



“十二五”国家重点出版规划
精品项目

先进航空材料与技术丛书

先进航空材料 焊接技术

Joining Technologies of
Advanced Aeronautical Materials

李晓红 熊华平 张学军 等著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



“十二五”国家重点出版规划
精品项目

先进航空材料与技术丛书 ·

先进航空材料焊接技术 ·

李晓红 熊华平 张学军 等著 ·

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

焊接技术是先进航空材料及其精密、复杂航空构件制造不可缺少的关键技术。本书以北京航空材料研究院成立 55 年以来,特别是“十五”、“十一五”以来关于焊接技术的科研工作及其创新性成果为基础,重点介绍了先进铸造高温合金、变形高温合金、不锈钢和超高强度钢、钛合金、 Ti_3Al 基合金、 TiAl 金属间化合物、金属基复合材料、铝合金等先进航空材料的焊接技术,航空发动机部件焊接修复技术,航空焊接材料技术,以及相关焊接新技术,基本反映了国内外在这些方向的科研前沿、热点和技术发展水平。

本书内容新颖、技术讨论的深度和广度适中,适合于从事先进结构材料焊接技术与焊接材料技术研究、开发、应用的工程技术人员,以及大专院校的大学生、研究生和教师们阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

先进航空材料焊接技术 / 李晓红等著. —北京:
国防工业出版社, 2012. 1
(先进航空材料与技术丛书)
ISBN 978 - 7 - 118 - 07840 - 4
I. ①先... II. ①李... III. ①航空材料 - 焊接
工艺 IV. ①V261.3
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 280394 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 × 960 1/16 印张 36½ 字数 760 千字
2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 86.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

《先进航空材料与技术丛书》

编 委 会

主 任 戴圣龙

副主任 王亚军 益小苏

顾 问 颜鸣皋 曹春晓 赵振业

委 员 (按姓氏笔划为序)

丁鹤雁 王志刚 王惠良 王景鹤

刘 嘉 刘大博 阮中慈 苏 彬

李 莉 李宏运 连建民 吴学仁

张庆玲 张国庆 陆 峰 陈大明

陈祥宝 周利珊 赵希宏 贾泮江

郭 灵 唐 斌 唐定中 陶春虎

黄 旭 黄 敏 韩雅芳 骞西昌

廖子龙 熊华平 颜 悦

序

一部人类文明史从某种意义上说就是一部使用和发展材料的历史。材料技术与信息技术、生物技术、能源技术一起被公认为是当今社会及今后相当长时间内总揽人类发展全局的技术,也是一个国家科技发展和经济建设最重要的物质基础。

航空工业领域从来就是先进材料技术展现风采、争奇斗艳的大舞台,自美国莱特兄弟的第一架飞机问世后的 100 多年以来,材料与飞机一直在相互推动不断发展,各种新材料的出现和热加工工艺、测试技术的进步,促进了新型飞机设计方案的实现,同时飞机的每一代结构重量系数的降低和寿命的延长,发动机推重比量级的每一次提高,无不强烈地依赖于材料科学技术的进步。“一代材料,一代飞机”就是对材料技术在航空工业发展中所起的先导性和基础性作用的真实写照。

回顾中国航空工业建立 60 周年的历程,我国航空材料经历了从无到有、从小到大的发展过程,也经历了从跟踪仿制、改进改型到自主创新研制的不同发展阶段。新世纪以来,航空材料科技工作者围绕国防,特别是航空先进装备的需求,通过国家各类基金和项目,开展了大量的先进航空材料应用基础和工程化研究,取得了许多关键性技术的突破和可喜的研究成果,《先进航空材料与技术丛书》就是这些创新性成果的系统展示和总结。

本套丛书的编写是由北京航空材料研究院组织完成的。19 个分册

从先进航空材料设计与制造、加工成形工艺技术以及材料检测与评价技术三方面入手,使各分册相辅相成,从不同侧面丰富了这套丛书的整体,是一套较为全面系统的大型系列工程技术专著。丛书凝聚了北京航空材料研究院几代专家和科技人员的辛勤劳动和智慧,也是我国航空材料科技进步的结晶。

当前,我国航空工业正处于历史上难得的发展机遇期。应该看到,和国际航空材料先进水平相比,我们尚存在一定的差距。为此,国家提出“探索一代,预研一代,研制一代,生产一代”的划代发展思想,航空材料科学技术作为这四个“一代”发展的技术引领者和技术推动者,应该更加强化创新,超前部署,厚积薄发。衷心希望此套丛书的出版能成为我国航空材料技术进步的助推器。可以相信,随着国民经济的进一步发展,我国航空材料科学技术一定会迎来一个蓬勃发展的春天。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '李锐' (Li Rui), written in a cursive style.

2011 年 3 月

前 言

焊接专业是 1956 年北京航空材料研究院成立时就设立的重点专业之一,焊接专业的战略定位是发展航空材料焊接及先进焊接材料技术,即开展航空工业用钎焊扩散焊技术、航空先进结构材料焊接性和新型材料构件焊接技术的应用基础研究和应用研究,为航空材料及构件的连接提供先进的焊接技术;针对先进航空材料,从事相应焊接材料成分设计、匹配性及其制备技术研究,建立和完善焊接材料体系,成为多品种、多规格、高难度、小批量焊接材料的供应基地。

伴随着北京航空材料研究院 55 年的发展历程,焊接专业在航空材料的可焊性研究与相关焊接材料研制及焊接技术研究,航空产品焊接工艺研究,航空发动机部件焊接修复技术,焊接新技术探索研究方面取得丰硕成果,已经发展成为我国武器装备制造技术体系中不可缺少的重要组成部分。

作为北京航空材料研究院成立 55 周年的献礼,本书选择了具有我们自主创新或具有自己研究特色的相关研究成果,适当结合国际上最新的研究动态给予介绍。

在先进铸造高温合金的钎焊与瞬态液相扩散焊方面,李晓红、毛唯和叶雷首先以航空发动机高温合金叶片研制涉及的核心制造技术之一——焊接技术的应用研究为题(第 1 章),介绍了航空发动机涡轮叶片用铸造高温合金及其对钎焊、扩散焊技术的需求,以及这方面国内外焊接技术发展现状,总结了北京航空材料研究院最近 20 年以来在定向凝固高温合金、定向凝固 Ni_3Al 基高温合金、单晶合金的钎焊与 TLP 扩散焊的创新性研究进展,参与本章部分工作的还有谢永慧、程耀永、周媛、陈波、吴欣等人。在第 2 章里,郭绍庆、郭万林介绍了变形高温合金的焊接技术,包括低膨胀高温合金熔焊技术、氧化物弥散强化(ODS 系列)高温合金钎焊技术、GH4169 变形高温合金的摩擦焊技术,参与本章部分研究工作的还有刘效方、梁海等人。在第 3 章里,程耀永、郭绍庆和袁鸿介绍了航空用不锈钢和超高强度钢的焊接技术,包括不锈钢氩弧焊、钎焊技术,超高强度钢氩弧焊技术。

钛合金因为具有密度低、比强度高优异性能,其发展速度很快,极大地推动了航空、航天技术的发展,在飞机上钛合金的应用比例呈现明显的上升趋势,而且钛合金的焊接技术在飞机、发动机上都得到越来越多的应用。在第 4 章里,袁鸿、王金雪、余槐重点论述了先进航空钛合金焊接技术的研究进展与应用,涉及的钛合

金包括中强钛合金、高强钛合金、损伤容限型钛合金和高温钛合金。这里论述的钛合金焊接技术包括氩弧焊、电阻焊和电子束焊接,参与本章部分研究工作的还有郝丽萍、谷卫华等人。

Ti₃Al 基合金和 TiAl 金属间化合物是新发展起来的相对于普通钛合金具有更高工作温度的新型钛基高温合金,是未来航空、航天领域理想的高温结构材料,具有良好的应用前景。在第 5 章里,熊华平、陈波、刘卫红、袁鸿和潘晖介绍了“十五”、“十一五”以来关于 Ti₃Al 基合金、TiAl 金属间化合物的钎焊、扩散焊技术,包括材料自身的钎焊,以及与异种材料的钎焊,Ti₃Al 基合金、TiAl 金属间化合物扩散焊,Ti₃Al 基合金氩弧焊和电子束焊,参与本章部分研究工作的还有李晓红、毛唯、程耀永、叶雷、谢永慧、李艳。这方面焊接技术目前仍处于探索研究阶段,可望有所突破,有所创新。

铝合金作为轻质材料在飞机上获得重要应用。针对铝合金的焊接,张学军、程耀永、李艳和马文利在第 6 章里介绍了中高强铝合金、铝锂合金的焊接,铝合金钎焊材料、钎焊工艺,以及铝合金复杂构件的钎焊技术和应用,参与本章部分研究工作的还有李晓红、毛唯、张文扬、李小飞、吴欣等人。另外,近些年来,金属基复合材料因为在航空、航天、电子信息等领域有着应用前景而得到快速研究和发展,李晓红、熊华平、毛唯和郭绍庆在第 7 章里呈现了金属基复合材料焊接技术的实验研究成果,参与本章部分研究工作的还有陈波、黄振隆、唐金蓉。

为满足航空发动机失效部件的翻新修复需求,北京航空材料研究院焊接专业自“九五”以来把航空发动机部件的焊接修复技术列为重要的研究方向,张学军、毛唯、潘晖在第 8 章里论述了航空发动机压气机叶片、涡轮叶片、封严部件、挡圈、导向器的焊接修复,以及航空发动机机匣、壳体的焊接修复技术与实际应用,参与本章部分研究工作的还有叶雷、吴欣、赵海生、熊华平、刘文慧、李小飞等人。

北京航空材料研究院是航空焊接材料(焊条、焊丝、钛基钎料、带状镍基高温钎料等)的定点供货单位,国防用特种焊接材料的设计、制备技术研究亦是焊接专业具有鲜明特色的研究方向。在第 9 章里,郭万林、淮军锋、张学军、潘晖、赵海生、袁鸿、郭绍庆、陈云峰以钛基钎料、镍基粘带钎料、软钎料等钎焊材料,铝合金、高温合金和钢的氩弧焊焊丝以及航空用电焊条为典型代表,介绍了航空焊接材料的制备及应用,参与本章部分研究工作的还有程耀永、毛唯、熊华平、李天文、李艳等人。

新型飞机、高推重比发动机、新一代航天飞行器等新型武器装备对新材料及其焊接技术提出了更高要求,这就要求大力发展焊接新技术,以解决常规焊接方法难以解决的技术问题。在第 10 章里,程耀永、张学军、吴欣、郭绍庆、李艳总结了北京航空材料研究院焊接专业“十五”、“十一五”以来关于焊接新方法探索研究的重要

进展,内容包括挤出液相扩散焊、纳米扩散焊、线性摩擦焊、铝合金活性剂氩弧焊以及钛合金焊接过程中细化晶粒新方法。

李晓红、熊华平安排了全书的结构布局,分别通读了全书初稿,并对初稿提出了建设性的修改意见。李晓红、熊华平、张学军最终审校了全书的最后一稿。

在书稿的最后两轮文字修改过程中,吴雪莲参与了校稿和整理工作。

本书的作者们衷心感谢国家科技部、国家科工局、总装对各级项目的大力支持,衷心感谢各类基金项目的资助,衷心感谢有关单位横向协作项目的资助和支持!

北京航空材料研究院焊接技术的发展离不开各相关航空厂与设计所、清华大学、西北工业大学和北京航空航天大学等高校以及其他从事焊接技术研究、生产单位同行们的鼎力协助,愿借此书出版之际,向各单位的同行们致以诚挚的谢意!

衷心感谢国防工业出版社的厚爱与支持!

鉴于本书内容涉及范围较广,技术上可能存在一些问题;而且成书仓促,个中瑕疵在所难免;又由于本书的章节出自不同作者之手,因此写作风格不尽相同。所有这些,诚挚地希望得到读者的批评和指正。

作者

2011 年 10 月

目 录

第 1 章 先进铸造高温合金的钎焊与扩散焊	1
1.1 航空发动机涡轮叶片用铸造高温合金及其对钎焊技术的需求	1
1.2 国内外铸造高温合金涡轮叶片钎焊与 TLP 扩散焊技术发展现状	3
1.3 定向凝固高温合金的钎焊与 TLP 扩散焊	6
1.3.1 定向凝固高温合金 DZ4 与等轴晶铸造高温合金 K403 的钎焊	6
1.3.2 定向凝固高温合金 DZ22 的钎焊与 TLP 扩散焊	14
1.3.3 定向凝固高温合金 DZ125 的钎焊 ^[25,26]	23
1.3.4 定向凝固高温合金 DZ406 的钎焊工艺探索	28
1.4 定向凝固 Ni ₃ Al 基高温合金的钎焊与 TLP 扩散焊	35
1.4.1 IC6 合金的钎焊与 TLP 扩散焊	35
1.4.2 IC6A 合金钎焊工艺的探索研究 ^[36]	49
1.4.3 IC10 合金的钎焊与 TLP 扩散焊	50
1.5 单晶高温合金的钎焊与 TLP 扩散焊	68
1.5.1 第一代单晶合金 DD3 的 TLP 扩散焊	68
1.5.2 第二代单晶合金 DD6 的钎焊与 TLP 扩散焊	86
1.6 总结与展望	97
参考文献	100
第 2 章 变形高温合金焊接技术	104
2.1 低膨胀高温合金熔焊技术	104
2.1.1 低膨胀高温合金的焊接性	105
2.1.2 GH909 焊接裂纹倾向性研究	107
2.1.3 GH783 焊接裂纹倾向性研究	111
2.1.4 GH783 合金氩弧焊接头组织及性能	112
2.1.5 低膨胀高温合金焊接性的数值模拟研究	116
2.2 氧化物粉末强化(ODS 系列)高温合金钎焊技术	130
2.2.1 用于 ODS 高温合金材料钎焊的钎料成分设计与制备	131
2.2.2 钎焊与扩散处理工艺及接头力学性能	132

2.2.3	焊缝组织研究	133
2.3	GH4169 高温合金的摩擦焊	137
2.3.1	GH4169 惯性摩擦焊工艺及接头组织特点	138
2.3.2	接头力学性能	141
	参考文献	142
第3章	航空用不锈钢和超高强度钢焊接技术	144
3.1	航空用不锈钢氩弧焊技术	144
3.1.1	00Cr18Ni10N 钢氩弧焊	145
3.1.2	0Cr15Ni5Cu4Nb 钢氩弧焊	150
3.1.3	1Cr11Ni2W2MoV 钢氩弧焊	155
3.1.4	0Cr15Ni5Cu2Ti 钢氩弧焊	161
3.2	不锈钢的钎焊	168
3.2.1	00Cr18Ni10N 不锈钢的钎焊	168
3.2.2	不锈钢结构的钎焊应用实例	178
3.3	超高强度钢氩弧焊技术	182
3.3.1	16Co14Ni10Cr2Mo 钢氩弧焊技术	182
3.3.2	AerMet100 钢氩弧焊技术	190
	参考文献	196
第4章	先进航空钛合金焊接技术	197
4.1	中强钛合金焊接	197
4.1.1	TA15 钛合金焊接技术	197
4.1.2	TC4 钛合金焊接技术	211
4.1.3	TC6 钛合金焊接技术	214
4.2	高强钛合金焊接	219
4.2.1	TC18 钛合金焊接技术	220
4.2.2	TB6 钛合金焊接技术	232
4.2.3	TB8 钛合金焊接技术	236
4.2.4	TB5 钛合金焊接技术	248
4.3	损伤容限型钛合金焊接	254
4.3.1	TC4 - DT 钛合金焊接技术	254
4.3.2	TC21 钛合金焊接技术	257
4.4	高温钛合金的焊接	267
4.4.1	TC11 钛合金焊接技术	267

4.4.2	TC25 钛合金焊接技术	269
4.4.3	Ti60 钛合金焊接技术	273
	参考文献	282
第 5 章	Ti₃Al 基合金及 TiAl 金属间化合物焊接技术	284
5.1	Ti ₃ Al 基合金自身及其与异种材料的钎焊	285
5.1.1	概述	285
5.1.2	Ti ₃ Al 基合金自身的钎焊	285
5.1.3	Ti ₃ Al 基合金与 GH536 高温合金的钎焊	289
5.2	TiAl 金属间化合物自身及其与异种材料的钎焊	293
5.2.1	概述	293
5.2.2	TiAl/TiAl 的钎焊	294
5.2.3	TiAl/TC4 的钎焊	299
5.2.4	TiAl/42CrMo 的钎焊	302
5.3	Ti ₃ Al、TiAl 扩散焊	306
5.3.1	概述	306
5.3.2	TiAl 金属间化合物的扩散焊	306
5.3.3	Ti ₃ Al 基合金扩散焊	308
5.3.4	分别以 Al、Ti 和 Al/Ti/Al 为中间层的 TiAl 扩散焊	310
5.3.5	关于 TiAl 金属间化合物扩散焊接的其他进展	313
5.4	Ti ₃ Al 基合金电子束焊接	314
5.4.1	实验材料和方法	314
5.4.2	Ti ₃ Al 基合金电子束焊接工艺特征分析	315
5.4.3	电子束焊接线能量对接头力学性能的影响	316
5.4.4	接头组织的相分析	318
5.4.5	不同焊接线能量作用下接头微观组织特征和断口形貌	321
5.5	Ti ₃ Al 基合金氩弧焊	326
5.5.1	Ti ₃ Al 基合金氩弧焊接头的典型显微结构	326
5.5.2	Ti ₃ Al 基合金氩弧焊接头力学性能	335
	参考文献	339
第 6 章	铝合金焊接	343
6.1	概述	343
6.2	铝合金电阻焊接	344

6.2.1	铝合金电阻点焊	344
6.2.2	铝合金缝焊	354
6.3	中、高强铝合金氩弧焊接	358
6.4	铝锂合金氩弧焊接	359
6.4.1	气孔	359
6.4.2	裂纹	363
6.4.3	接头软化	369
6.5	铝合金钎焊技术	377
6.5.1	BAI67CuSi 钎料的试验研究	378
6.5.2	Al - Cu - Si - Ni 钎料的试验研究	382
6.5.3	Al - Cu - Si - Mn 钎料的研究	392
6.5.4	Al - Cu - Si 复合钎料的研究	397
6.6	母材对铝合金中温钎焊的影响及钎焊机理	400
6.6.1	不同母材上钎料润湿、铺展和钎缝成形情况	401
6.6.2	不同母材钎焊接头的组织和性能	403
6.6.3	钎料在不同母材上的润湿、铺展机理分析	403
6.6.4	铝合金钎焊接头中的缺陷及成因分析	406
6.7	铝合金平板缝阵天线精密钎焊技术的应用	408
6.7.1	钎焊工艺的选择	409
6.7.2	铝合金缝阵天线等结构的钎焊	410
6.7.3	铝合金天线钎缝的无损检测技术	410
	参考文献	411
第7章	金属基复合材料焊接技术	413
7.1	纤维增强铝基复合材料及其与钛合金的焊接	414
7.1.1	钎焊	416
7.1.2	固相扩散焊	421
7.1.3	电阻点焊	424
7.1.4	小结	426
7.2	SiCp/Al 复合材料的电子束焊技术	427
7.2.1	SiCp/Al 复合材料的焊接性分析	428
7.2.2	SiCp/Al 高能束焊的特点	429
7.2.3	解决措施	430
7.2.4	采用非增强中间层电子束焊接 SiCp/Al	431

7.2.5 小结	437
7.3 钛基复合材料钎焊扩散焊	438
7.3.1 国外对钛基复合材料焊接技术的研究概况	438
7.3.2 钛基复合材料的钎焊技术研究	440
7.3.3 $\text{SiC}_f/\beta 21\text{S}$ 钛基复合材料的扩散焊	446
7.3.4 小结	453
参考文献	453
第8章 航空发动机部件焊接修复	456
8.1 概述	456
8.2 航空发动机涡轮导向叶片钎焊修复	458
8.2.1 涡轮导向叶片裂纹修复	458
8.2.2 涡轮导向叶片磨损修复	464
8.3 航空发动机涡轮工作叶片焊接修复	466
8.3.1 涡轮工作叶片钎焊修复	466
8.3.2 涡轮工作叶片熔焊修复	468
8.4 航空发动机其他涡轮部件修复	472
8.4.1 封严部件钎焊修复	472
8.4.2 承力部件熔焊修复	474
8.5 航空发动机整体铸造导向器修复	477
8.5.1 整体铸造不锈钢导向器修复	477
8.5.2 整体铸造高温合金导向器修复	482
8.6 机匣及壳体修复	486
8.6.1 涡轮轴支点机匣修复	486
8.6.2 高温合金机匣修复	490
参考文献	494
第9章 航空焊接材料的制备技术及应用	495
9.1 钎焊材料	495
9.1.1 钛基钎料	495
9.1.2 镍基粘带钎料	498
9.1.3 软钎料	504
9.2 氩弧焊焊丝	508
9.2.1 铝锂合金焊丝	508
9.2.2 钢焊丝	510

9.2.3 低膨胀高温合金、高强钢焊丝	518
9.3 航空电焊条	521
9.3.1 航空焊条的分类	521
9.3.2 航空焊条特点和应用	522
9.3.3 航空焊条焊接接头力学性能	523
9.4 目前常用的焊接材料	525
参考文献	530
第10章 焊接新方法研究	532
10.1 原位生成纳米粉末中间层的低温扩散焊	532
10.1.1 原位生成纳米粉末扩散焊的原理、试验材料和方法	533
10.1.2 先驱体材料的特性	534
10.1.3 低温扩散焊的组织 and 性能	536
10.1.4 工艺参数对纳米粉末扩散焊接头性能的影响	537
10.2 挤出液相扩散焊	539
10.2.1 TC4 钛合金的挤出液相扩散焊	540
10.2.2 DZ22 合金的挤出液相扩散焊	543
10.3 铝合金活性剂氩弧焊	545
10.3.1 铝合金焊剂	545
10.3.2 铝合金药芯焊丝焊接	550
10.4 钛合金焊接过程细化晶粒新方法	552
10.5 线性摩擦焊	557
10.5.1 钛合金线性摩擦焊	557
10.5.2 钛合金线性摩擦焊缺陷	564
参考文献	566

第 1 章 先进铸造高温合金的钎焊与扩散焊

高温合金又称热强合金、耐热合金或超合金,是 20 世纪 40 年代发展起来的新型航空金属材料;它可在 $600^{\circ}\text{C} \sim 1100^{\circ}\text{C}$ 的氧化和燃气腐蚀条件下,承受复杂应力,能长期可靠地工作。主要用于航空发动机的热端部件,也是航天、能源、交通运输和化学工业的重要材料^[1]。

根据合金材料成形方式的不同,高温合金可分为变形高温合金、铸造高温合金和粉末冶金高温合金^[2]。目前先进航空发动机上的涡轮叶片一般都采用铸造高温合金。涡轮工作叶片是发动机最关键的部件之一,承受高温、燃气腐蚀、离心力、弯曲应力、热应力、振动和热疲劳的作用。因此除要求材料具有良好的抗氧化性、耐腐蚀能力和足够高的强度外,还应具有良好的机械疲劳、热疲劳性能以及足够的塑性和冲击韧性,无缺口敏感,并应具有良好的工艺性能。涡轮导向叶片是涡轮中热负荷最大的部件,除承受燃气冲刷外,主要承受温度急剧变化所引起的热冲击作用,要求材料具有更好的抗热疲劳强度和抗氧化、耐腐蚀性能^[1]。

北京航空材料研究院针对我国先进航空发动机涡轮叶片制造对焊接技术的需求,对我国定向凝固高温合金 DZ22、DZ125,定向凝固 Ni_3Al 基高温合金 IC6、IC10,第一代单晶合金 DD3,第二代单晶合金 DD6 等先进铸造高温合金的钎焊与过渡液相扩散焊(TLP 扩散焊)技术进行了研究。

1.1 航空发动机涡轮叶片用铸造高温合金及其对钎焊技术的需求

铸造高温合金的发展始于 20 世纪 40 年代。铸造高温合金是由合金锭重熔后直接浇注成零件的高温合金。铸造高温合金按凝固工艺,可分为普通铸造(等轴晶)合金、定向凝固柱晶合金和定向凝固单晶合金。1943 年美国首次在涡轮喷气发动机 J-33 上选用了铸造钴基高温合金 HS-21 制造涡轮工作叶片,并与原采用的变形合金 Hastelloy-B 的叶片进行比较试车,获得成功。随着航空发动机的发展,对高温合金性能提出了越来越高的要求,为了提高变形高温合金的强度和工作温度,在合金中相继加入了多种合金元素,这又引出了变形加工困难的问题。为此人们越来越重视铸造高温合金的研究与发展。从 20 世纪 50 年代末开始,陆续出现了许多高性能的铸造高温合金,如 IN-100、ЖС6К、B1900、MAR-M200 等。在

铸造高温合金发展过程中,熔炼及凝固工艺技术的发展起着极其重要的作用。其中在 20 世纪 50 年代末出现的真空熔炼技术和 60 年代初出现的定向凝固技术使铸造高温合金的研究开发取得突破性进展^[1]。

定向凝固高温合金由于消除了垂直于应力轴的横向晶界而使其承温能力比普通铸造等轴晶合金提高约 50℃。20 世纪 70 年代,美国已将定向凝固涡轮叶片、导向叶片广泛投入航线使用,例如 JT9D 采用定向凝固的 PWA1422 合金使发动机寿命延长 9600h 以上。定向凝固合金的进一步发展是出现了完全消除了晶界的单晶高温合金。单晶合金是目前性能水平最高的铸造高温合金,从 F100 - PW - 220 发动机用第一代单晶合金到 EJ200 和 F119 采用的 RR3000 和 CMSX - 10(或 Rene' N6)第三代单晶合金,使涡轮进口温度提高了近 80℃。第一代单晶合金以 PWA1480、CMSX - 2 为代表,其承温能力比定向柱晶合金提高约 28℃ ~ 50℃,达 1040℃左右。在 20 世纪 70 年代末就开始用于高涵道比涡扇发动机,如 JT9D7R 系列、4PW2000 系列等发动机。20 世纪 80 年代以来相继出现第二代(如 PWA1484、PWA1487、CMSX - 4、ЖС36、Rene' N5 等)、第三代(如 PWA1496、CMSX - 10 等)和第四代(如 RR3010 等)单晶合金,每一代单晶合金承温能力的提高幅度约为 30℃。因此,20 世纪 70 年代以来铸造高温合金一直占据着航空发动机中温度最高、应力最复杂或者说工作条件最恶劣的位置。从 20 世纪 40 年代到 90 年代,标志合金性能水平的 140MPa/100h 的承温能力从 750℃左右提高到 1150℃左右。当前,高性能的单晶合金与先进的冷却技术和优异的防护及隔热涂层相结合,使推重比为 10 的航空发动机的涡轮前温度高达 2000K^[1]。

我国从 1958 年开始研制第一种铸造高温合金 K401,作为航空发动机导向叶片材料。迄今已研制了铁—镍基、镍基、钴基和 Ni₃Al 基合金 50 多个牌号,用于航空发动机和其他工业部门,形成了我国的铸造高温合金系列。例如 K417 合金是我国第一种用于现役航空发动机涡轮工作叶片的铸造合金,已用于航空发动机涡轮转子叶片的成批生产,还用作涡轮增压器转子叶轮及火药起动机整体涡轮等,是目前应用最多、产量最大的铸造高温合金之一。DZ4 是我国第一种用于现役发动机投入航线使用的定向凝固高温合金,已投入大批量生产。DD3 是我国第一种用于航空发动机的单晶合金,其性能水平相当于美国第一代单晶合金 PWA1480。IC6 合金是 Ni₃Al 基定向凝固铸造合金,是国内外首例用在航空发动机的金属间化合物基铸造高温合金,具有高温比强度高、初熔温度高、密度较低和成本较低的特点,已制成涡轮导向叶片,通过试车、试飞试验,并投入生产。近年来研制的 DD6 单晶合金,其性能水平与国外第二代单晶合金相当,但其所含昂贵的元素 Re 量比国外同类合金低,成本显著低于国外同类合金,是我国目前性能水平最高的铸造高温合金^[1]。

表 1-1 列出了我国涡轮叶片用铸造高温合金的概况^[1,3]。