百分制, 两级制(通过、不通过), 五级制(优、良、中、

学院成绩校核章

及格、不及格)。

成绩校核人: 张梦依

2. 备注中“\*”表示重修课程。

打印日期: 2025-06-03





## An investigation of slip and twinning behavior of a zirconium alloy during plastic deformation based on in-situ SEM-EBSD

Jiahao Li <sup>a,b</sup>, Ao Liu <sup>a,b</sup>, Xuan Liu <sup>a,b</sup>, Xianjue Ye <sup>a,\*</sup>, Jin Wang <sup>a</sup>, Yuefei Zhang <sup>a,\*</sup>, Ze Zhang <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Institute of Superalloys Science and Technology, School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

<sup>b</sup> Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310015, China

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Zirconium alloy  
In-situ SEM-EBSD observation  
Schmid's law  
Slip trace analysis  
Twin nucleation and growth

### ABSTRACT

In this study, a combination of in-situ scanning electron microscopy (SEM) and electron backscattering diffraction (EBSD) was employed to investigate the tensile deformation behavior of Zr-4 alloy at room temperature. Slip trace analysis shows that the prismatic  $\langle a \rangle$  slip is activated at the initial stage of deformation, while other slip modes are also activated with strain increasing. In-Grain Misorientation Axis (IGMA) analysis demonstrates a significant increase in the probability of non-prismatic slip in non-basal textured grains. In terms of twinning behavior, when the twin nucleation critical stress is lower than the global applied stress, slip-independent twins could form at lower strain. When the twin nucleation critical stress is higher than the global applied stress, slip-assisted twins could form due to the high local strain caused by the adjacent grains.

### 1. Introduction

Zirconium and zirconium alloys are widely used in nuclear reactor cladding materials and core structural materials due to their low thermal neutron absorption cross-sectional area, high thermal conductivity, excellent machinability and resistance to neutron irradiation, as well as good corrosion resistance [1–3]. The most common Zr-4 alloys for production applications contain hcp  $\alpha$ -Zr and some second phase particles at room temperature. The hcp structure is less symmetric than the fcc structure, and the activated slip systems are limited and not uniformly distributed.  $\alpha$ -Zr has an axial ratio of  $c/a = 1.593$  (< ideal  $c/a$  of 1.633) [4]. And the stacking fault energy (SFE) of the prismatic  $\langle a \rangle$  slip is smaller than that of the basal  $\langle a \rangle$  slip, so the most preferred slip system of  $\alpha$ -Zr is the  $\{10\bar{1}0\} < 11\bar{2}0 >$  prismatic  $\langle a \rangle$  slip [5]. Other prevalent slip systems in  $\alpha$ -Zr alloys include:  $\{0001\} < 11\bar{2}0 >$  basal  $\langle a \rangle$  slip,  $\{10\bar{1}1\} < 11\bar{2}0 >$  pyramidal  $\langle a \rangle$  slip,  $\{10\bar{1}1\} < 11\bar{2}3 >$  pyramidal 1<sup>st</sup>  $\langle c+a \rangle$  slip and  $\{11\bar{2}2\} < 11\bar{2}3 >$  pyramidal 2<sup>nd</sup>  $\langle c+a \rangle$  slip [6–9]. The  $\langle a \rangle$  dislocations can only provide 4 independent slip systems, so the pyramidal  $\langle c+a \rangle$  dislocations need to be activated to satisfy Von Mises criterion [10]. In addition to the dislocation slip, twinning is also one of the important deformation modes in zirconium alloys, which usually happens at low temperatures and high strain rates [11]. There are four common deformation twins in  $\alpha$ -Zr alloys:  $\{10\bar{1}2\} < 1\bar{1}01 >$  and

$\{11\bar{2}1\} < 11\bar{2}6 >$  extension twins rotates the  $c$ -axis by  $85.22^\circ$  and  $34.84^\circ$ , respectively.  $\{11\bar{2}2\} < 11\bar{2}3 >$  and  $\{-1101\} < 10\bar{1}2 >$  compression twins reoriented  $64.22^\circ$  and  $57.05^\circ$ , respectively [12–14]. Hence, formation of deformation twins may cause large lattice rotations and change the crystalline texture of zirconium alloys.

Many researchers have studied the slip and twinning behavior of zirconium alloys during plastic deformation. Tenckhoff et al. [15] studied the plastic deformation behavior during the rolling of polycrystalline zirconium plates. The results showed that  $\{11\bar{2}2\}$  twins nucleated commonly in grains with an angle of  $0\text{--}50^\circ$  between the  $c$ -axis of the grains and ND, and  $\{10\bar{1}2\}$  twins produced abundantly at an angle of  $50\text{--}90^\circ$ , whereas  $\{11\bar{2}1\}$  twins and prismatic  $\langle a \rangle$  slips were activated in all grain orientations. Juan et al. [16] investigated the plastic deformation behavior of strongly basal plane texture high-purity zirconium under various conditions by combination of experimental and simulation methods. It has been found that when compression direction perpendicular to the  $c$ -axis of most grains, the deformation was coordinated by a combination of mainly  $\{10\bar{1}2\}$  primary twins,  $\{11\bar{2}2\}$  double twins, and prismatic slip. Knezevic et al. [11] adopted a combination of compression experiments and multi-scale polycrystal modeling to find that the predominant compression twin type for polycrystalline zirconium deformation at temperatures higher than 673 K would change from  $\{11\bar{2}2\}$  twins to  $\{10\bar{1}1\}$  twins. Rodriguez

\* Corresponding authors.

E-mail addresses: [yexianjue@zju.edu.cn](mailto:yexianjue@zju.edu.cn) (X. Ye), [yfzhang76@zju.edu.cn](mailto:yfzhang76@zju.edu.cn) (Y. Zhang).