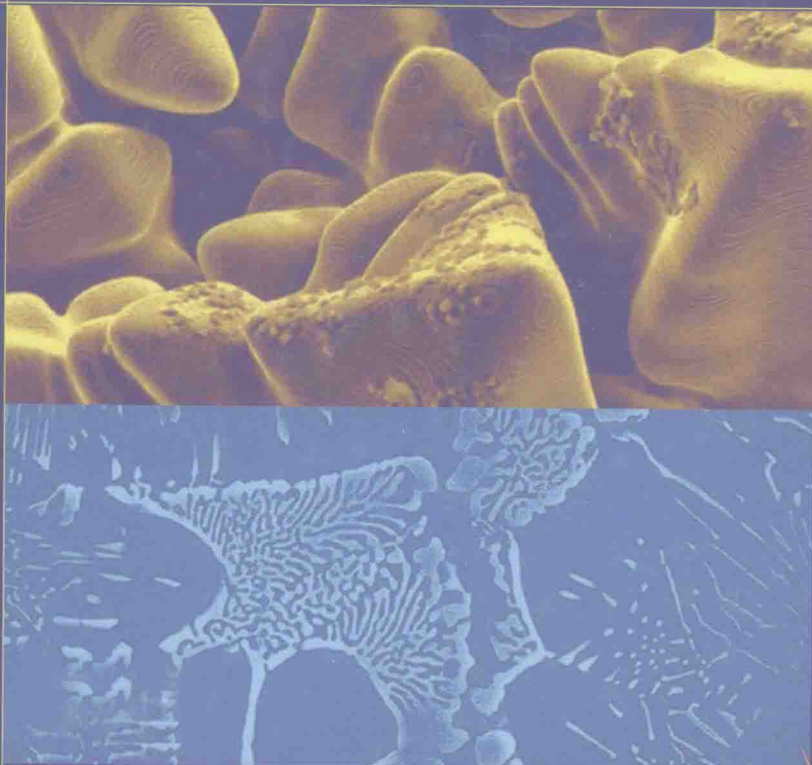


镍基合金 焊接冶金和焊接性

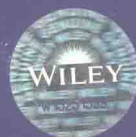
Welding Metallurgy and
Weldability of Nickel-Base Alloys

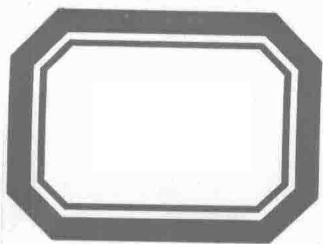
吴祖乾 张晨 译
虞茂林 余燕

[美] 约翰·N.杜邦 (John N. DuPont) 著
约翰·C.李波特 (John C. Ippold)
赛缪尔·D.凯瑟 (Samuel D. Kiser)



 上海科学技术文献出版社
Shanghai Scientific and Technological Literature Press





镍基合金 焊接冶金和焊接性

Welding Metallurgy and
Weldability of Nickel-Base Alloys

吴祖乾 张晨 译
虞茂林 余燕

[美] 约翰·N.杜邦 (John N. DuPont) 著
约翰·C.李波特 (John C. Lippold)
赛缪尔·D.凯瑟 (Samuel D. Kiser)



上海科学技术文献出版社
Shanghai Scientific and Technological Literature Press

图书在版编目 (CIP) 数据

镍基合金焊接冶金和焊接性 / (美) 杜邦 (DuPont, J.N.), (美) 李波特 (Lippold, J.C.), (美) 凯瑟 (Kiser, S.D.) 著; 吴祖乾等译. —上海: 上海科学技术文献出版社, 2014.5

书名原文: *Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys*
ISBN 978-7-5439-5801-2

I . ① 镍… II . ① 杜…② 李…③ 凯…④ 吴… III . ① 镍基合金—焊接冶金—研究 IV . ① TG146.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 291064 号

Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Base Alloys

Copyright © 2009 by John Wiley & Sons, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled *Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Base Alloys*, ISBN 9780470087145, by John N. DuPont, John C. Lippold, Samuel D. Kiser, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder.

Copyright in the Chinese language translation (Simplified character rights only) © 2014 Shanghai Scientific & Technological Literature Publishing House Co., Ltd.

All Rights Reserved
版权所有, 翻印必究

图字: 09-2013-142

责任编辑: 忻静芬

封面设计: 钱 祯

镍基合金焊接冶金和焊接性

[美] 约翰·N. 杜邦 (John N. DuPont) 著 吴祖乾 张 晨 译
约翰·C. 李波特 (John C. Lippold) 著 虞茂林 张 余 译
赛缪尔·D. 凯瑟 (Samuel D. Kiser)

出版发行: 上海科学技术文献出版社

地 址: 上海市长乐路 746 号

邮政编码: 200040

经 销: 全国新华书店

印 刷: 上海中华商务联合印刷有限公司

开 本: 720×1000 1/16

印 张: 26.75

版 次: 2014 年 5 月第 1 版 2014 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5439-5801-2

定 价: 148.00 元

<http://www.sstlp.com>

谨以本书献给 Alden 和 Pauline DuPont,在我年轻的时候他们鼓励我,还有 Ryan 和 Caitlin,他们至今还一直鼓励着我。

John N. DuPont

里海大学

谨以本书献给我的妻子, Mary Catherine Juhas,在我的整个生涯中她一直支持我,并留下了力量、鼓舞和良好心情的恒定源泉。

John C. Lippold

俄亥俄州立大学

谨以本书献给 Jackie Kiser,我的朋友、我的精神伙伴和我所有想做的事的合作者。

Samuel D. Kiser

特殊金属焊接产品公司

译者序

镍基合金由于具有优异的高温性能和卓越的耐蚀性能,已在航空航天、核电、火电、石油化工等领域获得了广泛的应用,但镍基合金的焊接往往会带来不少的困难,主要表现在相的变化导致接头性能的改变,以及焊接过程中产生的各种裂纹等缺陷造成运行中的早期失效。为此,众多科技工作者长期以来对镍基合金的焊接开展了大量的试验研究,力求在焊接镍基合金时能获得高质量和性能满意的焊接接头。

最近,中国动力工程学会材料专业委员会主任委员林富生教授和副主任委员谢锡善教授等在访问美国 Lehigh 大学期间从该校带回了 John N. DuPont 教授等编著的《Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Base Alloys》一书,该书汇总了当前已发表的各种有关镍基合金焊接的资料,介绍了镍基合金在焊接冶金学和焊接性方面的最新进展和研究成果,着重阐述了镍基合金中合金元素的作用、相图和相的稳定性、异种金属焊接、各种裂纹的形成机理和焊接性试验方法等。这是一本很有参考价值的、值得向广大读者推荐的好书。该书的作者 John N. DuPont 和 John C. Lippold 是美国 Lehigh 大学和州立 Ohio 大学长期从事镍基合金焊接性研究的著名教授,而 Samuel D. Kiser 是美国 SMC 公司(Special Metals Welding Products Company)具有丰富生产实践经验的技术经理。所以希望该书的中译本能够成为广大读者的一本有用的参考书。

本书的翻译工作是由上海发电设备成套设计研究院吴祖乾教授(第 1、2、7 章)、虞茂林教授(第 3 章)和上海核工程研究设计院的张晨教授(第 4、5 章)、余燕教授(第 6、8 章)共同完成的,译稿的审校则由虞茂林(第 1、2、7 章)和吴祖乾(第 3、4、5、6、8 章)完成。此外,李强(上海发电设备成套设计研究院)和王弘昶、黄逸峰、谷雨(上海核工程研究设计院)等也参与了部分翻译工作,在此表示感谢。

此外,上海焊接器材有限公司(原上海电焊条总厂)、上海大西洋焊接

材料有限公司、上海电力修造总厂有限公司和昆山京群焊材科技有限公司等单位对本书的翻译出版均给予了大力的支持和热情的关怀,使本书的译校工作得以顺利完成。译者在此一并表示感谢。

译者

2013年12月于上海

英文版前言

编写本书的目的在于要为工程师们、科学家和广大师生们提供一本有关镍基合金焊接冶金和焊接性方面最新进展的参考书。虽然本议题在涉及焊接/连接和工程材料类的手册和其他参考资料中已有所论述,但本书是目前献给在镍和镍基合金的焊接冶金和焊接性研究领域中的一本独一无二的书籍。

本书把重点放在镍基合金的冶金行为上,特别着重于焊接性的论述。它并不专门针对焊接方法或焊接工艺的讨论,也不提供作为选择方法/工艺的指南。本书以介绍镍和镍基合金发展历史的一章开始。第2章讨论了合金元素的作用并给出了相图,其中描述了在这些合金中相的稳定性,包括为开发复杂系统的相图而采用“热动力计算技术”。接下来的两章致力于镍基合金的两个最大类型,即固溶强化合金和沉淀强化合金(或“超合金”)。另外一章描述了与特殊合金——镍铝化合物和氧化物弥散强化合金有关的焊接性问题。最后几章谈到的题目是修复焊、异种焊接和焊接性试验。某些章节含有安全分析,它让读者看到这里描述的观点是如何应用于“现实世界”的状况。

在编写本书时,作者们还收集了镍基合金 80 年来的经验。很多年来,Dupont 教授和 Lippold 教授相应地在 Lehigh 大学和俄亥俄州立大学对这些题目开展了研究并进行了教学活动。Kiser 先生在特殊金属焊接产品公司对镍基焊接材料进行的开发和应用研究已超过 40 年。这种共同努力的结果给本书带来了技术上的宽度和广度,给大学的师生们和从事实践的工程师们和科学家们提供了广泛的资源。

特别要感谢 Dr. S. Suresh Babu (俄亥俄州立大学)、Dr. Steve Matthews (Haynes 国际)、Dr. Charles Robino (Sandia 国立实验室)和 Mr. J. Partrick Hunt、Mr. Brian A. Baker 和 Dr. Rengang Zhang(以上都来自 SMC 公司),他们很仔细地审阅了个别的章节,提出了很多有用的建议,并已纳入本书的手稿中。我们还想感谢下列里海大学和俄亥俄州

立大学以前的学生们,他们的著作和论文也为本书作出了贡献,他们是 Dr. Qiang Lu、Dr. Ming Qian、Dr. Nathan Nissley、Mr. Matt Collins、Dr. Steve Banovic、Dr. Weiping Liu、Dr. Timothy Anderson、Mr. Michael Mimicozzi、Dr. Matthew Perricone、Dr. Brian Newbury、Mr. Jeff Farren 和 Dr. Ryan Deacon。作者们同样要感谢里海大学的学生 Andrew Stockdalet 和 Gregory Brentrup,为他们帮助获得在本书中同意使用插图和其他参考教材所付出的辛勤劳动和努力。

最后作者们还要感谢里海大学、俄亥俄州立大学、SMC 公司和精密浇铸件公司分部为相当长时期的写作和出版保证了时间和提供了场地,从而使本书变成了现实。

目录

译者序	vi
英文版前言	viii
第 1 章 概论	1
1.1 镍基合金分类	2
1.1.1 商用纯镍合金	2
1.1.2 固溶强化合金	3
1.1.3 沉淀强化合金	3
1.1.4 其他特殊合金	4
1.2 镍和镍基合金的历史	5
1.3 抗腐蚀性	11
1.4 镍合金生产	12
参考文献	13
第 2 章 合金添加剂、相图和相的稳定性	14
2.1 概述	14
2.2 合金添加剂的一般影响	15
2.3 固溶合金的相图	19
2.3.1 Ni-Cu 系	19
2.3.2 Ni-Cr 系统	20
2.3.3 Ni-Mo 系统	20
2.3.4 Ni-Fe-Cr 系统	22
2.3.5 Ni-Cr-Mo 系统	23
2.4 沉淀硬化合金—— γ' 形成物的相图	24
2.5 沉淀硬化合金—— γ'' 形成物的相图	29
2.6 计算的相稳定性图	31

2.7 PHACOMP 相稳定性计算	38
参考文献	40
第 3 章 固溶强化镍基合金	44
3.1 标准合金和焊接材料	44
3.2 物理冶金和力学性能	49
3.3 焊接冶金	56
3.3.1 熔合区显微组织的演变	56
3.3.2 热影响区	81
3.3.3 焊后热处理	82
3.4 焊接件的力学性能	90
3.4.1 氢的作用	93
3.4.2 焊后热处理	93
3.5 焊接性	100
3.5.1 熔合区凝固裂纹	100
3.5.2 HAZ 液化裂纹	117
3.5.3 避免凝固裂纹和液化裂纹	124
3.5.4 失塑裂纹	127
3.6 抗腐蚀性	142
3.7 案例分析	147
3.7.1 MONEL [®] 焊缝中的点蚀	147
参考文献	149
第 4 章 沉淀强化镍基合金	157
4.1 标准合金和焊材	157
4.2 物理冶金和力学性能	162
4.3 焊接冶金	173
4.3.1 熔合区显微组织评价	173
4.3.2 热影响区	201
4.3.3 焊后热处理	204
4.4 焊件的力学性能	206
4.5 焊接性	207
4.5.1 凝固裂纹	207

4.5.2	HAZ 液化裂纹	221
4.5.3	应变时效裂纹	233
	参考文献	245
第 5 章	氧化物弥散强化合金和镍铝化合物	253
5.1	氧化物弥散强化合金	253
5.1.1	物理和机械冶金	253
5.1.2	焊接冶金	257
5.1.3	ODS 合金焊接性小结	265
5.2	镍铝化合物合金	265
5.2.1	物理和机械冶金	265
5.2.2	Ni-Al 化合物的焊接性	269
5.2.3	镍铝化合物合金的焊接性小结	275
	参考文献	275
第 6 章	镍基合金的焊接修复	278
6.1	固溶强化合金	278
6.2	沉淀强化合金	280
6.2.1	718 合金	280
6.2.2	Waspaloy 合金(瓦氏合金)	291
6.3	单晶超合金	294
6.3.1	单晶焊缝修复的控制	297
6.3.2	凝固裂纹	308
6.3.3	优化工艺参数	310
	参考文献	316
第 7 章	异种金属焊接	320
7.1	异种金属焊缝的应用	320
7.2	焊接参数对熔合区成分的影响	321
7.3	碳钢、低合金钢和不锈钢	324
7.3.1	确定焊缝金属组织	324
7.3.2	熔合边界过渡区	326
7.3.3	焊接性	333

7.4	用镍基填充金属焊接不锈钢的焊后热处理开裂	339
7.5	超级奥氏体不锈钢	340
7.6	镍基合金异种焊缝——对耐蚀性的影响	348
7.7	9%镍钢	349
7.7.1	9%镍钢的物理冶金	350
7.7.2	镍基焊缝熔敷金属的热裂纹	352
7.8	超级双相不锈钢	354
7.9	案例研究	355
7.9.1	用 ENiCrFe-2 填充金属焊接的 800H 合金厚截面 焊缝的焊后热处理开裂	355
7.9.2	用 ERNiCrMo-15(INCO-WELD 725 NDUR) 焊接的 925 合金来制造真空隔热石油连接管	358
7.9.3	625 合金焊缝堆焊层的腐蚀疲劳	360
7.9.4	用高铬的镍基填充金属堆焊“安全端”焊缝	363
	参考文献	366
第 8 章	焊接性试验	370
8.1	概述	370
8.1.1	焊接性试验方法	371
8.1.2	焊接性试验方法的类别	371
8.2	可变拘束裂纹试验	372
8.2.1	定量分析焊缝凝固裂纹的方法	373
8.2.2	定量分析 HAZ 液化裂纹的方法	377
8.3	改进的铸件销钉撕裂试验(CPT 试验)	380
8.4	SIGMAJIG 试验	382
8.5	热塑性试验	384
8.6	STF(应变-断裂)试验	389
8.7	其他焊接性试验	391
	参考文献	392
附录 A	锻造和铸造镍基合金的化学成分(重量百分比)	394
附录 B	镍和镍合金焊接材料的化学成分(重量百分比)	400

附录 C 腐蚀的验收试验方法	405
C. 1 ASTM A262 C-HUEY 试验	405
C. 2 ASTM G28A/A262B-STREICHER 试验	406
C. 3 ASTM G28B	406
C. 4 ASTM G48A 和 B	406
C. 5 ASTM G48C 和 D(同样 E 和 F)	406
附录 D 镍基合金和焊缝的浸蚀技术	409
参考文献	411

概 论

镍基合金是工程材料最重要的类别之一,因为它们能够用于多种环境和场合。在含水和高温下的耐蚀场合、室温和高温下的高强度场合、低温下的延性和韧性场合、特殊的电性能场合以及与其他物理性能有关的场合都选用了这些合金。镍基合金焊接材料能提供某些焊态下的性能,而这些性能是其他类型的焊接产品所不能提供的,例如被许多各种不同的合金元素稀释后,还能保持从低温到接近固相线温度强度和延性的能力。它们也是十分通用的,例如,用于焊接 9%镍钢的 Ni-Cr-Mo 系焊接产品在液氮温度下还具有非常高的焊态强度和冲击韧性。用来焊接铸铁的镍和镍-铁合金能被铁和碳稀释后而保持延性,并提供良好的机加工特性。镍基合金焊接材料亦广泛用于电力工业,可在碳钢和不锈钢之间进行异种焊接,作为在高温下使用时热膨胀系数的过渡材料。

相对于钢而言,镍基合金能够在低温下使用,又能在接近 1 200°C (2 190°F)的高温下使用,因为固溶合金的基体从固态到绝对零度都保持奥氏体^①。这些加入适当添加剂的合金提供了有用的耐蚀性,并在包括电力、石化、化学加工、航天和控制环境污染等的广大工业领域中得到了应用。对镍基合金来说,焊接是一门关键性的制造技术。最近 50 年来,已经进行了大量的研究和开发工作,为更好地弄清和控制这些合金的焊接性以及开发在焊接接头耐蚀性和力学性能方面能满足更高要求的焊接材料作出了不懈的努力。

本书的宗旨在于提供有关镍基合金焊接冶金和焊接性的基础资料,文中包含了对两种最重要镍基合金类别的全面覆盖,即固溶强化合金和沉淀强化合金。有一章致力于氧化物弥散强化合金(ODS)和镍-铝化合物合金。为了补充所提供的有关这些合金体系焊接冶金的基础资料,还

^① 这里和文中的其他地方,术语“奥氏体”和“奥氏体的”是用来涉及在镍基合金中的主要相的面心立方结构。

2 镍基合金焊接冶金和焊接性

论述了有关焊接修复和在异种焊接时选择和应用镍基合金的基本观念。许多重要的概念是通过采用“分析案例”来展示的,并将这些概念与实际应用联系起来。

1.1 镍基合金分类

对镍基合金来说,没有像铁合金和铝合金那样的系统分类体系。因此,大多数镍基合金是通过它们的商业名称或最初由合金制造商给予的合金号而被知晓的。例如,INCONEL[®] 600 合金^①和 HASTELLOY[®] C-22 合金^②亦归类于 600 合金和 C-22 合金。镍基合金通常以成分分类,如图 1.1 所示。以下列出这些类别的简要汇总。

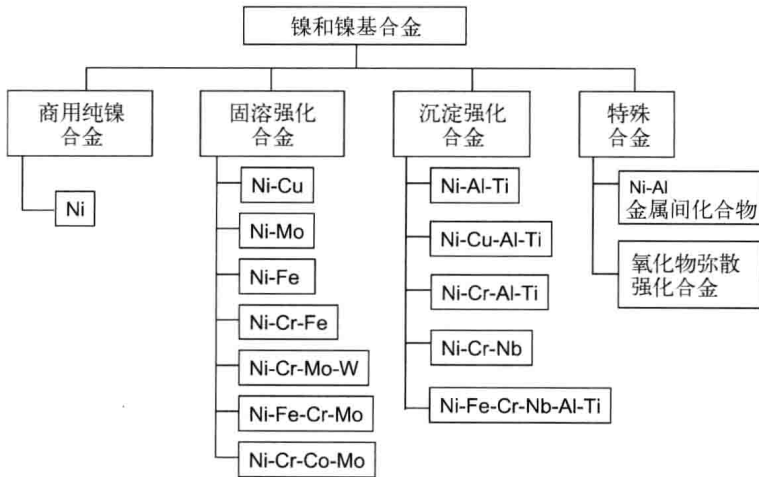


图 1.1 镍和镍基合金分类

1.1.1 商用纯镍合金

商用纯镍合金是基本上含有镍 $>99\text{wt}\%$ ^③的那些合金。这是一个商用纯镍合金的完整族系,命名为 200 合金和 201 合金。这些材料具有低强度和低硬度,原则上由于它们具有良好的耐蚀性而用于苛性腐蚀环境。201 合金具有最高值为 $0.02\text{wt}\%$ 的碳,所以它们能够在高于 315°C

① INCONEL 是国际超合金集团 Special Metals, PCC 的注册商标。

② HASTELLOY 是国际 Haynes 公司的注册商标。

③ wt% 是重量百分率。

(600°F)的高温下使用而无被“石墨化”的危险。因为碳在高于 315°C 的镍基体中是相对易变的,添加超出溶解度极限($\sim 0.02\text{wt}\%$)的碳会造成石墨质点的沉淀,使材料变脆和变弱。

还有一些附加商用纯镍合金,它们在电或磁致伸缩的有限场合使用。这些合金具有良好的焊接性,但在焊接时对气孔敏感。如果在焊前和焊接中保持清洁,这些合金会显示良好的抗裂性,但保护气体或焊剂必须充足以避免气孔的形成。商用纯镍焊接材料含有最高达 1.5% 铝和 2.0%~3.5% 钛的添加剂来抵消少量的大气污染。钛和铝与氧结合形成氧化物,与氮结合形成氮化物,因而控制了焊缝熔敷金属中的气孔。

1.1.2 固溶强化合金

镍和铜是同一形态的元素(完全固溶性),能在整个成分范围内生成单相合金。这个族系的材料通常对海水和其他一般腐蚀环境显示出良好的耐蚀性。通常 Ni-Cu 合金有很好的焊接性,如果不使用适当的保护或良好的抗氧化焊接材料,可能会对气孔敏感。其他的固溶强化镍基合金可以仅含有铁,这些合金的大多数由于特定的膨胀系数或电性能而得到使用。Ni-36wt%Fe 合金通常称作 INVAR[®]①合金,在所有的镍基合金中具有最低的膨胀系数,在几百度的温度范围内加热和冷却一直到约 300°F,仅以小于 $1.0 \times 10^{-6} \text{in}/(\text{in} \cdot ^\circ\text{F}^{-1})$ 的速率膨胀和收缩。Ni-Fe 合金有较好的焊接性,但开发又有良好抗凝固裂纹性能,又有相匹配膨胀性能的焊接材料对焊材制造商来说是一个挑战。Ni-Fe 合金及其焊材也可能对低塑性开裂敏感,这种开裂的机理将在第 3 章中详细阐述。

其他固溶合金含有不同的置换元素,包括铬、钼和钨。每种元素都能赋予特殊的性能,并有能力改变每种合金的焊接特性。固溶强化镍基合金的最高抗拉强度值接近 830 MPa(120 ksi),而屈服强度在 345~480 MPa(50~70 ksi)之间。这些合金在要求具有良好耐蚀性的广泛场合下使用。如果要求较高的强度水平,必须选择沉淀强化合金。

1.1.3 沉淀强化合金

沉淀强化镍基合金含有钛、铝和/或铌等添加剂,在适当的热处理后与镍形成强化的沉淀物。在大多数情况下,这些沉淀物与奥氏体基体具

① INVAR 是 Imphy SA 的注册商标,法国。

有凝聚力,并使基体变形,因而实质上增加了基体的强度。这些沉淀物的大多数称为 γ' [γ' -Ni₃Al、Ni₃Ti 和 Ni₃(Al, Ti)]和 γ'' (γ'' -Ni₃Nb)。在最佳合金添加剂和热处理情况下,这些合金能够强化到最高抗拉强度超过 1 380 MPa(200 ksi)和 0.2%屈服强度超过 1 035 MPa(150 ksi)。

第一个沉淀硬化 Ni-Cr 合金(X-750)是由 γ' 强化的,在靠近 γ' 溶解线温度下,显示出良好的抗氧化性和高温强度的组合。不幸的是,当焊后并直接时效而不在中间插入退火处理时,会产生焊后应变时效裂纹(SAC)。这种开裂的机理将在第 4 章中详细阐述。在为改善焊接性和避免 SAC 的努力下,开发了 γ'' 强化的第二代沉淀硬化 Ni-Cr-Mo 合金。这些合金中最普遍的是 718 合金。因为 γ'' 沉淀物比 γ' 的形成要慢得多,718 合金在焊后热处理时通常不受 SAC 影响。718 合金的主要应用之一是航空航天燃气透平传动轴和耐压壳。如果适当地熔炼,获得低含量的杂质,该合金可提供极大的使用机会。当设计合理时,在一直到 760°C(1 400°F)的使用温度下,具有极佳的疲劳寿命。

基于沉淀强化合金具有在高温下不同寻常的高强度和耐蚀性,所以通常把它们归类为“超合金”。该术语曾松散地应用于许多其他高强度多元合金,但一般术语“超合金”是用来描述由 γ' 和 γ'' 相所提供的具有超强度性能的镍基合金。

在燃气轮机动叶片上采用超合金始于 IN713C 合金。这种合金与 X-750 合金相似,但仅仅作为铸件生产,因为含有较多的铝、钛添加剂,因此从铸造温度下冷却时,会发生时效硬化。由于该合金对 SAC 有极高的敏感性,所以产品修复受到限制,但在叶片顶端堆焊则不会开裂。经过数十年的技术进展,增加了“超合金”族系的其他成员,包括超高强度和耐腐蚀的单晶透平叶片合金。为了减少在运行时受到侵蚀,在叶片顶端堆焊是可行的,只要焊接过程能很好得到控制,并使残余应力保持在较低水平。最初这些材料在焊接修复时曾遇到挑战,包括避免在熔池中的晶粒分散和阻止开裂。单晶合金修复过程的关键问题见第 6 章的阐述。

1.1.4 其他特殊合金

有一些合金,由于它们具有令人印象深刻的高温蠕变特性,也能纳入“超合金”范畴,例如氧化物弥散强化合金 MA6000 和 MA754^①。这些合

^① 机械合金化(MA)合金是由国际镍公司开发的。