



国家出版基金资助项目
“十三五”国家重点图书
材料研究与应用著作

包晶合金定向凝固

DIRECTIONAL
SOLIDIFICATION
OF PERITECTIC
ALLOYS

苏彦庆 骆良顺 著
傅恒志 主审

哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



国家出版基金资助项目
“十三五”国家重点图书
材料研究与应用著作

包晶合金定向凝固

DIRECTIONAL
SOLIDIFICATION
OF PERITECTIC
ALLOYS

苏彦庆 骆良顺 著
傅恒志 主审

哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书汇集了哈尔滨工业大学金属精密热加工国家级重点实验室在包晶合金凝固行为方面的最新研究成果。全书内容共分为6章,第1章介绍包晶合金的组织结构及工程应用;第2章系统介绍包晶合金凝固特性及凝固过程中形成的异彩缤纷的组织形态;第3章以Ti-Al和Fe-Ni包晶合金为例,系统介绍非小平面包晶合金定向凝固过程中的组织演化;第4章以Al-Ni合金为例系统介绍小平面包晶合金定向凝固过程中的组织演化;第5章介绍包晶合金形态演化规律及相场法模拟在包晶合金凝固组织研究中的应用;第6章主要介绍采用新型定向凝固技术对Ti-Al合金进行系统定向凝固得到的重要结果及进展。

本书可供材料科学与工程、凝聚态物理领域的师生作为参考书,也可供从事相关研究和开发的科研人员和相关企业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

包晶合金定向凝固/苏彦庆,骆良顺著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2017.6

ISBN 978-7-5603-6215-1

I. ①包… II. ①苏… ②骆… III. ①合金—定向凝固
IV. ①TG13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 231843 号



策划编辑 许雅莹 杨 桦

责任编辑 何波玲 刘 瑶 杨明蕾

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街10号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司

开 本 660mm×980mm 1/16 印张 29 字数 500 千字

版 次 2017年6月第1版 2017年6月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-6215-1

定 价 138.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

《材料研究与应用著作》

编 写 委 员 会

(按姓氏音序排列)

毕见强	曹传宝	程伟东	傅恒志
胡巧玲	黄龙男	贾宏葛	姜 越
兰天宇	李保强	刘爱国	刘仲武
钱春香	强亮生	单丽岩	苏彦庆
谭忆秋	王 铀	王超会	王雅珍
王振廷	王忠金	徐亦冬	杨玉林
叶 枫	于德湖	藏 雨	湛永钟
张东兴	张金升	赵九蓬	郑文忠
周 玉	朱 晶	祝英杰	

前 言

包晶合金是一类应用非常广泛的工程合金,随着具有重要工程应用前景的高温金属间化合物结构材料 Ti-Al, Fe-Al, Ni-Al 合金, 稀土永磁材料 Nd-Fe-B 和 Co-Sm-Al 合金, 以及高温氧化物超导材料 Y/Nd-Ba-Cu-O 等新型包晶系材料的开发, 包晶合金的凝固过程近年来受到人们的极大关注。一方面, 凝固过程是制备包晶系材料一个重要的工艺过程, 对材料的最终组织和性能必然产生重要影响; 另一方面, 近年来在包晶系材料凝固过程中发现了大量新颖的组织, 这些组织的出现极大地丰富了现有的包晶凝固理论, 同时也反映出人们目前对包晶凝固过程认识的局限性。因此, 工程应用和凝固理论的研究都迫切需要人们对包晶凝固过程进行深入的研究以便更好地控制合金组织。本书系统介绍了金属凝固领域研究者, 尤其是哈尔滨工业大学对包晶合金凝固行为的最新研究成果, 这些研究成果对丰富金属凝固行为的认识、包晶系材料的开发和制备具有重要的理论和实际意义。

本书共 6 章, 第 1 章为包晶合金组织结构与应用, 介绍包晶合金的组织结构及工程应用; 第 2 章为包晶合金凝固特性, 系统介绍包晶合金凝固特性及凝固过程中形成的异彩缤纷的组织形态; 第 3 章为非小平面包晶合金定向凝固, 以 Ti-Al 和 Fe-Ni 包晶合金为例, 系统介绍非小平面包晶合金定向凝固过程中的组织演化; 第 4 章为小平面包晶合金定向凝固, 以 Al-Ni 合金为例系统介绍小平面包晶合金定向凝固过程中的组织演化; 第 5 章为包晶合金形态演化规律与组织形成模拟, 介绍包晶合金形态演化规律及相场法模拟在包晶合金凝固组织研究中的应用。第 6 章为包晶合

金电磁冷坩埚定向凝固与组织控制,主要介绍采用新型定向凝固技术对Ti-Al合金进行系统定向凝固得到的重要结果及进展。苏彦庆教授撰写第1章、第4~6章,骆良顺副研究员撰写第2章、第3章。全书由苏彦庆统稿、定稿。

本书撰写过程中得到多位老师和研究生的帮助,书稿形成过程中,傅恒志院士、郭景杰教授、丁宏升教授、陈瑞润教授、李新中副教授、王亮副教授,刘畅博士、刘冬梅博士、杨劼人博士等参与了部分章节内容的选撰和讨论,书中很多研究成果和数据来源于众多研究生的学位论文,书稿经傅恒志院士审阅并提出了很多宝贵意见,在此一并向他们表示衷心的感谢。书中大部分内容取自作者们承担的两项国家重点基础研究发展计划(973)项目2011CB610406和2011CB605504、五项国家自然科学基金项目以及总装备部和国防科工委的科研项目51425402、50391012、50901025、513300167和51071062,这些项目为进行相应的研究工作提供了宝贵的经费支持和需求牵引。

由于时间紧张和水平所限,书中难免有疏漏与不妥之处,敬请同行和读者批评指正,不吝赐教,在此表示衷心感谢。

作者

2016年7月

目 录

第 1 章 包晶合金组织结构与应用	1
1.1 包晶合金的工程应用	1
1.2 TiAl 包晶合金的组织及应用	2
1.3 Nd-Fe-B 包晶合金组织及应用	19
参考文献	21
第 2 章 包晶合金凝固特性	24
2.1 包晶合金凝固组织复杂性	24
2.2 定向凝固条件下单相合金界面形态的演化	26
2.3 包晶合金初始过渡区内的形核生长	52
2.4 包晶合金稳态生长时凝固组织的演化	53
2.5 包晶合金的复杂生长形态	55
2.6 包晶合金共生生长	61
2.7 近平衡包晶凝固理论	75
参考文献	86
第 3 章 非小平面包晶合金定向凝固	90
3.1 TiAl 合金定向凝固界面响应函数及选择图	90
3.2 TiAl 合金定向凝固组织演化	103
3.3 TiAl 合金定向凝固过程中的带状生长	121
3.4 TiAl 合金定向凝固过程中的共生生长	130
3.5 Fe-Ni 包晶合金低速段定向凝固组织演化	141
3.6 包晶反应对定向凝固组织演化的影响	165
3.7 包晶系共生生长及其模型化	185
参考文献	225
第 4 章 小平面包晶合金定向凝固	229
4.1 引言	229
4.2 具小平面特性 Al_3Ni 相的形核及生长特性	230

4.3	包晶合金定向凝固初始固/液界面及熔体准备	248
4.4	热稳定处理对 Al-Ni 包晶合金熔体中溶质分布的影响 ...	263
4.5	Al-Ni 包晶合金定向凝固组织演化及各相的生长机制 ...	278
4.6	TGZM 效应引起的一种新型包晶反应机制	310
	参考文献	325
第 5 章	包晶合金形态演化规律与组织形成模拟	332
5.1	二元合金液固相变“广义”相场模型构造	332
5.2	定向凝固 Ti-Al 合金液固相变微观组织模拟	350
5.3	定向凝固包晶相变微观组织的相场模拟	371
	参考文献	390
第 6 章	包晶合金电磁冷坩埚定向凝固与组织控制	396
6.1	电磁冷坩埚定向凝固原理	396
6.2	籽晶的制备与片层取向控制	397
6.3	TiAl 合金定向凝固初始成分过渡区控制	412
6.4	采用籽晶原位定向凝固法实现片层取向控制	428
	参考文献	436
	名词索引	439
	附部分彩图	441

第1章 包晶合金组织结构与应用

1.1 包晶合金的工程应用

包晶合金是应用非常广泛的工程合金,如 Fe-Ni, Ti-Al 等,更多的三元或多元工程材料如 Fe-C-X, Fe-Ni-Cr, Nd-Fe-B 和 Co-Sm-Cu 等结构和磁性材料及 Y-B-Cu-O 等超导材料也往往具有包晶反应,因此包晶合金的凝固引起了人们的极大关注。

无论二元或多元包晶合金在冷却凝固时都会出现典型的包晶反应,即液相+初生相→包晶相,如人们所熟悉的 Fe-C 合金系中的包晶反应就是在 1 495 °C 出现液相与 δ -Fe 和 γ -Fe 的平衡并转变为奥氏体。在 Fe-Ni-Cr 合金中类似的包晶反应也非常重要,它不仅直接决定了所得到的凝固组织,影响了铁素体最终的体积分数,而且还影响了材料的热裂倾向及性能。

在某些材料系中可能出现连续的包晶反应,如 TiAl, Cu-Sn, Cu-Zn 和某些工具钢,所形成的包晶相通常是金属间化合物,如 γ -TiAl, Cu₃Sn 等。由于它们具有较高的高温强度,因此这些金属间化合物合金引起人们的广泛关注。

第三代永磁材料 NdFeB 中的磁性相 NdFe₁₄B 是在凝固过程中通过包晶反应形成的包晶相,它在定向凝固过程中的晶体学择优生长方向决定了该材料的磁性能,而氧化物超导材料中的超导相 YBa₂Cu₃O_y,在定向凝固过程中的组织形态与取向也决定了该材料的超导性能。

虽然这些包晶材料具有重要的结构和功能特性,但迄今人们对它们在凝固过程中的相变及组织演化特性了解得还很不深入。

包晶合金的凝固是目前凝固领域研究的热点之一,包晶合金凝固研究无论在凝固理论还是实际应用方面都有十分重要的意义。在对这些材料的研究过程中,人们发现通过包晶凝固形成的微观组织结构并非如以往描述的那样单一,而是多种多样的,如初生相枝晶外包覆包晶相、稳定或亚稳相的单相枝晶、包晶相在初生相基体中弥散分布、垂直于生长方向的带状组织以及类似共生生长的组织。包晶合金在定向生长过程中呈现出的多

种凝固组织,反映了包晶合金在定向凝固过程中组成相与显微组织之间竞争与选择的多样性。然而,人们对包晶合金凝固过程的认识还远远不足,有待于更深入的研究。

定向凝固中的初生相和包晶相的竞争生长是一个动态演化的过程,受合金成分和生长速度等条件的影响,两相之间的竞争生长、界面形态的选择、组织形态的演变以及它们之间的相互转化成为组织形态控制的根本问题,这些竞争选择的物理过程迄今都不太清楚,有待于进一步的研究。

1.2 TiAl 包晶合金的组织及应用

1.2.1 TiAl 包晶合金应用领域及应用研究现状

TiAl 基合金具有耐高温、抗氧化、优异的弹性模量及抗蠕变性能,被认为是温度为 $850\sim 1\,050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 最值得关注的结构材料。TiAl 基合金在许多领域表现出潜在的应用前景,其中以单轴应力状态应用的 TiAl 合金发动机叶片是今后重要发展方向之一,其原因在于具有定向片层组织的 TiAl 合金具有优异的单轴力学性能。由于其性能与 Ni 基高温合金相当,但其密度还不到 Ni 基合金的一半,因此是一种在航空航天及地面燃气轮机上应用得比较理想的材料。 γ -TiAl 合金在一定温度下的比模量和比强度与其他合金系对比存在明显的优势,如图 1.1 所示。

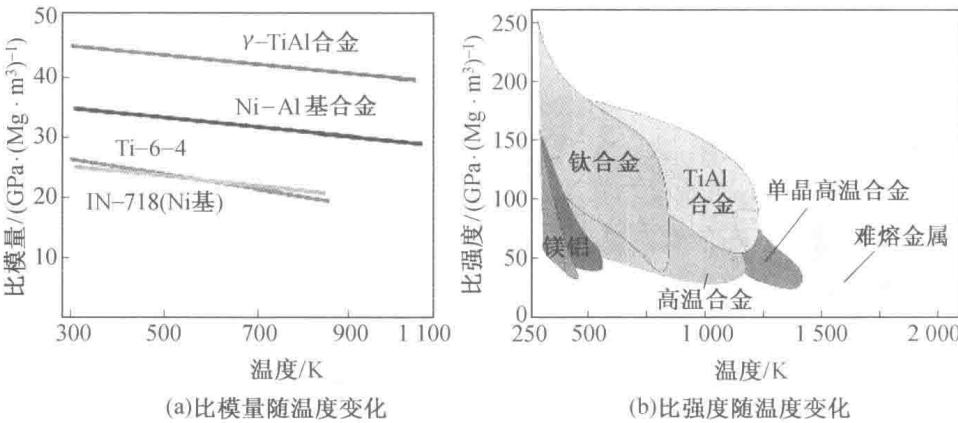


图 1.1 γ -TiAl 合金在一定温度下的比模量和比强度与其他合金性能比较

按照美国综合高性能涡轮技术计划 (IHPTET) 和高速民航计划 (HSCT) 及未来可重复使用的航天飞机需求, γ -TiAl 可使燃烧室及高温

蒙皮结构的工作温度大增而无须用 Ni 基高温合金,它还可使喷气发动机推重比提高 50% 以上。由于 TiAl 合金的优势,它在航空航天未来发动机用材中受到了高度重视。据美国航空航天局预测,TiAl 金属间化合物在 2020 年约占发动机全部用材量的 1/5。目前,许多学者试图通过定向凝固控制 TiAl 合金片层方向以提高 TiAl 合金性能。然而,这些研究只着重于改变合金成分和提高定向凝固技术等方面的研究,而忽视了 TiAl 合金作为包晶合金的自身凝固特点对凝固组织的影响。

TiAl 二元合金是一种典型的包晶系合金,等原子附近存在两个连续包晶反应,在凝固过程中随着成分的改变会经历不同形式的包晶反应,使它的宏观、微观组织呈现多种形态的变化。为能比较准确地揭示不同凝固参数下 TiAl 包晶合金的微观组织形态和特征,必须对定向凝固过程中初生相和包晶相的选择竞争规律以及对其组织的影响进行深入的分析。

1. 异形件的应用研究

TiAl 合金作为高温结构材料,其铸造组织具有明显的优势,突出表现在抗蠕变和断裂韧性方面。近年来,对 TiAl 合金的研究重点在这方面有所体现,在未来以低压涡轮叶片为主要应用对象时整体铸造占有重要地位,如图 1.2 所示。相应地,近期关于 TiAl 合金铸造技术的研究非常活跃。

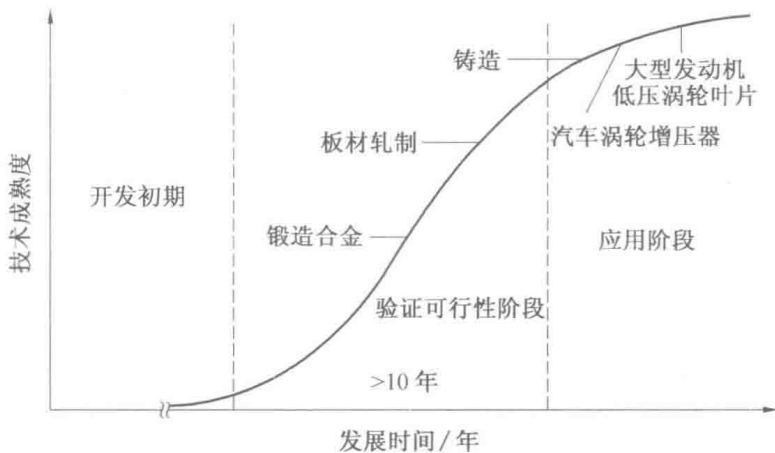


图 1.2 TiAl 合金各种工艺发展演化

日本 Daido 钢公司采用了 CLV(counter-gravity low-pressure casting of vacuum-melted alloys)方法铸造出 TiAl 合金涡轮。其中与 IN713C 涡轮同样尺寸(直径 47 mm)的 TiAl 涡轮(铸态)与合金钢轴焊在一起,以煤油燃气驱动进行了模拟实验,从 34 000 r/min 分别加速到 100 000 r/min

和 170 000 r/min,与 IN713C 涡轮相比分别节约了 16% 和 26% 的时间。最大转速达到 180 000 r/min,比 IN713C 涡轮增加了 10 000 r/min,Burst Test 转速达到 210 000 r/min。3.5 L 12 阀门 DOHC 发动机,受原始排气阀材料的跳动限制,该发动机的原始设计转速极限为 13 000 r/min,当采用 TiAl 排气阀后最大转速达到 14 000 r/min。日本三菱重工也开展了类似的工作,经过测试后的 TiAl 涡轮外观如图 1.3 所示。美国 Edison 材料技术中心联合 GM, Ford, TRW, DelWest, USAF Labs, GEAE, Cincinnati Milacron, Duriron, RMI, UD, WSU 等单位采用铸造方法共同研制了 TiAl 合金汽车排气阀门,通过在两台 Chevrolet Corvettes 上测试,运行 2.5 万 km 后,平均节油 2%,排气阀没有损伤,又有资料报道采用 TiAl 合金排气阀可以节约燃油 8%。可见,这一新材料的使用将显著提高整车的性能,在节约能源方面将带来巨大的效益,不仅如此,随之而来的噪声和尾气污染也将大幅度降低。

涡轮发动机是航空器的主要动力形式,发动机性能的改进和提高在很大程度上依赖于压气机级压比的提高,相应地,要求压气机叶片的转速及工作温度大幅度提高,使叶片的工作应力、工作环境恶化。TiAl 合金的高比强度、高的抗氧化及抗蠕变温度使其成为压气机叶片的首选材料。自 1998 年,美国空军就开始在 F119 发动机上着手测试 TiAl 第 9 级压气机叶片的可靠性;GE 公司已生产出 TiAl 合金 CF6—80C2 航空发动机的第 5 级低压涡轮叶片,如图 1.4 所示,测试工作已获得成功。精密铸造 TiAl 低压涡轮叶片将在 GE90 发动机的第 5、6 级以及最新的 GENX 发动机上获得应用。叶片质量的降低将显著减小叶片作用到涡轮盘上的应力,从而减轻发动机的质量。另外,GE90 发动机的管道转向横梁也将采用 TiAl 合金铸件,该横梁长为 200 mm,宽为 60 mm。

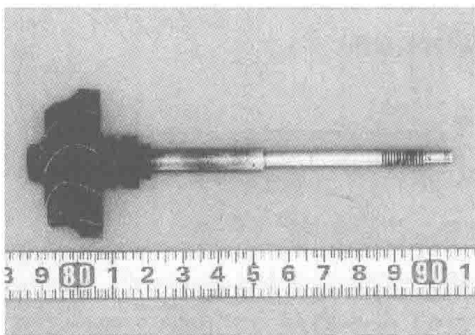


图 1.3 经过测试后的 TiAl 涡轮外观

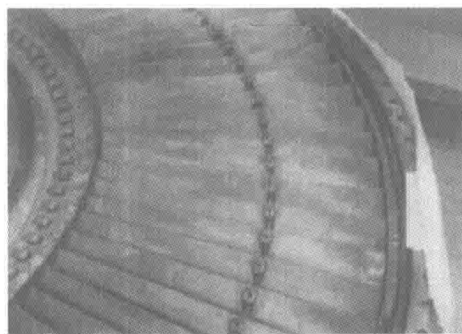


图 1.4 铸造 TiAl 合金 CF6—80C2 发动机第 5 级低压涡轮叶片

国内对 TiAl 合金铸造技术的研究也已开展多年,并有铸造 TiAl 排气阀和叶轮的研究报道,TiAl 排气阀已通过台架测试,但 TiAl 叶轮目前还没有进行台架试验的报道。

虽然 TiAl 合金的塑性还较低,但关于该合金异形件塑性成形方面的研究也已取得很大进步。图 1.5 所示为 TiAl 合金叶片变形加工的基本流程,用该方法加工出的 TiAl 合金叶片如图 1.6 所示。通过粉末方法制备异形件的研究也已进行多年。

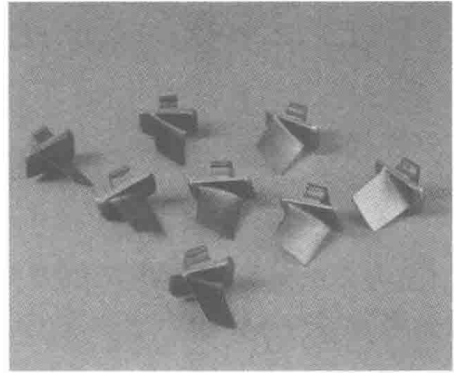
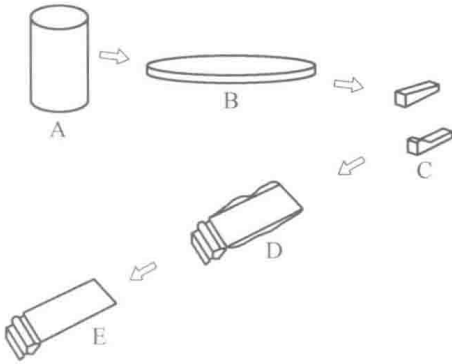


图 1.5 TiAl 合金叶片变形加工的基本流程

图 1.6 变形加工获得的 TiAl 合金叶片

2. TiAl 合金板材的应用及制备方法

TiAl 合金在航空航天器及其发动机上的一个重要应用形式是板材。据预测在未来 20 年里,航空旅客将增加至每天 60 万人次。对飞行速度更高的飞机的需求是显然的。因此,正在运行的 HSCT(the high speed civil transport)计划,为了减少尾气及噪声的污染,计划采用各种形式的 TiAl 合金,图 1.7 是该计划中发动机尾喷管上将应用的 TiAl 板,既有铸造薄板,也有锻造薄板。

铸造 TiAl 板材面的研究工作主要是由日本钢铁公司开展的,其试验原理如图 1.8 所示,两个直径为 300 mm 的铜辊之间留有 1.5 mm 的缝隙,铜辊以 0.44 m/s 的线速度转动,使通过中间包流下来的 TiAl 合金熔体受到激冷并轧制成 1.5 mm 厚的 TiAl 板,随后进行热等静压和退火处理。目前,对 Ti-47Al-3Cr, Ti-50Al, Ti-50Al-1TiB₂ 等合金进行了试验。用该方法制备的 TiAl 板与锻造法制得的板进行比较,高温强度明显提高,如图 1.9 所示。

锻造板材更容易获得薄的板材,从而成为生产 TiAl 合金板材的主要方法。通过锻造工序生产 TiAl 薄板的方法可概括为三种:铸锭-开坯-轧

制法、预合金粉末冶金法及 Ti/Al 箔冷轧-热扩散合成法。

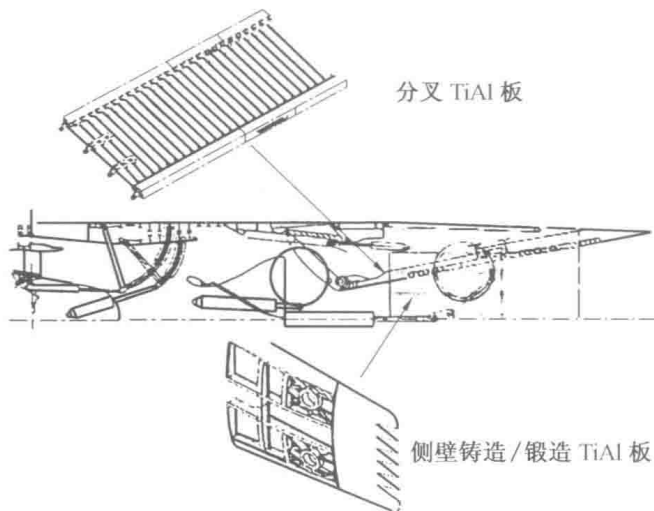


图 1.7 TiAl 板在 HSCT 计划中的应用

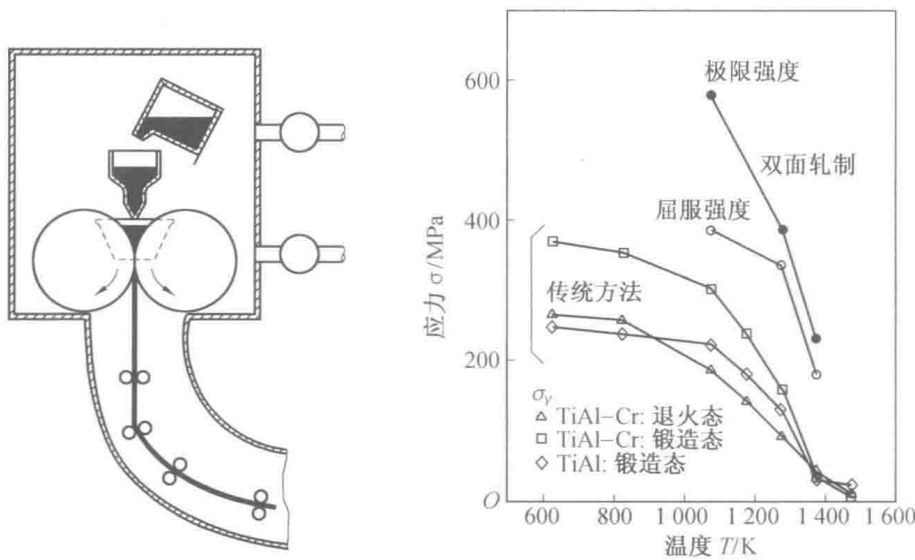


图 1.8 直接连铸 TiAl 板示意图 图 1.9 连铸 TiAl 板与锻造法制得的板的性能比较

①铸锭—开坯—轧制法。奥地利 PLANSEE 研究所在铸锭—轧板领域进行了大量的研究工作。其工艺过程如下:首先对铸锭进行包套锻成饼状,然后将其切成方块并封装,最后进行轧制成板,加以修正和表面精磨后得到规定厚度的板材。通过多年的研究,已摸索出适合于该工艺的合金成分 Ti-46.5Al-4(Cr-Nb-Ta)-0.1B。

压轧 TiAl 板或箔在超音速飞行器及新型发动机的应用在美国、日本的研发计划中占有重要地位。美国以铸锭-轧制技术为主,据报道利用近等温轧制已加工出 $700\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 的薄板,但关于其性能的研究未报道。日本主要研究等温轧制技术,但由于轧制过程压缩率低、变形速率慢而需要很长时间,另外很难消除铸态组织缺陷,目前只能做出宽度不超过 150 mm 的板。

②预合金粉末压制薄板。奥地利 PLANSEE 研究所发展了粉末冶金方法生产 TiAl 板材,该技术采用预合金粉末($\text{Ti}-46.5\text{Al}-4(\text{Cr}-\text{Nb}-\text{Ta})-0.1\text{B}$)。合金粉末是通过高压压气雾化金属液而成的球状颗粒。将合金粉末封装后进行轧制并烧结而成板。与铸锭-轧制法相比,铸锭-轧制法得到的板材性能好,但工艺成本高(必须采用多次轧制以及材料利用率低),预合金粉-轧制法成本低,但得到的板材组织内有缺陷(显微缩松),性能受到影响。

③Ti/Al 箔冷轧-热扩散合成薄板。粉末冶金法与铸锭冶金法相比,得到的组织细小、均匀,预合金粉末冶金法轧制过程较困难,间隙元素含量相对较低。近年来出现一种新的板材制备技术,即 TiAl 箔冷轧-热扩散合成法。

1994 年,瑞士 Jakob 报道了他们利用该方法合成 TiAl 合金的研究结果,该方法得到的二元 TiAl 材料的典型力学性能为:断裂强度为 400 MPa ,屈服强度为 300 MPa ,室温延伸率约为 1% 。

1999 年,美国 Luo 等人报道了用该方法合成 TiAl 合金的研究结果。其工艺过程为:纯 Ti/Al 箔经表面清理(超声波)后交替叠摺在一起,之后进行室温冷轧,压缩量为 56% 。接下来进行加热促进元素间的反应,这个过程在 Ar 气体保护下进行。

Jakob 和 Luo 的研究表明,用 Ti/Al 箔热扩散法是可以合成 TiAl 合金的。之后日本学者报道了用该方法制备 TiAl 板过程中内部偏扩散空洞及织构方向控制的研究结果,并找到了消除空洞的方法。

1.2.2 TiAl 基合金显微组织与力学性能

TiAl 基合金的力学性能与其显微组织密切相关,由于全片层组织具有远高于其他组织形态的断裂韧性,因此多趋向于选择全片层组织。全片层的高断裂韧性是由于该组织能够产生较大的裂纹尖端应变,从而增大了抗裂纹扩展的能力,同时,层片相界面两侧如果存在不同的晶体位向及晶体结构,也会造成对滑移带和解理裂纹跨越界面的阻碍。这就是人们设计

由 γ 及 α_2 交替排列形成片层结构(γ/α_2)的基本思路。

γ -TiAl 片层结构的力学性能有很强的方向性,在最近的十几年来通过对具有单一取向的全片层 PST(polysynthetically twinned)晶体的系统研究,揭示了片层取向与性能的关系,对 γ/α_2 层片显微结构的基本性能有了广泛的了解,如显微特性、变形、断裂韧性和宏观流动性等。PST 晶体的强度与塑性表现出明显的各向异性,取决于承载方向与片层取向的角度 Φ 和 ψ ,其中 ψ 的影响较小, Φ 则起决定性作用。图 1.10 给出载荷方向与 PST 晶体相对方位。图 1.11 为 PST 晶体屈服强度及塑性随片层与应力轴夹角的变化,在 $\Phi=90^\circ$ 时,PST 晶体表现出最高的抗拉强度,然而,塑性几乎最低。抗拉强度与塑性在 $\Phi=0^\circ$ 时得到很好的平衡。抗拉强度虽然没有 90° 时那么高,但拉伸塑性在室温时为 $5\%\sim 10\%$,当 $\Phi=30^\circ\sim 60^\circ$ 时,屈服强度要更低于而塑性更高于 $\Phi=0^\circ$ 和 $\Phi=90^\circ$ 时,这种趋势几乎可以保持到 $1\,000\,^\circ\text{C}$ 。综合而言,外加载荷平行于片层界面可以获得最佳的强度与塑性的综合。这种明显的力学性能的各向异性是由于片层界面平行或垂直于外加应力时, γ 相沿 $\langle 111 \rangle$ 面的剪切形变与片层界面相截,剪切形变必须通过孪晶界、 γ/α_2 界面和 α_2 片层,造成大的形变阻力。

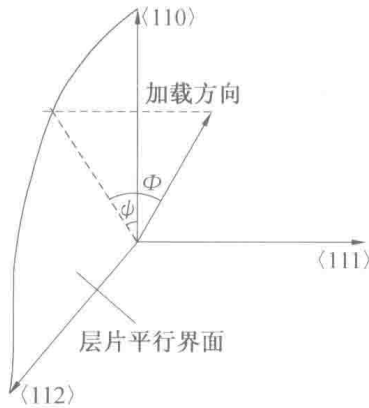


图 1.10 载荷方向与 PST 晶体相对方位

目前研究者们正在探索用不同方法来控制 TiAl 合金组织中的片层取向。利用片层组织是通过 α 相形成的,而且 γ 相析出时遵循以下位相关系: $\{111\}_{\gamma} // (0001)_{\alpha}$ 和 $\langle 110 \rangle_{\gamma} // \langle 1120 \rangle_{\alpha}$,提出了 Ti/Al 相变合成 TiAl 薄板内部组织方向控制。当用 Ti 箔和 Al 箔合成 TiAl 合金时,Ti 箔中 α 相的组织($\langle 0001 \rangle$ 方向垂直于 Ti 箔的长度方向)会对反应后的组织产生影响。Fukutomi 等人在这方面开展了研究工作,对比了不同工艺条件下片层取向的分布规律。

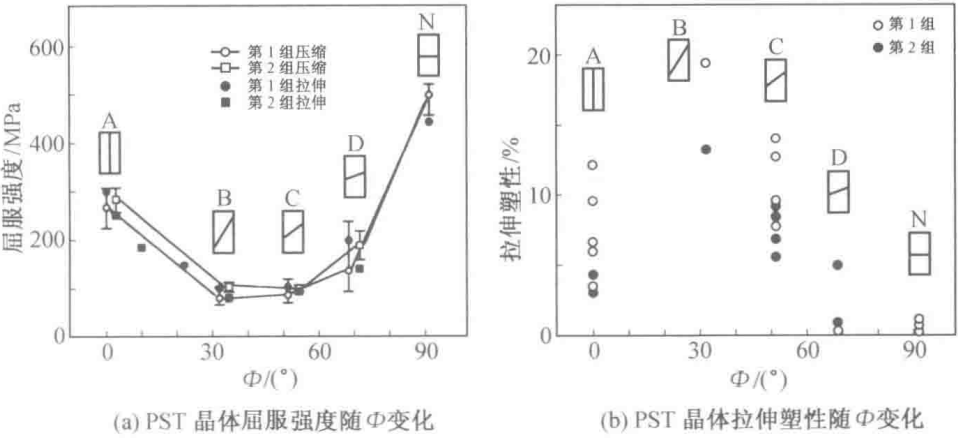


图 1.11 PST 晶体屈服强度及塑性随片层与应力轴夹角的变化

Ti/Al 箔冷压后经 550 °C 3.6 ks+630 °C 162 ks+1 350 °C 3.6 ks 热处理得到的组织中片层晶团尺寸达到 1 mm,远大于原始的 Ti 箔的厚度,而且片层方向与板的轧制方向的夹角分布如图 1.12(a)所示,10°时分布频率较高,而 40°~60°和 90°也较高。当采用 550 °C 3.6 ks+630 °C 36 ks+850 °C 144 ks+1 350 °C 3.6 ks 热处理后,仍然可以得到片层组织,但晶团尺寸较小,而且片层方向大部分平行于板的轧制方向,如图 1.12(b)所示。

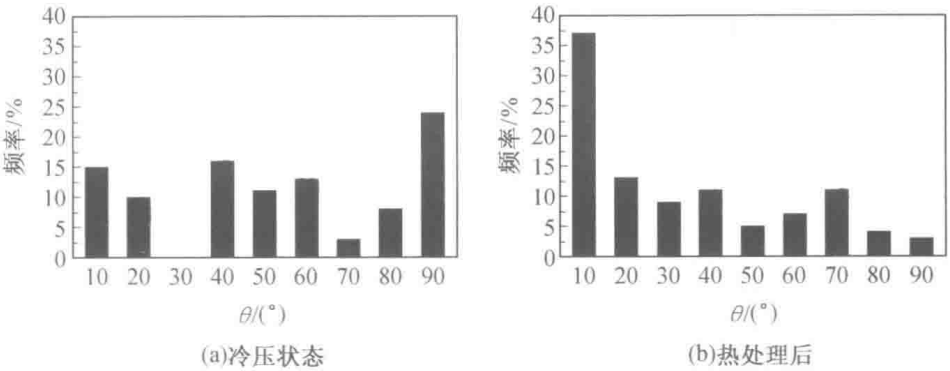


图 1.12 TiAl 板中片层方向与轧制方向的夹角分布

造成这种差别的主要原因是,在加热过程中是否存在 Ti 的 $\alpha \rightarrow \beta$ 的转变。在第一种加热方式中,升温较快,Ti 发生 $\alpha \rightarrow \beta$ 的转变,而在冷却过程中发生 $\beta \rightarrow \alpha \rightarrow \alpha_2 + \gamma$ 转变,形成的片层组织与板轧制方向成 40°~60°和 90°。在第二种条件下,在达到 $\alpha \rightarrow \beta$ 转变以前,在 850 °C 保温,促使 Al 在 Ti 中的溶解量增多,以稳定 α 相、抑制 β 相的形成,因此所产生的片层组织接近平行于板的长度方向。