

同行专家业内评价意见书编号： 20250856103

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： 刘浩

学号： 12360002

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21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)

通过本次实践，目前我可以独立进行从材料热处理到力学性能测试及微观组织观察的一系列实验，可以熟练操作热处理炉、线切割、镶嵌机、磨样机、振动抛光机等制样设备；光学显微镜、扫描电子显微镜等组织观察设备；以及万能试验机、显微硬度计、持久蠕变机等性能测试设备，同时还可以利用原位扫描电镜进行的原位拉伸实验等。本次专业实践提升了我的科学素养。通过深度参与课题项目，认识到要以严谨科学的态度开展实验，通过查阅文献对研究的内容有一个清晰的认识，并通过预实验对项目有一个合理预期；要客观地分析、总结计算实验数据；要注重经验的积累；遇到问题不要逃避，要及时与导师的沟通，不断地查阅文献，了解出现问题的根源并解决问题。这是只通过理论学习不能达到的，只有自己亲自参加才能得到锻炼。

2. 工程实践的经历(不少于200字)

对低膨胀高温合金进行微观组织结构及演化规律分析，建立合金的微观结构与工艺参数的关系；获得合金在不同高温应力长期作用下微观结构、析出相的演化规律；研究合金的变形机理，提出低膨胀高温合金的强韧化机制。

- (1) 利用大气热处理炉，同时结合显微硬度计，初步确定合金的再结晶温度与热处理制度。
- (2) 低膨胀高温合金热处理前后的组织结构特征：包括晶粒度、 γ' 强化相的形态与分布、TCP相、碳化物的形貌特征等；分析不同形态下合金的显微组织以及析出相的形成机理。
- (3) 长期高温热暴露过程的组织稳定性分析：包括晶粒的长大， γ' 强化相的粗化、有害相的析出和晶界碳化物的演化过程。
- (4) 利用万能试验机与蠕变持久试验机，研究合金在变形过程中的微观结构演化与机理分析：对不同应力和温度条件下的低膨胀合金，利用扫描电镜等手段，分析强化相 γ' 演化过程中 γ/γ' 界面成分、 γ' 尺寸及形貌的变化规律；获得长期持久条件下微观组织的演化规律；提出合金的变形机理。
- (5) 原位力学性能与结构分析：利用扫描电镜并结合原位拉伸设备，对合金进行室温与高温的原位拉伸，研究其在断裂过程中组织的原位动态演化规律。

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）

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

一、问题背景

燃煤发电产业的升级是我国实现节能减排和碳中和的重要战略之一，而高效清洁的先进超超临界电站技术正是全球各国争相研发的发电技术前沿。为了提升超超临界机组的效率，减少CO₂等气体排放和燃煤消耗，提高机组的蒸汽参数已成为最具可行性和继承性的途径。随着蒸汽温度和压力的提高，对螺栓材料提出了更高的要求。传统的螺栓材料（如12Cr铁素体不锈钢和合金钢等）仅适用于600℃以下的汽轮机，而对于蒸汽温度超过600℃的汽轮机，必须选用镍基低膨胀高温合金作为紧固螺栓材料。高温高压的蒸汽服役环境要求这些材料具有良好的长期组织稳定性、高强度和优异的蠕变性能。然而，传统镍基高温合金存在以下问题：

1. 组织退化：长期服役中 γ' 相粗化、晶界碳化物粗化，导致服役寿命衰减。
2. 热膨胀系数不匹配：与汽缸材料（低膨胀合金钢）的膨胀差异导致预紧力损失。
3. 中温低塑性（ITLP）：在600-800 °C范围内，材料延伸率显著下降，易引发脆性断裂。针对某新型超超临界机组设计需求，亟需开发一种镍基低膨胀高温合金，解决上述工程难题。

二、问题分析与知识综合

基于文献调研与前期实验，团队锁定以下关键科学问题：

- (1) 组织设计矛盾：提高 γ' 相体积分数可增强强度，但会加剧热膨胀系数升高。
- (2) 中温低塑性机理：文献指出，ITLP与等强温度有关，在等强温度附近，晶界与晶内竞争性参与变形导致合金快速硬化导致断裂。
- (3) 蠕变寿命优化： γ' 相粗化速率和晶界碳化物稳定性直接影响抗蠕变性能。

综合知识应用：

- (1) 材料热力学：通过JMatPro计算平衡相图，并结合差热分析DSC，确定 γ' 相、碳化物的析出温度区间。
- (2) 金属学与热处理：设计欠时效工艺，利用动态析出平衡强度与组织稳定性。
- (3) 断裂力学：结合原位拉伸观察裂纹萌生-扩展路径，解析ITLP机制。
- (4) 蠕变理论：基于Orowan机制与位错攀移模型，优化晶内/晶界协同变形能力。

三、解决方案设计与实施

1. 合金成分与热处理工艺优化

成分设计：以Haynes系列的Ni-Mo-Cr系合金为基础，控制Fe与Cr元素的质量分数，找到最优的Mo/(Fe+Cr)原子比，调整Al、Ti总含量找到 γ' 相的最优体积分数，限制W、Mo总含量，整体调控C、B、Zr的含量，综合考虑Cr、Mo元素的添加。

热处理创新：结合先进超超临界机组服役特点和Ni-Mo-Cr系低膨胀高温合金的热处理工艺，设计了一种欠时效的热处理工艺。该工艺结合了高温固溶、快速冷却和三步时效处理，有效控制了晶粒内部强化相 γ' 的尺寸和体积分数，确保在服役过程中 γ' 相能够动态析出和粗化，使合金的强度表现出先增加后降低的演变趋势，从而延缓了合金性能和组织的退化，进而提高合金的服役寿命。此外，链状碳化物均匀分布在晶界上，增强了晶界结合力，抑制了晶界滑移，并延缓了空洞的形核和聚集。

长时组织稳定性

合金在拟服役温度下具有良好的组织稳定性，长时热暴露后未发现有害相的析出。热暴露2300h后，晶粒尺寸变化不明显，仅略有增加；晶界碳化物的形貌和尺寸几乎未发生明显变化；在长时热暴露中， γ' 相的尺寸逐渐增大，热暴露2300 h后仍保持球状形貌， γ' 相的粗化遵循LSW理论。

2. 中温低塑性调控

通过离位和原位拉伸试验揭示了ITLP与等强温度 (ECT) 之间的关系，并通过微观结构设计调控了晶界和晶内强度，成功实现了ITLP区的移动甚至消除。

- (1) 合金的塑性主要受初期的变形积累阶段和裂纹萌生阶段的控制。裂纹萌生后，裂纹并不会立即扩展；当裂纹数量达到临界值时，裂纹会迅速扩展，最终导致断裂。
- (2) 随着拉伸温度的升高，变形行为发生变化，从室温下晶界对晶内滑移的阻碍，到低塑性点附近晶界滑动与晶内滑移的竞争性激活，最终在高温下晶界与晶内的协调变形。中温区的ITLP现象归因于晶界与晶内区域强度相当所导致的竞争性硬化。
- (3) 通过调节晶界和晶内强度，可以移动甚至消除ITLP区。强化晶界有助于将ITLP区移至更高温度范围，而降低晶界强度则会导致整体塑性下降，因此，消除ITLP的最佳方法是强化晶界。

(4) 在中温区，细小晶粒之间的滑移和旋转可以产生足够的硬化效应。因此，晶粒细化被证明是可以提升合金在中温下强度和塑性的一种有效方法。

四、效果验证

合金的长期组织稳定性良好，拟服役温度下长时热暴露2300 h后，未析出有害相，奥氏体晶粒与晶界碳化物保持稳定， γ' 相仍保持球状形貌均匀分布在基体中， γ' 相粗化过程遵循LSW模型，粗化主要受Al、Ti元素扩散速率控制。

热暴露前后，合金的屈服强度均在600 MPa以上，延伸率均在20%以上，中温低塑性得到控制。热处理态合金在750 °C/250 MPa条件下的蠕变寿命为1970 h，在800 °C/200 MPa条件下，蠕变寿命为524 h。随着热暴露时间的增加，合金的蠕变寿命先增加后下降。在热暴露1000 h的情况下，合金的蠕变寿命最高，表现出最强的蠕变抗力。

五、总结与展望

本案例通过多学科知识融合，解决了低膨胀高温合金的中温低塑性、蠕变寿命与组织稳定性难题，阐明了“微观组织结构-变形机制-断裂机制-力学性能”之间的相互关系，为合金的工程化应用提供了理论依据和数据支持。主要创新点如下：

- (1) 考虑先进超超临界机组长时低应力的服役特点，设计了一种欠时效的热处理工艺，可以延缓服役过程中合金性能和组织的退化，进而提高合金的服役寿命。
- (2) 通过对低膨胀高温合金在不同温度/应力作用下微观组织结构及演化规律的深入分析，建立了合金“微观组织结构-变形机制-断裂机制-力学性能”的关系。
- (3) 揭示了低膨胀高温合金出现中温低塑性的机理，通过调节晶界和晶内强度，可以实现中温低塑性区域的移动甚至消除。

(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
Influence of thermal exposure on microstructural stability and tensile properties of a new Ni-base superalloy	一级期刊	2022年11月12日	Journal of Materials Research and Technology	1/10	SCI期刊收录
一种无中温脆性的高强镍基变形高温合金	授权发明专利	2023年10月20日	专利号：ZL202211113006.0	2/6	
一种镍基变形高温合金的欠时效热处理工艺	授权发明专利	2023年03月21日	专利号：ZL202211112998.5	2/6	

2.其他代表作【主持或参与的课题研究项目、科技成果应用转化推广、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】

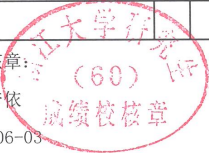
(三) 在校期间课程、专业实践训练及学位论文相关情况	
课程成绩情况	按课程学分核算的平均成绩： 86 分
专业实践训练时间及考核情况(具有三年及以上工作经历的不作要求)	累计时间： 1.5 年（要求1年及以上） 考核成绩： 89 分
本人承诺	
个人声明：本人上述所填资料均为真实有效，如有虚假，愿承担一切责任，特此声明！	
申报人签名： 刘 浩 .	

浙江大学研究生院
攻读博士学位研究生成绩表

学号：12360002	姓名：刘浩	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：30.0学分			已获得：38.0学分				入学年月：2023-02		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
2020-2021学年秋季学期	研究生论文写作指导		1.0	79	专业学位课	2020-2021学年春季学期	数学建模		2.0	74	跨专业课
2020-2021学年秋季学期	研究生英语基础技能		1.0	免修	跨专业课	2020-2021学年春季学期	金属材料制造与评价实践		1.0	89	专业选修课
2020-2021学年秋季学期	金属学原理与加工工艺学		2.0	90	专业选修课	2020-2021学年春夏学期	创业能力建设		2.0	87	专业选修课
2020-2021学年秋季学期	研究生英语		2.0	免修	公共学位课	2020-2021学年夏季学期	材料现代研究方法与应用		2.0	88	专业选修课
2020-2021学年秋季学期	先进合金材料及工程研究		2.0	91	专业选修课	2022-2023学年春季学期	中国马克思主义与当代		2.0	86	公共学位课
2020-2021学年秋冬学期	中国特色社会主义理论与实践研究		2.0	89	公共学位课	2022-2023学年春季学期	材料与化学工程技术进展		2.0	86	专业学位课
2020-2021学年冬季学期	工程伦理		2.0	94	专业学位课	2022-2023学年夏季学期	材料工程产业及发展		2.0	86	专业选修课
2020-2021学年冬季学期	位错理论与材料强化		2.0	90	专业选修课	2022-2023学年夏季学期	材料科学与工程专题		2.0	82	专业学位课
2020-2021学年冬季学期	材料加工技术		2.0	84	专业选修课	2023-2024学年秋季学期	实验安全教育		1.0	94	专业选修课
2020-2021学年冬季学期	工程中的有限元方法		2.0	92	专业选修课	2023-2024学年秋冬学期	工程管理		2.0	90	专业学位课
2020-2021学年春季学期	自然辩证法概论		1.0	84	公共学位课	2024-2025学年秋季学期	研究生英语能力提升		1.0	免修	公共学位课

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、及格、不及格）。

2. 备注中“*”表示重修课程。

学院成绩校核章：

成绩校核人：张梦依

打印日期：2025-06-03



Available online at www.sciencedirect.com
jmr&t
 Journal of Materials Research and Technology
 journal homepage: www.elsevier.com/locate/jmrt



Original Article

Influence of thermal exposure on microstructural stability and tensile properties of a new Ni-base superalloy



Hao Liu ^{a,b}, Xinbao Zhao ^{a,*}, Yong Yuan ^c, Yingying Dang ^c, Weiqi Li ^a,
 Jiachen Xu ^{a,b}, Yuan Cheng ^a, Quanzhao Yue ^a, Yuefeng Gu ^{a,**}, Ze Zhang ^a

^a Institute of Superalloys Science and Technology, School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China

^b Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China

^c Xi'an Thermal Power Research Institute Co. Ltd., Xi'an 710032, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 18 October 2022

Accepted 8 November 2022

Available online 12 November 2022

Keywords:

Ni-base superalloy

Microstructure

Thermal exposure

Tensile deformation

ABSTRACT

The influence of long-term thermal exposure on microstructure evolution and tensile behavior of a new wrought γ' -hardened Ni-base superalloy at different temperatures are investigated. The experimental superalloys are thermal exposure at 650 °C for different times up to 2300 h and tensile tests are performed in both heat treatment and thermal exposure conditions. The results show that some discontinuous carbides precipitate at the grain boundaries and spherical γ' precipitates homogeneously disperse within the γ matrix after heat treatment. During thermal exposure, the γ' precipitates remain spherical morphology, and the coarsening behavior of γ' conforms to the LSW model. The tensile strength of the experimental superalloy after heat treatment generally shows a downward trend with the increase of tensile temperature while the elongation reaches a maximum at 650 °C. After thermal exposure, the tensile strength of the experimental superalloy has improved while the elongation slightly decreases.

© 2022 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introduction

As raising the operating temperature and pressure of the coal-fired power generation not only can notably reduce greenhouse-gas emissions as well as fuel consumption, but also increase the thermal efficiency, the advanced ultra-supercritical (A-USC) technology with the inlet steam

temperature of 650–760 °C and pressure of around 35 MPa has long been designed for the next generation of coal-fired power plants [1–4]. In current usage, ferritic steels are used up to approximately 600 °C [3–5], and austenitic heat-resistant steels are used up to approximately 650 °C [6–8]. In order to meet the requirements of materials for high-temperature components of A-USC steam turbines, Ni-base superalloys

* Corresponding author.

** Corresponding author.

E-mail addresses: superalloys@zju.edu.cn (X. Zhao), guyf@zju.edu.cn (Y. Gu).
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.050>

2238-7854/© 2022 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

经检索《Web of Science》、《Journal Citation Reports (JCR)》及《中国科学院文献情报中心期刊分区表》数据库,《Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)》收录论文及其期刊影响因子、分区情况如下。(检索时间:2025年3月19日)

第1条,共1条

标题:Influence of thermal exposure on microstructural stability and tensile properties of a new Ni-base superalloy

作者:Liu, H(Liu, Hao);Zhao, XB(Zhao, Xinbao);Yuan, Y(Yuan, Yong);Dang, YY(Dang, Yingying);Li, WQ(Li, Weiqi);Xu, JC(Xu, Jiachen);Cheng, Y(Cheng, Yuan);Yue, QZ(Yue, Quanzhao);Gu, YF(Gu, Yuefeng);Zhang, Z(Zhang, Ze);

来源出版物:JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH AND TECHNOLOGY-JMR&T 卷:21

页:4462-4472 DOI:10.1016/j.jmrt.2022.11.050 出版年:NOV-DEC 2022

入藏号:WOS:000948507700008

文献类型:Article

地址:

[Liu, Hao; Zhao, Xinbao; Li, Weiqi; Xu, Jiachen; Cheng, Yuan; Yue, Quanzhao; Gu, Yuefeng; Zhang, Ze] Zhejiang Univ, Inst Superalloys Sci & Technol, Sch Mat Sci & Engn, Hangzhou 310027, Zhejiang, Peoples R China.

[Liu, Hao; Xu, Jiachen] Zhejiang Univ, Polytech Inst, Hangzhou 310027, Zhejiang, Peoples R China.

[Yuan, Yong; Dang, Yingying] Xian Thermal Power Res Inst Co Ltd, Xian 710032, Peoples R China.

通讯作者地址:

Zhao, XB; Gu, YF (corresponding author), Zhejiang Univ, Inst Superalloys Sci & Technol, Sch Mat Sci & Engn, Hangzhou 310027, Zhejiang, Peoples R China.

电子邮件地址:superalloys@zju.edu.cn; guyf@zju.edu.cn

IDS 号:9V6NS

ISSN:2238-7854

eISSN:2214-0697

期刊《Journal of Materials Research and Technology-JMR&T》2023年的影响因子为6.2,五年影响因子为6.3。

期刊《Journal of Materials Research and Technology-JMR&T》2023年的JCR分区情况为:

Edition	JCR® 类别	类别中的排序	JCR 分区
SCIE	MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY	102/439	Q1
SCIE	METALLURGY & METALLURGICAL ENGINEERING	6/90	Q1

期刊《Journal of Materials Research and Technology-JMR&T》2022年的影响因子为6.4,五年影响因子为6.4。

期刊《Journal of Materials Research and Technology-JMR&T》2022年的JCR分区情况为:

Edition	JCR® 类别	类别中的排序	JCR 分区
---------	---------	--------	--------

《SCI-EXPANDED》收录、《JCR》期刊影响因子、分区及中科院期刊分区证明

SCIE	MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY	86/344	Q1
SCIE	METALLURGY & METALLURGICAL ENGINEERING	6/79	Q1

期刊《Journal of Materials Research and Technology-JMR&T》2023 年升级版的中科院期刊分区情况为:

刊名	Journal of Materials Research and Technology-JMR&T		
年份	2023		
ISSN	2238-7854		
	学科	分区	Top 期刊
大类	材料科学	2	是
小类	METALLURGY & METALLURGICAL ENGINEERING 冶金工程	1	-
小类	MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY 材料科学: 综合	2	-

注:

1. 期刊影响因子及分区情况最新数据以 JCR 数据库、《中国科学院文献情报中心期刊分区表》最新数据为准。
2. 以上检索结果来自 CALIS 查收查引系统。
3. 以上检索结果均得到委托人及被检索作者的确认。



证书号第6407740号



发明专利证书

发明名称：一种无中温脆性的高强镍基变形高温合金

发明人：赵新宝;刘浩;谷月峰;张泽;岳全召;夏万顺

专利号：ZL 2022 1 1113006.0

专利申请日：2022年09月14日

专利权人：浙江大学

地址：310058 浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号

授权公告日：2023年10月20日

授权公告号：CN 115449670 B

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，颁发发明专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为二十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长
申长雨

申长雨





证书号第6407740号

专利权人应当依照专利法及其实施细则规定缴纳年费。本专利的年费应当在每年09月14日前缴纳。未按照规定缴纳年费的，专利权自应当缴纳年费期满之日起终止。

申请日时本专利记载的申请人、发明人信息如下：

申请人：

浙江大学

发明人：

赵新宝;刘浩;谷月峰;张泽;岳全召;夏万顺

证书号第5798994号



发明专利证书

发明名称：一种镍基变形高温合金的欠时效热处理工艺

发明人：赵新宝;刘浩;谷月峰;张泽;岳全召;夏万顺

专利号：ZL 2022 1 1112998.5

专利申请日：2022年09月14日

专利权人：浙江大学

地址：310058 浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号

授权公告日：2023年03月21日

授权公告号：CN 115491620 B

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，颁发发明专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为二十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长
申长雨

申长雨





证书号第5798994号

专利权人应当依照专利法及其实施细则规定缴纳年费。本专利的年费应当在每年09月14日前缴纳。
未按照规定缴纳年费的，专利权自应当缴纳年费期满之日起终止。

申请日时本专利记载的申请人、发明人信息如下：

申请人：

浙江大学

发明人：

赵新宝;刘浩;谷月峰;张泽;岳全召;夏万顺