

钢铁技术发展趋势丛书

铁素体系耐热钢

——向世界前沿不懈攀登的
研究与开发

〔日〕太田定雄 著

张善元 张绍林 译

钢铁技术发展趋势丛书

钢铁技术发展趋势丛书

铁素体系耐热钢

——向世界前沿不懈攀登的研究与开发

〔日〕太田定雄 著
张善元 张绍林 译

北 京
冶金工业出版社

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2002-6744 号

Ferritic Heat-Resisting Steels

Unrelaxing Research and Development

for the World Highest Performance

© 1998 SADA OHTA

图书在版编目(CIP)数据

铁素体系耐热钢:向世界前沿不懈攀登的研究与开发/

[日]太田定雄著;张善元等译. —北京:冶金工业出版社,2003.8

(钢铁技术发展趋势丛书)

ISBN 7-5024-3296-5

I. 铁... II. ①太... ②张... III. 铁素体钢:耐热钢

IV. TG142.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 053436 号

出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 王雪涛 美术编辑 王耀忠 责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

北京鑫正大印刷有限公司印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2003 年 8 月第 1 版,2003 年 8 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 10 印张; 264 千字; 297 页; 1—3 000 册

30.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

出版说明

20 世纪 90 年代末,日本钢铁学会组织日本国内钢铁界的专家学者,编写了《钢铁技术发展趋势丛书》。该丛书从不同专业,不同角度,对钢铁技术,尤其是对日本钢铁技术的发展历程进行了系统的回顾和总结,并对钢铁技术的现状及未来发展趋势进行了评价和预测。

日本是钢铁技术最先进的国家之一。虽然日本的国情及钢铁技术发展背景与我国不同,但其钢铁技术发展历程及经验教训对我国的钢铁工业会有一定的启迪价值。

冶金工业出版社在中国金属学会理事长翁宇庆同志及副理事长仲增墉同志的关心和支持下,准备陆续将此套丛书介绍给我国读者,并希望此套丛书(中文版)的出版,能对我国钢铁技术的发展有所裨益。

《钢铁技术发展趋势丛书》发刊词

我国的钢铁技术现在处于世界领先地位,这是先辈们长期不懈的努力所赐,令我们感到骄傲,同时也感到肩负着莫大的责任。为了构筑钢铁技术的工学体系,为了该领域新的研究和开发,我们作为当今的技术工作者,要承担起对技术中潜在的大量信息进行取舍和选择的基础性建设工作。

日本钢铁学会过去曾多次出版过反映我国钢铁技术状况的便览和技术资料。学术性刊物《铁和钢》也发表过许多研究成果,记述了不断进步的技术和我们在技术方面的成长过程。但是现在有种钢铁技术已经达到饱和点的感觉,弥漫着停滞的气氛。为了打破这种局面,以新的想像去发展钢铁技术,就要回顾一下我们曾经倾注了心血和努力所培养、积累的技术和研究经验,从中获取新的启示。有鉴于此,必须以先辈们积累的珍贵知识财富为背景来建立工学体系。

遗憾的是,我国的工程技术人员在这方面并不擅长。因此,我在副会长任上的 1991 年 12 月,曾向日本钢铁学会培训委员会提出出版具有以下特点的学术丛书,作为朝此方向迈进的第一步:

(1) 作为展望技术发展历史的平台。其内容包括:技术是在怎样的背景下发生的,怎样展开的,又是怎样形成的。要从长远发展的目光来评述。

(2) 组建“知识产权分会”,以该会的权威性来挑选执笔人。执笔人可按自己的意见对题材进行取舍、选择和评价,组织人员,确定内容等。

(3) 基本内容应是《铁和钢》(或以此为基准的资料)所记载的具有历史价值的综述论文,并用现在的观点加以评价。

(4) 经过数年形成一个系列之后,将它作为钢铁科学技术的路标,初级的知识财产。

幸运的是,此项工作得到了培训委员会和理事会的理解与支持,作为纪念日本钢铁学会成立 80 周年的规划,《钢铁技术发展趋势丛书》第 1 系列共 10 卷出版发行了。我们期待这一规划能在技术成就的背景下,为今后钢铁工学的研究及技术构成,提供积极发言的基础。

最后,对出版本丛书给予充分理解并鼎力支持的地人书馆表示衷心感谢。

(社团法人)日本钢铁学会 培训委员会 知识产权分会
委员长 增子 昇
1995 年 1 月

前 言

自古以来,就有“自从得到火之时起,人类与其他动物就追寻着不同道路”的说法。另外,也常听到“第二火”,“第三火”的说法,这些说法对我们的文明来说,火即高温,象征着火比任何东西都重要。

一般地说,越是高温就意味着热效率越高,反应速度加快,同时,在高温下出现了低温下没有的物质。因此,在我们的日常生活有着重要作用的能源、动力、原材料制造的领域里,常常追求操作温度的高温化。在火力发电、原子能、宇航、化学工业等新技术的开发领域中,耐热材料性能的高低是其成败的关键环节。特别是,近年来能源及环境问题的日益突出,为解决这些问题,采用了各种各样的工艺手段,改善热效率提高温度势在必行,因此,耐热材料的重要性日益提高。所以,各国都在进行新材料的开发。

日本的耐热材料技术,在军工方面,第二次世界大战以前已达到了世界水平,但在产业领域尚有差距。20世纪50年代,日本从欧美引进了全新的耐热材料体系。在欧美与军事有很大关系的超合金领域,日本则没有很大的发展。但在对产业具有重要意义的耐热钢领域中,自20世纪50年代后半期,对引进的材料制造、性质、使用时的行为等进行了广泛的、详细的研究,其结果是,自20世纪60年代末,日本的耐热钢在质量、性能方面超过欧美国家的材料,日本成为耐热钢的世界输出国。到了20世纪70年代,根据基础研究成果,日本自主开发的耐热钢新材料得到了快速的发展。后来,在石油危机后的20世纪80年代,为了对日益严重的能源和环境问题采取对策,在火力发电、原子能、化学工业等领域里,新工艺的开发被广泛推广。因此,在该领域里,日本的耐热钢研究开发处于世界领先地位。

耐热材料在高温下显示出复杂的行为,例如蠕变、持久性能等问题,这就要求研究工作者在具有很好的设想的同时,还要具有坚强的意志和不断努力进取的精神。

另外,在耐热钢的应用领域中,应特别重视其可靠性和安全性,因此,新材料的采用是十分慎重的。由于新材料的研究、开发、推广应用的费用高,且时间周期长,所以,相关企业和相关组织的配合十分重要。

本人进入公司以来,一直在进行耐热钢的研究与开发,因此,时刻把很好地合作记在心上。回顾日本第二次世界大战后50年间耐热钢的研究和开发的变迁过程,并且与同时期欧美国家的情况相比较,日本的耐热钢得到世界范围发展的主要原因有以下几点:

(1) 从第二次世界大战前开始,相应于军事方面的严格要求,就制造技术而言早有储备。

(2) 第二次世界大战后,对于与军事有密切关系的超合金,并未投入力量,而是着重于在产业领域里有重要作用的耐热钢上。

(3) 材料制造厂家不仅在制造技术上,而且在材料的性能上进行了基础研究,在此基础上,对新材料的开发,投入了很大的力量。

(4) 用户引导开发的方向,积极采用开发成果。

(5) 大学、国立和公立研究所进行了多种基础研究。

(6) 即使是在基础研究中,在短时间内也要进行总结,将材料的变形、破坏行为模型化、数字化,这还不够,还要对经过长时间的组织变化和变形、破坏的微观机理等详细探讨,同时,还要把合金元素和热处理等对其影响进行广泛的研讨,以达到控制变形的目的。

(7) 国家认定其重要性,推动了开发。

特别是日本从 20 世纪 90 年代起,对于已达到世界先进水平的远大于临界压发电用铁素体系耐热钢来说,在作为产业基础能源的领域内,一直潜心于 12Cr 系耐热钢的研究开发工作者的存在和机器制造厂家所做的贡献,使日本对开发的新材料的实用化和国际化的推广,起到了很大作用。

根据丛书发刊词所说的宗旨,在汇编本书时,对在各领域中的耐热钢的研究、开发以及如何把日本的耐热钢推向世界顶峰的,我们在编写这些内容时尽可能的做到通俗易懂。

另外,本书是以日本的发展和受世人关注的铁素体

8 前 言

系耐热钢为中心加以叙述的。书中关于奥氏体系耐热钢的介绍,对于更好地了解各领域耐热钢的技术发展是有帮助的。

耐热材料在日本也取得了很好的成果,只因本书篇幅所限,未被收录而已。

本书若能为世人了解日本耐热钢技术的发展过程并能使其进一步的发展,即使起到一点点的作用,本人亦感到欣慰。

最后,对给予我执笔本书机会,并始终给予批评指导的东京大学名誉教授增子 昇先生、日本钢铁学会有关的各位及给予亲切关照的地人书馆的各位负责人表示衷心的感谢。

太田定雄

1997 年 12 月

译者的话

本书在编辑过程中，参考了国内外有关文献，力求做到准确、完整、清晰、简洁。如有不妥之处，敬请读者指正。

《铁素体系耐热钢》一书是由日本钢铁学会组织编写的《钢铁技术发展趋势丛书》系列之一。

从第二次世界大战前及二次世界大战中直至 20 世纪末，日本一直不间断地进行与军事和国民经济相关的各种耐热钢的研究与开发，取得了举世瞩目的科技成果。本书就是那一历史时期科研和实践经验的总结。不同类型的耐热钢的问世，都大大地促进了日本在不同历史时期的发电业、石油工业、化学化工业、航空业、宇航业、原子能工业、汽车工业、能源及环境保护等产业领域的发展，成为世界名列前茅的工业强国，为 21 世纪继续攀登技术高峰奠定了更加坚实的基础。

从技术的角度看，具有代表性的技术水平，可参看资料 1、资料 2。

从材料和研究的角度看，是以 9-12Cr 钢为重点，详细探讨了其组织变化及强

化机理。

从数据的采集和应用上看,主要是对长时间蠕变特性的评价和高温蠕变研究数据的应用。

从有效地组织人力、物力、财力上看,是采取国家、地方、大学、制造商等联合的方式进行,同时加强国际间的技术交流和国际标准的建立。

我国钢铁业自改革开放以来,在铁素体系耐热钢的研究与开发上,有了突飞猛进的发展,但尚需加强连续性和数据的综合性分析。希望本译文能对从事这方面的研究单位、科技人员、在校大学生等起到一些帮助的作用。

由于本人专业水平和日语水平有限,不妥之处在所难免,企望读者批评指正。

张善元 张绍林
2002年4月

.....

1	耐热钢、耐热材料的历史	1
1.1	不锈钢、低合金耐热钢的问世	1
1.2	飞机及超合金的发展	2
1.3	宇宙开发及新材料的问世	2
1.4	产业用耐热钢的拓展	3
	参考文献	4
2	日本耐热钢研究开发的变迁	5
2.1	第二次世界大战前及大战中的 耐热钢	5
2.1.1	锅炉、蒸汽轮机材料	5
2.1.2	化学工业装置用材料	6
2.1.3	飞机、汽车发动机用材料	7
2.1.4	燃气轮机用材料	7
2.1.5	基础研究	8
2.2	第二次世界大战后耐热钢的发展	9
2.2.1	耐热钢生产变迁	9
2.2.2	研究开发的变迁	11
	参考文献	15
3	TAF 钢的开发	17
3.1	日本燃气轮机材料的开发	17

12 目 录

3.2 燃气轮机叶轮、涡轮盘用材料	18
3.3 TAF 钢的开发	19
参考文献	22
4 火力发电用材料的发展	24
4.1 第二次世界大战后火力发电的发展	24
4.2 锅炉钢管材料的开发	25
4.2.1 第二次世界大战前及大战中的锅炉钢管	25
4.2.2 第二次世界大战后引进的材料和制造条件 的确立	26
4.2.3 锅炉钢管材料的基础研究	27
4.2.4 日本独立开发的新材料	45
参考文献	50
4.3 涡轮材料的开发	55
4.3.1 转子材料	55
4.3.2 套管材料	66
4.3.3 叶片材料,螺栓材料	67
4.4 火力发电用耐热材料等的长时间蠕变数据的整备	68
4.4.1 第二次世界大战后蠕变试验的状况	69
4.4.2 试验机、试验方法的标准化	70
4.4.3 蠕变数据的收集	71
4.4.4 金属材料技术研究所的蠕变数据图表	72
4.4.5 关于外推法的探讨	76
4.5 腐蚀、疲劳、时效变化及剩余寿命推断的研究	79
参考文献	80
5 化学工业的发展和压力容器材料的开发	86
5.1 合成氨筒材料	87
5.2 石油精炼用压力容器材料	87

5.2.1 压力容器材料的引进和制造技术的确立·····	87
5.2.2 关于 0.5Mo 钢、(1-1.25)Cr-0.5Mo 钢蠕变 延展性降低的研究·····	89
5.2.3 关于氢侵蚀的研究·····	91
5.3 煤液化用新材料的开发·····	94
5.4 石油精炼用大型氢化反应器新材料·····	96
参考文献·····	98
6 高速增殖堆用铁素体系耐热钢的开发·····	100
6.1 日本高速增殖堆的开发·····	100
6.2 燃料包覆管用材料的开发·····	101
6.2.1 18-8Mo 系钢·····	101
6.2.2 15Cr-20Ni 系奥氏体钢·····	103
6.2.3 弥散强化型铁素体钢·····	104
6.2.4 外套管用铁素体钢·····	106
6.3 高温结构材料的开发·····	107
6.4 蒸气发生器材料的开发·····	107
参考文献·····	109
7 核聚变反应堆用铁素体系耐热钢的开发·····	113
7.1 核聚变反应堆的开发·····	113
7.2 日本核聚变反应堆材料的开发计划·····	114
7.3 奥氏体系材料·····	115
7.4 关于高强度 9-12Cr 系钢的时效脆化的研究·····	116
7.5 低放射性材料的开发·····	117
参考文献·····	119
8 汽车排气系统用铁素体系耐热钢的发展·····	122
8.1 环境问题和排气系统的材料·····	122
8.2 热交换器材料的开发·····	124

14 目 录

8.3 催化转换器,催化载体用材料的开发·····	127
8.4 排气歧管材料的开发 ·····	130
8.5 蛇形管、前管及消音器材料·····	132
8.6 汽车排气系统用铁素体耐热钢的发展 ·····	133
参考文献·····	134
9 联合发电的发展和燃气涡轮用材料及蒸气涡轮用 高低压一体化转子材料的开发 ·····	137
9.1 联合发电的发展和燃气涡轮材料的开发计划 ·····	137
9.2 日本喷气发动机的状况和材料开发计划 ·····	139
9.3 日本燃气涡轮、喷气发动机材料的开发·····	140
9.3.1 合金设计方法及新型合金的开发 ·····	140
9.3.2 燃气涡轮机动态叶片的开发,实用化·····	143
9.3.3 单向凝固及单晶合金,弥散强化合金·····	144
9.3.4 超合金锻造涡轮盘及超塑性粉末冶金合 金涡轮盘 ·····	145
9.4 低合金钢及 12Cr 系钢涡轮盘材料的开发·····	146
9.5 蒸气涡轮用高低压一体型转子的开发 ·····	146
参考文献·····	149
10 超高临界压发电用铁素体系耐热钢的开发·····	153
10.1 能源及环境问题·····	154
10.2 超高临界压发电用材料的开发计划·····	155
10.2.1 日本 12Cr 系铁素体钢的研究开发的进展 ·····	155
10.2.2 日本超高临界压发电材料的开发计划·····	157
10.3 关于合金元素对 9-12Cr 系钢高温强度影响的 基础研究·····	157
10.3.1 钼的影响·····	157
10.3.2 钒的影响·····	158

10.3.3 铌的影响·····	159
10.3.4 V-Nb 复合添加的影响 ·····	160
10.3.5 钨的影响·····	162
10.3.6 铜的影响·····	166
10.3.7 碳的影响·····	166
10.3.8 氮的影响·····	167
10.3.9 C-N 复合添加的影响·····	169
10.3.10 硼的影响 ·····	170
10.3.11 钴的影响 ·····	171
10.3.12 铬的影响 ·····	172
10.3.13 Ni、Mn 的影响 ·····	174
10.3.14 硅的影响 ·····	176
10.3.15 铈的影响 ·····	176
10.4 9-12Cr 系钢新材料的开发 ·····	177
10.4.1 锅炉用材料·····	177
10.4.2 涡轮转子用材料·····	182
10.4.3 套管用材料·····	187
10.4.4 叶片用材料·····	188
10.4.5 电渣重熔法在涡轮转子上的应用·····	189
参考文献·····	190
10.5 9-12Cr 系钢的组织变化和强化机理说明 ·····	197
10.5.1 热处理组织·····	198
10.5.2 9-12Cr 系钢的组织变化和蠕变行为的关系 ···	198
10.5.3 合金元素强化机理的说明·····	208
10.5.4 铁素体系耐热钢的基础蠕变强度·····	224
10.6 奥氏体系钢新材料的开发·····	226
10.6.1 锅炉用奥氏体系钢·····	226
10.6.2 奥氏体系涡轮机转子材料的探讨·····	227
10.7 日本的 9-12Cr 系钢新材料的国际交流 ·····	227