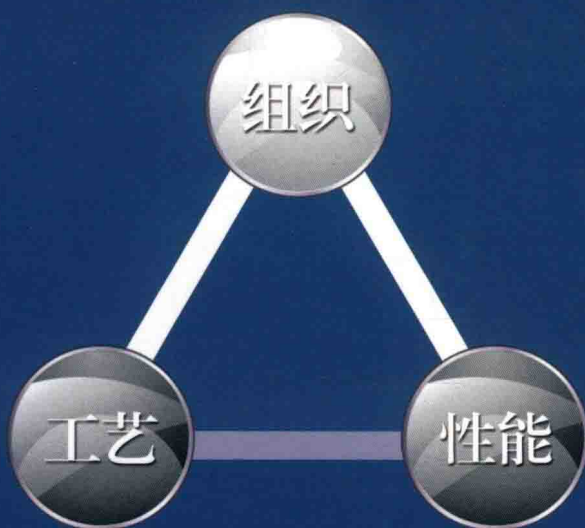


Physical Metallurgy of Steel

钢的物理冶金

思考、方法和实践

霍向东 李烈军 著



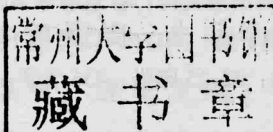
冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

Physical Metallurgy of Steel

钢的物理冶金

思考、方法和实践

霍向东 李烈军 著



北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2017

内 容 提 要

物理冶金学是广义冶金学的重要分支学科,研究的主要内容是化学冶金的产品经再加工和热处理产生的金属及合金的组织、结构的变化,以及由此而造成的金属材料的力学性能、物理性能、化学性能、工艺性能的变化。

本书从对物理冶金学的思考、物理冶金学的研究方法和先进钢铁材料研发实践三个方面,分9章介绍了钢的物理冶金理论进展与工业应用。

本书可供钢铁材料生产和研发领域的科研、生产及教学人员阅读,也可作为材料工程和冶金工程专业讲解物理冶金知识和科研方法的本科生或研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

钢的物理冶金:思考、方法和实践/霍向东,李烈军著. —
北京:冶金工业出版社,2017.12

ISBN 978-7-5024-7717-2

I. ①钢… II. ①霍… ②李… III. ①钢—金属材料—
物理冶金—研究 IV. ①TG14

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第312385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.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 刘小峰 曾 媛 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7717-2

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2017年12月第1版,2017年12月第1次印刷

169mm×239mm;22.25印张;436千字;346页

78.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.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 yjgychs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

我先后在北京科技大学金属物理专业、材料工程专业、材料物理与化学专业获得学士、硕士和博士学位，在上海大学冶金工程学科和华南理工大学材料科学与工程学科从事博士后研究工作，并且在大型钢铁企业有十多年的工作经历。2006年起，我在江苏大学冶金工程系承担“材料加工技术”课程的教学任务，根据专业特点，实际讲授的主要内容是塑性加工及物理冶金理论。

几十年钢铁生产、教学和科研的经历，逐渐丰富、加深了我对物理冶金学的认识和理解。金属物理的专业背景和多年的工程经历，使我更多地思考理论在实践中的应用，以及工艺、组织和性能之间的关系。物理冶金学是现代材料科学赖以蓬勃发展的根源 (R. W. Cahn, *From Physical Metallurgy*)。钢铁生产中的物理冶金学问题就是工艺、组织和性能之间的关系问题；对组织的深入研究揭示了各种表象背后的机理，并推动着工艺技术的进步和先进材料的发展。

在长期的教学过程中，我尝试把实践经验、科研成果和经典理论相结合，把物理冶金学的知识灵活、生动地呈现给学生。在承担科研项目和撰写论文的过程中，逐渐发现、归纳、解决了许多钢铁生产中的物理冶金学问题，某些成果也在丰富和验证着物理冶金学的理论。一直想对这些工作做一个总结，从冶金发展的历史角度、从钢铁生产的整个工艺流程、从理论与实践、从宏观到微观去介绍钢的物理冶金，于是形成了这本书稿。

本书内容主要包括对于物理冶金学的思考、物理冶金学的研

究方法和先进钢铁材料的研发实践三部分内容。思考、方法和实践，相互交叉，贯穿始终。第1章、第2章侧重于思考，总结和归纳了物理冶金学的发展过程、应用和进展，围绕钢铁生产阐述物理冶金学。第3章、第4章侧重于方法，简明扼要地阐述钢铁材料的微观分析方法以及热模拟方法在物理冶金学研究中的应用。第5~9章侧重于实践，包括先进钢铁流程、先进钢铁材料、先进生产工艺的产品研发实例，体现了物理冶金理论和材料研发的关系，也是前面深入思考和研究方法在科研工作中的运用。其中，第6章（部分）、第8章、第9章的研究成果是和李烈军合作完成的，第4章由李烈军和我指导研究生夏季年、何康撰写。此外，要感谢彭政务博士、吕盛夏硕士、郭林硕士、董峰硕士、田振卓硕士、陈松军硕士、陈优硕士、刘江硕士、侯亮硕士等，他们的工作都在书中都有所体现。

我的老师、朋友、同事、学生大都在钢铁行业，这本书体现了他们的教诲、鼓励、协作和帮助，在此表示深深的感谢。特别要感谢毛新平院士多年的指导和帮助。感谢我的博士生导师柳得橹教授，她教给我钢铁材料的微观分析方法。感谢我的硕士导师王连忠教授，使我对控轧控冷工艺有了深入的理解。感谢已故的柯俊院士在北京科技大学（原北京钢铁学院）创立了中国首个金属物理专业，从那里我开始了物理冶金的学习。在本书的写作过程中，参考了1984年版由柯俊院士主持翻译的《物理金属学》（R. W. Cahn 主编），柯先生在译序中对“物理冶金学”的来龙去脉做了详细地解释。

物理冶金学博大精深，本人才疏学浅，加之时间仓促，书中不妥之处，恳请专家、学者不吝赐教，也希望读者予以批评指正。

霍向东

2017年10月

目 录

1 物理冶金学概述	1
1.1 物理冶金学的概念和研究范畴	1
1.2 物理冶金学的发展史	3
1.2.1 人类冶金的历史	3
1.2.2 20 世纪以前的物理冶金学	5
1.2.3 20 世纪的物理冶金学	6
1.3 物理冶金学的应用和进展	8
1.3.1 TMCP 技术	8
1.3.2 微合金化技术	10
1.3.3 薄板坯连铸连轧技术	11
1.3.4 低碳贝氏体钢的生产技术	11
1.3.5 氧化物冶金技术	13
参考文献	14
2 钢铁生产中的物理冶金问题	17
2.1 力学性能	17
2.1.1 位错	17
2.1.2 钢的强化	21
2.1.3 钢材的韧性	27
2.1.4 强化机理定量分析实例	33
2.2 再结晶	41
2.2.1 塑性加工	41
2.2.2 回复和再结晶机理	45
2.2.3 热轧过程中的组织变化	47
2.2.4 冷轧退火工艺的再结晶行为	54
2.3 相变	62
2.3.1 Fe-C 相图	62
2.3.2 过冷奥氏体转变曲线	65
2.3.3 过冷奥氏体的相变组织	70

2.3.4 控制冷却和相变的关系	75
2.4 析出物	79
2.4.1 析出过程的热力学	79
2.4.2 析出物在钢中的作用	83
2.4.3 微合金碳氮化物	87
2.4.4 低碳钢中的硫化物	91
2.4.5 析出动力学研究方法	94
2.4.6 物理化学相分析介绍	96
参考文献	99
3 钢铁材料的微观分析方法	106
3.1 光学显微镜	106
3.2 X射线衍射方法	107
3.2.1 X射线的性质	107
3.2.2 晶体学知识	108
3.2.3 布拉格公式和倒易点阵	109
3.2.4 X射线衍射的应用	111
3.3 透射电子显微镜	111
3.3.1 电子显微镜的诞生和发展	111
3.3.2 透射电镜的构造	113
3.3.3 选区衍射	113
3.3.4 衍衬像	116
3.3.5 微分析	118
3.3.6 高分辨率电子显微像	119
3.3.7 样品的制备	119
3.3.8 析出物相定性和衍射谱标定实例	121
3.4 扫描电子显微镜	123
3.4.1 扫描电镜的特点	123
3.4.2 扫描电镜的结构和工作原理	125
3.4.3 扫描电镜的电子成像	127
3.4.4 X射线能谱仪	129
3.4.5 背散射电子衍射	129
3.4.6 热煨弯管的外弧裂纹分析	131
3.5 CSP生产低碳钢中的硫化物分析实例	134
3.5.1 实验材料和方法	134

3.5.2 钢中硫化物的微观分析	135
3.5.3 钢中硫化物析出的热力学分析	141
3.5.4 纳米级硫化物的析出动力学分析	144
3.5.5 低碳钢中形成纳米级硫化物的条件	147
参考文献	148
4 物理冶金的热模拟研究方法	150
4.1 热模拟机简介	150
4.2 热模拟机工作原理	151
4.2.1 加热系统	151
4.2.2 机械系统	153
4.2.3 计算机控制系统	154
4.3 Gleeble-3800 热模拟机的操作规范	154
4.3.1 编程页面简介	154
4.3.2 控制面板简介	156
4.3.3 操作步骤	158
4.4 Gleeble-3800 热模拟机的应用范围	164
4.5 Gleeble-3800 热模拟机在物理冶金学研究中的应用	164
4.5.1 奥氏体再结晶的热模拟研究	165
4.5.2 相变的热模拟研究	176
4.5.3 第二相析出的热模拟研究	189
参考文献	196
5 薄板坯连铸连轧低碳钢的组织演变	197
5.1 项目背景	197
5.1.1 薄板坯连铸连轧简介	197
5.1.2 物理冶金学特点	198
5.1.3 项目意义	203
5.2 CSP 生产低碳钢连轧过程中的再结晶研究	203
5.2.1 低碳钢 ZJ330 在不同道次变形后的室温组织	203
5.2.2 CSP 连轧阶段奥氏体的变形与再结晶行为	209
5.3 CSP 生产低碳钢的奥氏体相变规律研究	215
5.3.1 低碳钢 ZJ330 的动态 CCT 曲线	215
5.3.2 层流冷却工艺对低碳钢 ZJ330 成品组织和力学性能的影响	217
5.3.3 CSP 生产低碳钢 ZJ330 的控制轧制的特点	223

5.3.4 CSP 生产低碳钢的奥氏体相变规律	225
5.4 CSP 生产低碳钢的晶粒细化	225
5.4.1 CSP 生产低碳钢成品板的组织和性能分析	225
5.4.2 CSP 生产低碳钢晶粒细化的不利因素	229
5.4.3 CSP 工艺生产低碳钢晶粒细化的机制	230
5.5 薄板坯连铸连轧低碳钢的组织演变研究规律	232
参考文献	233
6 钛微合金钢的 TMCP 工艺研究	237
6.1 项目背景	237
6.2 研究基础	239
6.2.1 珠钢 CSP 生产线的产品研发	239
6.2.2 纳米碳化物的沉淀强化效果	241
6.2.3 卷取温度对高强钢组织和性能的影响	244
6.3 TMCP 工艺对钛微合金钢组织和性能的影响	248
6.3.1 板带材生产工艺	248
6.3.2 实验设计思路	249
6.3.3 力学性能实验结果	251
6.3.4 显微组织分析	251
6.3.5 析出物分析	253
6.3.6 晶粒细化和析出物对性能的影响	254
6.4 钛微合金钢再结晶、相变和析出规律的热模拟研究	255
6.4.1 再结晶规律的研究	255
6.4.2 相变规律	259
6.4.3 等温过程的析出规律研究	260
6.5 钛微合金钢中纳米析出物控制总结	263
参考文献	263
7 低碳贝氏体钢的关键技术研究	266
7.1 研究背景	266
7.1.1 低碳贝氏体钢的发展历史	266
7.1.2 低碳贝氏体钢的应用基础研究	268
7.1.3 国内低碳贝氏体钢的研发现状	270
7.1.4 立项依据 (2008 年)	272
7.2 低碳贝氏体钢的研发思路	273

7.2.1 化学成分和组织设计思路	273
7.2.2 实验室热模拟和轧制思路	275
7.3 实验钢的熔炼	277
7.4 实验室热模拟	278
7.4.1 实验材料和方法	278
7.4.2 相变温度的确定及连续冷却转变规律	279
7.4.3 钼和铬在实验钢中的作用	283
7.5 实验室轧制	284
7.5.1 实验材料和方法	284
7.5.2 实验钢的力学性能	286
7.5.3 实验钢的室温组织	288
7.6 低碳贝氏体钢研发总结	291
参考文献	291
8 管线钢焊接热影响区组织和性能研究	294
8.1 研究背景	294
8.1.1 管线钢和管线钢管的现状与发展趋势	294
8.1.2 管线钢的化学成分和生产工艺	298
8.1.3 管线钢焊接热影响区的组织、性能及研究方法	301
8.1.4 项目来源和意义	304
8.2 管线钢焊接热影响区的组织和性能	304
8.2.1 X80 管线钢的成分、性能和焊接工艺	304
8.2.2 X80 管线钢焊缝处的组织特征	306
8.2.3 X80 管线钢焊接热影响区 (HAZ) 的组织变化	309
8.2.4 焊接接头的力学性能	310
8.3 X80 管线钢的峰值温度对组织和析出物的影响	311
8.3.1 实验材料和方法	311
8.3.2 峰值温度对 X80 管线钢晶粒尺寸的影响	312
8.3.3 微观组织和析出物的透射电镜分析	313
8.4 X80 管线钢焊接热影响区的热模拟实验研究	315
8.4.1 实验材料和方法	315
8.4.2 不同冷速下管线钢试样的室温组织	316
8.4.3 不同冷速下热模拟试样的冲击韧性	318
8.4.4 不同冷速下热模拟试样的冲击断口分析	318
8.5 管线钢焊接热影响区组织和性能研究总结	321

参考文献	322
------------	-----

9 轴承钢的相变与网状碳化物的控制研究	325
---------------------------	-----

9.1 研究背景	325
----------------	-----

9.1.1 轴承钢的发展	325
--------------------	-----

9.1.2 项目来源和意义	329
---------------------	-----

9.2 GCr15 轴承钢的相变规律研究	331
----------------------------	-----

9.2.1 实验材料和方法	331
---------------------	-----

9.2.2 静态 CCT 曲线和相变组织	332
----------------------------	-----

9.2.3 动态 CCT 曲线和相变组织	335
----------------------------	-----

9.2.4 GCr15 轴承钢的相变规律	337
----------------------------	-----

9.3 轴承钢 GCr15 中网状碳化物的控制研究	338
---------------------------------	-----

9.3.1 实验设计思路	338
--------------------	-----

9.3.2 实验内容与方法	339
---------------------	-----

9.3.3 网状碳化物的形成	340
----------------------	-----

9.3.4 网状碳化物析出的抑制	343
------------------------	-----

9.4 轴承钢相变规律与网状碳化物控制总结	344
-----------------------------	-----

参考文献	345
------------	-----

1 物理冶金学概述

1.1 物理冶金学的概念和研究范畴

物理冶金学与金属学相对应，是广义冶金学的重要分支学科。

英文 Metallurgy 一词系指有关金属的工艺技术和科学，包括冶炼、提纯、合金化、成型、处理以及结构、组分和性能。因此 Chemical Metallurgy 系指这门科学中有关从矿石中提取金属及提纯部分，而 Physical Metallurgy 则以研究金属组织结构性能为主。德文和俄文中分别有不同的词对应着 Chemical Metallurgy 和 Physical Metallurgy，过去分别称为冶金学和金属学。我国在 1978 年制定科学规划时曾经有关业务部门研究，把冶金学、金属学这两个名词按照我国过去习惯和德文、俄文的用法分别用于相应于 Chemical Metallurgy 和 Physical Metallurgy 的内容，并写入了全国科学规划纲要^[1]。

因此，英文 Physical Metallurgy 可以翻译成“物理冶金学”，也可以翻译为“金属学”，我国一般称为“金属学”。由于钢铁生产铸坯凝固前后是截然不同而又相互联系的两个过程，而“金属学”的叫法较宽泛且无法体现钢铁生产的过程，因此许多从事钢铁组织和性能研究的科技工作者，更愿意使用“物理冶金学”这种叫法，关于“物理冶金”的科研论文更是屡见不鲜。

冶金学是一门研究如何经济地从矿石或其他原料中提取金属或金属化合物，并用一定加工方法制成具有一定性能的金属材料的科学。它包含化学冶金（又称提取冶金）、物理冶金和机械冶金（又称力学冶金）三个分支学科。图 1-1 中给出了冶金学中分支学科的相互关系，三者互相衔接、紧密联系，形成了一个闭路循环。

化学冶金学是通过化学中氧化还原等各种方法将金属由化合态转换为游离态的方法，是化学原理在金属的提取和精炼、金属的熔化与再生回收以及金属腐蚀等方面的应用。冶金反应中涉及的基本化学原理，包括键合和周期性、冶金热力学、反应动力学、液态金属溶液、金属水溶液和电化学等。

物理冶金学研究的主要内容是化学冶金的产品经再加工和热处理产生的金属及合金的组织、结构的变化，以及由此而造成的金属材料的力学性能、物理性能、化学性能、工艺性能的变化。物理冶金学的基础理论是金相学、相变理论、位错理论、晶体热力学、氧化热力学、氧化动力学等。

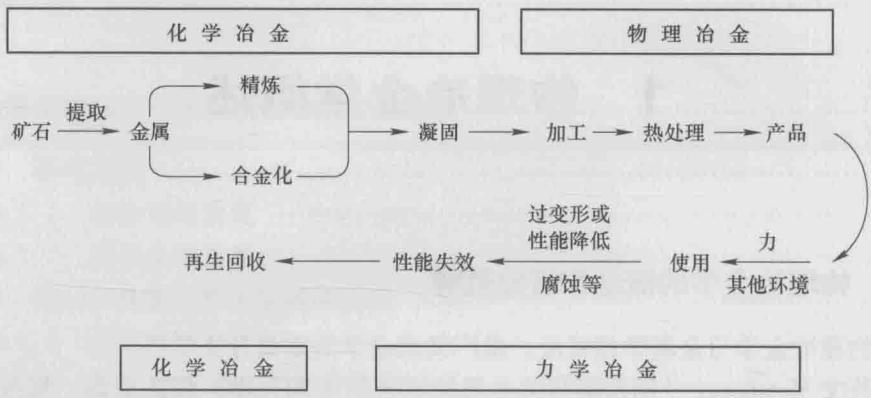


图 1-1 冶金学中三个分支学科之间的关系

力学冶金学是研究在力的作用下，或者在力和其他环境条件的综合作用下，金属的行为和性态及其变化规律，以及与冶金因素之间的关系。力学冶金学研究的主要内容包括宏观强度理论、微观强度理论和断裂力学理论等。

目前，冶金工程专业的课程设置以化学冶金学为主，包括钢铁冶金、冶金物理化学、冶金传输原理、有色金属冶金等课程。尽管也开设金属学、材料加工技术等课程，但内容较为宽泛，针对性不强，学生对钢材加工和热处理过程中组织、结构和性能的变化不甚了解，无法对钢铁生产建立起系统、全面的认识。冶金工程专业应适当增加、补充和生产密切相关的物理冶金学的教学内容，钢铁企业从事新产品开发的工程师也需要具备化学冶金学和物理冶金学的综合知识。

首先，物理冶金学和化学冶金学是冶金工程学科不可分割的组成部分。钢铁生产是从铁矿石中提取铁并加工成钢材的过程，包括炼铁（焦化、烧结）、炼钢、精炼、连铸、轧钢、热处理等工艺环节。钢铁生产的集成技术已经打破了冶金、轧钢和热处理的明确分工，尤其是薄板坯连铸连轧技术的兴起更是将炼钢、连铸、轧钢等工艺环节有效地联系在一起。为了得到性能合格的钢材，需要控制钢材的化学成分和组织结构，化学冶金学解决了化学成分控制的问题，在钢铁生产中由连铸之前的工艺环节完成，最终的组织状态则通过后续的成型加工和热处理实现。可见，钢铁生产需要化学冶金学和物理冶金学的综合知识，只有把两者结合才能解释并解决钢铁生产中出现的问题。

其次，物理冶金学和化学冶金学的内容是互相联系的。通过物理冶金学的学习，冶金工程专业的学生可以更加深刻地理解冶金过程热力学中元素氧化还原的规律性，认识到合理控制化学成分的必要性。例如，冶金过程热力学中自由能的计算，是判别、变更或控制化学反应发生的趋势、方向和达到平衡态的手段，运用热力学计算可以分析钢中元素的氧化还原问题。由于铜氧化的标准自由能和铁相比更高，在炼钢吹氧过程中，将被铁保护而不被氧化。而铜是钢材热加工产生

热脆的有害元素，这是由于加热过程中铁被氧化，铜在轧件表面富集，成为液相后沿奥氏体晶界渗透，弱化晶界而造成热塑性降低。所以，只有通过配料降低钢中的铜含量。这样，就会对铜在钢中的危害、控制及氧化还原的热力学条件有了系统的认识。

另外，物理冶金课程在冶金工程专业的引入能够拓宽学生的知识面，增加毕业生的适应性，促进将来工作和事业的发展。钢铁生产中需要“专才”，也需要“通才”。只有具备了化学冶金学和物理冶金学的综合知识，才能使毕业生对操作岗位的工艺特点和目的要求有更深刻的认识；在产品出现质量问题时，才能对复杂工艺环节的影响因素做出准确判断，并制定出切实可行的解决方案。例如，钛微合金化高强钢的开发主要是利用了纳米尺寸 TiC 的沉淀强化作用，需要通过控制轧制和控制冷却来实现，但由于钛容易氧化的特点，必须在精炼后期用铝充分脱氧后加入钛才能提高其收得率^[2]。

1.2 物理冶金学的发展史

1.2.1 人类冶金的历史

到目前为止，人类社会的发展按照材料的使用可以分为三个时期：石器时代、铜器时代和铁器时代。金属的使用大致从新石器时代后期开始，在寻找石器的过程中人类认识了矿石，而制陶技术（高温和还原气氛烧制黑陶）促进了冶金技术的产生和发展。

人类最早使用的金属是铜、金、陨铁等天然金属。至少是在公元前 5000 年以前，人们已经开始使用自然金和自然铜。铁镍陨石在极古老的年代就已被人们利用，考古已发现了公元前 4000 年古埃及和古巴比伦的铁珠和匕首。

在人类冶金史上，炼铜是迈出的第一步。早在公元前 3000 年左右，生活在黄河流域上游、两河流域和尼罗河流域的人们开始使用含锡青铜^[1]。在炼铜出现以后，很快就有了其他金属的熔炼，特别像铅、锌等金属的熔炼。世界最早的铜器出土于公元前 3800 年的伊朗 Yahya 地区，其中含有少量砷（0.3%~3.7%）。中国甘肃东乡马家窑出土的青铜刀（6%~10%Sn）约产生于公元前 2000 年。在此前后，两河流域（公元前 3000~前 2500 年）、埃及（公元前 2600 年）、欧洲（公元前 1800~前 1500 年）相继开始铜的生产。中国冶铜技术是独立发展的，并且有了锡青铜和铅青铜两个系列，其中青铜（铜锡合金）熔点低、铸造性好。青铜器在商周时期达到鼎盛，创造了世界上水平最高的青铜文化。

人类使用铁至少有五千年的历史，铁的熔炼大约在公元前 2800 年出现。最早的铁是热锻成型的海绵铁，当原始鼓风机加大以后，它就能够产生较高的温度，从而就能熔化和生产生铁，生铁经氧化火焰处理之后就变成熟铁。最初的钢

是由熟铁经渗碳而得到，这种生产钢的方法一直延续到 18 世纪坩埚炼钢的出现。

我国很早就有使用陨铁的历史，已出土的用陨铁锻造成铁刃的青铜钺（藁城铁刃铜钺）约产于商代中期^[1]，约在公元前 13 世纪中叶。我国在春秋中叶（即公元前七世纪），开始使用海绵铁锻成的铁和可能是渗碳得到的钢。春秋末期，中国冶铁取得突破，这是由于烧陶窑到冶铜炉的温度逐渐升高，具备了冶炼条件，并且逐渐发展了两大技术：利用生铁退火制造韧性铸铁；用生铁为原料制钢。

两汉时期，钢铁业的发展通过多方面展现（如炉容扩大、用石灰石做熔剂、风口增加、利用畜力或“水排”鼓风）。河南郑州附近古荥阳汉代冶铁遗址出土两座高炉，炉缸呈椭圆形，长径 4 米，短径 2.7 米，容积 44 立方米，日产生铁估计在 1 吨左右^[3]（据刘云彩考证，估算时漏风率选择偏低，日产生铁不到 570 公斤）。公元前后，我国又进一步发明了炒钢的炼钢法，即将生铁在炼铁炉内熔化搅拌，通过氧化脱碳成为高碳钢和低碳钢，然后锻造除渣成型。在公元一世纪至二世纪，出现了反复叠打以改善钢材性能的工艺，被称作“百炼钢”。我国至迟在公元前三世纪已在刀剑制作中应用淬火技术，公元二世纪末，已掌握了水质与淬硬的关系。

三国时期，百炼钢技术进一步推广。南北朝时期“灌钢”技术出现，即利用生铁液对熟铁（即低碳炒钢）进行渗碳的方法，然后进行锻造焊合及均匀化，这样得到的中高碳钢成为“灌钢”。

唐宋时期，我国实现了农具由铸制改为锻制这一具有重大意义的历史性转变。北宋时期，炼铁已普遍使用煤。明代初期，在“灌钢法”基础上优化出“生铁淋口”法，而后再由苏州冶铁工匠提升为“苏钢法”。明代中叶，出现炼铁半连续系统，开始使用焦炭冶炼。至此，中国的钢铁生产一直处于世界领先水平。

明代中后期到清代，我国传统的钢铁技术发展开始缓慢。而此时的西方，工业革命方兴未艾，生铁冶炼技术长足发展。早在 15 世纪初，欧洲就采取了加强鼓风、加大炉身、增大燃料比等强化冶炼的措施，1755 年蒸汽机、1709 年焦炭、1828 年热风的应用不断把炼铁技术和生产推向高潮。也正是在 16 世纪后，冶金技术同物理、化学、力学的最新成就结合，逐渐发展成为“冶金学”。

19 世纪，冶金学在生产力的推动下蓬勃发展。1856 年英国人 H. Bessemer 发明了酸性底吹转炉炼钢法，标志着现代炼钢技术的产生。同年出现了平炉炼钢方法，1899 年电弧炉炼钢方法也被发明成功。

转炉炼钢法出现后，经历了不断的发展，例如：1879 年英国人 Thomas 发明的碱性空气底吹转炉炼钢法；1952 年在奥地利出现的氧气顶吹转炉炼钢方法，及同时德、美、法等国发明成功的氧气底吹转炉炼钢法；在 20 世纪 80 年代中后

期,西欧、日、美等国相继开发成功了顶底复吹氧气转炉炼钢方法。

连续浇铸的专利早在 1886 年问世,此后经过不断发展和工业应用,世界连铸比率于 20 世纪 80 年代超过模铸,目前已占据绝对优势。同模铸相比,连铸除了有节能、提高成材率等显著优势外,减少了“开坯”这一工艺环节。薄板坯连铸连轧是生产热轧板卷的一项结构紧凑的短流程工艺,被誉为继氧气转炉炼钢及连续铸钢之后,又一重大的钢铁产业的技术革命。无缺陷铸坯的生产减少了“连铸坯检查、清理和存放”这一工艺环节。

然而,在冶金技术进步推动下现代化钢铁厂也增加了铁水预处理和炉外精炼等工艺环节。铁水预处理(脱硅、脱磷、脱硫)在 20 世纪 80 年代的日本钢铁企业大规模采用。20 世纪 50 年代,炉外精炼方法被开发成功,到目前为止现代化钢铁厂钢水炉外精炼比例已接近 100%^[4]。

由于钢铁生产的发展和金相显微镜的应用,促使“物理冶金学”从“冶金学”中衍生出来,并主要伴随着钢铁技术的进步,同“化学冶金学”一起蓬勃发展。

1.2.2 20 世纪以前的物理冶金学

实际上,在人类进行冶金的漫长历史中,已经积累了有关金属材料的成分、性能、加工处理和质量检验等方面的知识,并逐渐探索其相互之间的联系和规律。

在极为古老的年代,人们在自然金属的使用过程中进行锻打成型、退火加工,就已经具有物理冶金学包含的某些知识。后来在生铁为原料制钢、百炼钢技术、灌钢技术、农具锻制的生产等过程中,这些知识逐渐丰富。另外,人们已自觉地通过辨别声响、观察表面色泽和断口状况等简单方法判别金属的性能和质量,并且和金属的制造、加工及热处理等方法结合,探索规律后改进生产工艺。这些生产、实验和检测方法虽然原始,实际上已成为现代物理冶金学的萌芽。

晶体学和矿物学的发展早于固态金属科学的发展。对矿物晶体和对金属晶体的研究有许多共同之处。矿物学知识往往能给物理冶金学的研究以基础性的帮助。Reaumur (1722 年)等开始用放大镜观察金属组织,铁的多形性概念在 1781 年提出,人们认识到钢、熟铁和生铁是碳影响的结果,据说伽利略测量了金属的拉伸强度^[1]。19 世纪中叶现代炼钢技术的产生增加了钢铁产量,热电偶、电阻温度计、显微镜等测量和检测方法受到重视,晶体学快速发展,而真正推进物理冶金学发展的是金相显微镜的应用。

直到 19 世纪中叶,人们对金属组织的认识还是通过肉眼观察。

1863 年英国人索比(H. C. Sorby)发明了金相技术,为研究合金中的相组成和显微组织提供了有力工具。索比是一位业余的英国科学家,他开始从事气象

学的研究,后来又研究金属学。1864年9月,索比在给英国科学促进协会提交的一篇论文中,列举了许多不同种类的钢铁显微照片,并做了重要论述^[5]。这篇论文标志着金相学——用显微镜研究金属组织的领域——的开端,尽管人们对于索比的研究工作给予高度评价,但这门技术的独立发展并没有得到特别关注,因此在此后的几乎20年中,金相学仍然处于停滞状态。1878年,德国科学家马登斯对索比在冶金方面感兴趣的问题重新进行研究,做了一些补充工作,并在1887年给德国钢铁研究院提交了一篇论文,这篇论文总结了他在该学科领域的全部研究工作。当时其他国家的科学家和工业冶金学家都对他的研究成果相当地关切。在20世纪初期,A.索维尔曾使美国的一些钢铁公司相信,显微镜是一种有助于钢的生产和热处理的有用工具^[5]。

1868年俄国人切尔诺夫观察到钢必须加热到超过某个临界温度才能淬火硬化,揭示了相变的存在和作用。吉布斯导出的相律于1876年发表。1887年法国人奥斯蒙利用差热分析方法系统地研究了钢的相变。1899年英国人罗伯茨-奥斯汀指出钢在临界温度以上的相是固溶体,并绘制出第一张铁碳相图。1900年德国人巴基乌斯-洛兹本在此基础上应用吉布斯相律修订了铁碳相图^[1]。相图的出现,是物理冶金学发展的另一个里程碑。

1.2.3 20 世纪的物理冶金学

在20世纪30年代,物理冶金学真正达到了成年。大学开始有了实质性的冶金系,物理冶金学随后成为了重要的学科之一。哥廷根大学的Tammann对金属系的组成进行了广泛的研究,主要是为了导出合金组成的一般规律和合金相的本质,结果是得到大量的相图,大量地发表了关于相变的机理的论文,坚持形核与长大过程的普遍适用性。

1912年,劳厄等人根据理论预见,证实了X射线具有波动特性和衍射的能力。1913年英国物理学家布拉格父子在劳厄发现的基础上,不仅成功地测定了NaCl、KCl等的晶体结构,并提出了作为晶体衍射基础的著名公式——布拉格方程: $2d\sin\theta=n\lambda$ 。大约在1922年,X射线衍射法和波动力学的应用,更多地补充了金属的组织 and 性能方面的知识。X射线衍射最感兴趣的是晶体结构^[6]。

人类很早就认识到对冷加工后的金属进行退火能够软化金属以便进行进一步的冷加工,事实上已经拥有再结晶的金属。19世纪人们对再结晶有了初步的认识和理解。20世纪初发现了大量再结晶的新事实,并产生了一些理论,如:发生软化的退火温度和冷加工度的关系;在冷加工铝的等温过程中发现了回复现象;Johnson于1939年提出了一个等温再结晶曲线的分析。再结晶过程是基本无应力的晶粒的出现和长大,吞并所有有应变的母体。初始晶核的形成可能仅仅是亚晶的合并过程,这个过程一直进行到与母体有大角度晶界时为止,然后就以恒