

STEELS

From Materials Science to Structural Engineering

钢 从材料科学 到结构工程

[英] 沙 维 (Wei Sha) 著
李胜利 乔 军 李 娜 巨东英 译



014060144

辽宁科技大学学术专著、译著出版基金资助

M 国外优秀材料与冶金著作译丛

TG142
61

STEELS

From Materials Science to Structural Engineering

钢 从材料科学 到结构工程

[英] 沙维 (Wei Sha) 著
李胜利 乔军 李娜 巨东英 译



北京
冶金工业出版社



北航

C1746868

TG142
61

Translation from English language edition:

Steels: From Materials Science to Structural Engineering

by Wei Sha

Copyright © 2013 Springer London

Springer London is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

本书中文简体版由 Springer Science & Business Media BV 授权冶金工业出版社独家出版发行。此版本仅限在中华人民共和国境内（不包括中国香港、澳门特别行政区及中国台湾地区）销售。未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2013-6704

版权所有，侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

钢：从材料科学到结构工程/(英)沙维著；李胜利等译. —北京：冶金工业出版社，2014. 8

(国外优秀材料与冶金著作译丛)

书名原文：Steels: from materials science to structural engineering

ISBN 978-7-5024-6527-8

I. ①钢… II. ①沙… ②李… III. ①钢 IV. ①TG142

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014) 第 170533 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmip.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 谢冠伦 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6527-8

冶金工业出版社出版发行；各地新华书店经销；北京慧美印刷有限公司印刷

2014 年 8 月第 1 版，2014 年 8 月第 1 次印刷

169mm×239mm；16.75 印张；326 千字；248 页

49.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题，本社营销中心负责退换)

译者序

我国是钢铁材料的生产大国，也是消费大国。近几十年来，虽然钢铁市场波动频繁，但钢铁行业总体运行态势良好。在国家拉动内需等政策的支持下，国内钢铁市场因基础设施投资和工业生产的平稳增长，需求较为旺盛，带动钢铁产量的大幅增长。在钢铁行业快速发展的同时，钢铁材料的科研开发工作也在如火如荼地进行。钢铁材料资源丰富、价格低廉、性能优异，可添加的合金元素种类繁多，在各种加工及热处理过程中组织形貌异彩纷呈，这为广大的科研工作者提供了无限的发挥聪明才智的舞台和空间。国内拥有钢铁行业的著名专家、学者以及数以万计的钢铁材料研究人员，他们分布于各大钢铁公司、科研院所和高等院校，为我国钢铁行业的快速发展立下了汗马功劳。引进出版国外优秀的学术专著能促进国内与国际学术界之间的沟通与交流，有助于国内广大科研工作者进一步开阔思路，不断取得创新。

英籍华人 Wei Sha 教授于 1986 年在清华大学获得学士学位，于 1992 年在牛津大学获得哲学博士学位，后于 2009 年在贝尔法斯特女王大学 (Queen's University Belfast) 被授予自然科学博士学位，现任贝尔法斯特女王大学规划、建筑及土木工程学院的材料科学教授。其研究领域涵盖钢铁材料及有色金属材料的微观结构、力学性能、热处理等方面的实验及数值模拟研究，先后出版专著 7 部；在各种科技期刊上发表科技论文达 300 余篇，论文被引用达 3000 多次。

Wei Sha 教授集 25 年从事钢铁材料研究的科研经历，并且汇集了世界上该领域研究人员近期的先进研究成果，完成了这部《钢——从材料科学到结构工程》(Steels: From Materials Science to Structural Engineering, Springer-Verlag London, 2013)，其内容涵盖了几类工程用钢的



设计、组织、性能以及动力学和热力学基本理论分析，对传统理论的修正及实验验证，并将计算机模拟与实验研究、工程应用有机地结合在一起。因此，无论对于钢铁材料的基础研究，还是对于钢铁公司从事实际生产，本书都不乏理论和工艺的参考价值。据 Springer 统计，本书的英文版电子书在 2013 年的下载次数排名在 Springer 电子书的前 25% 之内（Springer: Book Performance Report 2013）。

第 2~7 章构成了本书的“合金钢的材料科学研究”篇。第 8~11 章构成了本书的“结构工程用钢”篇。第 1 章广泛地介绍了书中涉及的几个主要钢种（包括高强低合金钢、耐火结构钢、耐热钢、氮化物强化的铁素体/马氏体钢、超高强马氏体时效钢和低镍马氏体时效钢）的研究背景和开发思路，对这几种钢的具体设计方案、组织观察及相变分析、性能测试、作用机理以及相关理论进行了具体分析、修正。第 2~7 章分别对上述钢种进行了更为详细的论述，针对不同的钢种，论述的侧重点略有不同。第 8~11 章对工程背景和钢铁材料在相关领域的应用情况进行了介绍，具体内容包括：钢铁材料在混凝土结构、冷成形钢制龙门架、消防工程、有保护超薄楼板的耐火性中的应用实践及相关设计结构的计算机模拟和优化。

总之，这是一部涉及钢铁材料研究及其重要工程应用的新作，既有先进的材料研究的理论、方法和相关模拟技术，又与工程实际密切结合。为了方便从事钢铁材料研究的广大科研工作者、研究生和相关工程技术人员进行研究、学习和借鉴，特对全书进行了翻译。书中的第 1、2、8~11 章由辽宁科技大学材料与冶金学院的李娜和李胜利教授翻译，第 3~7 章由辽宁科技大学材料与冶金学院的乔军和巨东英教授翻译。由于译者水平有限，有理解不够精准和学术用语选择欠妥之处，还望各位读者批评指正。

本书的原作者 Wei Sha 教授对中文版的翻译工作给予了大力的支持和帮助，并对全部译文进行了校对，在此对 Wei Sha 教授表示衷心的感谢！同时感谢边福勃、牛田钢、李素山、宋岳、吉嘉兴、冯浩、徐薇、

周龙等研究生对译文的整理工作。

感谢以下资助：

辽宁科技大学学术专著、译著出版基金。

中国国家自然科学基金 (No. 51374125)。

中国国家自然科学基金 (No. 50801034)。

中国辽宁省人事厅“十百千高端人才引进工程”基金 (No. 2012207)。

译者

2014年1月28日

前 言

合金钢的研究领域非常活跃。根据科学引文索引 (SCI) 所收录的论文进行统计, 每年有 9000 多名作者发表 3000 多篇在合金钢领域的研究论文, 这些作者隶属于 80 多个国家的 2000 多个组织。

利用谷歌图书的搜索工具进行快速搜索, 可以发现关于钢的图书并不缺少。一些图书针对钢材和钢基材料的微观结构进行了讨论, 例如:

(1) 《钢——微观结构与性能》(*Steels: Microstructure and Properties*), Harry Bhadeshia and Robert Honeycombe;

(2) 《钢——冶金与应用》(*Steels: Metallurgy and Applications*), D. Llewellyn and R. C. Hudd;

(3) 《钢》(*The Book of Steel*), G. Beranger, G. Henry, and G. Sanz 编;

(4) 《先进钢铁材料——钢铁科技新进展》(*Advanced Steels: The Recent Scenario in Steel Science and Technology*), 翁宇庆, 董瀚, 干勇编;

(5) 《ASM 专业手册: 碳钢与合金钢》(*ASM Specialty Handbook: Carbon and Alloy Steels*), J. R. Davis 编。

那么这本新书有什么独到之处呢?

本书作者自 2004 年起在英国贝尔法斯特女王大学的规划、建筑及土木工程学院任材料科学教授, 此前, 作者自 1995 年起曾先后担任结构材料讲师和副教授。

自 2000 年以来, 作者在下面每一个学科领域, 材料科学、冶金学与冶金工程、物理学、科学与技术、化学、工程学, 都发表了至少 15 篇文章, 并被科学引文索引 (SCI) 或会议论文集引文索引 (CPCI-S)

收录,其中与本书有关的一些文章在目录前列出。因此,作者在钢铁材料研究的各个领域具有丰富的经验。

作者的独特且广博的研究经历使得《钢——从材料科学到结构工程》一书具有独到之处。在现有的钢铁材料方面的图书中,本书所涵盖的题材范围可谓独一无二。

作为一部积累了作者 25 年科研经历的专著,本书主要包括自 2000 年以来的最新研究结果,同时也包含了世界上其他研究人员的近期相关工作。本书的重点内容为消防工程、耐热钢和耐火钢。此外,还包括了制造和微观结构工程,这两个主题对于扩展钢材在临界状态下的性能越来越重要。

研究论文是本书的支柱,但本书的主体结构基于合金钢的种类和结构工程钢材的应用领域而搭建,目的是将作者多年来的个人研究经历汇集起来。因此,本书将为这些知识提供令人感兴趣的脉络。此外,本书对其他研究者的工作进行了评论,并对主要结果进行了讨论。

作者在钢铁研究领域是闻名世界的权威:

- 自 1970 年以来,科学引文索引 (SCI) 收录了约 1200 篇关于马氏体时效钢的研究论文,其中被引用次数最多的 10 篇文章中有 2 篇为作者所著。期刊的影响因子采集于科学引文索引数据库。

- 关于合金钢的论文通常发表于两个期刊,即 *Materials Science and Engineering A* 和 *Surface and Coatings Technology*。作者在前一期刊中发表 15 篇论文,在后一期刊中发表 9 篇论文。自 2007 年,作者作为两个期刊的编委会成员,应邀为 *Materials Science and Engineering A* 的 28 篇稿件和 *Surface and Coatings Technology* 的 54 篇稿件审稿。

大量的新近文献表明,在材料科学与结构工程中,基于计算机的数值模拟是一个快速发展的领域。本书融合了模拟与实验研究,这也是本书的长处和吸引读者的一个特点。

本书作者具有将钢铁研究和模型开发相结合的独特专长。尽管建

模只是本书的一部分，但将填补书籍文献中的建模技术应用于钢材的空白。钢铁研究和模型开发均为当代材料研究的热点话题，本书不仅将这两方面结合，而且记载了该领域的最新研究进展。基于作者在该领域处于世界领先地位，本书主要介绍作者的大量最新研究，同时也介绍了其他研究者的的重要相关研究成果。很多结构工程的建模是为了研究建筑结构用钢的耐火性能，这是结构用钢的两个最重要的性能之一，另一个为腐蚀性能。

本书主要供钢铁研究者（包括研究生、研究人员、讲师以及钢铁专家）的科研使用。而材料领域的专家则能够了解到建模相关内容，并将这一不断发展的重要技术应用于钢铁材料的研发。前面给出的统计数据表明，基于钢铁及其应用领域的研究十分广泛，因此我们希望这本书产生广泛影响。

感谢以下资助：

- 英国工程和物理科学研究委员会资助项目“马氏体时效钢加工过程中显微结构演变的计算机模拟”，授予编号：GR/N08971。
- 英国皇家工程院的全球研究奖励计划。
- 结构工程师研究奖励机构 2011 资助的项目“冷加工钢制龙门架建筑的原尺度消防测试”。
- 英国考文垂 Nullifire 有限公司和英国钢厂（现在的 Tata 钢厂）。
- 英国钢铁结构研究所。
- 中国国家自然科学基金（No. 51001102）。
- 中国国家基础研究计划项目
（Nos. “973” 2010CB630800, 2008CB717802）。
- 中国国家“863” 高端技术基金
（高科技项目 No. 2006AA03Z530）。
- 中国国家高技术计划（No. 2009GB109002）。
- 中国科学院知识创新工程（No. KJCX2-YW-N35）。

- 中国辽宁省 (No. 20081011), 博士研究基金。
- 美国能源部, 材料科学分部, 依据与 Lockheed Martin 能源研究公司的合同 DE-AC05-96OR22464 以及与橡树岭联合大学的合同 DE-AC05-76OR00033 中的 SHaRE 计划。

- 美国橡树岭国家实验室。

并向以下个人致谢:

- 本序言后来所列论文的所有合著者。
- 剑桥大学材料科学与冶金系 Rivera-Díaz-del-Castillo 博士, 感谢与其进行的有益交流。
- William Warke 博士。
- M. K. Miller 博士和 K. F. Russell 女士。
- 新日铁的 Kazutoshi Ichikawa 博士, 感谢其提供的日本耐火钢。
- G. M. Newman 先生和 C. G. Bailey 教授, 感谢与其进行的有益讨论。
- 感谢 P. A. M. Basheer 教授在配料设计、讨论以及供应材料和混凝土实验设施等方面给予的帮助。

Wei sha

准备本书过程中使用的研究论文

(第2章)

1. Kinetics of ferrite to Widmanstätten austenite transformation in a high-strength low-alloy steel revisited. Zhanli Guo, Wei Sha, *Zeitschrift für Metallkunde*, **95**, 2004, 718-723.
2. Modeling the diffusion-controlled growth of needle and plate-shaped precipitates. Z. Guo, W. Sha, *Modeling and Numerical Simulation of Materials Behavior and Evolution*, Materials Research Society (MRS) Symposium Proceedings, vol. 731, Symposium on Modeling and Numerical Simulation of Materials Behavior and Evolution held at the 2002 MRS Spring Meeting (Symposium W), 2-5 April 2002, San Francisco, CA, ed: Antonios Zavaliangos, Veena Tikare, Eugene A. Olefsky, Materials Research Society, Warrendale, PA, paper W 7.5, pp. 215-220.
3. Determination of activation energy of phase transformation and recrystallization using a modified Kissinger method. W. Sha, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **32A**, 2001, 2903-2904.
4. Change of tensile behavior of a high-strength low-alloy steel with tempering temperature. Wei Yan, Lin Zhu, Wei Sha, Yi-yin Shan, Ke Yang, *Materials Science and Engineering A*, **517**, 2009, 369-374.
5. Delamination fracture related to tempering in a high-strength low-alloy steel. Wei Yan, Wei Sha, Lin Zhu, Wei Wang, Yi-yin Shan, Ke Yang, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **41**, 2010, 159-171.

(第3章)

6. Development of structural steels with fire resistant microstructures. W. Sha, F. S. Kelly, P. Browne, S. P. O. Blackmore, A. E. Long, *Materials Science and Technology*, **18**, 2002, 319-325.
7. Atom probe field ion microscopy study of commercial and experimental structural steels with fire resistant microstructures. W. Sha, F. S. Kelly, *Materials Science and Technology*, **20**, 2004, 449-457.
8. Design and characterisation of experimental fire resistant structural steels. W. Sha, F. S. Kelly, S. P. O. Blackmore, K. H. J. Leong, *Proceedings for the 4th International Conference*

on *HSLA Steels* (*HSLA Steels* '2000), 30 October-2 November 2000, Xi'an, China, eds: Guoquan Liu, Fuming Wang, Zubin Wang, Hongtao Zhang, Metallurgical Industry Press, Beijing, pp. 578-583.

9. Mechanical properties of structural steels with fire resistance. Wei Sha, *PRICM4: Fourth Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing*, 11-15 December 2001, Honolulu, Hawaii, vol. II, eds: S. Hanada, Z. Zhong, S. W. Nam, R. N. Wright, The Japan Institute of Metals, Sendai, pp. 2707-2710.
10. High temperature transient tensile properties of fire resistant steels. W. Sha, T. M. Chan, *Advances in Steel Structures*, Proceedings of the Third International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS '02), 9-11 December 2002, Hong Kong, vol. 2, eds: S. L. Chan, J. G. Teng, K. F. Chung, Elsevier Science, Oxford, pp. 1095-1102.

(第4章)

11. Microstructure evolution of a 10Cr heat-resistant steel during high temperature creep. Ping Hu, Wei Yan, Wei Sha, Wei Wang, Yiyin Shan, Ke Yang, *Journal of Materials Science & Technology*, **27**, 2011, 344-351.
12. Study on Laves phase in an advanced heat-resistant steel. Ping Hu, Wei Yan, Wei Sha, Wei Wang, Zhanli Guo, Yiyin Shan, Ke Yang, *Frontiers of Materials Science in China*, **3**, 2009, 434-441.
13. Microstructural evolution and mechanical properties of short-term thermally exposed 9/12Cr heat-resistant steels. Wei Wang, Wei Yan, Wei Sha, Yiyin Shan, Ke Yang, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **43**, 2012, 4113-4122.

(第5章)

14. Microstructure and mechanical properties of a nitride-strengthened reduced activation ferritic/martensitic steel. Qiangguo Zhou, Wenfeng Zhang, Wei Yan, Wei Wang, Wei Sha, Yiyin Shan, Ke Yang, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **43**, 2012, 5079-5087.
15. Nitride-strengthened reduced activation ferritic/martensitic steels. Ping Hu, Wei Yan, Lifeng Deng, Wei Sha, Yiyin Shan, Ke Yang, *Fusion Engineering and Design*, **85**, 2010, 1632-1637.
16. Effect of carbon reduction on the toughness of 9CrWVTaN steels. Wei Yan, Ping Hu, Lifeng Deng, Wei Wang, Wei Sha, Yiyin Shan, Ke Yang, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **43**, 2012, 1921-1933.
17. The impact toughness of a nitride-strengthened martensitic heat resistant steel. Wenfeng Zhang, Wei Yan, Wei Sha, Wei Wang, Qiangguo Zhou, Yiyin Shan, Ke Yang, *Science China Technological Sciences*, **55**, 2012, 1858-1862.

(第6,7章)

18. Phase transformations in maraging steels. W. Sha, H. Leitner, Z. Guo, W. Xu, *Phase transformations in steels*. Volume 2: Diffusionless transformations, high strength steels, modelling and advanced analytical techniques, eds: Elena Pereloma, David V. Edmonds, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 2012, Chapter 11, 332-362.

(第7章)

19. Precipitation, microstructure and mechanical properties of low nickel maraging steel. W. Sha, Q. Li, E. A. Wilson, *Materials Science and Technology*, **27**, 2011, 983-989.
20. Microstructure and mechanical properties of low nickel maraging steel. W. Sha, A. Ye, S. Malinov, E. A. Wilson, *Materials Science and Engineering A*, **536**, 2012, 129-135.

(第8章)

21. In stainless steel reinforcement a viable option? Wei Sha, Roslyn Kee, *Proceedings of Metal 2000: 9th International Metallurgical Conference (CD-R)*, 16-18 May 2000, Ostrava, Tanger Ltd., Ostrava, Czech Republic.
22. Differential scanning calorimetry study of normal portland cement paste with 30% fly ash replacement and of the separate fly ash and ground granulated blast-furnace slag powders. W. Sha, G. B. Pereira, *Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, 22-27 July 2001, Chennai (Madras), India, Supplementary volume, compiled: Maria Venturino, ACI, Detroit, pp. 295-309.
23. Differential scanning calorimetry study of hydrated ground granulated blastfurnace slag. W. Sha, G. B. Pereira, *Cement and Concrete Research*, **31**, 2001, 327-329.

(第9章)

24. Optimization of cold-formed steel portal frame topography using real-coded genetic algorithm. D. T. Phan, J. B. P. Lim, C. S. Y. Ming, T. Tanyimboh, H. Issa, W. Sha, *Procedia Engineering*, **14**, 2011, 724-733.
25. Design optimization of cold-formed steel portal frames taking into account the effect of building topology. Duoc T. Phan, James B. P. Lim, Wei Sha, Calvin Y. M. Siew, Tiku T. Tanyimboh, Honar K. Issa, Fouad A. Mohammad, *Engineering Optimization*, **45**, 2013.
26. An efficient genetic algorithm for the design optimization of cold-formed steel portal frame buildings. Duoc T. Phan, James B. P. Lim, Wei Sha, Tiku T. Tanyimboh, *Proceedings of the 21st International Specialty Conference on Cold-formed Steel Structures*, 24-25 October



2012, St. Louis, MO, eds: Roger A. LaBoube, Wei-Wen Yu, Missouri University of Science and Technology, pp. 473-483.

27. Full-scale fire tests on a cold-formed steel portal frame building. Yixiang Xu, James Lim, Wei Sha, Christine Switzer, Richard Hull, Andrew Taylor, Ross McKinstry. Institution of Structural Engineers Research Award 2011.
28. Large-scale fire tests on a cold-formed steel portal frame building. Yixiang Xu, James Lim, Wei Sha, Christine Switzer, Richard Hull, Andrew Taylor, Ross McKinstry. Institution of Structural Engineers Research Award Application, 2011.

(第 10 章)

29. Fire safety design and recent developments in fire engineering. W. Sha, N. C. Lau, *Structural Engineering, Mechanics and Computation*, Proceedings of the International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, 2-4 April 2001, Cape Town, South Africa, vol. 2, ed: A. Zingoni, Elsevier Science, Oxford, pp. 1071-1078.
30. Heat transfer in fire across a wall in shallow floor structure. Wei Sha, *Journal of Structural Engineering*, **127**, 2001, 89-91.
31. Heat transfer in steel structures and their fire resistance. W. Sha, T. L. Ngu, *Structural Engineering, Mechanics and Computation*, Proceedings of the International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, 2-4 April 2001, Cape Town, South Africa, vol. 2, ed: A. Zingoni, Elsevier Science, Oxford, pp. 1095-1102.
32. Intumescent fire protection coating thickness for shallow floor beams. W. Sha, T. M. Chan, *Advances in Building Technology*, Proceedings of the International Conference on Advances in Building Technology (ABT 2002), 4-6 December 2002, Hong Kong, vol. 2, eds: M. Anson, J. M. Ko, E. S. S. Lam, Elsevier Science, Oxford, pp. 1321-1328.

(第 11 章)

33. Fire resistance of slim floors protected using intumescent coatings. W. Sha, *Proceedings of the Eighth International Conference on Civil and Structural Engineering Computing*, ed: B. H. V. Topping, Civil-Comp Press, Stirling, UK, 2001, Paper 65, pp. 163-164.
34. Fire resistance of protected asymmetric slim floors beams. W. Sha, *Proceedings of the Eighth International Conference on Civil and Structural Engineering Computing*, ed: B. H. V. Topping, Civil-Comp Press, Stirling, UK, 2001, Paper 67, pp. 167-168.

目 录

1 导论	1
1.1 高强低合金钢	1
1.1.1 铁素体向魏德曼 (Widmanstätten) 奥氏体转变动力学	1
1.1.2 拉伸行为随回火温度的变化	2
1.1.3 与回火有关的层状断裂	4
1.2 耐火结构钢	4
1.3 耐热钢	6
1.4 氮化物强化铁素体/马氏体钢	7
1.4.1 低活化铁素体/马氏体钢和降碳的影响	7
1.4.2 冲击韧性	9
1.5 低镍马氏体时效钢	10
1.6 冷成形钢制龙门架	12
1.7 消防工程	14
参考文献	15

第一篇 合金钢的材料科学研究

2 高强低合金钢	25
2.1 扩散控制铁素体向魏德曼奥氏体转变动力学	25
2.1.1 生长理论	25
2.1.2 参数确定和计算	27
2.1.3 小结	31
2.2 用基辛格方法确定再结晶激活能	32
2.3 拉伸行为随回火温度的变化	33
2.3.1 微观组织和拉伸性能	33
2.3.2 上屈服点	36
2.3.3 应变硬化指数	37
2.3.4 小结	38



2.4 回火有关的分层断裂	39
2.4.1 微观组织	39
2.4.2 拉伸和冲击断口表面的分层	40
2.4.3 等轴晶样品的断口形貌和韧性	44
2.4.4 回火钢的裂口尖端金相组织及 XRD	44
2.4.5 分层与各向异性微观组织	46
2.4.6 分层与应力条件以及分层对韧性的影响	47
2.4.7 小结	49
参考文献	49
3 耐热钢	51
3.1 耐火设计	51
3.2 钢的设计要素	52
3.2.1 控制晶粒尺寸	52
3.2.2 置换元素的特性	53
3.2.3 加工、钢的成分和生产	54
3.3 显微组织	55
3.3.1 晶粒结构	55
3.3.2 铁素体-奥氏体相变和析出	56
3.3.3 新日铁耐热钢	58
3.3.4 试验耐热钢	60
3.4 力学性能	63
3.4.1 强度	63
3.4.2 伸长率和断口	64
3.4.3 硬度和蠕变	65
3.4.4 原子探针数据与力学性能变化之间的联系	65
3.4.5 高温瞬时拉伸性能	66
3.4.6 高温瞬时拉伸试验	67
3.5 小结	67
参考文献	69
4 耐热钢	70
4.1 蠕变前的显微组织和蠕变断裂强度	70
4.2 显微组织演变对蠕变断裂强度的影响	71
4.2.1 马氏体板条结构	71
4.2.2 Laves 相	71

4.2.3 应力对显微组织演变的影响	74
4.3 热力学计算	75
4.4 原始显微组织和 Laves 相在蠕变中的长大	76
4.5 Laves 相尺寸对蠕变行为的影响和钴对 Laves 相尺寸的影响	77
4.6 短期热暴露钢的显微组织和力学性能	79
4.7 热暴露对力学性能的影响	80
4.8 热暴露对断裂特征的影响	81
4.9 热暴露对显微组织的影响	83
4.10 显微组织演变对力学性能的影响	86
参考文献	88
5 氮化物强化的铁素体/马氏体钢	90
5.1 显微组织、氮化物析出相、硬度及回火温度的影响	90
5.2 冲击韧性及其与回火和相变的关系	94
5.3 拉伸性能及化学成分和回火温度的影响	97
5.4 夹杂物	102
5.5 原奥氏体晶粒尺寸与正火温度的关系	104
5.6 引发解理断裂的夹杂物	106
5.7 传统的氮化物强化耐热钢	109
5.7.1 显微组织及氮化物析出相	109
5.7.2 力学性能、韧-脆转变温度及断口形貌	111
5.7.3 氮化物析出相对屈服强度的影响	113
5.7.4 DBTT 与回火温度的关系	113
参考文献	114
6 超高强马氏体时效钢	118
6.1 最先进的超高强钢	118
6.2 马氏体时效钢的种类	120
6.3 马氏体时效钢中的显微组织和析出相	123
6.3.1 PH13-8Mo 马氏体时效钢	123
6.3.2 析出相	124
6.4 逆转变奥氏体和力学性能	125
6.4.1 逆转变奥氏体	125
6.4.2 力学性能	128
6.5 析出相的演变和全过程	129
6.5.1 粒子间距的计算	129