

分类号 _____

密 级 _____

UDC _____

单位代码 10154

★★ 注：盲审论文采用电子版送校外进行评审，隐藏信息完成后将论文转为 PDF 格式进行送审，并检查是否按要求隐藏了所有相关信息。

辽宁工业大学 硕 士 学 位 论 文

一种镍基单晶高温合金的组织演化及高温力学性能

注：保留专业名称

专 业：材料物理与化学

研 究 生：

指导教师：

注：研究生姓名、指导教师姓名与职称信息字体颜色可采用“白色”处理。

二〇二一年三月

一种镍基单晶高温合金的组织演化及高温力学性能

注：研究生姓名处字体
颜色采用“白色”处理。

辽宁工业大学硕士学位论文
材料物理与化学

注：保留专业名称

二〇二二年

辽宁工业大学 硕 士 学 位 论 文

一种镍基单晶高温合金的组织演化及高温力学性能

专 业：材料物理与化学

研 究 生：

指导教师：

注：保留专业名称

注：研究生姓名、指导教师姓名与职称信息字体颜色采用“白色”处理。

辽宁工业大学 材料科学与工程学院

二〇二一年三月

Master Thesis

Analysis on Cu-Al-Ni Alloys Refinement Superelastic Damping Characteristics and Its Microstructures

注：保留专业英文名称

Speciality: Materials Physics and Chemistry

Candidate:

Supervisor(s):

注：英文研究生姓名、指导教师姓名与职称信息字体颜色采用“白色”处理。

注意对指导教师处(s)的处理。

Liaoning University of Technology

Jinzhou, 121001, China

March 2021

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得辽宁工业大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所作的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：

年 月 日

注：盲审论文，此页无需研究生与指导教师的签名，但应保留此页，以确保论文的完整性。

关于论文使用授权的说明

本人完全了解辽宁工业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交的复印权，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

研究生签名：

导师签名：

年 月 日

摘 要

自 1861 年金属材料中的电迁移或电传输现象被发现, 电流对金属材料的影响一直被各国学者所关注。其中高密度脉冲电流作用下, 材料的制备过程、加工过程和热处理过程中出现的新现象引起了研究者的极大兴趣。

高温合金是标志国家科技发展水平及国防能力的重要金属材料。随着对高温合金性能要求的不断提高, 高温合金化程度也随之增加, 出现了诸如加工塑性差、长期时效后韧性下降等瓶颈性问题。本研究利用脉冲电流对镍基高温合金进行改性, 研究脉冲电流作用下合金的组织演化和性能变化规律。

脉冲电流促进了 GH4199 合金的时效过程, 使 GH4199 合金中 γ 相和晶界 M₂₃C₆ 型碳化物迅速长大。理论计算表明: 脉冲电流处理降低了 GH4199 合金的扩散激活能, 脉冲电流使 GH3625 合金中的位错密度降低, 促进 GH3625 合金中孪晶和层错的形成。

脉冲电流退火处理促进了 GH4199 合金和 GH3 625 合金再结晶过程。对冷轧 GH4199 合金进行电脉冲退火 20min (处理温度达 6000℃), 合金已发生了再结晶, 且合金中存在两种尺寸的 M₆C 型碳化物, 而即使 800℃常规时效 40min, 亦未发现有再结晶出现。同样在 600℃下对 GH3625 合金脉冲电流退火 40min, 合金再结晶过程已经完成; 而 600℃常规退火处理 40min, 合金没有发生再结晶, 800℃常规退火处理 40min, 合金开始发生再结晶。

脉冲电流提高了 GH4199 合金室温屈服强度和抗拉强度, 而拉伸断裂延伸率可维持基本不变或稍有降低, 从而使 GH4199 合金获得更优异的力学性能。扫描电子显微镜的拉伸断口分析发现: 电脉冲时效后, 晶内尺寸较大的 M₆C 是微裂纹形成源。

总之, 本文研究了脉冲电流下镍基高温合金组织和性能的变化规律, 本研究结果为改善镍基高温合金的组织 and 力学性能提供了创新性的思路与途径。

关键词: 脉冲电流; 镍基高温合金; 时效; 再结晶; 晶界碳化物

Abstract

Since 1861, the phenomenon of electromigration or mass transportation in the metallic materials was discovered, the effects of electric current on metallic materials have been paid attention. The new phenomena caused by high density pulse current on the fabrication, working processing and heat treatment of the materials was focused with many researches.

Superalloy as one kind of the important metallic materials, it is said to be the level symbol of industry for a country. In order to adapt the increasing requirements, more alloying elements have to be added into the superalloys, it leads the poor deformability, especially, the decrease of toughness and plasticity after long-term aging. In the present study, a high density pulse current was used to improve the mechanical property of Nickel-base superalloys, and the mechanisms of microstructure evolution and mechanical property were also discussed.

Based on the experimental results, it can be found that the pulse current accelerated the aging process of GH4199 alloy, both the γ' phase and carbides on the grain boundary of GH4199 alloy are enlarged by the electropulsing. Theory calculation indicated that the diffusion activation energy of GH4199 alloy was decreased by the pulse current, the dislocation density was decreased and the twin and fault of GH3625 alloy formed easy by the electropulsing.

Based on the results of micro-tensile testing, it is notice that both the yielding strength and tensile strength of GH4199 alloy at room temperature can be improved by the pulse current, even if the fracture elongation somehow little decreased or kept at the same level as untreated one. With the examination by both TEM and SEM, it is found that the crack initial easy occurred round with the M₆C carbides in larger-size, which there are strong stress concentration at the interface between the M₆C carbides and matrix. Since both the M₆C carbides and matrix can be easy controlled by the electropulsing treatment, the mechanical properties can be improved with optimum treating parameters.

In summary, new effects of the pulse current on microstructure evolution and behaviors of deformation of Nickel-base superalloys have been found in the present research. Based on the present research, a new method for improving the microstructure and mechanical properties of Nickel-base superalloys can be considered.

Key words: electropulsing current; Nickel-base superalloy; aging; recrystallization; crystal carbides

目 录

摘 要.....	I
Abstract	II
1 绪论.....	1
1.1 引言	1
1.2 课题研究.....	1
1.3 国内外研究.....	1
1.4 课题研究内容	1
2 基本格式规范.....	2
2.1 图、表及公式格式规范.....	2
2.1.1 图的规范	2
2.1.2 表的规范	3
2.1.3 公式的规范	3
2.2 常见问题	4
2.2.1 图表分析	4
2.5 本章小结	4
3 结论.....	5
参考文献.....	6
攻读硕士期间发表学术论文情况	7
致 谢	8
附录 关于镍基材料工艺参数说明	9

1 绪论

1.1 引言

随着我国高等级公路的兴建，汽车的行驶速度有了很大程度的提高^[1]，而传统汽车悬架不能很好适应行驶工况和道路激励的多变性^[2,3,5-8]。……，具体表现如下：

(1) 随着对高温合金性能要求的不断提高，高温合金化程度也随之增加。

(2) 脉冲电流促进了 GH4199 合金的时效过程，使 GH4199 合金中 γ 相和晶界 M23C6 型碳化物迅速长大，主要表现在以下几个方面：

①脉冲电流处理降低了 GH4199 合金的扩散激活能。

②脉冲电流使 GH3625 合金中的位错降低，促进 GH3625 合金中孪晶和层错的形成。

③……

(3) ……

……

1.2 课题研究……

近年来，随着磁流变液体的研究取得重大突破，……

1.3 国内外研究……

……

1.4 课题研究内容

……

注：论文正文内容、图、表中若出现研究生姓名、导师姓名、职称信息，应将相关字体颜色采用“白色”字体和底纹均采用灰色进行处理。

2 基本格式规范

2.1 图、表及公式格式规范

2.1.1 图的规范

图在正文中的格式示例如图 2.1、2.2 所示。

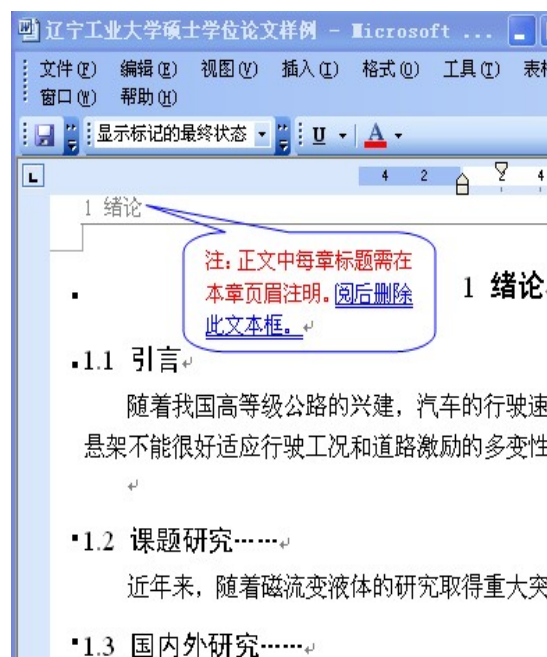
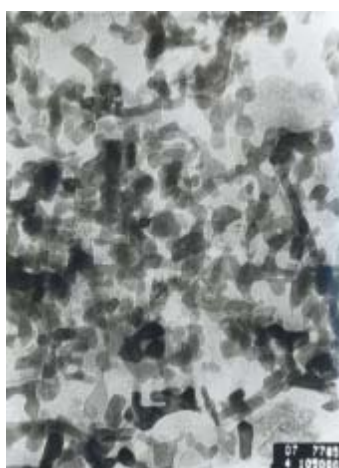
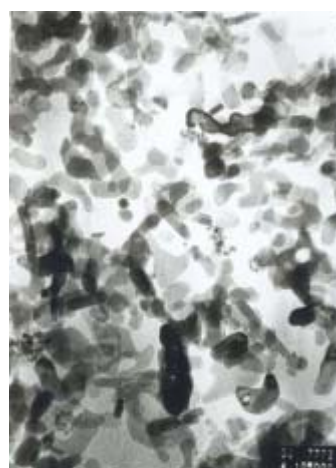


图 2.1 样式

Fig. 2.1 Manner



(a) 流动氮气



(b) 静态空气

图 2.2 不同的焙烧条件下样品的 TEM 照片

Fig. 2.2 The TEM picture of samples in different roasting conditions

2.1.2 表的规范

表在正文中的常用格式如表 2.1 至表 2.3 所示，请参考使用。

表 2.1 物流的概念和范围
Tab. 2.1 Conception and scope of logistics

本质	过程
途径或方法	规划、实施、控制
目标	效率、成本效益
活动或作业	流动与储存
处理对象	原材料、在制品、产成品、相关信息
范围	从原点（供应商）到终点（最终顾客）
目的或目标	适应顾客的需求（产品、功能、数量、质量、时间、价格）

由表 2.1 可以看出……

表 2.2 统计表
Tab. 2.2 Statistics table

产品	产量	销量	产值	比重
手机	11000	10000	500	50%
电视机	5500	5000	220	22%
计算机	1100	1000	280	28%
合计	17600	16000	1000	100%

由表 2.2 可以看出……

表 2.3 分栏表
Tab. 2.3 Column table

年度	产品	产量	销量	产值
2004	手机	11000	10000	500
	计算机	1100	1000	280
2005	手机	16000	13000	550
	计算机	2100	1500	320

由表 2.3 可以看出……

2.1.3 公式的规范

公式在正文中的常用格式如下所示：

$$LRI = 1 / \sqrt{1 + \left(\frac{\mu_R}{\mu_s} \right)^2 \left(\frac{\delta_R}{\delta_s} \right)^2} \quad (2.1)$$

$$H = \frac{nI}{S_{A3}\mu_0\mu_f(R_{mA1} + 2R_{mA2} + 2R_{mA3} + R_{mA4})} = \frac{nI}{S_{A3}\mu_0\mu_f R_m} \quad (2.2)$$

从式 (2.2) 可以看出……

2.2 常见问题

2.2.1 图表分析

……

2.5 本章小结

……

3 结论

经理论分析和实验……，得出以下结论：

- (1) 脉冲电流退火处理促进了 GH4199 合金和 GH3 625 合金再结晶过程。
- (2) 脉冲电流提高了 GH4199 合金室温屈服强度和抗拉强度，而拉伸断裂延伸率可维持基本不变或稍有降低，从而使 GH4199 合金获得更优异的力学性能。
- (3) ……
……

参考文献

- [1] 高景德, 王祥珩. 交流电机的多回路理论[J]. 清华大学学报, 1987, 27(1): 1-8.
- [2] 蒋有旭, 张之祥. 交流电机研究[J]. 北京大学学报, 1989(1): 1-8.
- [3] Chen S, Billing S A, Cowan C F. Practical identification of MARMAX models[J]. Int J Control, 1990, 52(6): 1327-1350.
- [4] 竺可桢. 物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1973.
- [5] 霍夫斯基. 禽病学: 下册. 第 7 版[M]. 胡祥璧译. 北京: 农业出版社, 1981.
- [6] Aho A V, Sethi R, Ullman J D. Compilers Principles[M]. New York: Addison Wesley, 1986.
- [7] 辛希孟. 信息技术与信息服务国际研讨会论文集: A 集[C]. 北京: 中国社会科学出版社, 1994: 1-4.
- [8] Dupont B. Bone marrow transplantation in severe combined immunodeficiency[C]. In: White H J, Smith R, eds. Proc. of the 3rd Annual Meeting of Int Soc for Experimental Hematology (ISEH). Houston: ISEH, 1974: 44-46.
- [9] 张竹生. 微分半动力系统的不变集[D]. 北京: 北京大学, 1983.
- [10] 姜锡洲. 一种温热外敷药制备方法[P]. 中国专利, 881056073. 1989-07-26.
- [11] 冯西桥. 核反应堆压力管道与压力容器的 LBB 分析[R]. 北京: 清华大学核能技术设计研究院, 1997.
- [12] GB/T 16159—1996. 汉语拼音正词法基本规则[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [13] 谢希德. 创新学习的新思路[N]. 人民日报, 1998-12-25(10).
- [14] 王明亮. 关于中国学术期刊标准化数据系统工程的进展[EB/OL].
<http://www.caicd.edu.cn/pub/wml.txt/980810-2.html>, 1998-08-16/1998-10-04.
- [15]

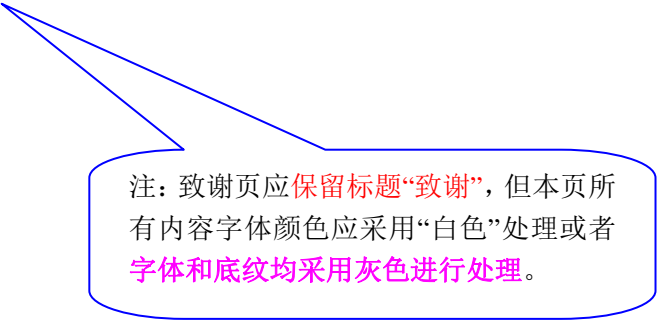
注: 参考文献部分无需隐藏任何信息。

攻读硕士期间发表学术论文情况



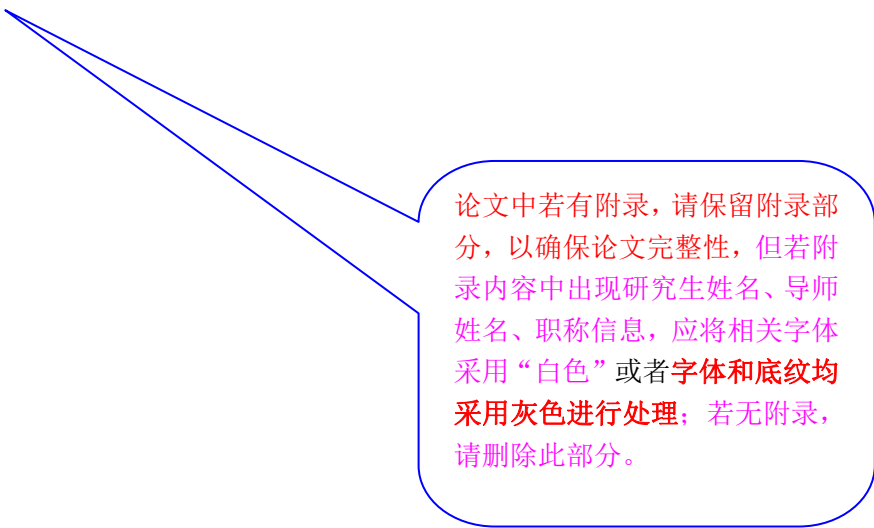
若有论文发表情况，此页应保留标题“攻读硕士期间发表学术论文情况”，但本页所有内容字体颜色应采用“白色”处理或者字体和底纹均采用灰色进行处理；若无发表论文情况，此页应删除。

致 谢



注：致谢页应保留标题“致谢”，但本页所有内容字体颜色应采用“白色”处理或者字体和底纹均采用灰色进行处理。

附录 关于镍基材料工艺参数说明



论文中若有附录，请保留附录部分，以确保论文完整性，但若附录内容中出现研究生姓名、导师姓名、职称信息，应将相关字体采用“白色”或者字体和底纹均采用灰色进行处理；若无附录，请删除此部分。