



国防科技图书出版基金

异质先进材料连接 理论与技术

Theories and Technique on Joining
of Dissimilar Advanced Materials

■ 李亚江 等 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

· 013032892

TG457
30



国防科技图书出版基金

异质先进材料连接 理论与技术

Theories and Technique on Joining of
Dissimilar Advanced Materials

李亚江 等编著



国防工业出版社

· 北京 ·



北航

C1640645

TG457
30

002008810

图书在版编目(CIP)数据

异质先进材料连接理论与技术 / 李亚江等编著.
—北京:国防工业出版社,2013.3
ISBN 978-7-118-08548-8

I. ①异... II. ①李... III. ①工程材料—
焊接工艺 IV. ①TG457

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 001119 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 15½ 字数 303 千字
2013 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 78.00 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 王 峰

副主任委员 吴有生 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

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 陆 军 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

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

先进材料是指除常规钢铁和有色金属之外的具有特殊性能的工程材料,如高技术陶瓷、金属间化合物、复合材料等。先进材料的研发是多学科相互渗透的结果,连接技术对其推广应用起着至关重要的作用。

现代科学技术的进步,对焊接构件的性能提出了更高、更苛刻的要求,除了要求满足通常的力学性能之外,还有如高温强度、耐磨性、耐腐蚀性、低温韧性、导热性等多方面的性能要求。因此,现代工程结构中经常需要对异质材料进行连接/焊接。异质材料连接/焊接构件的特点是能够最大限度地发挥材料各自的性能优势,收到“物尽其用”的效果。但是,异质材料的连接/焊接要比同质材料困难得多,因为除了材料本身的物理化学性能对连接性的影响之外,两种材料物理化学和性能的差异会在更大程度上影响它们之间的连接性。特别是针对异质先进材料,连接/焊接难度更大,采用常规的连接/焊接方法难以实现,而且缺乏必要的理论支持。

为了推进先进材料的发展,本书从理论与实践结合的角度,对近年来受到人们关注的异质先进材料连接/焊接问题,例如高技术陶瓷、金属间化合物、复合材料等异质材料连接/焊接的理论、技术特点及应用前景等做了系统的阐述,力求突出科学性、先进性和新颖性等特色。本书内容反映出近年来先进材料连接/焊接技术的发展,特别是一些高新技术的发展。

参加本书编写人员的有:李亚江、王娟、刘鹏、陈茂爱、马海军、沈孝芹、夏春智、蒋庆磊、吴娜、魏守征等。

本书供从事与先进材料研发和连接/焊接技术相关的研究人员和工程技术人员使用,也可供高等院校师生、科研院(所)和企事业单位的科研人员参考。

向关心本书出版的焊接界同行及所援引文献的作者致以敬意。由于编著人员水平所限,书中错误或不当之处,恳请读者指正并提出宝贵意见。

编 者
2012年8月

目 录

第 1 章 概述	1	Chapter 1 Introduction	1
1.1 先进材料的分类和性能特点	1	1.1 Classification and performance of advanced materials	1
1.2 先进材料的应用及发展前景	4	1.2 Application and development prospect of advanced materials	4
第 2 章 先进陶瓷与金属的连接	11	Chapter 2 Joining of advanced ceramics and metals	11
2.1 陶瓷材料的性能特点	11	2.1 Performance characteristics of ceramics	11
2.1.1 陶瓷分类与特点	11	2.1.1 Classification and characteristics of ceramics	11
2.1.2 氧化物陶瓷和非氧化物陶瓷	12	2.1.2 Oxide ceramics and non-oxide ceramics	12
2.1.3 复合陶瓷及性能	16	2.1.3 Composite Ceramics and performance	16
2.2 陶瓷与金属连接的要求和问题	17	2.2 Requirements and problems in the joining of ceramics with metals	17
2.2.1 陶瓷与金属连接的基本要求	17	2.2.1 Essential requirements in the joining of ceramics and metals	17
2.2.2 陶瓷与金属连接存在的问题	18	2.2.2 Problems in the joining of ceramics and metals	18
2.2.3 陶瓷与金属的连接方法	19	2.2.3 Joining processes for ceramics and metals	19
2.3 陶瓷与金属的连接性分析	22	2.3 Weldability analysis of ceramics to metals	22
2.3.1 接头区裂纹问题	22	2.3.1 Crack problems in the joint zone	22
2.3.2 陶瓷与金属的界面反应产物	24	2.3.2 Interface reaction of ceramics to metals	24
2.3.3 接头区的结合强度	26	2.3.3 Combine strength of the joint zone	26
2.3.4 陶瓷与金属接头区的应力分布	29	2.3.4 Stress distribution of the joint zone Ceramics to metals	29
2.4 陶瓷与金属的钎焊连接	32	2.4 Brazing joining of ceramics to metals	32

2.4.1	陶瓷与金属的钎焊连接特点	32	2.4.1	Brazing joint characteristics of ceramics to metals	32
2.4.2	陶瓷与金属的表面金属化法连接	33	2.4.2	Surface metallization brazing of ceramics to metals	33
2.4.3	陶瓷与金属的活性金属化法连接	38	2.4.3	Active metallization brazing of ceramics to metals	38
2.4.4	陶瓷与金属钎焊连接示例	40	2.4.4	Applications of brazing ceramics to metals	40
2.5	陶瓷与金属的扩散连接	41	2.5	Diffusion bonding of ceramics to metals	41
2.5.1	陶瓷与金属扩散连接的特点	41	2.5.1	Characteristics of diffusion bonding ceramics to metals	41
2.5.2	扩散连接的工艺参数	43	2.5.2	Technological parameters of diffusion bonding	43
2.5.3	Al ₂ O ₃ 复合陶瓷/金属扩散界面特征	52	2.5.3	Interface characteristics of Al ₂ O ₃ composite ceramic/metal diffusion bonding	52
2.5.4	SiC/Ti/SiC 的扩散连接	57	2.5.4	Diffusion bonding of SiC/Ti/SiC	57
第3章 金属间化合物异质材料的连接			Chapter 3 Joining of intermetallics to dissimilar materials		
3.1	金属间化合物的发展及特性	60	3.1	Development and characteristics of intermetallics	60
3.1.1	金属间化合物的发展	60	3.1.1	Development of intermetallics	60
3.1.2	金属间化合物的基本特性	61	3.1.2	Essential performance of intermetallics	61
3.1.3	三种有发展前景的金属间化合物	62	3.1.3	Three promising intermetallics	62
3.2	Ni-Al 金属间化合物的连接	70	3.2	Joining of Ni-Al intermetallics	70
3.2.1	NiAl 合金的扩散连接	70	3.2.1	Diffusion bonding of NiAl alloys	70
3.2.2	Ni ₃ Al 金属间化合物的熔焊连接	72	3.2.2	Fusion welding of Ni ₃ Al intermetallics	72
3.2.3	Ni ₃ Al 与碳钢(或不锈钢)的连接	74	3.2.3	Joining of Ni ₃ Al and carbon steel (or stainless steel)	74
3.3	Ti-Al 金属间化合物的连接	77	3.3	Joining of TiAl intermetallics	77
3.3.1	TiAl 合金的电子束焊	77	3.3.1	Electron beam welding of TiAl alloys	77
3.3.2	TiAl 和 Ti ₃ Al 合金的扩散连接	79	3.3.2	Diffusion bonding of TiAl to Ti ₃ Al	79
3.3.3	TiAl 异种材料的扩散连接	82	3.3.3	Diffusion bonding of TiAl dissimilar materials	82

3.4 Fe-Al 金属间化合物与钢的连接	85	3.4 Joining of Fe - Al intermetallics to steels	85
3.4.1 Fe ₃ Al 金属间化合物的电子束焊	85	3.4.1 Electron beam welding of Fe ₃ Al intermetallics	85
3.4.2 Fe ₃ Al 与钢的填丝钨极氩弧焊	86	3.4.2 Tungsten inert-gas arc welding with filler metal of Fe ₃ Al to steel	86
3.4.3 Fe ₃ Al 与钢熔焊区的组织与断口形态	88	3.4.3 Microstructure and fracture morphology of Fe ₃ Al/steel fusion welding joint	88
3.4.4 Fe ₃ Al 堆焊及焊条电弧焊	96	3.4.4 Surfacing and shielded metal arc welding of Fe ₃ Al intermetallics	96
3.4.5 Fe ₃ Al 金属间化合物与钢的扩散连接	97	3.4.5 Diffusion bonding of Fe ₃ Al to steels	97
参考文献	104	References	104
第 4 章 异质复合材料的连接	106	Chapter 4 Joining of dissimilar composites	106
4.1 复合材料的分类、特点及性能	106	4.1 Classification, characteristics and performance of composites	106
4.1.1 复合材料的分类及特点	106	4.1.1 Classification and characteristics of composites	106
4.1.2 复合材料的增强体	110	4.1.2 Reinforcements of composites	110
4.1.3 金属基复合材料的性能特点	114	4.1.3 Performance of metal-matrix composites	114
4.2 复合材料的连接性分析	118	4.2 Joining characteristics analysis of composites	118
4.2.1 金属基复合材料的连接性	118	4.2.1 Joining characteristics of metal-matrix composites	118
4.2.2 树脂基复合材料的连接性	123	4.2.2 Joining characteristics of polymer-matrix composites	123
4.2.3 C/C 复合材料的连接性	125	4.2.3 Joining characteristics of C/C composites	125
4.2.4 陶瓷基复合材料的连接性	130	4.2.4 Joining characteristics of ceramic-matrix composites	130
4.3 连续纤维增强金属基复合材料的连接	137	4.3 Joining of continuous fibers reinforced metal-matrix composites	137

4.3.1	连续纤维增强 MMC 连接中的问题	137	4.3.1	Problems in joining of continuous fibers reinforced MMC	137
4.3.2	连续纤维增强 MMC 接头设计	138	4.3.2	Joint design of continuous fibers reinforced MMC	138
4.3.3	连续纤维增强 MMC 的连接工艺特点	138	4.3.3	Joining technological characteristics of continuous fibers reinforced MMC	138
参考文献		146	References		146
第 5 章	超导材料的连接	147	Chapter 5	Joining of super-conductor materials	147
5.1	超导材料的特性及应用 前景	147	5.1	Performance and application prospect of super-conductors	147
5.1.1	超导材料的基本 特性	147	5.1.1	Essential performance of super- conductors	147
5.1.2	超导材料的类型	148	5.1.2	Classification of super-conductors	148
5.1.3	应用及前景	150	5.1.3	Application and prospect of super-conductors	150
5.2	超导材料的连接方法	151	5.2	Joining processes of super-conductors	151
5.2.1	超导材料的爆炸 连接	152	5.2.1	Explosive welding of super-conductors	152
5.2.2	超导材料的扩散 连接	152	5.2.2	Diffusion bonding of super-conductors	152
5.2.3	超导材料的钎焊 连接	153	5.2.3	Brazing joining of super- conductors	153
5.2.4	超导材料的冷压和 储能冲击连接	154	5.2.4	Cold pressure welding and Capacitor discharge welding of super-conductors	154
5.3	超导材料的连接工艺特点	155	5.3	Joining technological characteristics of super-conductors	155
5.3.1	Nb-Ti 低温超导 材料的连接特点	155	5.3.1	Joining characteristics of Nb-Ti low temperature super-conductors	155
5.3.2	金属间化合物和 氧化物陶瓷超导 的连接	156	5.3.2	Joining of intermetallics with oxide ceramic super-conductors	156
5.3.3	Y-Ba-Cu-O 超导材料 的连接	158	5.3.3	Joining of Y-Ba-Cu-O super-conductors	158
5.3.4	Bi-Sr-Ca-Cu-O 超导 材料的连接	163	5.3.4	Joining of Bi-Sr-Ca-Cu-O super-conductors	163
参考文献		172	References		172

第 6 章 形状记忆合金的连接	173	Chapter 6 Joining of shape memory alloys	173
6.1 形状记忆合金的特点及分类	173	6.1 Characteristics and classification of shape memory alloys	173
6.1.1 形状记忆合金的特点	173	6.1.1 Characteristics of shape memory alloys	173
6.1.2 形状记忆合金的分类及性能	174	6.1.2 Classification and performance of shape memory alloys	174
6.1.3 形状记忆合金的应用	176	6.1.3 Application of shape memory alloys	176
6.2 形状记忆合金的连接方法	178	6.2 Joining processes of shape memory alloys	178
6.2.1 形状记忆合金的熔化焊	178	6.2.1 Fusion welding of shape memory alloys	178
6.2.2 形状记忆合金的固相连接	181	6.2.2 Solid-phase joining of shape memory alloys	181
6.2.3 形状记忆合金的钎焊连接	183	6.2.3 Brazing joining of shape memory alloys	183
6.2.4 形状记忆合金的电阻钎焊	184	6.2.4 Resistance brazing joining of shape memory alloys	184
6.3 形状记忆合金的连接示例	188	6.3 Applications of shape memory alloys	188
6.3.1 形状记忆合金的法兰密封连接	188	6.3.1 Joining of shape memory alloy flanges	188
6.3.2 TiNi 记忆合金与不锈钢的 TLP-DB 连接	190	6.3.2 TLP-DB of TiNi shape memory alloy to stainless steel	190
参考文献	193	References	193
第 7 章 异质轻金属的连接	194	Chapter 7 Joining of dissimilar light metals	194
7.1 钛与铝异质金属的连接	194	7.1 Joining of Ti and Al dissimilar metals	194
7.1.1 钛与铝连接的意义	194	7.1.1 Significance of joining Ti to Al	194
7.1.2 钛及钛合金与铝的连接特点	195	7.1.2 Joining characteristics of Ti and its Alloy to Al	195
7.1.3 钛及钛合金与铝的连接工艺要点	196	7.1.3 Technique points in the joining Ti to Al	196
7.2 镁与铝异质金属的连接	199	7.2 Joining of Mg and Al dissimilar metals	199
7.2.1 镁与铝连接的意义及特点	200	7.2.1 Significance and characteristics of joining Mg to Al	200

7.2.2	铝与镁的钨极氩弧焊	202	7.2.2	Tungsten inert-gas arc welding of Mg to Al	202
7.2.3	镁与铝的扩散连接	208	7.2.3	Diffusion bonding of Mg to Al	208
7.3	铝与铜异质金属的连接	213	7.3	Joining of Al and Cu dissimilar metals	213
7.3.1	铝与铜连接中存在的问题	213	7.3.1	Problems in joining Al to Cu	213
7.3.2	铜与铝及铝合金的熔焊连接	215	7.3.2	Fusion welding of Cu to Al and its alloys	215
7.3.3	铜与铝及铝合金的压焊连接	218	7.3.3	Pressure bonding of Cu to Al and its alloys	218
7.3.4	铜与铝及铝合金的钎焊连接	223	7.3.4	Brazing joining of Cu to Al and its alloys	223
7.4	钛及钛合金异质金属的连接	227	7.4	Joining of Ti and its alloys dissimilar metals	227
7.4.1	钛及钛合金与铜的连接	228	7.4.1	Joining characteristics of Ti and its alloys to copper	228
7.4.2	钛及钛合金与钢的连接	230	7.4.2	Joining of Ti and its alloys to steels	230
参考文献		233	References		233

第1章 概述

先进材料是指具有比传统钢铁和有色金属材料更加优异的性能,能够满足高新技术发展需要的一类工程材料,如高技术陶瓷、金属间化合物、复合材料等。先进材料的焊接是经常遇到的,而且在实践中出现问题较多,有时甚至阻碍了整个工程(或焊接结构)的进展。先进材料的主要特点是高硬度、塑韧性差,焊接中极易产生裂纹,焊接难度很大,但日益受到工程界人士的重视。解决先进材料的焊接问题对其发展、应用和推动科技进步、促进社会发展起着重要的作用。

1.1 先进材料的分类和性能特点

现代科学技术的发展,对焊接接头质量及结构性能的要求越来越高,钢铁材料和常规有色金属材料的焊接已难以满足高新技术发展的要求,各种特殊材料的焊接近年来不断涌现。先进材料是具有特殊性能和用途的材料,如陶瓷、金属间化合物和复合材料等。先进材料受到人们的关注,极大地推动了科学技术进步和社会发展,并在电子、能源、汽车、航空航天、核工业等领域中得到了应用。

1. 先进材料的分类

先进材料是指那些已研制成功或正在发展之中的具有比传统材料的性能更为优异的一类材料。先进材料技术是按照人的意志,通过物理化学、材料设计、材料加工、试验评价等一系列研发过程,创造出能满足各种需要的新型材料的技术。先进材料按材料的属性划分,有先进金属材料、无机非金属材料(如陶瓷材料等)、有机高分子材料、先进复合材料四大类。

按材料的使用性能划分,有结构材料和功能材料。结构材料主要是利用材料的力学和理化性能,以满足高强度、高刚度、高硬度、耐高温、耐磨、耐蚀、抗辐照等性能要求;功能材料主要是利用材料具有的电、磁、声、光、热等效应,以实现某种功能,如超导材料、磁性材料、光敏材料、热敏材料、隐身材料和制造原子弹、氢弹的核材料等。先进材料在国防建设上作用重大。例如,超纯硅、砷化镓研制成功,导致大规模和超大规模集成电路的诞生,使计算机运算速度从每秒几十万次提高到每秒百亿次以上;航空发动机材料的工作温度每提高 100°C ,推力可增大24%;隐身材料能吸收电磁波或降低武器装备的红外辐射,使敌方探测系统难以发现。

先进材料的开发与应用是现代科学技术发展的重要组成部分。随着航空航天、新能源、电力等工业的发展,人们对材料的性能提出了越来越高的要求。开发在特殊条件下使用的结构材料是先进材料的发展趋势之一,而特种结构材料的发

展是其中重要的组成部分。

工程中经常用到的先进材料主要包括先进陶瓷、硬质合金、金属间化合物、难熔金属及合金等。这些材料的一个共同特点是硬度高、塑性和韧性差,焊接中极易产生裂纹,采用常规的熔焊方法很难对这类材料进行焊接。

先进材料的发展及应用与高新技术的发展密切相关,而且具有独特的和难以替代的作用。例如先进陶瓷材料、金属间化合物和难熔材料的开发与应用,为开发能源、开发太空和海洋、探索航空航天等领域提供了重要的物质基础。

2. 先进材料的性能特点

从先进材料的合成和制造工艺来看,先进陶瓷、金属间化合物、复合材料等,是把通过一些高技术手段获得的极端条件(如超高压、超高温、超高冷却速度等)作为必要的制备方法;其次是先进陶瓷、金属间化合物、复合材料等的研发与计算机技术和先进的自动控制技术的发展和运用密切相关,对材料的质量控制要求非常严格。因此,先进材料具有高强度、耐高温、耐腐蚀、抗氧化等一系列优点。

1) 先进陶瓷材料

先进陶瓷材料又称高性能陶瓷、新型陶瓷或高技术陶瓷,是以精制的高纯、超细人工合成的无机化合物为原料,采用精密控制的制备工艺获得具有优异性能的新一代陶瓷。

先进陶瓷在组成、性能、制造工艺及应用等方面都与传统的陶瓷截然不同,组成已由原来的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 等发展到了 Si_3N_4 、 SiC 和 ZrO_2 等。采用先进的物理、化学方法能够制备出超细粉末。烧结方法也已由普通的大气烧结发展到在控制气氛中的热压烧结、真空烧结和微波烧结等先进的烧结方法。先进陶瓷具有特定的精细组织结构和性能,在现代工程和高新技术中起着重要的作用。

广义的先进陶瓷包括人工单晶、非晶态(玻璃)、陶瓷及其复合材料、半导体、耐火材料等,属于无机非金属材料。陶瓷材料一般分为功能陶瓷和结构陶瓷两大类,生物陶瓷可以归入功能陶瓷(也可以单独列出)。与焊接相关的主要是结构陶瓷。

先进陶瓷具有优异的物理和力学性能,如高强度、高硬度、耐磨、耐腐蚀、耐高温和抗热震性等,而且在电、磁、热、光、声等方面具有独特的功能。陶瓷作为高温结构材料用于航空发动机、切削刀具和耐高温部件等,具有广阔的前景。

先进陶瓷的发展趋势有三个方面:

(1) 由单相、高纯材料向多相复合陶瓷方向发展,包括纤维(或晶须)补强的陶瓷基复合材料、异相颗粒弥散强化复相陶瓷、两种或两种以上主晶相组合的自补强材料、梯度功能复合材料以及纳米—微米陶瓷复合材料等。

(2) 从微米级尺度(从粉体到显微结构)向纳米级方向(1~数百纳米)发展,即向介于原子或分子与常规的微米结构之间的过渡性结构区发展。将出现与以往的微米级陶瓷材料不同的化学和物理性质,如超塑性和电、磁性质的变化等。

(3) 陶瓷材料的加工,如剪裁、形状设计和连接(焊接)等。

2) 金属间化合物

金属间化合物的研究始于20世纪30年代,直到70年代中后期才有所突破,看到了金属间化合物成为实用工程材料的前景,在世界范围掀起一股研究热潮,在不同层次上开展研究工作,先后突破了 Ti_3Al 、 Fe_3Al 、 $TiAl$ 、 $NiAl$ 等金属间化合物的脆性问题,使这些材料向工程实用跨出了关键性的一步。

金属间化合物的脆性问题基本解决后,要使这些合金成为实用的工程材料,还需解决一系列问题,如进一步提高强度和高温强度、改善加工性能(特别是压延性、焊接性)和保证组织稳定性等。众多研究者在这些方面开展了工作并已取得长足进展。与焊接相关的主要是结构用金属间化合物,最具应用前景的是 $Ni-Al$ 、 $Ti-Al$ 、 $Fe-Al$ 系金属间化合物,如 Ni_3Al 、 $NiAl$ 、 Ti_3Al 、 $TiAl$ 、 Fe_3Al 、 $FeAl$ 等。

3) 复合材料

复合材料的发展可以分为两个阶段,即早期复合材料和现代复合材料。“复合材料”(Composite Materials)一词出现于20世纪40年代,当时出现了玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂,60年代以后陆续开发出多种高性能纤维;80年代以后,各类作为复合材料基体的材料(如树脂基、金属基、陶瓷基、碳/碳基)和增强相的使用和改进,进入高性能现代复合材料的发展阶段。

复合材料技术实质上就是用原有的金属材料、无机非金属材料和高分子材料等作为组分,通过一定的工艺方法将增强相与基体复合在一起,制成既能保留原有材料的特性,又能显示出某些新性能的材料。

复合材料一般有两个基本相:一个是连续相(称为基体);另一个是分散相(称为增强相)。复合材料的性能取决于各相的性能、比例,而且与两相界面性质和增强剂的几何特征有密切的关系。分散相是以独立的形态分布在整个连续相中,分散相可以是纤维、晶须、颗粒(分别以下标 f 、 w 、 p 表示)等弥散分布的填料。

金属基复合材料包括晶须、颗粒和短纤维增强的金属基复合材料等几种。增强相包括单质元素(如石墨、硼、硅等)、氧化物(如 Al_2O_3 、 TiO_2 、 SiO_2 、 ZrO_2 等)、碳化物(SiC 、 B_4C 、 TiC 、 VC 、 ZrC 等)、氮化物(Si_3N_4 、 BN 、 AlN 等)的颗粒、晶须及短纤维。

4) 轻金属

世界范围内的能源消耗不断增长,减重增效已被发达国家公认为是提高能源利用效率的重要手段。由于具有高比强度(R_m/ρ)和高比刚度(E/ρ),轻金属(特别是镁合金、钛合金等)及其焊接结构的工程应用是减轻整体结构重量、提高能源利用效率的有效途径之一。

我国的国家中长期科学和技术发展规划纲要中明确将轻量化作为中国科技发展的基本国策。在中国近期实施的重大科技发展项目,如大飞机项目、高速列车项目和载人航天项目,都对结构的轻量化有明确的要求。但是,由于轻金属材料自身的特点和焊接的特殊性,决定了这些材料的焊接接头区组织和性能发生了显著的变化,这些变化对轻金属整体结构的性能和寿命有重要的影响。

(1) 镁及镁合金。以镁为基体的合金,常称为超轻质合金。镁合金近年来在工业(如航空航天、电子、通信、仪表、汽车等行业)上的应用越来越多。镁合金具有密度很小(比铝轻 $1/3$)、比强度高、能承受较大的冲击载荷、有良好的切削加工性等优点,具有广泛的应用前景。

镁及镁合金由于性能独特,正成为继钢铁、铝及铝合金之后的第三大金属工程材料,被誉为“21世纪绿色工程材料”。世界镁产业正以每年 $15\% \sim 25\%$ 的幅度增长,这在近代工程金属材料的开发应用中是前所未有的。

(2) 钛及钛合金。钛合金是以钛为基加入其他元素组成的合金。钛及钛合金是20世纪50年代发展起来的一种重要的轻结构金属,钛合金因具有比强度高、耐腐蚀性好、耐热性高等特点而被广泛应用于各个领域。世界上许多国家都认识到钛合金材料的重要性,相继对其进行研究开发,并得到了实际应用。20世纪50年代—60年代,主要是发展航空发动机用的高温钛合金和飞机机体用的结构钛合金,70年代开发出一批耐蚀钛合金,80年代以后,耐蚀钛合金和高强钛合金得到进一步发展。钛合金主要用于制作飞机发动机压气机部件,其次为火箭、导弹和高速飞机的结构件。钛合金在造船、化工、医疗器械等方面也获得了应用。

钛合金兼有钢、不锈钢和铝材的许多优点,有广阔的应用前景,人们对其发展寄予厚望,称为正在崛起的“第三金属”。钛作为年轻的材料,它要发展,性价比是竞争的焦点。从钢铁等材料的发展史可以看出,影响材料发展的五个要素是:需求、性能、成本、资源、经济技术环境。一种材料要获得迅速的发展,必须在诸多因素中取得某几项优势。

从20世纪50年代开始,由于航空航天技术的迫切需要,钛及钛合金得到了迅速的发展。第一种实用的钛合金是1954年美国研制成功的Ti-6Al-4V合金,由于它的耐热性、强度、塑性、韧性、成形性、可焊性、耐腐蚀性和生物相容性均较好,而成为钛合金工业中的王牌合金,该合金使用量已占全部钛合金的 $75\% \sim 85\%$ 。其他许多钛合金都可以看作是Ti-6Al-4V合金的改型。现在,钛及钛合金不仅是航空航天工业中不可缺少的结构材料,在造船、化工、冶金、医疗器械等方面也获得了广泛的应用。

1.2 先进材料的应用及发展前景

对于现代材料而言,材料是物质,制造是途径(或手段),应用是目的。在先进材料的使用条件下,必须考虑环境的特殊要求,如高温、低温、腐蚀介质等。结构件均有一定的形状配合和精度要求,因此先进材料还需有良好的可加工性能,如铸造性、冷(或热)成形性、焊接性、切削加工性等。遗憾的是,先进材料由于固有的特殊性能,焊接难度很大,有时甚至阻碍了先进材料的发展和应用。

1. 先进陶瓷

先进陶瓷原料丰富、产品附加值高,应用领域广阔。但由于陶瓷塑性和韧性

差,加工困难,不易制成大型或形状复杂的构件,因而单独使用受到一定的限制。特种陶瓷是随着现代电气、无线电、航空、原子能、冶金、机械、化学等工业以及电子计算机、空间技术、新能源开发等尖端科学技术的飞跃发展而发展起来的。在实际应用中,常采用连接技术制成陶瓷—金属复合构件,这样既能发挥陶瓷与金属各自的性能优势,又能降低生产成本,具有很好的应用前景。

陶瓷—金属焊接已获得广泛的应用,例如用于汽车发动机增压器转子(可以降低尾气排放)、陶瓷/钢摇杆、陶瓷/金属挺柱、火花塞、高压绝缘子、电子元器件(如真空管外壳、整流器外壳)等。

研究开发高效陶瓷发动机,是世界各国高技术竞争的热点之一。使用陶瓷发动机,可以把发动机的工作温度从 1000°C 提高到 1300°C ,热效率从30%提高到50%,重量减轻20%,燃料节省30%~50%。英国是最早从事结构陶瓷应用开发的国家,英国政府专门拨款上千万英镑,对陶瓷燃气轮机和往复式陶瓷发动机进行研发,已经制造出了活塞式陶瓷发动机。据美国福特汽车公司的专家估计,如果全美国的汽车都采用陶瓷发动机,那么每年至少可节约石油5亿桶。

对于陶瓷发动机,目前美、日、法、德等都制定了庞大的开发计划,投入了巨大的人力和资金。美国投资数十亿美元,组织几十家公司从事陶瓷发动机的研究开发,其中通用汽车公司、福特汽车公司、诺尔顿公司等大型企业,相继建立了新型陶瓷专业化生产中心。

日本把结构陶瓷看作是继微电子之后又一个可带来巨大效益的新领域,因此他们在同美国人的竞争中不惜代价,开发新产品的能力已超过了美国。日本213kW陶瓷发动机已经形成规模生产,并已装备了上百万辆小汽车。德国对陶瓷内燃机的研发也走在世界前列,德国“奔驰”汽车公司研制的“2000年轿车”就是由陶瓷燃气轮机驱动的。

在欧洲共同体的“尤里卡计划”中,法国、德国和瑞典三个国家从20世纪80年代开始联合进行陶瓷燃气轮机的开发,已经研制出功率为147kW的陶瓷涡轮喷气发动机,其工作温度可达 1600°C ,比普通发动机高出 600°C 以上。

2. 金属间化合物

近20年来,人们开始重视对金属间化合物的开发应用,这是材料领域一个带有根本性的转变。金属间化合物由于它的特殊晶体结构,使其具有其他固溶体材料所没有的性能。特别是固溶体材料通常随着温度的升高而强度降低,但某些金属间化合物的强度在一定范围内反而随着温度的上升而升高,这就使它有可能作为新型高温结构材料的基础。金属间化合物还有一些性能是固溶体材料的数倍乃至二三十倍。

Ni—Al、Ti—Al金属间化合物适合用于航空航天材料,具有很好的应用潜力,已受到欧、美等发达国家的普遍重视。一些Ni—Al合金已获得应用或试用,如用于柴油机部件、电热元器件、航空航天飞机紧固件等。Ti—Al合金可替代镍基合金制成航空发动机高压涡轮定子支撑环、高压压气机匣、发动机燃烧室扩张喷管喷