图字：01-2020-6940 号
Gamma Titanium Aluminide Alloys：Science and Technology /by Fritz Appel，Jonathan David Heaton Paul，Michael Oehring /ISBN 9783527315253

Copyright © 2011 Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Higher Education Press Limited Company and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder，John Wiley & Sons Limited. Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

版权所有。本书中文简体版独家专有翻译出版权由 John Wiley & Sons Limited 公司授予高等教育出版社有限公司。未经许可，不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。本书封底贴有 Wiley 防伪标签，无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

Gamma 钛铝合金：科学与技术 /（德）弗里茨·阿佩尔（Fritz Appel），（德）乔纳森·保罗（Jonathan D. H. Paul），（德）迈克尔·奥林（Michael Oehring）著；宋霖译. -- 北京：高等教育出版社，2022.1

书名原文：Gamma Titanium Aluminide Alloys：Science and Technology

ISBN 978-7-04-057637-5

Ⅰ.①G… Ⅱ.①弗… ②乔… ③迈… ④宋… Ⅲ.①钛合金-铝合金 Ⅳ.①TG146.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 014158 号

Gamma Tailü Hejin：Kexue yu Jishu

策划编辑 刘占伟　责任编辑 任辛欣　封面设计 杨立新　版式设计 马 云
插图绘制 于 博　责任校对 刘丽娴　责任印制

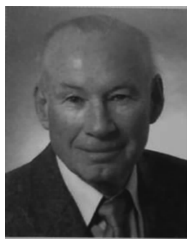
出版发行	高等教育出版社	网　址	http：//www.hep.edu.cn
社　址	北京市西城区德外大街 4 号		http：//www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http：//www.hepmall.com.cn
印　刷			http：//www.hepmall.com
开　本	787mm×1092mm　1/16		http：//www.hepmall.cn
印　张	56.25		
字　数	1050 千字	版　次	年　月第 1 版
购书热线	010-58581118	印　次	年　月第　次印刷
咨询电话	400-810-0598	定　价	179.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换
版权所有　侵权必究
物 料 号　57637-00

译者简介

宋霖，山东泰安人，西北工业大学凝固技术国家重点实验室副教授。2010 年于山东大学材料科学与工程学院获学士学位，2015 年于北京科技大学新金属材料国家重点实验室获博士学位，2015 年 7 月被西北工业大学特评为副教授，并工作至今。获批日本学术振兴会(JSPS)博士后项目。2017 年 12 月至 2019 年 12 月在德国亥姆霍兹吉斯达赫特研究中心(原 GKSS)从事博士后研究。多年来一直从事钛合金、钛铝金属间化合物的相变机理、变形机制以及组织稳定性的先进电子显微分析表征研究。主持国家自然科学基金青年基金/面上项目、陕西省自然科学基础研究计划、国家重点实验室课题等，参与国家及省部级课题多项，在 *Acta Materialia* 等期刊上发表 SCI 论文 50 余篇，与本书作者一直保持着科研合作和良好沟通，共同发表了多篇研究论文。

作者简介



本书的主要作者 Fritz Appel 博士将毕生精力倾注在对钛铝合金的基础和应用研究上，是钛铝合金领域的权威科学家。他 2006 年在亥姆霍兹吉斯达赫特研究中心(Helmholtz-Zentrum Geesthacht，HZG，原 GKSS)作为物理冶金研究组长退休，之后仍一直活跃于钛铝合金研究领域。Appel 博士于 1973 年在位于德国哈勒的马丁·路德大学获得博士学位，并于 1987 年获得该校教职；于 1987 年在日本学术振兴会(JSPS)的资助下在日本从事了为期 6 个月的研究；1990 年加入德国 GKSS。Appel 博士于 1999 年获德国材料学会塔曼(Tammann)奖，于 2002 年获英国材料、矿物和矿业学会查理斯·哈契特(Charles Hatchett)奖。Appel 博士已发表 160 余篇论文，作邀请报告 80 余次，并持有本领域的 6 项专利。

Jonathan Paul 博士于 1990 年获曼彻斯特大学博士学位，1993 年前往位于萨克雷的法国原子能委员会从事研究工作。他于 1995—1997 年在原 GKSS 任研究员，随后供职于位于法恩伯勒的英国防卫评估研究署结构材料中心。1999 年至今任 GKSS 研究员。Paul 博士主要从事钛铝合金力学性能相关研究，他分别于 1995 年和 2002 年获得由英国材料、矿物和矿业学会颁发的 Vanadium 奖和查理斯·哈契特(Charles Hatchett)奖。Paul 博士发表了多篇论文，并持有 4 项专利。

Michael Oehring 博士于 1988 年获德国哥廷根大学博士学位。1989 年加入原 GKSS 的应用物理冶金研究组任研究员，1993 年加入由 Fritz Appel 领导的钛铝合金研究团队。Oehring 博士主要从事钛铝合金的定向凝固、同步辐射表征等相关研究，于 2002 年获英国材料、矿物和矿业学会颁发的查理斯·哈契特(Charles Hatchett)奖。他撰写或合作撰写了 100 余篇研究论文，并持有 5 项专利。

译者的话

人们对钛铝合金的研究已持续了数十年，其间发表的文献浩如烟海。对钛铝合金领域的每一位工程技术和科研人员来说，学习和掌握对目前研究成果和认知水平的相关综述是十分必要的。由 Fritz Appel 博士领衔所著的 *Gamma Titanium Aluminide Alloys: Science and Technology* 以权威的视角回顾了钛铝合金领域的基础研究成果及应用进展，是钛铝合金从业人员公认的案头必备书籍，也是本领域学生和学者需要参考的重要资料。

本书从钛铝合金的物相结构、相变、变形机理、强韧化等微观层面出发，扩展至合金的蠕变、断裂、疲劳及氧化等服役性能，继而又阐述了合金在热加工和部件应用等工程领域中的相关知识，内容宽广丰富，行文深入浅出。三位作者——Fritz Appel 博士、Jonathan D. H. Paul 博士和 Michael Oehring 博士均是钛铝合金领域备受尊崇的科学家，特别是主要作者 Appel 博士，年逾八旬仍坚持在科研一线，笔耕不辍，将全部的精力奉献在了钛铝合金的研究上。可以认为，本书是他们毕生智慧的结晶。

译者在三位作者的工作单位从事了两年的博士后研究。有幸经常与三位科学家进行学术讨论及科研合作，深感受教，获益良多。临别之际，三位作者为译者所购的英文原版书亲笔留言勉励，令人感动。三位作者年事已高，在与他们的朝夕相处中，译者作为青年学者，愈发感觉到将书中的知识传承下去的责任。现今，我国的钛铝合金研究正处于热潮阶段，国家对轻质高温结构材料也有迫切的需求，将本书译成中文，对我国的学生、学者以及工程技术人员必有助力。同时，从日常教学与科研的角度看，译者认为本书也适宜作为研究生教材。因此，译者对三位作者作出了高质量独立完成翻译的郑重承诺。

本书体量庞大，作出承诺着实是需要下一番决心的。为力求科学名词翻译的准确性和中文阅读的通俗性，译者不计时间成本，查阅了大量资料。令人鼓舞的是，翻译期间，译者一直承蒙三位作者的鼎力支持，随时与他们保持着沟通。Paul 博士和 Oehring 博士提供了原版书的勘误表(绝大部分是拼写错误)，因此中文版对原版书中的部分表述进行了校正。本书作者还欣然为中文版作序。需要特别指出的是，在本书英文原版出版至今的 10 年中，钛铝合金又迎来了许多新的突破和发展。为此，三位作者决定为中文版加续一些内容，以附录的形式对钛铝合金领域近 10 年来的新进展进行综述，这无疑使中文版得到

了升华。可能是因为年龄原因，Appel 博士曾来信说自己的工作效率已大不如前，想必在续写过程中，三位作者也付出了大量的时间和精力，在此向他们表示感谢。

在中文版翻译及出版过程中，译者得到了伯明翰大学 David Hu 教授在部分中英文词汇方面的许多建议和高等教育出版社刘占伟、任辛欣编辑一直以来的耐心协助，本书还获得了西北工业大学精品学术著作培育项目和研究生培养质量提升项目的资助，在此一并表示感谢。

本书涉及的知识面非常宽广，由于译者水平有限，译文难免有欠妥或错误之处，恳望广大读者批评指正。

宋霖

2021 年 10 月于西北工业大学

中文版序

在本书写就之时，人们对钛铝合金的兴趣正与日俱增，这主要是因为当时合金在高温领域中的各种应用已经领先于对合金的探索了。

本书的译者，宋霖教授，以其大量的研究论文和会议报告在钛铝合金领域内广为所知。他的研究领域涵盖了钛铝合金的相变、相组成及显微组织的演化，以及变形机制等。他近期的一个主要的代表性工作即为对 α_2-Ti_3Al 相的孪晶行为的研究。因此，宋霖教授对本书中所涉及的内容是非常熟悉的。我们对他能够承担起翻译本书的重任表示衷心的感谢。

我们也要感谢英国伯明翰大学冶金与材料学院的胡大为教授，他不辞劳苦地对本书的中文版进行了校订。

在过去的十年中，钛铝合金研究在中国得到了飞速发展，这些进展涵盖了物理冶金学的各个方面。从中国学者在大量著名期刊上发表了数量可观的研究论文中可见一斑。因此我们相信，本书的中文版将收获广泛的读者群。

本书在 2011 年出版后，又出现了许多阐述钛铝合金新研究进展的论文。宋霖教授邀请我们为中文版补写内容，对这些新的进展作出综述。我们对此欣然应允。对于补写内容，我们将尽可能地按照原书的顺序安排加以叙述，并列于书后的附录。

Fritz Appel

Jonathan David Heaton Paul

Michael Oehring

2022 年 3 月

序　一

钛铝合金作为一种轻质高强的高温结构材料，已经在航空发动机中实际应用多年，并表现出巨大的市场前景和应用拓展的潜力。学界对钛铝合金的研究重点已从20世纪末的相变、变形等基本原理延伸至热加工、增材制造及探索其新应用的方向上。本书英文版自2011年出版以来，一直是相关从业人员的重要参考书籍。书中对合金基本原理的阐述有助于科研人员快速进入专业知识领域，对合金制造及应用的总结和展望又为工程技术人员提供了重要参考和设计思路。

英文版的主要作者Fritz Appel博士是钛铝合金基础研究的先驱，尤其在合金的微观结构领域有很高的建树，其性格温文尔雅且极具钻研精神。多年前，我国钛铝合金研究的奠基人、高铌钛铝系列合金的开创者陈国良院士曾与其有深入的合作。在两位老一辈科学家的推动下，北京科技大学陆续将多名优秀的青年学者派遣至GKSS(现称亥姆霍兹吉斯达赫特研究中心，简称HZG)深造，为我国钛铝合金的早期研发作出了重要贡献。书中GKSS有关高铌钛铝合金的许多工作都有中国学者的参与和贡献。虽然陈国良院士已仙逝，但其打造的过硬研发团队和培养的众多弟子如今已成为我国钛铝合金研究和应用领域的中流砥柱。

自钛铝合金实现应用以来，合金的研发迎来了大发展。世界各航空大国对这种材料的重视以及科研人员的不懈努力，使其一直是轻质高温材料领域的研究热点。我国在钛铝合金的基础研究和应用研究方面也呈现出百花齐放的态势，这是非常令人高兴的。这就要求我国大量的、新的从业人员能够尽快掌握合金的相关基础知识，在科研和实验中少走弯路。本书英文原版涵盖的内容极其丰富，但对非母语的读者来说理解起来也颇有些难度。因此，需要有人将其翻译成通俗易懂的中文，当然，这就要求译者有扎实的知识功底并付出极大的精力。

本书的译者宋霖是我的学生，他曾在HZG从事了两年的博士后研究，在钛铝合金的基础研究方面工作出色。在对英文原版的理解和中英文词汇的把握方面，他是能完全胜任的。翻译工作同时也得到了原作者的无私帮助。因此，我认为本书的翻译质量是值得信赖的。中文版《Gamma钛铝合金：科学与技术》对钛铝合金研究方向的学生、学者和工程技术人员来说一定开卷有益，对

从事其他金属材料的科技工作者而言也具有重要参考价值。书中阐述的理论不仅是对知识的总结和传承，也是研究人员科研灵感的源泉。

2021 年 10 月于北京科技大学

序　二

TiAl 金属间化合物及合金的研究至今已有半个世纪的历程，在科学文献方面以专著形式成书的只有 *Gamma Titanium Aluminide Alloys: Science and Technology* 这一本。本书比较全面地总结了出版前近 40 年的研究成果，基本上涉及本领域的各个方面，第一次把 TiAl 领域的知识系统地呈现给读者。由于 TiAl 研究只是材料研究里的一个小领域，加上大规模的、世界范围的 TiAl 研究活动已经成为过去，因此，在这个领域内已经没有可能再产生一本与本书有同等地位的专著，本书必定是 TiAl 领域内的唯一专著。

本书自 2011 年出版便受到 TiAl 研究者的欢迎，特别是对于初入此行的研究人员，借助本书可以很快地对 TiAl 研究有个全面的了解。即使像本人这样在 TiAl 领域工作多年的资深研究者，也会经常从本书中得到新的启发。读过本书后会有个感觉，就是这本书在“科学”和“技术”方面，“科学”的比重更大一些。这有可能是因为本书的第一作者，Fritz Appel 博士，本身就是一位优秀的科学家，同时也是一位优秀的电子显微镜专家。书中的很多透射电镜照片都出自他手。因此，比起只有工程研究背景的研究者，他对“科学”方面更加专注。本书的三位作者都是长年工作在一线的研究者，他们对 TiAl 有着第一手的认知，这又增加了本书的权威性。

本书的译者，宋霖博士，是中国 TiAl 研究领域年轻一代中的佼佼者。自博士生开始至今，一直在这个领域中踏踏实实地耕耘着。即便如此，翻译这样一本大部头的专著对他来说还是有相当难度的。书中涉及的知识范围远超出了他本人的研究范围。在很多方面，翻译书稿也是他重新学习的过程。可慰的是，宋霖知难而上，利用近两年的时间，认真、仔细地完成了全书的翻译工作。这个译本基本上做到了“信”和“达”，虽然在“雅”的方面仍有改进余地，但也相当难能可贵。

在本书原著出版以后，特别是 2016 年锻造 TiAl 合金(TNM)叶片投入商业运营后，世界范围的 TiAl 科学研究进入了收尾阶段，仍在继续的研究活动基本上是工业应用推动的小规模的项目。与之相反，中国国内对 TiAl 的需求日渐旺盛，以应用为目的的研究活动日渐活跃。在这样一种背景下，本书中译本的出现可以说是恰逢其时，将会更好地为 TiAl 在国内的应用服务。

最后想说的是，无论是本书的原著还是中译本，对 TiAl 研究者来说，都

只是一本参考书。在深入研究一个问题时，仔细阅读本书附录的原始文献是不能跳过去的。只有在原始文献中，才能看到从假设、实验、逻辑推论到结论的全过程，以及每个研究的实验条件限制范围。这对于研究生和刚进入 TiAl 领域的年轻研究人员而言是非常重要的。

D. Hu（胡大为）

2022 年 1 月于英国伯明翰

作者序

为进一步提高热力学效率和生态相容性，人们对能量转换系统研发的要求在不断提高。先进的材料设计理念源自不断提高材料的服役温度，更轻质和更高的运转速度。例如，涡轮的进气温度每提高 10 ℃，燃气轮机的运行效率可提升 1%。采用更耐高温或更轻质的材料，可大幅降低飞行器和发电设施的燃料消耗。经过近 50 年的研发，目前正在应用的传统金属材料体系已经接近其能力极限。为取得进一步的发展，新的材料体系亟待建立。

目前普遍认为，以金属间化合物 γ 相为基的钛铝合金具备达到上述设计要求的潜力。毫无疑问，这种材料的研发对其他相关的高温科技领域以及总体经济效益均有重要意义。例如，通用电气公司最近宣布，作为发动机叶片材料，钛铝合金已经应用于其最新型号的发动机 GEnx 中。这对钛铝合金这样一种相对较新的先进工程材料具有重大里程碑式的意义。

尽管在过去的 20 年内发表了大量关于 TiAl 合金的文献，但在最近 10 年内，综述性的文献并不多。然而，自 10 年前开始，对 TiAl 合金基础物理冶金学的理解以及合金的加工技术等方面均取得了长足进展。我们希望，通过本书的出版，可首次对相关的浩如烟海的文献进行覆盖面宽广的阐释和讨论。在纳米尺度下深入理解 TiAl 合金复杂的显微组织，以及如界面相关现象的原子机制等内因如何决定其结构-性能的关系，对 TiAl 合金这种结构材料未来的成功应用是十分必要的。

本书对相关研究课题的概述旨在建立科学发现与合金设计、材料性能、工业加工技术和工程应用之间的联系。TiAl 合金的冶金学必然与其他金属间化合物系统有一些共同点。本书将主要为因研究需要而需掌握更加具体的知识的科研工作者和高年级学生等提供物理冶金教科书上所没有涉及的细节，因此我们着重强调相关问题的科学性。我们希望书中对目前钛铝合金科学与技术发展的总结不仅可以引导 TiAl 合金研究者们从大量的文献中理清思路，也可以引起从事低密度及耐热材料工作的其他材料科学家、工程师和技术管理人员的兴趣。书中关于界面及与之相关现象的描述一定可以引发更广泛的学界兴趣。

没有大量人员和多个组织的帮助，本书是无法完成的。首先，我们感谢亥姆霍兹吉斯达赫特研究中心(Helmholtz-Zentrum Geesthacht，HZG，原 GKSS)提供了无私的帮助和绝佳的研究条件。我们对该研究中心的科学总负责人

Wolfgang Kaysser 教授、材料研究所负责人 Andreas Schreyer 教授和研究组组长 Florian Pyczak 教授表示感谢。

我们感谢德国联邦教育与研究部(BMBF)、德国科学基金会(DFG)、亥姆霍兹联合会、罗尔斯-罗伊斯德国公司和巴西矿冶公司(CBMM)对我们许多科研项目的资助。

我们要特别感谢 Richard Wagner 教授(现为法国格勒诺布尔劳厄-朗之万研究所负责人)，是他在 20 世纪 80 年代担任本研究所负责人期间率先开展了 TiAl 合金的研究工作。另外，还要感谢我们的同事和已毕业的学生，他们是 Ulrich Brossmann、Stefan Eggert、Dirk Herrmann、Roland Hoppe、Ulrich Fröbel、Viola Küstner、Uwe Lorenz，以及已故的 Johann Müllauer、Thorsten Pfullmann 和 Ulf Sparka。感谢他们的关注、支持和对研究小组美好氛围的贡献。对于 HZG 图书馆工作人员的热心帮助也在此一并表示感谢。

必须特别提到的是，我们要感谢 Young-Won Kim 博士(通用能源系统公司，美国代顿市)，因为他在紧密联合 TiAl 合金研究人员方面作了多年的贡献，也感谢他和我们的友谊。Fritz Appel 还要感谢妻子 Bärbel 对他工作的支持。最后，所有作者致谢 Wiley-VCH 出版社给予的这次写作本书的机会，特别是 Waltraud Wüst 和 Ulrike Werner 的耐心支持，以及 Bernadette Cabo 在文稿校正方面的细心帮助。

Fritz Appel
Jonathan David Heaton Paul
Michael Oehring
吉斯达赫特，2011 年 1 月

图表致谢清单

为了涵盖尽可能多的已发表文献，本书作者采用了已发表作品中的图片和图表，并对其中的一部分进行了简单的改动。当使用图片时，其文章来源、作者以及所发表的期刊都已注明。下表列出了持有这些图片版权的出版商、公司或个人，感谢他们对我们在使用这些图片时的无私许可。

出版源	图/表
ACCESS e.V Reprinted with permission，Copyright ACCESS	图：14.21
American Physical Society（APS） Reprinted from "*Phys. Rev. B*" with permission， Copyright（1998）APS	图：3.1，3.2
ASM International® Reprinted from "*Castings*，*Metals Handbook*" with permission，Copyright ASM www. asminternational. org	图：14.25
Cambridge University Press Reprinted with permission， Copyright Cambridge University Press	图：5.7，12.1，15.15，16.47
Deutsche Gesellschaft für Materialkunde（DGM） Reprinted with permission，Copyright DGM	图：15.12
General Electric Company（Aviation） Reprinted with permission，Copyright GE	图：1.2 和封面

（转下页）

出版源	图/表
Elsevier Publishing Reprinted with permission, Copyright Elsevier	图：1.1a，2.5～2.10，3.2，4.1，4.13～4.15，6.6，6.26，6.30，6.31，6.60，6.65，6.69，6.70，6.72～6.74，6.77，6.78，7.6，7.12，7.13，7.20，7.21，7.23，7.25，8.1～8.3，8.9，8.10，9.3，9.27，9.31～9.33，10.14，10.17，10.25，10.26，11.5，11.6，11.8，11.9，11.11～11.13，11.16，11.17，12.6，12.8，12.9，12.11，12.12，12.16，13.4，13.5，13.16，14.12～14.15，14.26，15.7，15.16，16.57，18.2～18.4，18.5，18.14，18.15，19.3，19.4 表：6.3，7.4，11.1，11.2
IOP Publishing Reprinted with permission, Copyright IOP Publishing	图：7.2
The Japanese Institute of Metals（JTM） Reprinted with permission, Copyright JIM	图：9.2
Metal Powder Industries Federation（MPIF），105 College Road East，Princeton，New Jersey，USA Reprinted with permission, Copyright MPIF	图：7.1，15.2，15.6，15.8，15.9
Springer Publishing Reprinted with permission, Copyright Springer	图：2.2～2.4，2.11，6.67，7.15，7.16，10.16，15.19～15.21，16.3～16.5，16.8～16.10，16.12，16.14～16.17，16.29，16.44～16.46，16.48～16.50，16.52，16.58，17.4～17.16 表：7.6
Taylor & Francis Publishing Reprinted with permission, Copyright Taylor & Francis	图：5.11，5.12，5.16，5.20～5.22，6.11，6.49，6.50，6.53，6.59，7.27，10.8，16.21，16.22

（转下页）

出版源	图/表
The Minerals, Metals and Materials Society, Warrendale, PA, (TMS) Reprinted with permission, Copyright TMS	图：4.2~4.4，4.6，6.29，6.49，7.17，9.1，9.22，9.24，10.13，10.15，10.18，10.21，10.30，10.31，11.2~11.4，11.7，12.15，13.2，13.3，14.2，14.3，14.5，14.6，14.8，14.9，14.16~14.20，15.3，15.11，15.17，15.18，16.11，16.18，16.55，19.1，19.2
Wiley Publishing Reprinted with permission, Copyright Wiley	图：6.40，6.42，10.2，12.2~12.5，12.7，12.10，12.14，14.1，15.10，15.13，15.14，16.33，16.35~16.37，16.39，16.53 表：14.1
G. Hug, PhD Thesis, Université de Paris-Sud, France, 1988	图：5.9

目　录

第 1 章　引言 …… 1
参考文献 …… 3
第 2 章　物相组成 …… 5
2.1　二元 Ti-Al 相图 …… 5
2.2　三元和多组元合金系 …… 13
参考文献 …… 22
第 3 章　热物理常数 …… 31
3.1　弹性和热性能 …… 31
3.2　点缺陷 …… 33
3.3　扩散 …… 35
参考文献 …… 37
第 4 章　相变和显微组织 …… 41
4.1　凝固组织的形成 …… 41
4.2　固态相变 …… 56
4.2.1　$\beta \rightarrow \alpha$ 相变 …… 56
4.2.2　$(\alpha_2+\gamma)$ 片层组织的形成 …… 58
4.2.3　羽毛状结构和魏氏组织区域 …… 65
4.2.4　块状转变 …… 67
参考文献 …… 68
第 5 章　单相合金的变形行为 …… 81
5.1　单相 γ-TiAl 合金 …… 81
5.1.1　滑移系和变形动力学 …… 81
5.1.2　面缺陷 …… 84
5.1.3　γ-TiAl 中位错的平面分解 …… 90
5.1.4　位错的非平面分解和位错钉扎 …… 95
5.1.5　γ-TiAl 中的机械孪晶 …… 98
5.1.6　取向和温度对 γ 相变形的影响 …… 103
5.2　α_2-Ti_3Al 单相合金的变形行为 …… 113
5.2.1　滑移系和变形运动学 …… 113

5.2.2 取向和温度对 α_2 相变形的影响 …… 119
5.3 β/B2 相合金 …… 122
参考文献 …… 125
第 6 章 双相 α_2-Ti_3Al+γ-TiAl 合金的变形行为 …… 139
6.1 片层组织 …… 139
6.1.1 片层 TiAl 合金中的界面结构 …… 139
6.1.2 片层界面的能量 …… 150
6.1.3 共格和半共格界面 …… 153
6.1.4 共格应力 …… 162
6.1.5 塑性各向异性 …… 168
6.1.6 微观力学模型 …… 173
6.2 单相与多相合金变形机制的差异 …… 175
6.2.1 TEM 表征方法的层面 …… 175
6.2.2 (α_2+γ)合金的室温变形 …… 176
6.2.3 独立的滑移系 …… 179
6.2.4 (α_2+γ)合金的高温变形 …… 181
6.2.5 片层间的滑移传递 …… 182
6.3 位错和形变孪晶的产生 …… 188
6.3.1 γ-TiAl 中位错源的开动 …… 188
6.3.2 界面相关位错的产生 …… 194
6.3.3 孪晶形核和生长 …… 196
6.3.4 孪晶交截 …… 206
6.3.5 声发射 …… 213
6.3.6 孪晶结构的热稳定性 …… 214
6.4 滑移阻力和位错可动性 …… 215
6.4.1 热激活变形 …… 215
6.4.2 变形初始阶段的滑移阻力 …… 224
6.4.3 TiAl 合金的静态和动态应变时效 …… 229
6.4.4 扩散协助的位错攀移、回复和再结晶 …… 239
6.5 热和非热应力 …… 241
参考文献 …… 247
第 7 章 强化机制 …… 263
7.1 细晶强化 …… 263
7.2 加工硬化 …… 269
7.2.1 加工硬化现象 …… 269

7.2.2 非热部分对加工硬化的贡献 …… 271
7.2.3 割阶拖曳和位错碎片强化 …… 273
7.2.4 变形结构的热稳定性 …… 276
7.2.5 高温流变行为 …… 281
7.2.6 高应变速率变形 …… 285
7.3 固溶强化 …… 286
7.3.1 溶质原子与 TiAl 基体的尺寸失配 …… 286
7.3.2 观察结果综述 …… 288
7.3.3 溶质元素铌的效果 …… 289
7.4 析出强化 …… 294
7.4.1 TiAl 合金中的碳化物析出 …… 294
7.4.2 碳化物强化 …… 295
7.4.3 硼化物、氮化物、氧化物以及硅化物强化 …… 301
7.5 优化的含 Nb 合金 …… 304
参考文献 …… 306
第 8 章 调制组织合金的变形行为 …… 315
8.1 调制组织 …… 315
8.2 失配界面 …… 320
8.3 力学性能 …… 324
参考文献 …… 325
第 9 章 蠕变 …… 327
9.1 设计裕度和失效机制 …… 327
9.2 总体蠕变行为 …… 329
9.3 稳态或最小蠕变速率 …… 330
9.3.1 单相 γ-TiAl 合金 …… 331
9.3.2 α_2-Ti_3Al+γ-TiAl 两相合金 …… 333
9.3.3 对蠕变结构的实验观察 …… 334
9.4 显微组织的影响 …… 335
9.5 初始蠕变 …… 339
9.6 蠕变诱发的片层结构退化 …… 342
9.7 与 $\alpha_2 \rightarrow \gamma$ 相变相关的析出效应 …… 352
9.8 加速蠕变 …… 354
9.9 优化的合金、合金成分和加工工艺的影响 …… 355
9.10 具有调制组织合金的蠕变性能 …… 359
9.10.1 应力和温度的影响 …… 359

9.10.2 损伤机制 …… 359
参考文献 …… 366
第 10 章 断裂行为 …… 375
10.1 TiAl 合金断裂的长度尺度 …… 375
10.2 解理断裂 …… 378
10.3 裂纹尖端的塑性 …… 380
10.3.1 塑性区 …… 380
10.3.2 裂纹与界面的交互作用 …… 383
10.3.3 裂纹与位错的交互作用 …… 385
10.3.4 孪晶的作用 …… 387
10.4 断裂韧性、强度和塑性 …… 391
10.4.1 实验方法方面 …… 391
10.4.2 显微组织和织构的作用 …… 393
10.4.3 温度及加载速率的影响 …… 401
10.4.4 预变形的作用 …… 404
10.5 调制组织合金的断裂行为 …… 405
10.6 对塑性和韧性的要求 …… 407
10.7 对性能离散性的评价 …… 409
10.7.1 统计分析 …… 409
10.7.2 TiAl 合金强度和塑性的离散性 …… 410
10.7.3 TiAl 合金断裂韧性的离散性 …… 413
参考文献 …… 414
第 11 章 疲劳 …… 421
11.1 定义 …… 422
11.2 应力-疲劳寿命(S-N)曲线 …… 423
11.3 高周疲劳(HCF) …… 425
11.3.1 疲劳裂纹扩展 …… 425
11.3.2 裂纹闭合效应 …… 427
11.3.3 门槛应力强度范围下的疲劳 …… 428
11.4 温度和环境对循环裂纹扩展抗力的影响 …… 430
11.5 低周疲劳(LCF) …… 434
11.5.1 总体认识 …… 434
11.5.2 循环应力响应 …… 435
11.5.3 循环塑性 …… 437
11.5.4 应力诱导相变和动态再结晶 …… 442

11.6 热机械疲劳和蠕变松弛 …… 444
参考文献 …… 444
第 12 章 氧化行为及相关问题 …… 451
12.1 动力学和热力学 …… 452
12.2 关于氧化的一般问题 …… 455
12.2.1 合金成分的影响 …… 455
12.2.2 氧化物生长相关的力学问题 …… 457
12.2.3 氧和氮的影响 …… 458
12.2.4 其他环境因素的影响 …… 460
12.2.5 亚表面区域、Z 相以及添加银的作用 …… 463
12.2.6 表面光洁度的影响 …… 464
12.2.7 离子注入的影响 …… 465
12.2.8 卤族元素对氧化的影响 …… 467
12.2.9 高温暴露后的脆性 …… 468
12.2.10 涂层/抗氧化合金 …… 473
12.3 总结 …… 474
参考文献 …… 475
第 13 章 合金设计 …… 485
13.1 铝含量的影响 …… 486
13.2 重要的合金化元素——综述 …… 487
13.2.1 Cr、Mn 和 V …… 488
13.2.2 Nb、W、Mo 和 Ta …… 489
13.2.3 B、C 和 Si …… 489
13.3 特定的合金系统 …… 491
13.3.1 传统合金 …… 491
13.3.2 高铌含量合金 …… 492
13.3.3 β 凝固合金 …… 492
13.3.4 块状转变合金 …… 494
13.4 总结 …… 496
参考文献 …… 496
第 14 章 铸锭的制备和部件的铸造 …… 501
14.1 铸锭生产 …… 501
14.1.1 真空电弧熔炼(VAR) …… 502
14.1.2 等离子弧熔炼(PAM) …… 505
14.1.3 感应凝壳熔炼(ISM) …… 511

14.1.4 总体评价 …… 514
14.2 铸造 …… 516
14.2.1 熔模铸造 …… 518
14.2.2 金属模重力铸造(GMM) …… 524
14.2.3 离心铸造 …… 525
14.2.4 反重力低压铸造 …… 532
14.2.5 定向凝固 …… 534
14.3 总结 …… 534
参考文献 …… 534
第 15 章 粉末冶金 …… 543
15.1 预合金粉法 …… 544
15.1.1 气雾化 …… 544
15.1.2 旋转电极法 …… 550
15.1.3 旋转盘雾化 …… 552
15.1.4 雾化的共性问题 …… 553
15.1.5 雾化后的处理 …… 563
15.1.6 总结 …… 577
15.2 元素粉法 …… 577
15.2.1 反应烧结 …… 577
15.2.2 总结 …… 582
15.3 机械合金化 …… 582
参考文献 …… 583
第 16 章 变形加工 …… 597
16.1 热加工条件下的流变行为 …… 598
16.1.1 流变曲线 …… 598
16.1.2 流变行为的本构分析 …… 602
16.2 显微组织的演变 …… 608
16.2.1 单相合金的再结晶 …… 609
16.2.2 多相合金及合金化的影响 …… 610
16.2.3 片层界面的影响 …… 617
16.2.4 共析温度以上热加工过程中的显微组织演化 …… 625
16.2.5 工程方面 …… 627
16.3 可加工性和首次加工 …… 628
16.3.1 可加工性 …… 628
16.3.2 铸锭开坯 …… 638

16.4 织构演化 …… 661
16.5 二次加工 …… 676
16.5.1 部件的热加工成形 …… 676
16.5.2 轧制板材的制备及力学性能的选择 …… 680
16.5.3 变形加工新技术 …… 687
参考文献 …… 690
第 17 章 焊接 …… 709
17.1 扩散焊 …… 709
17.1.1 合金成分和显微组织 …… 710
17.1.2 微凸体变形 …… 711
17.1.3 扩散焊的实验设置 …… 713
17.1.4 焊接区的金相表征 …… 713
17.1.5 合金成分的影响 …… 722
17.1.6 焊接时间和应力的影响 …… 724
17.1.7 接头的力学表征 …… 725
17.2 钎焊及其他焊接技术 …… 727
17.2.1 钎焊和瞬时液相焊 …… 727
17.2.2 其他焊接技术 …… 728
参考文献 …… 729
第 18 章 表面硬化 …… 733
18.1 喷丸和滚压 …… 733
18.2 残余应力、显微硬度和表面粗糙度 …… 734
18.3 喷丸引发的表面变形 …… 737
18.4 相变、再结晶和非晶化 …… 743
18.5 喷丸对疲劳强度的影响 …… 747
18.6 表面硬化的热稳定性 …… 748
参考文献 …… 751
第 19 章 应用、部件的评定和展望 …… 753
19.1 航空航天领域 …… 753
19.1.1 在飞机发动机上的应用 …… 753
19.1.2 特殊航空航天应用 …… 756
19.2 汽车领域 …… 756
19.3 展望 …… 760
参考文献 …… 761

附录 1　前沿进展——物相组成(第 2 章) …… 765
参考文献 …… 768
附录 2　前沿进展——热物理常数(第 3 章) …… 773
A2.1　B2 结构 TiAl 中的点缺陷 …… 773
A2.2　γ-TiAl 合金中氧和硼的固溶度及扩散 …… 773
A2.3　氢的固溶与扩散 …… 774
A2.4　B19-TiAl 相的弹性性质 …… 774
A2.5　ω-Ti 结构的弹性性质 …… 774
参考文献 …… 774
附录 3　前沿进展——相变和显微组织(第 4 章) …… 777
A3.1　凝固 …… 777
A3.2　固态相变 …… 780
参考文献 …… 783
附录 4　前沿进展——单相合金的变形行为(第 5 章) …… 789
A4.1　沿伪孪生方向的剪切 …… 789
A4.2　α_2 相的孪晶 …… 790
参考文献 …… 791
附录 5　前沿进展——多相合金的变形行为(第 6 章) …… 793
A5.1　PST 晶体的制备 …… 793
A5.2　片层组织合金的变形各向异性 …… 794
A5.3　PST 晶体中的通道流变效应 …… 794
A5.4　位错可动性 …… 794
A5.5　位错攀移 …… 795
A5.6　孪晶交截 …… 796
A5.7　内应力 …… 796
A5.8　包辛格效应 …… 797
A5.9　应变分布 …… 798
A5.10　环境脆性 …… 799
参考文献 …… 800
附录 6　前沿进展——强化机制(第 7 章) …… 803
A6.1　晶界强化 …… 803
A6.2　位错偶极子和位错碎片的作用 …… 803
A6.3　α_2 相中的反相畴界(APB)强化 …… 804
A6.4　添加 Nb 的作用 …… 804
A6.5　含有 β/β_o 相的合金 …… 805

A6.6 冲击加载 …… 806
A6.7 添加碳的固溶强化和析出强化 …… 806
A6.8 复合材料相关研究 …… 807
参考文献 …… 809
附录 7 前沿进展——调制组织合金的变形行为(第 8 章) …… 813
参考文献 …… 815
附录 8 前沿进展——蠕变(第 9 章) …… 817
A8.1 长时蠕变 …… 817
A8.2 β/β_o 相的作用 …… 818
参考文献 …… 819
附录 9 前沿进展——断裂行为(第 10 章) …… 821
A9.1 微柱变形实验 …… 821
A9.2 模拟研究 …… 822
A9.3 显微组织的作用 …… 822
A9.4 环境对断裂行为的影响 …… 823
A9.5 复合材料的断裂行为 …… 824
A9.6 残余应力的作用 …… 824
参考文献 …… 824
附录 10 前沿进展——疲劳(第 11 章) …… 827
A10.1 高周疲劳(HCF) …… 827
A10.2 形变孪晶的作用 …… 828
A10.3 显微组织的影响 …… 828
A10.4 铸造缺陷的影响 …… 829
A10.5 短裂纹 …… 829
A10.6 β/β_o 相的影响 …… 830
A10.7 低周疲劳(LCF) …… 830
A10.8 热机械疲劳 …… 831
参考文献 …… 832
附录 11 前沿进展——氧化行为及相关问题(第 12 章) …… 835
参考文献 …… 836
附录 12 前沿进展——合金设计(第 13 章) …… 839
参考文献 …… 840
附录 13 前沿进展——铸锭的制备和部件的铸造(第 14 章) …… 841
参考文献 …… 842
附录 14 前沿进展——粉末冶金(第 15 章) …… 843

参考文献 …… 845
附录 15　前沿进展——变形加工(第 16 章) …… 847
参考文献 …… 851
附录 16　前沿进展——焊接(第 17 章) …… 855
A16.1　扩散焊 …… 855
A16.2　异种材料之间的焊接 …… 856
A16.3　瞬间液相扩散焊 …… 856
A16.4　其他技术 …… 857
参考文献 …… 857
附录 17　前沿进展——表面硬化(第 18 章) …… 859
参考文献 …… 860
附录 18　前沿进展——应用、部件的评定和展望(第 19 章) …… 861
参考文献 …… 862
索引 …… 865

第1章
引言

γ-TiAl合金之所以受到众多的研究者，包括大学、公费资助组织、工业制造商以及终端用户的持续青睐，是因为当考虑到密度因素时，其集合了优异的力学性能。特别是，某些钛铝合金的高温力学性能甚至比高温合金还要突出。

Dimiduk[1]在对TiAl合金和其他航空航天结构材料进行评估后发现，从性能方面看，TiAl合金具有新的优势。其中最重要的表现为：

- 高熔点；
- 低密度；
- 高比强度和比模量；
- 低扩散速率；
- 良好的结构稳定性；
- 良好的抗氧化和抗腐蚀性能；
- 高阻燃性(相比于传统钛合金)。

图1.1给出了TiAl合金相对于其他材料的比模量和比强度。基于这些性能，TiAl合金终将在包括汽车、航空发动机以及发电厂汽

轮机等工业领域的诸多部件中得到应用。

对于一种将要投入使用的材料，其整个生产线和供应商基础，即从材料制造、加工到热处理等环节必须是完备的。这就需要对材料的化学成分、显微组织和加工工艺等因素如何影响构件的性能进行深入的了解。另外，还需要发展特定于 TiAl 合金构件的设计和升级方法，并能够给出可靠预测[2]。在实施阶段，不能出现不可预见的有关加工路径和构件性能的技术问题，因为这将增加成本且是难以挽回的。在 1999 年，当燃料成本相对于今天还较低的时候，Austin[3]曾讨论过：如何引入 γ-TiAl 合金将取决于经济上的可行性。这一点被认为是 γ-TiAl 能否应用的主要障碍，同时，项目的实施决策也以市场因素为主导。

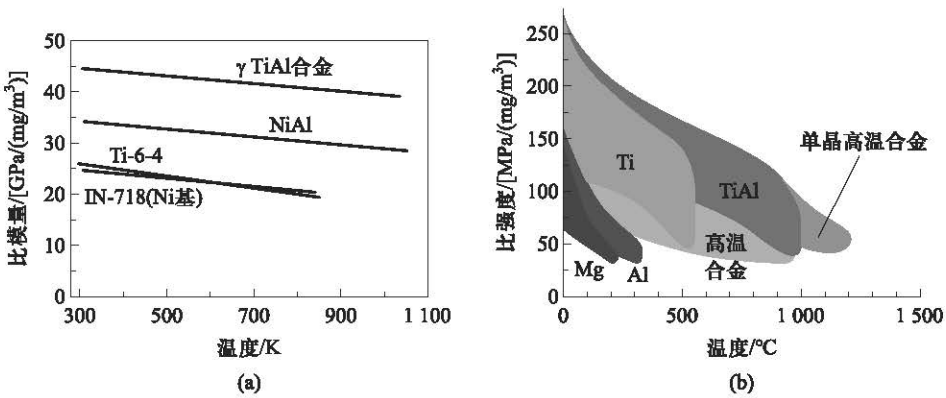


图 1.1　不同温度下 TiAl 合金的比模量(a)和比强度(b)[1]。这些数据表明 TiAl 合金较其他材料具有优势。图片在原图基础上进行了修改

由于 TiAl 合金的金属间化合物特性、复杂的相组成和显微组织以及本征脆性，其物理冶金学是非常难掌握的。尽管如此，我们将尝试对过去 20 年间发表的有关合成、加工和表征等科学问题的大量文献进行分析。在我们看来，TiAl 合金已经取得了长足的发展，特别是通用电气公司宣布将在其最新型的发动机 GEnx-1B(图 1.2)上应用 γ-TiAl 合金[4,5]，这是 TiAl 合金现阶段成功应用的有力证明。γ-TiAl 合金也已经在至少一个汽车系列，即 F1 方程式赛车中获得成功应用，同时，多组部件也已制造完毕并成功进行了测试。在以下的章节中，我们将对促成 TiAl 合金成功应用的相关的科学和工程技术问题进行全面的分析和评价。

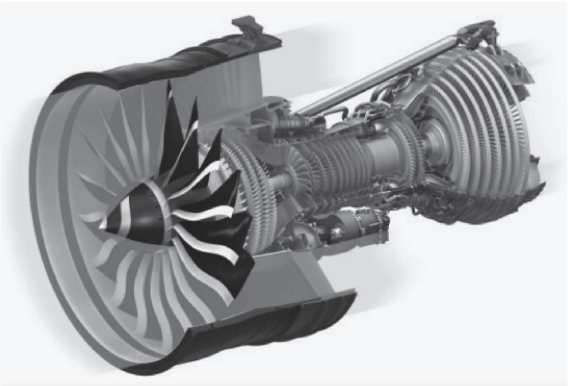


图 1.2 应用于波音 787 梦想客机的通用电气 GEnx-1B 型发动机。其中最后两级的低压涡轮叶片是由铸造 TiAl 合金制造，实现了 TiAl 合金在航空发动机中的首次实际应用。图片由通用电气公司提供

参考文献

[1] Dimiduk, D. M. (1999) *Mater. Sci. Eng.*, **A263**, 281.

[2] Prihar, R. I. (2001) *Structural Intermetallics 2001* (eds K. J. Hemker, D. M. Dimiduk, H. Clemens. R. Darolia, H. Inui, J. M. Larsen. V. K. Sikka, M. Thomas, and J. D. Whittenberger), TMS, Warrendale, PA, p. 819.

[3] Austin, C. M. (1999) *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, **4**, 239.

[4] Weimer, M., and Kelly, T. J. Presented at the 3rd international workshop on γ-TiAl technologies, 29th to 31st May 2006, Bamberg, Germany.

[5] Norris, G. (2006) Flight International Magazine.