



国防科技图书出版基金

网状结构钛基 复 合 材 料

Titanium Matrix Composites
with Network Microstructure

黄陆军 耿林 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

网状结构钛基复合材料

**Titanium Matrix Composites
with Network Microstructure**

黄陆军 耿 林 著

國防工業出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

网状结构钛基复合材料/黄陆军,耿林著. —北京:
国防工业出版社,2015. 1

ISBN 978 - 7 - 118 - 09793 - 1

I. ①网... II. ①黄... ②耿... III. ①网状结构 - 钛
基合金 - 金属复合材料 - 研究 IV. ①TB331

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 267210 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$ 字数 247 千字

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 69.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717



致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作

需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

金属基复合材料作为复合材料中的一个重要方向,由于其独特的性能特点而具有其他材料不可替代的地位。钛基复合材料作为金属基复合材料的一种,由于其具有最高的比强度、比模量、服役温度,被视为最具潜力的金属基复合材料。受传统思维的束缚,人们总是追求增强相在基体中均匀分布,然而增强相均匀分布的钛基复合材料一直存在增强效果低与塑性差的问题,特别是粉末冶金钛基复合材料,存在钛基复合材料高脆性的瓶颈问题,一直制约着其发展与应用。作者结合“材料设计”思想,基于 Hashin - Shtrikman ($H - S$)理论与晶界强化理论,设计并制备出了网状结构钛基复合材料,不仅解决了粉末冶金法制备钛基复合材料的瓶颈问题,表现出优异的塑性水平及可塑性加工能力,而且进一步提高了钛基复合材料在室温与高温下的增强效果。网状结构钛合金基复合材料将成为轻质、高强、耐热、可塑性加工、可热处理强化与变形强化的典型材料代表。

本书是课题组自 1999 年以来开展的原位反应自生技术制备钛基复合材料的创新研究工作总结。自 2008 年以来,由黄陆军博士及其指导的学生共计 10 余人完成了网状结构钛基复合材料的系列研究工作,包括不同基体、不同增强相、不同结构参数的网状结构钛基复合材料的设计、制备工艺优化、特殊组织结构形成机理、强韧化机理,及其组织与性能在后续热处理与热变形过程中的演变规律。全书共分 9 章,其中:第 1 章是绪论,总结前人在钛基复合材料方面的研究成果,归纳粉末冶金钛基复合材料的瓶颈问题,借鉴其他金属基复合材料的创新研究工作,提出网状结构钛基复合材料设计思想和理论依据;第 2 章介绍了钛基复合材料网状组织结构、结构参数、制备工艺的设计工作,并通过比较网状结构与均匀结构 TiBw/Ti 复合材料拉伸性能,展示网状结构钛基复合材料优异的强韧化效果;第 3 章进一步展示增强相含量对网状结构 TiBw/Ti 复合材料组织与性能的影响规律,并揭示轧制变形对其组织与性能的影响规律;第 4 章主要侧重网状结构 TiBw/TC4 复合材料中独特组织结构的形成机理分析,包括整体网状结构、基体等轴组织、销钉状 TiBw 结构、树枝状 TiBw 结构等特点及形成机理,并介绍了制备工艺参数、网状结构参数对其组织结构的影响规律;第 5 章重在展示网状结构 TiBw/TC4 复合材料优异的室温与高温综合性能,以及其特殊的断裂与强韧化机理,并结合组织分析优化结构参数与制备工艺参数;第 6 章开展网

状结构 TiBw/TC4 复合材料高温压缩、高温超塑性拉伸、热挤压、热轧制等后续塑性变形研究,揭示网状结构钛基复合材料塑性变形机理,展示其优异的塑性加工能力,并研究塑性变形过程中其组织与性能演变规律;第 7 章进一步揭示后续热处理过程中烧结态与挤压态网状结构 TiBw/TC4 复合材料组织与性能的演变规律,展示其优异的热处理强化效果;第 8 章展示了 TiCp/TC4 复合材料中独特的类蜂窝状组织结构特点,及其优异的高温抗氧化能力与抗氧化机理,还介绍了网状结构 (TiCp + TiBw)/TC4 复合材料独特的组织结构特点与优异的强化效果,说明网状结构设计的普适性;第 9 章通过引入高温 Ti60 合金作为基体制备网状结构 TiBw/Ti60 复合材料,获得了最耐高温的钛基复合材料。并根据现有研究与生产基础,说明网状结构钛基复合材料的生产潜能与未来可持续发展。

本书内容创新性强、理念新颖,解决了学术前沿问题与生产瓶颈问题,研究内容具有较强的可持续性。适合高等院校、科研机构及企业从事金属基复合材料相关领域的研究人员、技术人员及相关专业的师生参考阅读。但由于时间和水平有限,书中内容必定有较多不足之处,希望读者对本书提出批评指正与建议,以利于更新与修正。

希望本书对钛基复合材料及其他金属基复合材料研究人员起到启示作用,从而促进金属基复合材料的研究、发展与应用。

黄陆军 耿林

2014 年 8 月

于哈尔滨工业大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 钛基复合材料国内外研究现状与分析	2
1.3 非连续增强钛基复合材料原位自生反应制备方法	5
1.3.1 气—固反应法	5
1.3.2 固—液反应法	6
1.3.3 固—固反应法	7
1.4 非连续增强金属基复合材料组织结构优化	8
1.5 非连续增强钛基复合材料的力学性能	11
1.5.1 复合材料协同效应概念	11
1.5.2 非连续增强钛基复合材料的室温拉伸性能	12
1.5.3 复合材料的弹性模量	14
1.6 非连续增强钛基复合材料变形及热处理	16
1.6.1 热变形对非连续增强钛基复合材料性能的影响	16
1.6.2 热处理对非连续增强钛基复合材料组织与性能的影响	17
参考文献	18
第 2 章 网状结构钛基复合材料的设计	24
2.1 钛基复合材料基体与增强相材料的设计	24
2.1.1 基体材料的设计	24
2.1.2 增强相的设计	26
2.2 钛基复合材料网状结构及结构参数的设计	29
2.2.1 网状结构的设计	29
2.2.2 网状结构参数的设计	29
2.3 网状结构钛基复合材料制备工艺设计与优化	32
2.3.1 网状结构 TiBw/Ti 复合材料制备工艺设计	32
2.3.2 增强相不同分布状态 TiBw/Ti 复合材料组织分析	35
2.3.3 增强相不同分布状态 TiBw/Ti 复合材料拉伸性能分析	37
参考文献	38

第3章	网状结构 Ti 基复合材料组织与性能	40
3.1	网状结构 TiBw/Ti 复合材料组织与性能	40
3.1.1	网状结构 TiBw/Ti 复合材料组织分析	40
3.1.2	网状结构 TiBw/Ti 复合材料拉伸性能	42
3.1.3	网状结构 Ti 基复合材料断裂与强韧化机理	44
3.2	热轧制变形对 TiBw/Ti 复合材料组织与性能的影响	47
3.2.1	轧制变形对 TiBw/Ti 复合材料组织的影响	48
3.2.2	轧制变形对 TiBw/Ti 复合材料拉伸性能的影响	49
3.3	网状结构($Ti_5Si_3 + Ti_2C$)/Ti 复合材料制备、组织与性能	50
3.3.1	网状结构($Ti_5Si_3 + Ti_2C$)/Ti 复合材料组织分析	50
3.3.2	网状结构($Ti_5Si_3 + Ti_2C$)/Ti 复合材拉伸性能	53
	参考文献	56
第4章	网状结构 TC4 基复合材料组织结构及其形成机理	58
4.1	准连续网状结构 5vol. % TiBw/TC4 复合材料的制备	58
4.1.1	烧结态 TC4 钛合金组织分析	58
4.1.2	准连续网状结构 5vol. % TiBw/TC4 复合材料组织分析	59
4.2	烧结工艺对网状结构 TiBw/TC4 复合材料组织的影响	62
4.3	网状结构参数对 TiBw/TC4 复合材料组织的影响	65
4.3.1	增强相含量对 TiBw/TC4 复合材料组织的影响	65
4.3.2	网状尺寸对 TiBw/TC4 复合材料组织的影响	67
4.4	网状结构 TiBw/TC4 复合材料特殊组织及形成机理	69
4.4.1	TiBw/TC4 复合材料网状结构形成机理	69
4.4.2	网状结构中 TiBw 销钉状结构形成机理	71
4.4.3	网状结构中树枝状 TiBw 结构形成机理	71
4.4.4	网状结构中基体等轴组织的形成机理	75
	参考文献	78
第5章	网状结构 TiBw/TC4 复合材料力学行为	81
5.1	准连续网状结构 TiBw/TC4 复合材料微观性能	81
5.1.1	网状结构 TiBw/TC4 复合材料显微硬度测试	81
5.1.2	网状结构 TiBw/TC4 复合材料微观弹性模量	82
5.2	烧结工艺对 TiBw/TC4 复合材料室温拉伸性能的影响	83
5.3	结构参数对 TiBw/TC4 复合材料室温拉伸性能的影响	84
5.3.1	增强相含量对 TiBw/TC4 复合材料室温拉伸性能的影响	84
5.3.2	网状尺寸对 TiBw/TC4 复合材料室温拉伸性能影响	85
5.4	网状结构 TiBw/TC4 复合材料的弹性特性分析	89

5.4.1	网状结构 TiBw/TC4 复合材料的弹性模量	89
5.4.2	网状结构 TiBw/TC4 复合材料的泊松比	90
5.5	网状结构 TiBw/TC4 复合材料断裂及强韧化机理	94
5.5.1	网状结构 TiBw/TC4 复合材料断口分析	94
5.5.2	准连续网状结构 TiBw/TC4 复合材料裂纹扩展分析	96
5.5.3	网状结构 TiBw/TC4 复合材料模型建立及强韧化机制	101
5.6	烧结态网状结构钛基复合材料高温力学行为	108
5.6.1	烧结态 TiBw/TC4 复合材料高温拉伸性能	108
5.6.2	烧结态 TiBw/TC4 复合材料高温拉伸断口分析	109
5.7	低含量 TiBw/TC4 复合材料的组织与性能	111
5.7.1	低含量 TiBw/TC4 复合材料的组织分析	112
5.7.2	低含量 TiBw/TC4 复合材料的拉伸性能	113
	参考文献	114
第 6 章	网状结构 TiBw/TC4 复合材料的热变形行为	117
6.1	网状结构 TiBw/TC4 复合材料高温压缩变形行为	117
6.1.1	网状结构 TiBw/TC4 复合材料高温压缩应力-应变行为	118
6.1.2	网状结构 TiBw/TC4 复合材料热加工图建立与分析	119
6.1.3	网状结构 TiBw/TC4 复合材料组织演变规律	122
6.2	网状结构 TiBw/TC4 复合材料高温超塑性拉伸变形行为	127
6.2.1	超塑性拉伸应力-应变行为	127
6.2.2	超塑性拉伸变形机制	129
6.2.3	超塑性拉伸变形组织演变规律	131
6.3	热挤压对 TiBw/TC4 复合材料组织与性能的影响	133
6.3.1	热挤压对 TiBw/TC4 复合材料组织的影响	133
6.3.2	热挤压对 TiBw/TC4 复合材料拉伸性能的影响	135
6.3.3	挤压态 5vol. % TiBw/TC4 复合材料高温拉伸性能	137
6.4	热轧制对网状结构 TiBw/TC4 复合材料组织与性能的影响	139
6.4.1	热轧制对 TiBw/TC4 复合材料组织的影响	139
6.4.2	热轧制对 TiBw/TC4 复合材料拉伸性能的影响	141
6.5	变态网状结构 TiBw/TC4 复合材料强韧化机理	142
6.5.1	变态 TiBw/TC4 复合材料弹性模量	142
6.5.2	挤压态网状结构 TiBw/TC4 复合材料拉伸断裂分析	144
	参考文献	146
第 7 章	热处理对 TiBw/TC4 复合材料组织与力学性能的影响	148
7.1	淬火对网状结构 TiBw/TC4 复合材料的影响	148
7.1.1	TC4 钛合金及 TiBw/TC4 复合材料热处理理论分析	148

7.1.2	淬火温度对 TiBw/TC4 复合材料组织的影响	150
7.1.3	淬火温度对 TiBw/TC4 复合材料力学性能的影响	151
7.2	时效温度对 TiBw/TC4 复合材料组织与性能的影响	153
7.3	热处理态 5vol. % TiBw/TC4 复合材料高温拉伸性能	155
7.4	网状结构 TiBw/TC4 (45 ~ 125 μ m) 复合材料的热挤压与热处理	157
7.4.1	热挤压对 TiBw/TC4 (45 ~ 125 μ m) 复合材料组织与性能的影响	157
7.4.2	热处理对挤压态 TiBw/TC4 (45 ~ 125 μ m) 复合材料的影响	159
	参考文献	161
第 8 章	网状结构 TiCp/TC4 与 (TiBw + TiCp)/TC4 复合材料	163
8.1	网状结构 TiCp/TC4 复合材料组织与力学性能	163
8.1.1	网状结构 TiCp/TC4 复合材料的组织分析	163
8.1.2	网状结构 TiCp/TC4 复合材料室温力学性能	166
8.2	网状结构 TiCp/TC4 复合材料高温抗氧化性能与机理	167
8.2.1	网状结构 TiCp/TC4 复合材料高温氧化行为	167
8.2.2	网状结构 TiCp/TC4 复合材料高温抗氧化机理	173
8.3	网状结构 (TiBw + TiCp)/TC4 复合材料制备	175
8.3.1	网状结构 (TiBw + TiCp)/TC4 复合材料组织分析	175
8.3.2	网状结构 (TiBw + TiCp)/TC4 复合材料拉伸性能	176
8.3.3	低含量 TiBw 的网状结构 (TiBw + TiCp)/TC4 复合材料	178
	参考文献	180
第 9 章	TiBw/Ti60 复合材料与网状钛基复合材料的应用	183
9.1	网状结构 TiBw/Ti60 复合材料制备	183
9.1.1	网状结构 TiBw/Ti60 复合材料组织分析	183
9.1.2	网状结构 TiBw/Ti60 复合材料力学性能	186
9.2	热处理对网状结构 TiBw/Ti60 复合材料的影响	188
9.2.1	固溶处理对 TiBw/Ti60 复合材料组织与性能的影响	188
9.2.2	时效处理对 TiBw/Ti60 复合材料组织与性能的影响	189
9.3	热处理对轧制态 TiBw/Ti60 复合材料的影响	191
9.3.1	热处理对轧制态 TiBw/Ti60 复合材料组织的影响	191
9.3.2	热处理对轧制态 TiBw/Ti60 复合材料拉伸性能的影响	194
9.4	网状结构钛基复合材料的应用	196
9.4.1	网状结构钛基复合材料生产潜能	196
9.4.2	网状结构钛基复合材料展望	199
	参考文献	200

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Overview	1
1.2 Progress and analysis of domestic and foreign research of TMCs	2
1.3 Preparation techniques of <i>in situ</i> DRTMCs	5
1.3.1 Gas – solid reaction synthesis technique	5
1.3.2 Solid – liquid reaction synthesis technique	6
1.3.3 Solid – solid reaction synthesis technique	7
1.4 Microstructure optimization of discontinuously MMCs	8
1.5 Mechanical properties of DRTMCs	11
1.5.1 Concept of synergistic effect for composites	11
1.5.2 Tensile properties of DRTMCs	12
1.5.3 Elastic modulus of composites	14
1.6 Deformation and heat treatment of DRTMCs	16
1.6.1 Effects of hot deformation on properties of DRTMCs	16
1.6.2 Effects of heat treatment on microstructure and properties of DRTMCs	17
References	18
Chapter 2 Design of DRTMCs with network microstructure	24
2.1 Design of matrix and reinforcement for DRTMCs with network microstructure	24
2.1.1 Matrix design	24
2.1.2 Reinforcement design	26
2.2 Design of network microstructure and structure parameters for DRTMCs	29
2.2.1 Design of network microstructure	29
2.2.2 Design of network parameters	29
2.3 Design and optimization of fabrication technology and parameters for DRTMCs with network microstructure	32
2.3.1 Design of fabrication technology for TiBw/Ti composites with	

network microstructure	32
2. 3. 2 Microstructure of TiBw/Ti composites with different reinforcement distributions	35
2. 3. 3 Tensile properties of TiBw/Ti composites with different reinforcement distributions	37
References	38
Chapter 3 Microstructure and property of pure Ti matrix composites	40
3. 1 Microstructure and property of TiBw/Ti composites with network microstructure	40
3. 1. 1 Microstructure of TiBw/Ti composites	40
3. 1. 2 Tensile property of TiBw/Ti composites	42
3. 1. 3 Fracture and strengthening and toughening mechanisms of pure Ti matrix composites	44
3. 2 Effects of hot rolling deformation on microstructure and property of TiBw/Ti composites	47
3. 2. 1 Effects of hot rolling deformation on microstructure of TiBw/Ti composites	48
3. 2. 2 Effects of hot rolling deformation on tensile property of TiBw/Ti composites	49
3. 3 Fabrication, microstructure and property of ($\text{Ti}_5\text{Si}_3 + \text{Ti}_2\text{C}$)/Ti composites with network microstructure	50
3. 3. 1 Microstructure of ($\text{Ti}_5\text{Si}_3 + \text{Ti}_2\text{C}$)/Ti composites	50
3. 3. 2 Tensile property of ($\text{Ti}_5\text{Si}_3 + \text{Ti}_2\text{C}$)/Ti composites	53
References	56
Chapter 4 Microstructure characteristics and formation mechanism of TC4 matrix composites with network microstructure	58
4. 1 Fabrication of 5vol. % TiBw/TC4 composites with quasi – continuous network microstructure	58
4. 1. 1 Metallographical microstructure of the as – sintered TC4 alloy	58
4. 1. 2 Microstructure of 5vol. % TiBw/TC4 composites with quasi – continuous network microstructure	59
4. 2 Effects of sintering parameters on microstructure of TiBw/TC4 composites	62

4.3	Effects of network parameters on microstructure of TiBw/TC4 composites	65
4.3.1	Effects of reinforcement fraction on microstructure of TiBw/TC4 composites	65
4.3.2	Effects of network size on microstructure of TiBw/TC4 composites	67
4.4	Formation mechanisms of special microstructures in TiBw/TC4 composites with network microstructure	69
4.4.1	Formation mechanism of network microstructure in TiBw/TC4 composites	69
4.4.2	Formation mechanism of dowel – like TiBw structure in network microstructure	71
4.4.3	Formation mechanism of branched TiBw structure in network microstructure	71
4.4.4	Formation mechanism of matrix equiaxed microstructure in network microstructure	75
	References	78
Chapter 5 Mechanical behaviors of TiBw/TC4 composites with network microstructure		81
5.1	Micro properties of TiBw/TC4 composites with network microstructure	81
5.1.1	Micro hardness of TiBw/TC4 composites	81
5.1.2	Micro elastic modulus of TiBw/TC4 composites	82
5.2	Effects of sintering parameters on tensile properties of TiBw/TC4 composites	83
5.3	Effects of network parameters on tensile properties of TiBw/TC4 composites	84
5.3.1	Effects of reinforcement fraction on tensile properties of TiBw/TC4 composites	84
5.3.2	Effects of network size on tensile properties of TiBw/TC4 composites	85
5.4	Elastic properties of TiBw/TC4 composites with network microstructure	89
5.4.1	Elastic modulus of TiBw/TC4 composites	89
5.4.2	Poisson's ratio of TiBw/TC4 composites	90
5.5	Fracture, strengthening and toughening mechanisms of TiBw/TC4	

composites with network microstructure	94
5. 5. 1 Fractograph of TiBw/TC4 composites	94
5. 5. 2 Crack propagation of TiBw/TC4 composites	96
5. 5. 3 Model and strengthening and toughening mechanisms of TiBw/TC4 composites	101
5. 6 High temperature mechanical behaviors of the as – sintered TiBw/TC4 composites with network microstructure	108
5. 6. 1 High temperature tensile properties of the as – sintered TiBw/TC4 composites	108
5. 6. 2 High temperature tensile fractograph of the as – sintered TiBw/TC4 composites	109
5. 7 Microstructure and property of TiBw/TC4 composites with low reinforcement fractions	111
5. 7. 1 Microstructure of TiBw/TC4 composites with low reinforcement fractions	112
5. 7. 2 Tensile property of TiBw/TC4 composites with low reinforcement fractions	113
References	114
Chapter 6 Deformation behaviors of TiBw/TC4 composites with network microstructure	117
6. 1 Hot compressive behaviors of TiBw/TC4 composites with network microstructure	117
6. 1. 1 Hot compressive stress – strain behaviors of TiBw/TC4 composites	118
6. 1. 2 Processing maps of TiBw/TC4 composites	119
6. 1. 3 Microstructure evolutions of TiBw/TC4 composites	122
6. 2 Superplastic tensile behaviors of TiBw/TC4 composites with network microstructure	127
6. 2. 1 Superplastic tensile stress – strain behaviors	127
6. 2. 2 Superplastic tensile deformation mechanism	129
6. 2. 3 Microstructure evolution during superplastic tensile deformation process	131
6. 3 Effects of hot extrusion on microstructure and property of TiBw/TC4 composites	133
6. 3. 1 Effects of hot extrusion on microstructure of TiBw/TC4 composites	133

6. 3. 2	Effects of hot extrusion on tensile properties of TiBw/TC4 composites	135
6. 3. 3	High temperature tensile properties of the as – extruded 5vol. % TiBw/TC4 composites	137
6. 4	Effects of hot rolling on microstructure and property of TiBw/TC4 composites	139
6. 4. 1	Effects of hot rolling on microstructure of TiBw/TC4 composites	139
6. 4. 2	Effects of hot rolling on tensile properties of TiBw/TC4 composites	141
6. 5	Strengthening and toughening mechanisms of the deformed TiBw/TC4 composites	142
6. 5. 1	Elastic modulus of the deformed TiBw/TC4 composites	142
6. 5. 2	Fracture analysis of the as – extruded TiBw/TC4 composites	144
	References	146

Chapter 7 Effects of heat treatment on microstructure and

property of TiBw/TC4 composites

7. 1	Effects of quenching treatment on TiBw/TC4 composites	148
7. 1. 1	Heat treatment fundamentals of TC4 alloy and TiBw/TC4 composites	148
7. 1. 2	Effects of quenching temperatures on microstructure of TiBw/TC4 composites	150
7. 1. 3	Effects of quenching temperatures on mechanical properties of TiBw/TC4 composites	151
7. 2	Effects of aging temperatures on microstructure and property of TiBw/TC4 composites	153
7. 3	High temperature tensile properties of the heat treated 5vol. % TiBw/TC4 composites	155
7. 4	Hot extrusion and heat treatment of TiBw/TC4(45 ~ 125 μ m) composites with network microstructure	157
7. 4. 1	Effects of hot extrusion on microstructure and property of TiBw/TC4(45 ~ 125 μ m) composites	157
7. 4. 2	Effects of heat treatment on the as – extruded TiBw/TC4 (45 ~ 125 μ m) composites	159
	References	161