

高技术 新材料

金属间化合物

——全国首届高温结构金属间化合物
学术讨论会论文集

仲增墉 叶恒强 主编

机械工业出版社



高技术 新材料

金属间化合物

——全国首届高温结构金属间
化合物学术讨论会论文集

仲增墉 叶恒强 主编

机械工业出版社

一九九二年四月廿八日

(京) 新登字054号

内 容 简 介

本文集收集了全国第一届高温结构金属间化合物学术讨论会的学术论文和科技报告。从金属间化合物的基础理论、材料工艺过程,力学行为与物理性能及其应用等方面反映了我国在金属间化合物新材料研制的最新进展和成果。本书可供从事新材料研制开发的科技人员、航空航天工业的工程设计人员使用。也可供材料系大学生和研究生学习参考。

高技术 新材料

金 属 间 化 合 物

——全国首届高温结构金属间
化合物学术讨论会论文集

仲增堃 叶恒强 主编

*

责任编辑:王霄飞

封面设计:郭景云

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京市昌平环球印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本787×1092 1/16·印张 19·字数457千字

1992年1月北京第一版·1992年1月北京第一次印刷

印数 0,001—1,170·定价:29.50元

*

ISBN 7-111-03130-X/TG·690

编辑委员会名单

主编：仲增墉 叶恒强

编委：汪宗荣 李成功 石力开 李临西

欧阳世翕 王 焱 张国定

秘书：蒲忠杰

序 言

金属间化合物作为功能材料,如超导材料、半导体材料、磁性材料与形状记忆合金等,已为人所共知,并对人类文明做出了很大的贡献。但作为结构材料,由于其原子的有序排列及金属键与共价键的共存,脆性问题一直是其发展的最大障碍,尽管它们具有较高的高温强度和弹性模量,较高的熔点和较低的密度,乃至良好的综合性能。直至70年代末80年代初,多晶 Ni_3Al 的塑性加入少量硼而大幅度提高,其它化合物如 Co_3V 、 Ti_3Al 的塑性研究也取得了重大进展,使人们看到金属间化合物的应用前景,因而金属间化合物的研究成为当前金属材料研究前沿热点之一。

我国在金属间化合物的研究方面随着国际上发展而迅速开展起来,并列入了高技术新材料研究计划之中。经过几年的共同努力,无论在基础性的研究,还是在合金设计,工艺流程的开发以及应用研究等方面都进行了系统而广泛的工作,并取得了不少令人鼓舞的进展,其中部分成果具有自己的特色和富有创造性,这是我国材料科学工作者辛勤耕耘、努力探索、奋力协作的结果。本文集交流和总结了近年来我国在这方面的部分研究成果,对促进我国金属间化合物高温材料的发展无疑将起到积极作用。预祝我国材料科学工作者充分发挥自己的聪明才智,团结协作,做出更加具有创造性的工作,在金属间化合物结构材料领域中取得更大的突破!

師 昌 緒

1991.6.15

前 言

金属间化合物由于其特殊的键性和原子排列状态以及由此产生的诸多与众不同的性质而有别于目前广泛应用的金属或合金，是一类有重要应用前景的高温结构材料。从本世纪70年代末 Ni_3Al 因添加微量硼元素而呈现显著塑性变形以来，材料科学界对金属间化合物的研究兴趣与日俱增，成为当前世界上金属材料领域中的研究热点之一。学者们从不同的角度探索提高塑性、提高使用温度、提高材料综合性能的途径，以期加速实用化进程。我国高技术研究发展计划（“八六三”计划）、国家自然科学基金和有关部门、单位均将有序金属间化合物列专题开展研究，充分表明该材料的巨大魅力和国家对该材料研究的高度重视。

近几年来，我国学者在金属间化合物的研究领域内辛勤耕耘，努力探索，在基础性研究、材料体系和工艺研究以及应用研究方面取得了许多尽管是初步的但却是令人鼓舞的进展。今年1月，“八六三”计划新材料领域结构材料专家组发起并组织了我国第一届高温结构金属间化合物材料学术讨论会，得到国内同行的积极响应和大力支持。本文集收集了学术讨论会中的部分学术论文和研究报告，它们在一定程度上反映了我国金属间化合物领域中的研究进展。我们希望本文集的出版将有助于我国有序金属间化合物的研究和该材料在国民经济中的应用。值此机会，我们谨向为本文集热情作序的材料界老前辈师昌绪教授和为本文集编辑出版而付出辛勤劳动的仲增墉研究员、叶恒强研究员及全体编委和编辑同志表示衷心的感谢。

国家高技术新材料领域结构材料专家组

1991.4.19

目 录

序言

前言

我国金属间化合物高温结构材料研究的进展.....仲增墉 (1)

硼在单晶和多晶 Ni_3Al 中的行为及其对室温和高温强度的影响

.....郭建亭 李 辉 孙 超 王淑荷 任大刚 熊良钺 姜 健 (10)

Zr对 Ni_3Al 合金塑性的影响郑 志 吴伟文 郭建亭 朱耀霄 (17)

添加Si和过渡金属元素对含硼 DS Ni_3Al 力学性能的影响 ...张 云 林栋梁 (24)

过渡金属元素合金化对含硼 DS Ni_3Al 塑性的影响张 云 林栋梁 (30)

AP—FIM研究 Ni_3Al 及 TiAl 中原子分布任大刚 孙家言 (35)

Ni_3Al 多晶体中的堆垛层错及其形成机制.....严 文 (42)

Ni_3Al 中的扩散机制.....王天民 赖文生 高 飞 陈舜麟 (49)

定向凝固 Ni_3Al 合金的动态脆化研究金 诚 林栋梁 (58)

铸造 Ni_3Al 基合金的初化研究周义章 张天相 朱耀霄 胡壮麒 (64)

一种先进的 Ni_3Al 基定向凝固高温合金的研制韩雅芳 李孙华 (70)

热处理对 Ni_3Al 基高温合金 IC-6 微观组织和力学性能的影响

.....谭永宁 李孙华 韩雅芳 (78)

提高 $\text{Ni}_3\text{Al}-\text{Cr}-\text{Zr}-\text{B}$ 金属间化合物热加工塑性的研究

.....马培立 袁 英 韩临光 陆玉良 仲增墉 (85)

Ni_3Al 金属间化合物高温抗氧化耐腐蚀性能及应用

.....冯 滌 邹敦叙 冯启红 陈淦生 孙 升 (92)

合金元素对 Ni_3Al 合金抗氧化性能的影响

.....孙 超 郭建亭 李 辉 谭明晖 赖万慧 王淑荷 (99)

含Nb的 Ti_3Al 基合金的显微组织研究张启海 周光爵 (106)

Ti_3Al 基合金中 α_2 相位错类型确定

.....王顺才 李春志 颜鸣皋 高 扬 曹春晓 (112)

热机械处理对 $\text{Ti}_3\text{Al}-\text{Nb}-\text{Mo}-\text{V}$ 合金显微组织和拉伸性能的影响

.....贾天聪 王 斌 邹敦叙 仲增墉 (117)

$\text{Ti}_3\text{Al}-\text{Nb}-\text{Mo}-\text{V}$ 合金长时稳定性的研究

.....王 斌 贾天聪 冯艳萍 邹敦叙 仲增墉 (124)

Ti_3Al 基合金热处理工艺与显微组织和性能之间的关系.....脱祥明 (132)

Ti_3Al 基合金的研究.....周光爵 脱祥明 张启海 俞仲祥 李 阳 邹彦茹 (139)

一种 Ti_3Al 基合金的热疲劳行为吴学民 高 扬 李学明 曹春晓 (147)

Ti_3Al 金属间化合物超塑性及扩散连接

.....郭 义 刘 鹏 何治经 张志华 廉丕芬 张玉琴 斯重遥 李 东 (153)

涡轮喷气发动机用Ti ₃ Al基合金典型零件的组织 and 性能	高 扬 曹春晓 郭 灵 钟天纺	(158)
层错偶极子及其对TiAl合金塑性变形的影响	曲选辉 黄伯云 钱 沅 孙祥炎 吕海波 黄培云	(164)
Ti-52at%Al 合金的形变行为及微观机理	张永刚 徐 强 陈昌麒	(170)
Ti-50at%Al-2at%Mn 合金的显微组织与压缩性能	徐 强 张永刚 陈昌麒	(178)
添加锰的TiAl 金属间化合物的塑性变形	黄伯云 曲选辉 温金海 雷长明	(184)
双相TiAl-V金属间化合物层状组织的微观结构研究	高 颖 朱 静 蔡其巩	(189)
TiAl 合金中层状组织的取向关系	韩 东 曹名洲 李 东	(194)
TiAl 金属间化合物脆性本质及其合金化行为	蒲忠杰 蔡其巩 邹敦叙 朱 静 仲增庸	(199)
热处理对TiAl-Cr-V合金微观组织和力学性能的影响	蒲忠杰 邹敦叙 石建东 仲增庸	(205)
Ti-Al金属间化合物双相合金组织的研究	郝士明 赵 泉	(210)
Al ₃ Ti基L ₁ ₂ 合金中位错增殖机制的透射电镜观察	陈世朴 戎泳华 吴晓华 胡赓祥	(216)
热压加工对 Al ₃ Ti 基 L ₁ ₂ 合金室温压缩塑性的影响	陈小夫 胡赓祥 陈世朴 吴晓华 方莲华	(222)
以铁、锰合金化的 Al ₃ Ti基L ₁ ₂ 型金属间化合物	吴晓华 陈小夫 陈世朴 胡赓祥	(228)
Nb-Ti-Al 三元铝化物作为高结构材料的估价	陈国良 孙祖庆 谢锡善 任允蓉 吴成义 杨玉珏	
	姚可夫 许 亚 周 昱 付深根 沙 琳 张卫军	(233)
急冷凝固Nb-Ti-Al三元系金属间化合物的相结构及形貌	孙祖庆 陈国良 付深根	(242)
Ti-Al-Nb系相图1000℃等温截面的研究	郝士明 赵 泉	(248)
Ti ₅ Si ₃ + Ti ₃ Al 双相金属间化合物合金	吴建生	(254)
Ti ₃ Al基PREP粉末特性研究	兰 涛 韩传奎 张宝惠 李明强 赵永骞	(260)
用机械合金化方法制备的TiAl 粉末的特性	熊 翔 雷长明 黄伯云 吕海波	(266)
Fe ₃ Al金属间化合物形变缺陷及其性能的研究	严 文 杨 勇 刘江南 杨觉明	(272)
Fe ₃ Al金属间化合物的研究	罗贤竞 俞 健 李丽霞 姜玉仙	(278)
氢对多晶Co ₃ Ti形变及断裂行为的影响	朱家红 经开良 万晓景	(284)
偏离化学计量比的Co ₃ Ti金属间化合物的缺陷结构研究	陈鉴寅 万晓景 王 琦 经开良	(290)

CONTENTS

Progress of Intermetallic Compounds for High Temperature Structural Materials in China	Zhong Zengyong..... 1
Behavior of Boron in Poly and Monocrystalline Ni_3Al and Its Effect on the Strengths at Room and High Temperature	Guo Jianting, Li Hui, Sun Chao, Wang Shuhe, Ren Dagang, Xiong Liangyue, Jiang Jian.....10
Effect of Zr on the Ductility of Ni_3Al Alloy	Zheng Zhi, Wu Weiwen, Guo Jianting, Zhu Yiaoxiao.....17
Effect of Alloying Additions of Si and Transition Metals on the Mechanical Properties of B-Doped DS Ni_3Al	Zhang Yun, Lin Dongliang.....24
Effect of Alloying with Transition metal Elements on the Ductility of B-Poped DS Ni_3Al	Zhang Yun, Lin Dongliang.....30
A Study of the Atomic Distribution in the Ni_3Al and TiAl Alloys by AP-FIM	D. G. Ren, J. Y. Sun.....35
Stacking Faults in Polycrystalline Ni_3Al and Their Formation Mechanisms	Yan Wen.....42
Diffusion Mechanism in Ni_3Al	Wang Tianmin, Lai Wensheng, Gao Fei, Chen Shunlin.....49
Dynamic Embrittlement for DS Ni_3Al Alloy	Jin Cheng, Lin Dongliang.....58
Ductilization of Cast Ni_3Al -Base Alloys	Zhou Yizhang, Zhang Tianxiang, Zhu Yaoyao, Hu Zhuangqi.....64
Development of an Advanced Ni_3Al Base Superalloy	Han Yafang, Li Sunhua.....70
Effect of Heat-Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Ni_3Al Base Superalloy IC-6	Tan Yongning, Li Sunhua, Han Yafang.....78
Improvement of Hot Workability of Ni_3Al -Cr-Zr-B Alloy	Ma Peili, Yuan Ying, Han Linguang, Lu Yuliang, Zhong Zengyong.....85
Behavior of High Temperature Oxidation and Corrosion	

Resistance and Application in Ni_3Al Intermetallic	
Feng Di, Zou Dunxu, Feng Chihong, Chen Gansheng, Sun Sheng	92
Effect of Alloying Elements on Oxidation Behavior of Ni_3Al Alloy	
Sun Chao, Guo Jianting, Li Hui, Tan Minghui, Lai Wanhui, Wang Shuhe	99
An Investigation of Microstructure of Ti_3Al -Base Alloy with Nb	
Zhang Qihai, Zhou Guangjue	106
Determination on the Types of Dislocations of α_2 Phases in Ti_3Al -Based Alloy	
Wang Shuncai, Li Chunzhi, Yan Minggao, Gao Yang, Cao Chunxiao	112
The Effect of Thermomechanical Processing on the Microstructure and Tensile Properties in a Ti_3Al -Nb-Mo-V Alloy	
Jia Tiancong, Wang Bin, Zou Dunxu, Zhong Zengyong	117
A Study on Long Time Stability of Ti_3Al -Nb-Mo-V Alloy	
Wang Bin, Jia Tiancong, Feng Yanping, Zou Dunxu, Zhong Zengyong	124
Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of Ti_3Al Alloy	
Tuo xiangming	132
An Investigation of Ti_3Al -Base Alloy	
Zhou Guangjue, Tuo Xiangming, Zhang Qihai, Yu Zhongxiang, Li Yang, Wu Yanru	139
Thermal Fatigue Behavior of a Ti_3Al -Based Alloy	
Wu Xuemin, Gao Yang, Li Xuemin, Gao Chunxiao	147
Superplasticity and Diffusion Bonding of Ti_3Al Intermetallic Compound	
Gou Yi, Liu Peng, He Zhijing, Zhang Zhihua, Lian Pifen, Zhang Yuqin, Si Zhongyao, Li Dong	153
Structure and Properties of Ti_3Al Based Alloy Parts for Turbine Jet Engine	
Gao Yang, Cao Chunxiao, Guo Ling, Zhong Tinfang	158
Faulted Diploles and Their Effects on the Plastic Deformation of TiAl Alloys	
Qu Xuanhui, Huang Baiyun, Qian Yuan, Kong Xiangyan, Lu Haibo, Huang Peiyun	164
Deformation Behavior and Mechanisms of $\text{Ti-52at\%Al}$ Alloy	
Zhang Yonggang, Xu Qiang, Chen Changqi	170
Microstructure and Compression Properties of $\text{Ti-50at\%Al-2at\%Mn}$ Alloy	
Xu Qiang, Zhang Yonggang, Chen Chanqi	178
Plastic Deformation of TiAl Intermetallics with Mn Addition	
Huang Baiyun, Qu Xuanhui, Wen Jinhai, Lei Changming	184
Lamellar Microstructure in Two Phases TiAl-V Intermetallic	

Compound

Gao Ying,Zhu Jing,Cai Qigong.....	189
The Orientation Relationship Between The γ Lamellae in TiAl Alloy	
Han Dong,Cao, Mingzhou,Li Dong.....	194
The Brittleness Nature and Alloying Behavior of TiAl Intermetallic Compound	
Pu Zhongjie,Cai Qigong,Zou Dunxu,Zhu Jing,Zhong Zengyong.....	199
The Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of a TiAl-Cr-V Alloy	
Pu Zhongjie,Zou Dunxu,Shi Jiandong,Zhong Zengyong.....	205
Study on the Structure of Ti-Al Intermetallic Compound Duplex Alloy	
Hao Shiming,Zhao Quan.....	210
Tem Observation of Dislocation Multiplication Mechanism in Al_3Ti -Base $L1_2$ -Type Intermetallic Alloy	
Chen Shipu,Rong Yonghua,Wu Xiaohua,Hu Gengxiang.....	216
Effect of Hot-working on Room Temperature Plasticity of Al_3Ti Base $L1_2$ Alloy	
Chen Xiaofu,Hu Gengxiang,Chen Shipu,Wu Xiaohua,Fang Lianhua.....	222
Al_3Ti -Base $L1_2$ Intermetallic Alloyed with Fe and Mn	
Wu Xiaohua,Chen Xiaofu,Chen Shipu,Hu Gengxiang.....	228
Evaluation of the Potential of the Ternary Aluminides in Nb-Ti-Al System for High Temperature Application	
Chen Guoling,Sun Zuqing,Xie Xishan,Ren Yunrong,Wu Chengyi,Yang Wangyue,Yao Kefu,Xu Ya,Zhou Xing,Fu Shengen,Sha Lin,Zhang Weijun.....	233
Phase Structures and Morphologies of Rapidly Solidified Intermetallic Alloys in Nb-Ti-Al Ternary System	
Sun Zuqing,Chen Guoliang,Fu Shengen.....	242
Investigation of 1000°C Isothermal Section of Ti-Al-Nb Ternary Phase Diagram	
Hao Shiming, Zhao Quan.....	248
Dual Phase Alloys Consisting of Intermetallic Phases Ti_3Al and Ti_5Si_3	
Wu Jiansheng.....	254
The Characterization of PREP Ti_3Al Base Alloy Powder	
Lan Tao,Han Chuanxi,Zhang Baohui,Li Mingqiang,Zhao Yongqian.....	260
Charaterization of TiAl Powders Produced by Mechanical Alloying	
Xiong Xiang,Lei Changming,Huang Baiyun,Lu Haibo.....	266
The Study of the Deformation Defects and Properties of	

Intermetallic Compound Fe_3Al	
Yan Wen, Yang Yong, Liu Jiangnan, Yang Jueying.....	272
Investigation of Fe_3Al Intermetallic Compound	
Luo Xianjing, Yu Jian, Li Lixia, Jiang Yuxian.....	278
The Influence of Hydrogen on Deformation and Fracture	
Behavior of a Polycrystalline Co_3Ti Alloy	
Zhu Jiahong, Jing Kailiang, Wan, Xiaojing.....	284
Studies of Defect Structures in Off-stoichiometric Co_3Ti	
Intermetallic Compound	
Chen Jianyin, Wan Xiaojing, Wang Qi, Jing Kailiang.....	290

我国金属间化合物高温结构材料研究的进展

仲 增 墉

(钢铁研究总院)

Progress of Intermetallic Compounds for High Temperature Structural Materials in China

Zhong Zengyong

(Central Iron and Steel Research Institute, Beijing)

摘要 本文评述了“七五”期间我国在金属间化合物高温结构材料研究与发展方面取得的进展,并对今后五年的工作进行了展望。

关键词 金属间化合物、塑化、高温强度。

ABSTRACTS In this paper the progress in research and development of the intermetallic compounds for high temperature structure materials in China in the period of the 7th Five-year plan is described and the future work in the next five year is also discussed.

KEY WORDS intermetallic compound, ductility, high temperature strength.

1 序言

金属间化合物,由于其原子的长程有序排列和原子间金属键及共价键的共存性,使其有可能同时兼顾金属的较好塑性和陶瓷的高温强度,其中Al、Si等形成的化合物还具有良好的抗氧化性能和低密度。因此,早在70年代,就有人提出开发以金属间化合物为基的高温结构材料,但由于脆性问题未得到解决,研究和开发工作在相当长时间内停滞不前。70年代后期,DO₁₈型的Co₃V和H₂型的Ni₃Al化合物塑化研究取得的巨大成就,Ti₃Al和TiAl基合金塑性的改善,使人们重新看到了研究金属间化合物高温结构材料的希望和前景,在世界范围内掀起了寻求具有陶瓷高温强度和金属较好塑性的金属间化合物基高温材料的研究热潮,并取得了较大进展。

80年代中期开始,我国一些主要从事金属材料研制的科研单位和部分高等院校,在国家技术计划指导下,在自然科学基金会及一些工业部门的组织和资助下,相继开展了Ni-Al、Ti-Al系及其它一些金属间化合物的研究和开发工作。从材料的制备加工技术、韧化和强

化、力学和物理性能等方面,进行了较深入广泛的研究,取得了令人瞩目的成就,缩小了我国与发达国家之间的差距,在某些方面还取得了有特色的创新性成果。

本文着重归纳了“七五”期间我国金属间化合物高温结构材料的研究和开发所取得的主要进展,结合我国的实际国情和国外的发展趋势,对“八五”期间我国在金属间化合物结构材料上的研制进行了展望。

2 国外研究现状与发展趋势

近十年来国外重点研究并取得重大进展的金属间化合物主要为Ni-Al, Ti-Al以及Fe-Al三个体系的 A_3B 和AB型铝化物,其中 A_3B 型化合物主要为 Ni_3Al 、 Ti_3Al 、 Fe_3Al 以及 Al_3Ti ; AB型化合物主要为NiAl、FeAl和TiAl。

多晶 Ni_3Al 基材料,易发生晶界脆断,在断裂前不表现出任何塑性,通过硼的微合金化使多晶 Ni_3Al 合金的脆性问题得到突破性改善,现已发展了一系列以 Ni_3Al 为基的商用合金。 Ti_3Al 有序合金室温时只有一个滑移系,只发生平行于基面的滑移,因而塑性很差,通过加入足够量的 β 稳定元素Nb,形成 $\alpha_2 + \beta$ 两相组织,使 Ti_3Al -Nb合金的室温塑性达2~5%,美国正在将此合金制成发动机部件进行实际使用考核。 Fe_3Al 金属间化合物的室温脆性被认为是环境介质作用的结果,通过Cr合金化和控制晶粒尺寸可使室温塑性提高至8~10%,当前研究的重点是进一步改善室温塑性的同时提高其高温强度。 Al_3Ti 金属间化合物近几年受到关注,但塑性极低,通过Cr、Mn、Ni、Fe、Cu以及Pd等元素合金化可使低对称性的 DO_{22} 四方结构转变成高对称性的 $L1_2$ 结构,使合金的压缩塑性得到改善,但 $L1_2$ 型 Al_3Ti 合金由于解理强度低,其塑性仍很低。

与 A_3B 型化合物相比,三种AB型金属间化合物的塑化尚未取得突破性进展,NiAl和FeAl至今未找到有效途径解决其脆性问题,近期研究表明,NiAl金属间化合物可通过形成部分 γ' 和无序 γ 相来改善塑性。TiAl金属间化合物通过Cr、Mn、V、Mo合金化和控制组织,形成一定比例和形态的 $\gamma + \alpha_2$ 两相组织,可使室温塑性提高至2~4%,日本正在研究用定向凝固技术大幅度提高TiAl合金室温塑性的可能性。

上述的几种二元金属间化合物,其高温蠕变和持久性能尚不太高,没有超过先进高温合金的水平,因而无法填补图1所示的高温合金和陶瓷之间的空白。近几年来国外金属间化合物的研究出现了两种趋势:一是研究发展熔点更高、可在 $1000^\circ\sim 1200^\circ\text{C}$ 工作的新型金属间化合物,这些化合物主要为高熔点金属Nb、W、Mo、Ta及其他金属与Al、Si形成的二元、多元铝化物和硅化物以及晶体结构更复杂的含Al、Si Laves相的(如 $MoSi_2$ 、 Ti_5Si_3 、 Al_3Nb 、 $NbNiAl$ 以及Nb-Ti-Al, Ta-Ti-Al系)多元化合物;二是发展以金属间化合物为基的复合材料,用 SiC 、 Al_2O_3 、 TiB_2 等纤维或质点

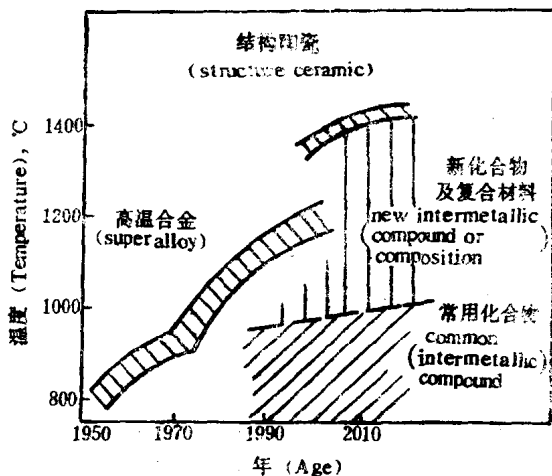


图1 各种高温结构合金的发展
Fig. 1 The development of various high temperature structure alloys.

作为增强剂强化金属间化合物基体,发展了一系列复合工艺。基体和增强剂之间界面的相容性和界面反应以及纤维与基体间膨胀系数的匹配问题是发展此类复合材料需解决的关键技术环节。

国外在发展合金材料的同时,还十分注意将先进的熔炼、加工及粉末冶金技术用于合金的研制中去。快速凝固技术在金属间化合物的研制中得到较广泛的应用,它不仅可改善合金成分的均匀性和细化晶粒,而且还可引入细小弥散的强化相质点,在 Ni_3Al 的研制中取得较显著的效果。机械合金化技术是制造含较多量强化质点合金材料的有效手段。新发展的反应烧结技术和自蔓延合成技术为金属间化合物的合成及金属间化合物基复合材料的制造提供了新的途径。带侧向压力的挤压技术、液静挤压技术以及等温锻造技术为难变形金属间化合物的高温变形和成形提供了可能性。

3 Ni_3Al 合金研究工作的进展

“七五”期间我国 Ni-Al 系金属间化合物的研究工作主要集中在 Ni_3Al 基合金的研究和发展,重点研究了改善塑性,提高强度,改善综合性能,使其发展成为一种实用的工程材料,同时也开展了一些基础性研究工作,取得了显著的进展,在实验室研制的合金达到的性能水平与国外公布的性能数据相当。

3.1 合金元素对塑性和强度的影响

各有关单位较系统地研究了 Zr 、 Cr 、 Ti 、 Hf 、 Si 、 Nb 、 Fe 、 Mn 、 V 等元素对 Ni_3Al 基合金强度和塑性的影响,结果指出: Fe 和 Mn 可以显著改善合金的室温塑性, Cr 、 Fe 和 Hf 可改善中温塑性; Co 、 Si 、 Hf 对 950°C 塑性产生有利的作用; Si 、 Ti 、 V 、 Zr 、 Nb 、 Mo 、 Hf 、 W 等元素可在不同程度上提高合金的高温强度。

通过研究合金元素对 $\text{Ni}_3\text{Al-Mo}$ 基铸造合金组织和性能的影响,发展了一种新的 Ni-8Al-12Mo-B-C 铸造合金,其 1100°C 、 100MPa 下的持久寿命可达 90h ,高于常规的镍基铸造高温合金的水平。

通过试验研究首次发现微量 Zr 可显著提高 Ni_3Al 的室温塑性,当 Zr 的加入量为 $1\text{at}\%$ 时,铸造 Ni_3Al 合金的室温伸长率可达 10% ,此成果为 Ni_3Al 的塑化提供了一条新的途径。

3.2 改善中、高温塑性的研究

$\text{Ni}_3\text{Al-B}$ 合金在 $600\sim 800^\circ\text{C}$ 拉伸时有一个低塑性区,高温时塑性低、热加工塑性差,针对此问题开展了试验研究工作,结果指出,低应变速率时($\dot{\epsilon} < 10^{-4}/\text{s}$)在大气中试验, 600°C 的塑性很低,但在真空中进行拉伸试验时塑性较高,表明 $\text{Ni}_3\text{Al-B}$ 的中温低塑性是由环境动态脆化引起的。合金中加入 Cr 可减轻动态脆性,但不能消除,研究表明了低应变速率下的动态脆化是氧在裂纹尖端动态渗入引起的。另一项研究的结果指出,高应变速率变形时的中温低塑性是与中温时形成的组织状态密切相关,中温拉伸试验时形成细小的 Ni_3Al 导致合金塑性降低,含 Cr 的 Ni_3Al 合金也呈现明显的中温低塑性。试验研究还表明,微量 Zr 对改善 $\text{Ni}_3\text{Al-B}$ 合金的中温塑性也有一定的有利作用。

Ni_3Al 合金的高温塑性低,热加工成型极为困难,难于作为变形合金推广应用。高温低塑性的原因是高温时晶界结合力低,沿晶界易断裂。为了提高晶界结合力,我国首创采用镁微合金化,使合金的高温塑性和热加工塑性有了显著的改善,铸态 $\text{Ni}_3\text{Al-Cr-Zr-B-Mg}$ 合金在 1100°C 允许的最大变形量达 50% ,达到单晶合金的水平,(图2)加镁后合金的持久性能也有明显的提高。此外,试验还发现适量稀土元素 Ce 和 Y 对合金的高温塑性也有一定的影

响。

3.3 Ni_3Al 的韧化及其机理研究

多晶 Ni_3Al 中加入硼使合金塑化, 合金材料因而取得突破性进展, 我国各有关单位从不同侧面研究了硼的塑化作用及其机理。有一项研究工作应用嵌入原子法计算机模拟了 Ni_3Al 的晶界原子结构, 发现晶界能和内聚能与存在的 B、Al 相对含量密切相关, B 有助于晶界结合强度的提高。研究中还应用扫描电镜原位观察, 证实 B 的加入使晶界附近存在一个中间过渡滑移区, 促进了晶界位错的吸收和发射。电镜微区衍射的结果也证明了加 B 合金的晶界呈无序态, 导致晶界的韧化。

还有的工作研究了 Al、B 含量与晶体空位缺陷的关系, 从晶体空位浓度角度解释了 Al 含量接近或超过化学计量配比时 B 塑化效应的消失。随着 Al 含量增加, 基体中空位浓度增加, B 的分布由晶界转入基体。中子活化试验结果也证明了超计量 Al 时, 晶界 B 浓度降低。 Ni_3Al 位错运动和滑移机制的研究结果指出, Ni_3Al 中有 30% 位错以 SISF 的形式分解, 而当加 B 后, 这些 SISF 位错消失, 说明了 B 改变变形机制可能也是塑化的原因之一。

有的工作进一步系统研究了 B 含量对 Ni_3Al 性能的影响, 结果指出, 对多晶 Ni_3Al 合

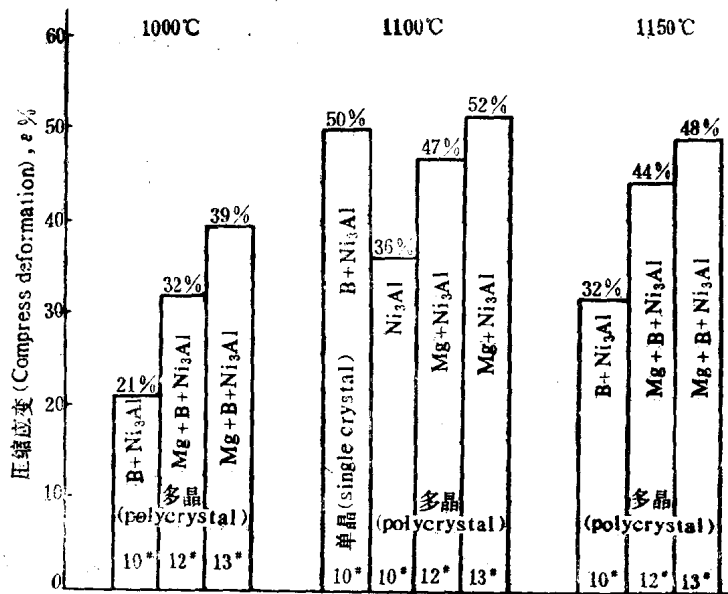


图2 mg对 Ni_3Al + B 合金高温压缩塑性的影响

Fig.2 The effect of mg on the hot compression ductility of Ni_3Al base alloy

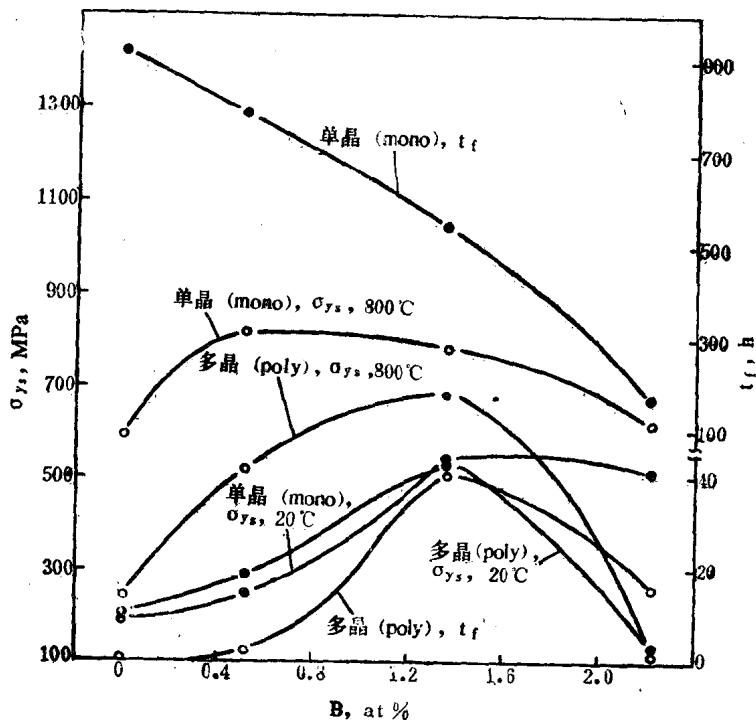


图3 硼含量对多晶和单晶 Ni_3Al 合金室温和800°C屈服

强度以及850°C, 100MPa条件下持久寿命的影响

Fig.3 Effect of boron content on yield strength at Zo and 800°C and rupture time at 850°C and 100MPa

金,当B加入量为0.3~0.4at%时,合金塑性最好,但综合性能较差,持久性能较低,而当加入B量为1.5at%时,塑性虽略有下降,但高温持久性能却最好(见图3)。

3.4 Ni_3Al 基合金的抗氧化行为

有些工作研究了合金元素对 Ni_3Al 基合金抗氧化和耐熔盐腐蚀性能的影响,结果指出,Cr对900℃以下合金抗氧化性产生有利的影响,但在900℃以上Cr能降低抗氧化性,Cr、Nb、Ti对抗熔蚀有有利的作用。1.37at%以下的B增加了合金的抗氧化性,适量稀土元素Y和Ce可显著提高合金的抗氧化性。

3.5 新工艺的探索研究及合金的开发应用

对 Ni_3Al 的超塑性及其成型工艺的研究,通过合金成分和组织的严格控制,在950℃时获得660%的超塑性,并成功地采用超塑性成型技术制造出小型 Ni_3Al 基合金盘件。在研制中还采用了热挤压工艺生产了 Ni_3Al 棒材、热轧工艺加工成板材及通过冷旋压制造了 $\phi 100 \sim 200 \times 1\text{mm}$ 管材,还开发了 $\phi 5\text{mm}$ 合金丝材水平连铸工艺。通过定向凝固得到的定向 Ni_3Al 合金具有较高的中温和高温塑性。

在 Ni_3Al 合金的推广应用方面也做了一定的工作,采用精密铸造技术制造生产了W、Mo粉用的还原舟皿,经一年半在现场实际应用,情况良好,没有发现任何问题,可以继续使用,此项目已通过冶金部组织的鉴定。在 Ni_3Al 合金用作电热丝的开发方面也取得进展,经水平连铸或经冷锻的线材通过冷拔制成 $\phi 0.63\text{mm}$ 合金丝,其电阻率接近Ni-Cr和Fe-Cr-Al合金,电热丝快速寿命试验表明, Ni_3Al 电热丝在1000℃的工作寿命超过了Ni-Cr丝,此外还准备进行进一步的工业性应用试验。

4 Ti-Al系金属间化合物研究工作的进展

Ti-Al系中有三种金属间化合物 Ti_3Al 、 TiAl 和 TiAl_3 ，“七五”期间我国重点地对 Ti_3Al 进行了较系统的研究,对 TiAl 和 TiAl_3 也进行了研究和探索。

4.1 Ti_3Al 基合金

对 Ti_3Al 基合金的塑化问题,主要从合金化;热处理和热机械处理对组织性能的影响;合金的熔炼和加工技术;及合金力学性能测试四个方面开展较广泛和系统的研究。

4.1.1 Ti_3Al 的合金化研究

通过合金化以改善合金的室温塑性,同时要保持 Ti_3Al 良好的蠕变性能,国外通过添加 β 相稳定元素Nb改进 Ti_3Al 室温塑性已取得明显进展,此外研究添加V代替部分Nb,添加Mo进行强化也取得明显效果。我国各有关单位深入地研究了Nb,Mo,V含量对 Ti_3Al 基合金室温塑性和高温强度的影响,并着重研究了Ti-24Al-11Nb和Ti-24Al-10Nb-3V-1Mo合金的组织 and 性能,这些合金在 $\alpha_2 + \beta$ 双相组织时的室温拉伸塑性可达3~6%。在研究的基础上发展了一个含Nb为14at%的新合金(Ti-24Al-14Nb-3V-0.5Mo),其室温拉伸塑性提高至7~10%,高温强度相当于含11at% Nb合金的水平。此外,还创造性地研究了元素Ru更强地稳定 β 作用,结果指出0.7wt% Ru能代替10wt% Nb的作用,含Ru合金的塑性可达Ti-24Al-11Nb合金的水平,因而用Ru合金化既可改善塑性又可降低合金比重,是一个有意义的合金化方向。有的单位还研究了含稀土元素的 Ti_3Al 合金。

4.1.2 热处理和热机械处理与相组织的关系

热处理和热机械处理对 Ti_3Al 合金的塑性有重要的影响,通过热处理和热机械处理可调整和控制合金的最佳组织状态,使合金达到最好的塑性。试验研究表明,加Nb和加Nb,