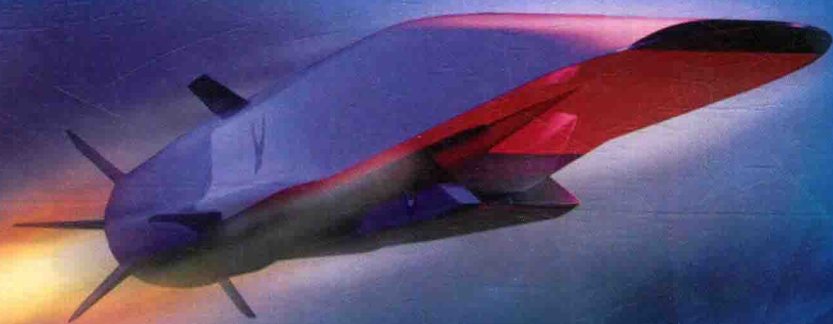


High Temperature Materials and Mechanisms

高温材料与力学机理

[美] 约瑟夫·巴科恩 (Yoseph Bar-Cohen) 编

张幸红 译



航空工业出版社



CRC Press
Taylor & Francis Group

高超声速技术译丛

“十二五”国家重点图书出版规划项目

高温材料与力学机理

High Temperature Materials and Mechanisms

(美) 约瑟夫·巴科恩 (Yoseph Bar-Cohen) 编

张幸红 译

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书共计17章。第1~第5章,涵盖了高温材料及其防热机理的各个方面,包括化学和热力学性质,各种材料的概述,难熔金属、陶瓷和复合材料,用于高温结构和功能应用的高温胶黏剂以及它们的失效原因。第6~第8章涵盖了材料的制备、材料的表征方法以及它们的无损检测和健康监测。在第9~第15章中介绍了高温材料在作动器和传感器上的应用,包括机电材料,如压电、热声学材料,形状记忆和超弹性合金,热电材料钻井装置,以及电子器件。此外,第16和第17章涵盖了传感器设计的相关挑战和各种高温材料和防热机理的应用和挑战。

本书可供大专院校师生、科研院所技术人员自学使用。

图书在版编目(CIP)数据

高温材料与力学机理 / (美) 约瑟夫·巴科恩
(Yoseph Bar - Cohen) 编; 张幸红译. -- 北京: 航空工
业出版社, 2019. 1

(高超声速技术译丛)

书名原文: High Temperature Materials and
Mechanisms

ISBN 978 - 7 - 5165 - 1769 - 7

I. ①高… II. ①约… ②张… III. ①高温材料—材
料力学 IV. ①TU350.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 278098 号

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01 - 2015 - 8593

Copyright © 2014 by Taylor & Francis Group, LLC

CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business

All Rights Reserved

Authorized translation from English language edition of *High Temperature Materials and Mechanisms* (ISBN 978-1-4665-6645-3) published by CRC Press, an imprint of Taylor & Francis Group LLC.

China Aviation publishing & Media Co., Ltd. is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal.

高温材料与力学机理
Gaowen Cailiao yu Lixue Jili

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话: 010 - 84936597 010 - 84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

2019年1月第1版

开本: 710 × 1000 1/16

印数: 1—2000

全国各地新华书店经售

2019年1月第1次印刷

印张: 34.5

字数: 800千字

定价: 160.00元

《高超声速技术译丛》编委会

顾问：(按姓氏笔画排序)

王礼恒	史新兴	包为民	乐嘉陵
冯志高	刘永才	杜善义	杨卫
李椿萱	张立同	俞鸿儒	陶文铨
黄伯云	黄瑞松		

主任委员：郑耀

副主任委员：符松 孟华

委员：(按姓氏笔画排序)

王振国	方文军	刘洪	刘卫东
关成启	杨超	李仲平	李存标
李建林	李跃明	何国强	沈清
张天序	张香文	张蒙正	张新宇
陈振乾	林均品	周毅	宗群
桂业伟	高正红	高效伟	韩杰才
程克明	樊菁		

《高超声速技术译丛》序言

飞得更快、更高、更远，是人类永恒的追求。通常人们把大气层中飞行速度达到5倍声速以上的飞行称为高超声速飞行。相关的高超声速流动的理论研究始于20世纪40年代后期，我国的著名科学家钱学森先生和郭永怀先生都是高超声速概念的最早倡导者。

早在20世纪60年代，在突破3倍声速之前，人类就已经开始研究高超声速技术。美国开展的X-43A、X-51A、X-37B和HTV-2（Hypersonic Technology Vehicle 2）“猎鹰”等飞行器的飞行试验在高超声速领域占据了领先地位，并积累了宝贵的技术和经验。受其鼓舞，更是由于其潜在的重要战略意义和极高的应用价值，使得高超声速技术成为21世纪航空航天领域的研究热点之一，得到了世界范围的广泛关注。

我国在高超声速技术领域的研究方兴未艾，相关的科研院所和高等学校取得了令人瞩目的突破和积累，但与美国等航空航天发达国家相比仍有一定差距，亟待汲取其先进的研究经验，并藉此能够系统培养相关的科研人员。《高超声速技术译丛》的出版适逢其时，译丛旨在借鉴和总结美国等航空航天领先国家的经验，使其理论化、科学化和系统化，进而结合工程实践，以形成具有我国特色的高超声速技术理论与实践相结合的知识体系。

《高超声速技术译丛》主要涵盖飞行器总体技术、推进技术、气动力与气动热、材料与结构热防护、制导与控制、数值模拟与试验测量技术等专业方向，知识领域覆盖了高超声速飞行器研发设计、制造和试验等关键技术。译丛择优选取了美国航空航天学会等国外机构出版的高超声速及相关技术的经典著作，以飨读者。

本套译丛的出版得到了国内众多方面的大力支持。丛书凝结了高超声速研究领域专家智慧和成果，承担着记载与弘扬科学成就、积累与传播科技知识的使命，具有较强的系统性、完整性、实用性和技术前瞻性，既可以作为实际工作的指导用书，也可以作为相关专业人员的学习参考书。期望这套丛书能够有益于高超声速技术领域人才的培养，有益于高超声速技术的发展，有益于高超声速飞行器的研制工作。同时，希望能够吸引更多的读者来关心、支持和热爱高超声速技术，并投身其中做出贡献。

《高超声速技术译丛》编辑委员会

2012年5月

前言

高温材料与其隔热机理的研究是推动人类能力进步的关键技术。高温材料的使用可以追溯到人类文明的开端。早在人类开始使用火和热的时候，他们就使用了能够维持高温的材料。最初，这些原始人用石头来得到他们用来做饭和取暖的明火。随着时间的推移，高温材料的应用场合被扩展到制造在高温下处理和使用的工具。有趣的是，人类生产和处理材料的能力随着他们在高温材料的熔化过程中得到了很大的提高。在石器时代，人类无法分辨任何矿石，而在青铜器和铁器时代，他们能够分别冶炼青铜和铁，并利用他们生产工艺品。由于工业革命提高了工业能力和操作安全性，导致了高温材料的应用项目和需求的巨大增长。

19 世纪一些重要的应用项目（包括汽轮机）、出现在 20 世纪初期的白炽灯和内燃机的发展，以及 20 世纪 40 年代出现的喷气发动机和 80 年代的航天飞机发动机。在 19 世纪末，钢铁被应用于上述项目，在 20 世纪初采用不锈钢和镍铬合金，这些合金对高温材料的应用产生了重大影响。今天，高温材料的选择已经扩大到诸如难熔金属、超合金和钛合金等金属合金。同时使用的包括某些陶瓷材料、碳/碳复合材料、金属基复合材料以及许多其他材料。

一般来说，在材料科学中，高温被定义为等于或高于固体熔点的三分之二的温度。然而，也有其他的定义，包括基于应用的定义，如耐热性（强度和耐腐蚀性）高于 500°C 。由于温度升高降低了材料的强度，因此材料在必要的操作温度下需要具有较高的强度，以保证这些材料的使用具备有效性和经济性。高温材料需要抵抗氧化和腐蚀等行为造成的损害，随着温度的升高，这些因素会加速损害的进程。一般来说，材料的性质和化学行为与高温数据并不相关。具体地说，随着温度的升高，化学反应变得明显，而决定反应性质的是热力学而不是动力学。此外，高温服役还会产生各种各样的影响，包括物质结构的混乱。

跟踪材料的研发和由此产生的工业应用是很有趣的。具体来说，19 世纪末工程需求的驱动因素是促进材料研发及其制备的主要因素，包括粉末冶金、铸造和真空熔炼等方式。材料的兼容性与可用性对于开发高温相关技术的能力至关重要，比如高速飞机和火箭，这些飞行器速度可以达到马赫数 (Ma) 5，而且表面温度超过了 500°C 。除了依靠其材料和结构本身的能力来维持飞行器在高温下没有发生不可逆转的变化和退化，它也需要具有有效的结构设计，进行有效的散热，传送高热通量，并且能够维持相关的热条件。

本书第1~第5章,涵盖了高温材料和其防热机理的各个方面,包括化学和热力学性质,各种材料的概述,难熔金属、陶瓷和复合材料,用于高温结构和功能应用的高温胶黏剂以及它们的失效原因。第6~第8章涵盖了材料的制备、材料的表征方法以及它们的无损检测和健康监测。在第9~第15章中介绍了高温材料在作动器和传感器上的应用,包括机电材料,如压电、热声学材料,形状记忆和超弹性合金,热电材料钻井装置,以及电子器件。此外,第16章和第17章涵盖了传感器设计的相关挑战和各种高温材料和防热机理的应用和挑战。

致 谢

第 1 章

Ted Iskenderian, 喷气推进实验室 (JPL) / 加州理工学院, 帕萨迪纳, 加利福尼亚州

Yiannis Pontikes, 比利时鲁汶大学冶金和材料工程学院

第 2 章

Elizabeth J. Opila, 弗吉尼亚大学材料科学与工程系, 夏洛茨维尔, 弗吉尼亚州

William T. Petuskey, 亚利桑那州立大学, 坦佩, 亚利桑那州

第 3 章

James Gordon Hemrick, 橡树岭国家实验室, 橡树岭, 田纳西州

Vilupnur A. Ravi, 加州理工大学, 波莫纳, 加利福尼亚州

Mark L. Weaver, 亚拉巴马大学, 塔斯卡卢萨, 亚拉巴马州

Eric Wuchina, 海军研究办公室 (ONR), 阿灵顿, 弗吉尼亚州

第 4 章

John Bishopp, Star Adhesion 有限公司, 剑桥, 英国

Lucas F. M. da Silva, *The Journal of Adhesion* 的主编, 波尔图大学, 葡萄牙

Linda Del Castillo, 喷气推进实验室 (JPL) / 加州理工学院, 帕萨迪纳, 加利福尼亚州

Erol Sancaktar, 阿克伦大学, 俄亥俄州

第 5 章

Sebastien Dryepondt, 橡树岭国家实验室, 橡树岭, 田纳西州

Paul Gannon, 蒙大拿州立大学, 波兹曼, 蒙大拿州

Brian Gleeson, 匹兹堡大学, 匹兹堡, 宾夕法尼亚州

Bryan Harder, 美国国家航空航天局 (NASA) 格伦研究中心, 克利夫兰, 俄亥俄州

第 6 章

William Fahrenholtz, 密苏里科技大学, 罗拉, 密苏里州

Yiannis Pontikes, 比利时鲁汶大学冶金和材料工程学院

Eric Wuchina, 海军研究办公室, NSWCCD, 马里兰, 马里兰州

第7章

Vince Crist, 纳米技术实验室, 米尔皮塔斯, 加利福尼亚州

Doreen D. Edwards, 北卡罗来纳州立大学, 罗利, 北卡罗来纳州

Kip O. Findley, 科罗拉多矿业大学, 金州, 科罗拉多州

第8章

Ali Abdul - Aziz, 美国 NASA 格伦研究中心和克利夫兰州立大学, 克利夫兰, 俄亥俄州

Edward Ecock, 爱迪生公司, 纽约, 纽约州

Darby B. Makel, Makel 工程应用中心, 芝加哥, 加利福尼亚州

Subhasish (Subh) Mohanty, 阿贡国家实验室, 莱蒙特, 伊利诺伊州

Philip G. Neudeck, 美国 NASA 格伦研究中心, 克利夫兰, 俄亥俄州

Don J. Roth, 美国 NASA 格伦研究中心, 克利夫兰, 俄亥俄州

第9章

Iqbal Husain, 北卡罗来纳州立大学, 罗利, 北卡罗来纳州

Ted Iskenderian, 喷气推进实验室 (JPL) / 加州理工学院, 帕萨迪纳, 加利福尼亚州

Robert Troy, 喷气推进实验室 (JPL) / 加州理工学院, 帕萨迪纳, 加利福尼亚州

第10章

Troy Y. Ansell, 俄勒冈州立大学, 科瓦利斯, 俄勒冈州

David Cann, 俄勒冈州立大学, 科瓦利斯, 俄勒冈州

Dragan Damjanovic, EPFL 工程学院材料研究所, 洛桑, 瑞士

Xiaoning Jiang, 北卡罗来纳州立大学, 罗利, 北卡罗来纳州

第11章

Wael Akl, 艾因夏姆斯大学工程学院, 开罗, 埃及

Hyeong Jae Lee, 喷气推进实验室 (JPL) / 加州理工学院, 帕萨迪纳, 加利福尼亚州

Ji Su, 美国国家航空航天局 (NASA) 兰利研究中心 (LARC), 兰利, 弗吉尼亚州

第12章

Alexander Czechowicz, 鲁尔大学, 波鸿, 德国

Eugenio Dragoni, 摩德纳和雷焦艾米利亚大学, 意大利

Osman E. Ozbulut, 弗吉尼亚大学, 夏洛茨维尔, 弗吉尼亚州

第 13 章

Sabah K. Bux, 喷气推进实验室 (JPL), 帕萨迪纳, 加利福尼亚州

Jeff Sakamoto, 密歇根州立大学, 东兰辛, 密歇根州

Eric Toberer, 科罗拉多矿业大学, 科罗拉多, 科罗拉多州

Rama Venkatasubramanian, RTI 国际, 三角科学园, 北卡罗来纳州

第 14 章

George Cooper, 加州大学伯克利分校, 伯克利, 加利福尼亚州

Timothy J. Szwarc, 斯坦福大学航空航天系, 加利福尼亚州

第 15 章

Michael Pecht, 马里兰大学帕克分校, 马里兰州

Leon M. Tolbert, 田纳西大学, 诺克斯维尔, 田纳西州

Fred (Fei) Wang, 田纳西大学, 诺克斯维尔, 田纳西州

第 16 章

Carl W. Chang, 美国 NASA 格伦研究中心, 克利夫兰, 俄亥俄州

Liang - Yu Chen, 美国 NASA 格伦研究中心, 克利夫兰, 俄亥俄州

Michael Iten, Marmota Engineering AG, 苏黎世, 瑞士

David Parks, 爱达荷国家实验室, 爱达荷福尔斯, 爱达荷州

Bernhard R. Tittmann, 宾夕法尼亚州立大学, 帕克校区, 宾夕法尼亚州

第 17 章

Josephine Aromando, 爱迪生公司, 纽约, 纽约州

Robert D. Cormia, 福德希尔学院, 洛斯阿尔托斯山, 加利福尼亚州

Somrah, Dowlatram, 爱迪生联合公司, 纽约, 纽约州

Edward Ecock, 爱迪生公司, 纽约, 纽约州

Jeff Hall, 喷气推进实验室 (JPL) / 加州理工学院, 帕萨迪纳, 加利福尼亚州

作者介绍

Yoseph Bar - Cohen 博士是高级技术小组的主管 (<http://nsam.jpl.nasa.gov/>) 和加州帕萨迪纳市喷气推进实验室/加州理工学院的高级研究科学家。1979 年, 他获得了以色列耶路撒冷希伯来大学的物理学博士学位。

他的研究方向主要集中在电力学上, 包括行星的采样处理机制, 新型的作动器, 由压电和 EAP (又称人造肌肉) 组成的仿生学的材料驱动。通过在复合材料中使用超声波, 他发现了极性反向散射 (1979 年) 和漏出的兰姆波 (1983 年) 现象。他参与编辑并撰写了 8 本书, 共同撰写了 360 多篇文章, 共同主持了 44 次会议, 并拥有 22 项注册专利。他引人注目的举措包括向世界各地的工程师和科学家发起挑战, 开发由人造肌肉驱动的机械手臂来与人类搏斗, 他在 2005 年和 2006 年举办了比赛。

由于他对人造肌肉领域的贡献, 《商业周刊》在 2003 年 4 月称他是“推动技术边界”的五名技术大师之一。由于他的突出成就, 美国国家航空航天局两次授予他荣誉勋章, 并两次荣获斯皮尔终身成就奖。除此之外, 他还获得了许多其他荣誉和奖项。同时, 他也是美国无损检测学会 (ASNT) 和国际光学工程学会 (SPIE) 成员。

译者序

从原始文明的石器时代，到农耕文明的铁器时代，从工业革命对新能源的诉求，到现代文明对认知空间和改造空间的能力的渴望，人类诞生以来，无论是每一个文明的起源与发展，还是每一次社会的推动与进步，皆离不开人类对高温环境与应用的探索与需求，更离不开高温材料的制备与其耐热机理的研究。能否在高温材料领域获得长足有效的发展，是人类能否提升自我的关键能力。考虑到目前出版的此类书籍均只针对于单一高温环境应用背景与功能设计，且由于不同高温材料的耐热机理不同，难以放在一起讨论。因此出版一部能够系统介绍不同应用环境、不同使用温度的各类高温材料的专著十分有必要。

加州理工学院的 Yoseph Bar - Cohen 博士于 2014 年出版了 *High Temperature Materials and Mechanisms* 一书。该书分为 17 章，分别阐述了高温材料本身的热力学、化学性质，不同种类高温材料的结构、应用与耐热机理等内容。该书将不同种类的高温材料各自的耐热机理相互比较，相互借鉴，同时详细说明了具体的应用场合，为日后设计多功能高温材料提供理论依据以及技术储备。

因此，本书译著的出版将面向高温材料的制备及其耐热机理阐述这一重大战略需求，针对高温材料本身的热力学、动力学性质，陶瓷基、难熔金属及碳/碳复合材料的高温应用环境下的结构、功能，以及热功能器件与热防护系统的监测与评判等内容，展开详细讨论，使得读者在阅读本书时，对应用于不同环境、不同场合的各种高温材料有一个系统的认识，对自身研究的领域有一个宏观的设计，最终有所收获。

由于作者水平有限，成书时间匆忙，其中不足之处还望广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 引言	Yoseph Bar - Cohen (1)
第 2 章 高温材料化学及热力学	Sulata Kumari Sahu and Alexandra Navrotsky (16)
第 3 章 高温结构和功能应用的难熔金属、陶瓷和复合材料	Jeffrey W. Fergus and Wesley P. Hoffmann (48)
第 4 章 高温胶黏剂与高温黏结应用	R. Peter Dillon (79)
第 5 章 高温材料的氧化行为	James L. Smialek and Nathan S. Jacobson (104)
第 6 章 高温材料制备	Olivia A. Graeve and James P. Kelly (176)
第 7 章 高温材料的表征	Yoseph Bar - Cohen and Robert D. Cormia (213)
第 8 章 高温材料及结构的无损评估和安全检测	Yoseph Bar - Cohen, John D. Lekki, Hyeong Jae Lee, Xiaoqi Bao, Stewart Sherrit, Shyh - Shiuh Lih, Mircea Badescu, Andrew Gyekenyesi, Gary Hunter, Mark Woike, and Grgory Adamovsky (243)
第 9 章 高温电动机	Nishant Kumar (306)
第 10 章 高温机电驱动器	Stewart Sherrit, Hyeong Jae Lee, Shujun Zhang, and Thomas R. Shrout (321)
第 11 章 热声压电能采集器	Mostafa Nouh, Osama Aldraihem, and Amr Baz (361)
第 12 章 形状记忆和超弹性合金	Mohammad Elahinia, Masood Taheri Andani, and Christoph Haberland (379)
第 13 章 热电材料和热电发生器: 研究和应用	Vijay K. Varadan, Linfeng Chen, Jungmin Lee, Gyanesh N. Mathur, Hyun Jung Kim, and Sang H. Choi (408)
第 14 章 高温钻探机制	Yoseph Bar - Cohen, Xiaoqi Bao, Mircea Badescu, Stewart Sherrit, Kris Zacny, Nishant Kumar, Thomas R. Shrout, and Shujun Zhang (447)
第 15 章 高温电子学	Zhenxian Liang (486)
第 16 章 超高温超声传感器的设计与挑战	Matthew M. Kropf (508)
第 17 章 高温材料与力学的应用与挑战	Yoseph Bar - Cohen (519)

第 1 章 引 言

Yoseph Bar – Cohen

1.1	引言	(2)
1.2	历史观点	(3)
1.3	高强高温材料的需求	(4)
1.4	高温材料	(4)
1.4.1	碳/碳复合材料	(5)
1.4.2	碳/碳化硅陶瓷基复合材料	(5)
1.4.3	陶瓷	(5)
1.4.4	陶瓷复合材料	(6)
1.4.5	金属陶瓷	(7)
1.4.6	金属基复合材料 (MMC)	(7)
1.4.7	难熔金属	(8)
1.4.8	超合金	(9)
1.5	高温加工	(10)
1.6	作动器、设备、机械装置与喷气发动机涡轮	(11)
1.7	高温材料与装置的无损评估 (NDE) 以及表征手段	(11)
1.8	总结/结论	(12)
	致谢	(12)
	参考文献	(12)
	互联网资源	(14)

1.1 引言

人类在最开始利用火和热工作的时候就一直在使用能够承受高温的材料。起初原始人使用从周边捡拾来的岩石，自从有能力控制火焰和有关的应用，人类就开始提高自身能力去控制所制备的材料及结构的性能。火焰的应用从生活领域的烹调和加热食物拓展到包括极端热条件在内的高温复杂加工方法和应用领域。今天，高温材料的选择（第3章）拓展到诸如金属合金材料，这些材料包括难熔金属、不锈钢、超级合金以及钛合金。其他材料则包括陶瓷材料、碳/碳复合材料、金属基复合材料（MMC）等许多材料。高温材料的应用涉及飞机的发动机（请参看图1-1的战斗机喷气发动机图例）、核反应堆以及工业涡轮。此外，这些材料还被用于熔炉、导管以及电子和光照设备。

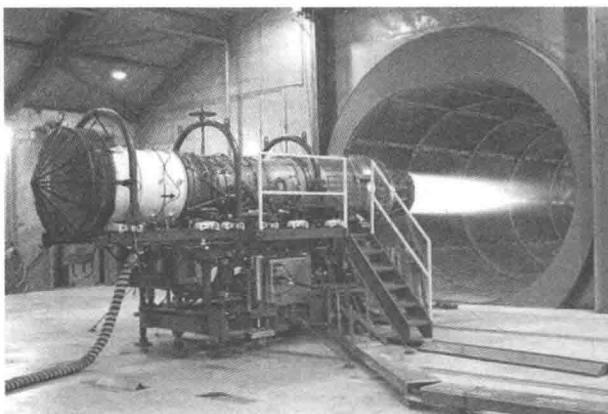


图1-1 在位于佛罗里达州的空军国民警卫队机体测试中的一台F-15“老鹰”Pratt & Whitney F100 涡轮风扇发动机。发动机后边的隧道具有排气和消声功能（摘自维基共享资源，http://en.wikipedia.org/wiki/File:Engine_f15 arp. 750pix. jpg；http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2e/Engine_f15 arp. 750pix. jpg）。

在材料科学领域，高温这一术语通常被定义为大于等于固体熔点三分之二的温度（Spear et al., 2006）。此外还有基于应用方面在内的其他定义，例如 Meertam 和 Van de Voorde（2000）描述的用于 500℃ 以上的耐热材料（如强度和耐腐蚀性）。由于温度的升高会降低材料的强度，为了使材料更为有效且具经济性，这些材料需要在特定的工作温度下具有高强度和安全裕度。高温材料必须对相应的破坏（如氧化和腐蚀）具有抵抗能力，温度升高会加速这些破坏（第5章）。通常情况下材料的性能以及化学行为与高温数据无关（第2章）。特别地，当材料温度升高时化学反应变得明显，相比于动力学，热力学对反应效率更起决定性作用。温度升高会带来包括材料结构扭曲在内的许多效应。

1.2 历史观点

高温材料的使用可以追溯到人类文明起源的远古时期。起初，热被用来烹饪和克服寒冷天气，随着时间的推移热的应用拓展到加工极端高温材料及其在极端条件下的用途。有趣的是，人类根据熔化高温材料能力的进化程度划分技术年代，同时这些技术也被用来划分人类运用材料能力的年代。在石器时代人类无法熔炼任何矿石，而在青铜器时代和铁器时代人类能够分别熔炼青铜和纯铁，还能利用它们生产手工艺品。因性能和操作安全性对材料制备以及使用性方面要求的提高，工业革命在材料应用和需求方面引发巨大的增长。而且，为了制备与处理材料，引进新材料并改良和发展材料加工方法，以此来强化材料的强度和耐久性（第2和第6章）。

一些涌现出的应用包括19世纪末发展起来的蒸汽轮机，以及在20世纪初的白炽灯、内燃机、石化工业。紧随其后，喷气发动机于20世纪40年代发展起来，航天飞机发动机则发展于80年代（请参看图1-2中“亚特兰蒂斯”号航天飞机及其三个主发动机）。19世纪末的合金钢以及20世纪初的不锈钢（Brearley, 1913）和镍铬合金（Crawford, 1959）在高温材料应用领域具有重要的影响，而碳/碳复合材料在20世纪70年代发展起来。



图1-2 航天飞机在发射时发动机放出大量的热量，因此温度显著升高。这张照片是“亚特兰蒂斯”号航天飞机发射至太空时三个主发动机的特写。因为发动机燃烧氢气和氧气，所以通过排气管释放出蒸汽（摘自 NASA/Rusty Backer and Michael Gayle. http://www.nasa.gov/mission_pages/shuttle/flyout/ssme.html；高分辨率：http://www.nasa.gov/images/content/502050main_ssme_firing.jpg。）

跟踪材料及其工业应用的同时发展是有趣的。特别地, 19 世纪末需求的驱动力是舰船动力, 这引起了蒸汽轮机/发动机的发展与进步。蒸汽轮机的发展很大程度上得益于 20 世纪 40 年代兴起的镍超级合金的使用 (Sims, 1987)。这些涡轮机用于车间的电力发电以及后来的喷气式飞机。含有各种添加剂的金属合金的应用使可用的高温材料在性能上大幅提高, 这些材料包括添加铝和钛之后具有抗腐蚀性的镍铬合金。许多生产方法被用来改善实用高温材料的性能, 这些方法包括粉末冶金、铸造以及真空熔炼。

兼容材料的可用性对于发展高温相关技术 (如达到若干马赫数的高速飞机和火箭等) 是决定性的 (Martellucci 和 Harris, 1991)。尤其是达到或超过 $Ma5$ 的问题在于表面温度升高超过 500°C , 这会引起表面材料的巨大应力和汽化 (快速烧蚀)。材料和结构除了在可逆转变和性能退化的情况下承受高温外, 还需要具备有效的结构设计来保证高效的热耗散、高热流传递以及承受相应热环境的能力。MMC 和钛合金通常使用于工作在 $300 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ 范围的结构件, 这些材料质量轻便还易于加工 (Tenny et al., 1988)。例如 6Al-4V 和 AM-3501CRES 不锈钢等合金具有高强度, 但是它们在 400°C 以上就趋于失效 (Jenkins 和 Landis, 2003)。对于高于 1000°C 的情形, 诸如陶瓷以及碳/碳复合材料就派上了用场。

1.3 高强高温材料的需求

一般而言, 人们需要一种比现有材料应用于更高温度的材料, 并且这样的材料还有益于其他工业领域。例如, 在超临界条件下运行的煤粉发电厂的效率可以显著提高 (Meetham 和 Van de Voorde, 2000)。因为随着温度升高材料的强度降低, 高强度材料的应用性被限制于先进结构的需求。钛金属基碳化硅 (SiC) 加固单向复合材料拥有超过 1400MPa 的高强度, 但是这种材料的使用温度局限于 500°C 左右。另外, 对于 1500°C 温度段的使用, 我们可以用强度低于 100MPa 的难熔金属或大于 350MPa 的碳/碳复合材料。除了因温度升高而降低的强度外, 我们还需考虑材料承受加速氧化的能力, 以及因暴露于高温下而产生的性能退化。

新的高温材料和合金相继报道出来 (第 3 章)。当新材料从具有吸引力和令人满意的研究进展中脱颖而出时并没有立即应用到工程领域。确定这些材料的缺点并利用适当的预防措施将其缺点最小化, 以及关注关键问题是必不可少的。举个例子来说, 航空航天工程师承认钛是一种轻质、高温材料, 对超声速飞机结构具有潜在的应用, 然而, 在钛合金成为超声速飞机或其他设备的完整关键结构备选材料之前, 开发出有效的加工、热处理、黏结、焊接以及其他预防早期开裂行为是需要关注的。

1.4 高温材料

许多高温材料正在服役, 第 3 章将给出全面的回顾。本章包含用户关心的高