

等径弯角挤压法 制备的钛镍基合金的 摩擦学性能研究

李振华 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

自然科学基金、浙江海洋大学出版基金和
通大学优秀博士论文基金资助

等径弯角挤压法 制备的钛镍基合金的 摩擦学性能研究

李振华 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书首次利用高温 ECAE 工艺对钛镍基合金进行加工处理,研究了高温 ECAE 工艺对于钛镍基合金材料微观组织和摩擦学性能的影响,并采用示差热分析和拉伸实验等手段对钛镍基合金材料的马氏体相转变行为和伪弹性进行了表征,系统地研究了干摩擦和油润滑条件下钛镍基合金材料的摩擦磨损性能,获得了其摩擦磨损性能随试验参数的变化规律及其磨损机理。开拓了高温 EACE 工艺研究的新领域,为钛镍基合金材料性能的改善及其在工程领域的应用提供了依据。

本书适用于高校机械工程等相关专业师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

等径弯角挤压法制备的钛镍基合金的摩擦学性能研究/
李振华著. —上海:上海交通大学出版社,2017

ISBN 978-7-313-18703-1

I. ①等… II. ①李… III. ①钛基合金—镍基合金—摩擦—研究 IV. ①TG139

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 002392 号

等径弯角挤压法制备的钛镍基合金的摩擦学性能研究

著 者:李振华

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:谈 毅

印 制:虎彩印艺股份有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/32

字 数:144 千字

版 次:2018 年 1 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-18703-1/TG

定 价:78.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021—64071208

经 销:全国新华书店

印 张:6.875

印 次:2018 年 1 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0769—85252189

前言

PREFACE

钛镍基合金除了具有优良的形状记忆效应和伪弹性外,还具有良好的耐磨性能,可望成为摩擦部件的良好选材,具有很好的工业应用前景。然而,由于钛镍基合金强度高、低温塑性差,难以通过常规工艺使其具有优异的综合性能,极大地限制了材料性能的发挥。

本书针对钛镍基合金低温塑性差的特性,利用先进的等径弯角挤压技术,对钛镍基合金进行高温 ECAE 处理,细化了钛镍基合金的微观组织,改善了钛镍基合金的伪弹性和显微硬度,从而提高了钛镍基合金材料的摩擦学性能,取得了原创性的研究成果。

(1)采用高温 ECAE 工艺对钛镍基合金进行处理,通过显微组织分析,研究了预热温度、挤压道次和热处理温度对钛镍基合金显微组织的影响,确定了钛镍基合金的高温 ECAE 加工工艺,并且探讨了高温 ECAE 工艺细化钛镍基合金组织机理。结果表明,预热温度是决定钛镍基合金高温 ECAE 加工工艺能否顺利进行以及组织细化程度的关键。当预热温度是 750°C 时,钛镍基合金不仅实现了高温 ECAE 的成功挤压,而且显著细化了钛镍基合金的微观组织。

(2)从热力学角度分析了高温 ECAE 工艺对钛镍基合金马氏体相转变温度和伪弹性应变回复的影响,通过示差热(DSC)分析和伪弹性分析,探讨了高温 ECAE 及随后的热处理工艺对钛镍基合金马氏体相转变和伪弹性作用的机理。结果表明,高温 ECAE 工艺降低了马氏体相转变温度,扩大了钛镍基合金伪弹性范围;随后的热处理工艺降低了钛镍基合金组织的内应力,使其组织的不均匀性得到改善,并且通过热处理,析出了第二相,强化了基体,提高了母相强度,从而改善了钛镍基合金的摩擦学性能。

(3)采用高温 ECAE 及随后的热处理工艺制备得到了微米晶钛镍基合金块体材料,系统地研究了钛镍基合金在干摩擦和油润滑条件下的摩擦磨损性能。结果表明,高温 ECAE 工艺大大提高了钛镍基合金材料的抗摩擦磨损性能,并且在相同的试验条件下,经过高温 ECAE 及热处理后的钛镍基合金试样的摩擦学性能显著优于未挤压和经过挤压无热处理的钛镍基合金试样的摩擦学性能。

(4)研究了钛镍基合金在干摩擦和油润滑条件下的摩擦磨损机理。干摩擦时,未挤压钛镍基合金的磨损机理主要为塑性变形、氧化和粘着磨损,经过高温 ECAE 及随后的热处理工艺后,塑性变形和粘着磨损大大减少。油润滑时,由于在摩擦副表面形成油膜,将钛镍基合金材料与偶件表面隔开,油流带走摩擦热,阻止了塑性变形和粘着磨损,主要的磨损机理为轻微的磨粒磨损。

(5)探讨了高温 ECAE 及随后的热处理工艺对钛镍基合金材料摩擦学性能影响的作用机理,高温 ECAE 及随后的热处理工艺可显著细化钛镍基合金的微观组织,提高钛镍基合金的伪弹性和

显微硬度,在磨损过程中减小了塑性区域面积,增强了材料弹性变形能力,从而减小了磨粒的塑性嵌入,降低了材料的磨损;当热处理温度为 500℃时,钛镍基合金的伪弹性和显微硬度达到了较好的结合,从而导致较好的摩擦学性能。

本书首次利用高温 ECAE 工艺对钛镍基合金进行加工处理,研究了高温 ECAE 工艺对于钛镍基合金材料微观组织和摩擦学性能的影响,并采用示差热分析和拉伸实验等手段对钛镍基合金材料的马氏体相转变行为和伪弹性进行了表征,系统地研究了干摩擦和油润滑条件下钛镍基合金材料的摩擦磨损性能,获得了其摩擦磨损性能随试验参数的变化规律及其磨损机理。开拓了高温 ECAE 工艺研究的新领域,为钛镍基合金材料性能的改善及其在工程领域的应用提供了依据。

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 选题背景及研究意义	3
1.1.1 选题背景	3
1.1.2 研究意义	5
1.2 TiNi 基形状记忆合金研究	7
1.2.1 TiNi 基合金的发展概况	7
1.2.2 TiNi 基合金的基本特性	8
1.2.3 TiNi 基合金的摩擦学性能研究	15
1.2.4 TiNi 基合金的应用	17
1.3 等径弯角挤压工艺研究	19
1.3.1 等径弯角挤压工艺的发展	19
1.3.2 等径弯角挤压工艺原理	20
1.3.3 等径弯角挤压工艺参数	21
1.3.4 等径弯角挤压工艺对材料微观结构的影响	23
1.3.5 等径弯角挤压工艺对材料力学性能的影响	25
1.4 本书研究拟解决的关键问题	27
1.5 本书研究的主要内容	29

第 2 章 TiNi 基合金高温 ECAE 工艺制备及实验方法	31
2.1 实验材料	33
2.1.1 TiNi 基形状记忆合金	33
2.1.2 H13 钢	33
2.1.3 GCr15 钢	34
2.2 实验装置	35
2.2.1 实验模具	35
2.2.2 挤压机	36
2.2.3 箱式电阻炉	36
2.3 试样制备	37
2.3.1 原料准备	37
2.3.2 合金熔炼	37
2.3.3 润滑剂的选择	38
2.3.4 试样预处理	38
2.3.5 ECAE 加工工艺	39
2.4 实验方法	40
2.4.1 拉伸性能实验	40
2.4.2 相变温度的测量	41
2.4.3 摩擦学性能实验	41
2.4.4 显微硬度测定	42
2.4.5 组织结构分析	43
第 3 章 TiNi 基合金显微组织及力学性能研究	45
3.1 引言	47

3.2 ECAE 对 TiNi 合金显微组织的影响	49
3.2.1 ECAE 时的宏观流动规律	49
3.2.2 预热温度对显微组织的影响	52
3.2.3 挤压道次对显微组织的影响	56
3.2.4 ECAE 变形后组织稳定性分析	58
3.3 ECAE 对 TiNiFe 合金显微组织的影响	62
3.4 ECAE 细化组织机理分析	63
3.5 显微硬度分析	65
3.6 力学性能分析	67
3.7 本章小结	69
第 4 章 TiNi 基合金相转变行为及伪弹性能研究	71
4.1 引言	73
4.2 热力学分析	75
4.2.1 相转变的热力学特性	75
4.2.2 伪弹性应变回复的热力学分析	78
4.3 TiNi 合金相转变行为和伪弹性分析	80
4.3.1 相转变行为的分析	80
4.3.2 伪弹性分析	84
4.3.3 伪弹性与马氏体相变温度的变化关系	86
4.4 TiNiFe 合金相转变行为和伪弹性分析	89
4.5 本章小结	90

第 5 章 TiNi 合金摩擦学性能研究	93
5.1 引言	95
5.2 试验方法	96
5.3 TiNi 合金的摩擦磨损性能分析	97
5.3.1 ECAE 对 TiNi 合金摩擦学性能的影响	97
5.3.2 热处理对 TiNi 合金摩擦学性能的影响	100
5.3.3 TiNi 合金摩擦磨损动力学研究	104
5.3.4 载荷及滑动速度对 TiNi 合金摩擦磨损性能的影响	107
5.4 磨损表面形貌分析	115
5.4.1 干摩擦和油润滑条件下磨损表面形貌比较	115
5.4.2 偶件表面分析	117
5.5 本章小结	118
第 6 章 TiNiFe 合金摩擦学性能研究	121
6.1 引言	123
6.2 TiNiFe 合金的摩擦磨损性能分析	124
6.2.1 ECAE 对 TiNiFe 合金摩擦学性能的影响	124
6.2.2 热处理对 TiNiFe 合金摩擦学性能的影响	127
6.2.3 TiNiFe 合金摩擦磨损动力学研究	130
6.2.4 载荷及滑动速度对 TiNiFe 合金摩擦磨损性能的影响	132
6.3 磨损表面形貌分析	138
6.3.1 干摩擦和油润滑条件下磨损表面形貌比较	138

6.3.2 偶件表面分析	140
6.4 本章小结	141
第7章 TiNi 基合金摩擦磨损机理分析	143
7.1 引言	145
7.2 TiNi 基合金材料摩擦磨损机理	147
7.2.1 TiNi 基合金的摩擦行为	147
7.2.2 TiNi 基合金的磨损机理	148
7.2.3 热处理温度的影响及其作用机理	153
7.2.4 载荷和滑动速度的作用机理	154
7.2.5 油润滑作用机理	156
7.3 高温 ECAE 工艺提高 TiNi 基合金材料摩擦学性能 的作用机理	159
7.3.1 晶粒细化对 TiNi 基合金材料摩擦学性能的 影响	159
7.3.2 显微硬度对 TiNi 基合金材料摩擦学性能的 影响	162
7.3.3 伪弹性对 TiNi 基合金材料摩擦学性能的 影响	163
7.4 本章小结	167
第8章 本书总结	169
8.1 本书的主要内容及结论	171
8.2 本书的创新点	174

8.3 对今后工作的建议	176
参考文献	178
附录 1 符号说明	197
附录 2 作者攻读博士学位期间发表和录用的论文	199
附录 3 作者攻读博士学位期间申请的发明专利	201
附录 4 作者攻读博士学位期间获得的奖励及荣誉	202
索引	203
致谢	204

第 1 章

绪 论

1.1 选题背景及研究意义

1.1.1 选题背景

摩擦导致大量机械能的损耗,而磨损是导致工程材料失效的主要形式之一。据不完全统计^[1],世界能源的 $1/3$ 至 $1/2$ 消耗于摩擦,而机械零件 80% 失效的原因是磨损。磨损会导致巨大的经济损失。美国政府公布的材料表明,20 世纪 60 年代,在工业国家仅是腐蚀磨损一项所导致的经济损失就占其国民生产总值的 $1\% \sim 4\%$ 。在我国,由于磨损在汽车、电力、采矿及建筑等行业造成的材料损耗,其数量也是很大的。随着工业的发展,特别是在现代工业与技术中,高速、重载的运转条件,核反应堆、宇宙飞船等的工作环境,对耐磨材料提出了更高的要求。因而,认识摩擦磨损机理,找出减小摩擦磨损的办法或发明更加耐磨、抗磨的材料是当今世界工业生产中一个非常重要而有意义的课题。

经过四十多年的研究,形状记忆合金不仅在基础理论研究方面取得了丰硕的成果,在实际应用方面也取得了长足进步,其应用范围涉及航天航空、电子、机械、化工和医疗等诸多领域。时至今日,形状记忆合金仍在不断的发展,并进入新的应用领域。因此,

形状记忆合金的基础及应用研究仍是当今材料科学研究中十分重要的领域之一。目前,由于价格、强度、可加工性及变形恢复能力等因素的差别,仅有两种体系的形状记忆合金已经在工程上被广泛地采用,即 TiNi 基形状记忆合金和 Cu 基形状记忆合金,而 Ti-Ni 基形状记忆合金的应用更为广泛^[2]。近年来研究发现^[3-12], TiNi 基合金除了具有优良的形状记忆效应和伪弹性外,还具有优异的耐磨性能。作为一种新型的耐磨材料,尽管当前对 TiNi 基合金摩擦、磨损行为的研究仍然处于基础研究阶段,但与典型的摩擦磨损材料相比, TiNi 基合金表现出了更加优异的耐磨性能,可望成为摩擦部件的良好选材,具有很好的工业应用前景。

但是钛镍基合金具有低温塑性差、强度高的特点,因而使其高性能材料的获得极为困难。目前,对钛镍基合金进行改性的方法主要包括对钛镍基合金铸件进行热加工及热处理,添加微量元素改变钛镍合金成分,或者在钛镍合金基体上添加陶瓷等硬质颗粒等^[7-9]。这些方法在一定程度上改善了钛镍合金的微观组织结构,提高了钛镍基合金的性能,但这些处理方法都存在各自的缺点和不足,达不到理想的效果。等径弯角挤压是近年来发展起来的一种新型的塑性变形方法,它通过纯剪切变形来细化材料的微观组织,进而达到提高其机械性能的目的。

本论文针对钛镍基合金的加工特性,基于先进的等径弯角挤压技术,依据等径弯角挤压的技术原理,研究和探索了钛镍基合金材料的高温 ECAE 加工工艺,制备出微米级的钛镍基合金材料,并深入研究了钛镍基合金材料的马氏体相转变行为和摩擦学性能。通过实验研究和理论分析,阐明高温 ECAE 工艺对于钛镍基合金组织细化的作用机理,以及提高钛镍基合金材料力学性能和

摩擦学性能的作用机制,得到钛镍基合金材料摩擦磨损性能随试验参数之间的变化规律。

高温 ECAE 工艺对于钛镍基合金材料组织细化、马氏体相转变行为和摩擦学性能的影响等方面的研究工作除我们研究结果报道外^[111-113],尚未见到国内外有与本论文研究技术指标和技术路线相同的专利和文献报道。本论文研究工作取得了突破性的研究进展,获得了创新性的研究成果,提出了高温 ECAE 工艺改性新技术,开拓了钛镍基合金在摩擦学领域的应用,获得国家自然科学基金(项目编号:A50071034)的支持。鉴于本论文中期考核取得了突破性的研究结果,经学院推荐及学校组织专家评审,获得了上海交通大学优秀博士学位论文奖励基金资助。

1.1.2 研究意义

随着高新技术迅速发展以及材料和能源短缺,在国民经济各个领域迫切需要发展高性能的材料,力求满足各种使用要求。钛镍基合金材料由于其奇特的形状记忆效应和伪弹性,在航天航空、机械、电子、化工等领域已获得了广泛应用,且其应用领域仍在扩大。近年来,大量研究发现钛镍基合金还具有良好的耐磨性,可望用来制造极端条件下的摩擦部件,具有潜在的工业应用前景,越来越受到国内外学者的关注,是当前摩擦学领域研究的热点课题之一。

晶粒细化是提高材料性能最有效的方法之一,控制并得到超细晶组织一直是追求的目标。等径弯角挤压工艺是近年来发展起来的一种新型的塑性变形方法,它不仅可以使金属材料进行超大