

热处理工程师手册

樊东黎 徐跃明 佟晓辉 主编

第3版



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

热处理工程师手册

第 3 版

主 编	樊东黎	徐跃明	佟晓辉		
参 编	邵周俊	贾洪艳	李爱国	葛京晶	杜秀轩
	李 俏	郑仲瑜	樊尔青	吕东显	付海峰
	胡小丽	韩永珍	高 予	罗晨光	哈 红
	赵慧敏	马欣新			



机械工业出版社

本版手册相对于第2版进行了大量修改补充,增添了必要的基础理论,新的先进生产技术,节能技术、质量控制技术、实用数据和换算等。

本版手册共分32章,全面介绍了化学元素、金属的晶体结构、钢的热处理基础、热处理设备、热处理工艺材料、热处理工艺、钢件的整体热处理、钢件的表面热处理、钢件的化学热处理、钢的少无氧化热处理、等离子体热处理、超硬化合物层的离子沉积法、高密度能加热表面热处理、淬火钢的冷处理、铸铁的热处理、非铁合金的热处理、粉末冶金件的热处理、机器零件的热处理、金属和合金的化学成分分析、金属材料缺陷的宏观和低倍检验、断口分析、显微组织检验、力学性能测试方法、热处理质量的无损检测、内应力测定、耐蚀性能测试、热处理质量控制、温度测量传感器和测温仪表、热处理的节能、热处理生产的安全技术、热处理生产环境及污染处理、常用数据资料等内容。

本版手册的读者对象仍然是从事第一线生产的热处理工程师和技师、以及热处理熟练技工、对在科研、设计、教育岗位的工程技术人员以及高校、中专、高职师生、企业高管也有重要参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

热处理工程师手册/樊东黎,徐跃明,佟晓辉主编. —3版. —北京:机械工业出版社,2011.2

ISBN 978-7-111-32817-9

I. ①热… II. ①樊…②徐…③佟… III. ①热处理-技术手册
IV. ①TG15-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第254265号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:张秀恩 责任编辑:崔滋恩 高依楠

责任校对:李锦莉 封面设计:姚毅 责任印制:杨曦
任秀丽

北京京丰印刷厂印刷

2011年3月第3版·第1次印刷

184mm×260mm·66.5印张·23插页·2198千字

0 001—4 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-32817-9

定价:183.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

策划编辑:(010) 88379770

社服务中心:(010) 88361066

网络服务

销售一部:(010) 68326294

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

第3版前言

第1版《热处理工程师手册》出版已10年,第2版手册也已出版5年,该书的两次出版均受到了读者欢迎,两版虽经多次重印仍供不应求,说明此手册的确有实用价值,也使编者感到荣幸。

国际科技进步促使热处理技术日新月异,我国机械制造业的高速发展、国际合作的日益广泛、机械产品的更新换代、国内外市场的激烈竞争等,也要求作为保证机器零件和整机质量强有力手段的热处理技术有新的突破。汽车、航空、航天、兵器、高速列车、基础零部件、工模具行业热处理技术改造蓬勃开展,民营热处理加工企业力求生产技术高起点都促使国内外热处理生产技术发生质的变化。为适应新的经济增长、市场繁荣和节能减排形势以及产品质量进一步提高的要求,且该手册五年一次的修订周期已到,有必要对《热处理工程师手册》进行第2次修订。

从以上形势和情况出发,编者在第3版修订中,在基本原理方面增补了钢的淬透性理论、淬透性的测定及应用、金属晶体结构和缺陷、扩散理论基础、钢件热处理残留应力和畸变、热处理设备的分类和用途等内容;在热处理工艺中补充了冷处理、等离子热处理,热处理工辅材料,热处理的节能与减排等内容;增设了常用数据资料一章,补充了大量的有用数据、单位换算,特别是冲击吸收功单位换算的新数据;最后还补充了国际和国内有关组织机构、标准、术语的名称和缩写。总之,在第3版中编者对原书作了重大补充修改,使其尽可能全面包络热处理工作者和生产需要的基础知识要点、生产知识和生产技术详情、节能减排措施、质量检验和质量保证手段、安全卫生常识等内容。期望广大读者在本版手册问世后能感受到更大的满足。

本版手册的读者对象仍然是从事第一线生产的热处理工程师和技师、熟练技工,对在科研、设计、教育岗位的工程师、高校和中专、高职师生、企业高管等也会有重要的参考价值。

本版手册的第1~7章、第9章、第14章、第16章、第28~32章由樊东黎补充修订。徐跃明负责15章、第17~18章的补充修订;佟晓辉负责补充修订第8、第10章、第12章、第13章、第19~27章。第11章由哈尔滨工业大学马欣新撰写。全国热处理学会、中国热处理行业协会和全国热处理标准化技术委员会、金属热处理杂志社贾洪艳、邵周俊、葛京晶、李俏、李爱国等参与了修订,收集整理了技术资料、数据、图表、进行了书稿的抄写、打印、绘图和校核工作,在此一并表示感谢。

尽管编者在手册修订过程中改正了不少第2版的印刷、编写错误,但难免还有遗漏,还会有新的失误和缺陷,欢迎读者批评指正。

编 者

第2版前言

第1版《热处理工程师手册》出版已5年。编者感到荣幸的是该书受到了广大读者欢迎，先后曾多次重印尚供不应求。鉴于当代技术进步的神速，这几年又涌现出许多已趋成熟的先进技术，航空、汽车、国防工业的发展，广泛开展的国际协作对热处理提出了许多新的、更高的要求。通过国际交流也引进了不少新工艺、新设备、新材料，民营热处理企业的兴起也要求在生产技术革新、技术改造上得到进一步的指导和启发。编者和出版社都感到有必要对该手册进行大幅度的增补和修订，以满足各行业和读者的这种迫切期望。

本手册第2版在修订中搜集补充了大量的近代热处理基本原理和基础数据，对钢铁加热和冷却过程中的转变以及容易出现的缺陷进行了详细叙述，列举了与制定热处理工艺密切相关的各种图表。在热处理工艺部分，全面补充了各种表面热处理和少无氧化热处理工艺，离子热处理和离子沉积、高密度能加热热处理方法。在材料热处理部分，补充了特殊铸铁的热处理，大量扩充了粉末冶金件的热处理内容。在各种机器零件的热处理具体工艺规范中添补了许多新的热处理强化技术。在机器零件热处理质量检验和质量控制方法部分强调和加重了质量管理和控制的内容，以突显实现产品质量的严格在线控制，求得100%合格率，保证产品质量的同批一致性和不同批的再现性。在严格质量管理中，鉴于控制温度的重要性，增加了温度测量传感器和测温仪表，包括加热炉有效加热区温度均匀度测定一章。最后还补充了热处理生产中的安全卫生一章，详细介绍了GB 15735—2004强制性国家标准的内容，以引起大家对安全生产重要性的认识，并严格按标准执行。

第2版的《热处理工程师手册》的读者对象仍然主要是从事第一线生产的热处理工程师和技师，对于在科研、设计、教育岗位上的工程师、教师都有重要参考、实用价值。

修订本手册的主编是樊东黎、徐跃明、佟晓辉。参与修订的有吴颖思、贾洪艳、曹敏达、邵周俊、葛京晶、杜秀轩、赵慧敏、罗晨光、马兰、郑仲瑜、刘西鹰、崔敬丽、胡小丽、李俏、樊尔青、哈红。机械工业出版社责任编辑王兴垣同志在稿件编辑、审理、校核和编排方面都付出了艰辛的劳动，为本手册的出版发行作出了杰出贡献。此外，尚有多人参与本书稿的抄写、打印、插图、复印、校核，编者在此一并致谢。

尽管编者们在手册修订过程中改正了不少原版印刷、编写的错误，但也难免还有遗漏、新的失误和不足，欢迎读者批评指正。

编 者

目 录

第3版前言

第2版前言

1 化学元素	1
1.1 化学元素周期表	1
1.2 金属晶体原子位置、原型、结构 符号、空间群标记和点阵参数	2
2 金属的晶体结构	3
2.1 金属的一般特征	3
2.2 金属的原子晶体结构	4
2.3 原子晶面的表示方法	6
2.4 金属的晶体点阵缺陷	6
2.5 晶体中的原子扩散	10
3 钢的热处理基础	13
3.1 Fe-Fe ₃ C 合金相图及其应用	13
3.2 合金元素对钢铁组织和性能的影响	17
3.2.1 Fe-C 合金相图与热处理温度的关系	17
3.2.2 合金元素的影响	18
3.3 钢在各种状态下的组织	23
3.3.1 奥氏体	23
3.3.2 铁素体	23
3.3.3 珠光体	24
3.3.4 贝氏体	24
3.3.5 先共析铁素体和渗碳体	25
3.3.6 马氏体和回火马氏体	25
3.3.7 回火索氏体和托氏体	26
3.4 钢在加热过程中的组织转变	26
3.4.1 珠光体-奥氏体转变	26
3.4.2 铁素体-珠光体向奥氏体的 等温转变	27
3.4.3 连续加热时的奥氏体形成过程	30
3.4.4 钢加热时的奥氏体晶粒长大	31
3.4.5 钢的晶粒度对性能的影响	32
3.4.6 奥氏体晶粒度的显示和测定	33
3.4.7 过热和过烧	33
3.4.8 氧化和脱碳	34
3.5 钢的过冷奥氏体转变	42
3.5.1 过冷奥氏体等温转变图	42
3.5.2 奥氏体连续冷却转变图	43
3.5.3 钢的淬透性和奥氏体连续冷却 转变图的关系	44
3.6 钢的淬透性	46
3.6.1 概述	46
3.6.2 Grossmann 的淬透性概念	46
3.6.3 钢淬透性测定方法	48
3.6.4 淬透性曲线的应用	50
3.6.5 低淬透性钢	60
3.7 钢件热处理残留应力和畸变	62
3.7.1 概论	62
3.7.2 整体热处理残留应力	62
3.7.3 表面淬火的残留应力	64
3.7.4 化学热处理的残留应力	65
3.7.5 残留应力的调整和消除	66
3.7.6 热处理畸变	68
4 热处理设备	71
4.1 热处理设备术语	71
4.2 对热处理设备的基本要求	76
4.3 热处理设备分类	77
4.4 热处理加热炉的标准编号	78
4.5 热处理设备发展方向	78
4.5.1 清洁的热处理设备	79
4.5.2 精密的热处理设备	79
4.5.3 节能的热处理设备	80
4.5.4 质量的自动控制	80
5 热处理工艺材料	82
5.1 热处理工艺材料术语	82
5.2 热处理工艺材料类别	85
5.3 热处理的加热介质	86
5.3.1 制备气氛的原料气	87
5.3.2 热处理加热用盐	87
5.3.3 流动粒子	90

5.3.4 回火油	91	9.1.2 碳在钢中的扩散	196
5.4 热处理淬冷介质	91	9.1.3 氮在钢中的扩散	197
5.4.1 淬火油	92	9.2 钢的低温化学热处理	198
5.4.2 聚合物淬火介质	97	9.2.1 气体渗氮	198
5.5 热处理渗剂	103	9.2.2 离子渗氮	205
5.5.1 渗碳剂	103	9.2.3 气体氮碳共渗	208
5.5.2 碳氮共渗剂	103	9.2.4 盐浴硫氮碳共渗	212
5.5.3 渗硼剂	104	9.2.5 渗锌	215
5.5.4 渗金属剂	104	9.2.6 钢件低温化学热处理的渗层组 织和性能	216
5.6 抗氧化脱碳涂料	105	9.3 钢的高温化学热处理	219
5.7 不锈钢箔	105	9.3.1 渗碳和碳氮共渗	219
5.8 防渗涂料	105	9.3.2 渗硼	229
5.9 表面处理剂	105	9.3.3 渗金属	234
5.10 辅助材料	106	9.3.4 钢铁件热浸铝和渗铝	238
5.10.1 清洗剂	106	10 钢的少无氧化热处理	245
5.10.2 防锈剂	107	10.1 可控气氛热处理	245
5.10.3 干燥剂和吸收剂	107	10.1.1 钢在气体介质中加热时的 行为	245
5.10.4 催化剂	107	10.1.2 钢在可控气氛中实现无氧 化加热的原理	246
6 热处理工艺和术语	109	10.1.3 碳势控制原理	246
6.1 热处理工艺分类和代号	109	10.1.4 可控气氛的制备和应用	248
6.1.1 基础分类	109	10.1.5 可控气氛热处理设备	257
6.1.2 附加分类与代号	109	10.2 真空热处理	260
6.2 金属热处理工艺术语	111	10.2.1 金属在真空中加热时的行为	261
7 钢件的整体热处理	124	10.2.2 金属在真空中的加热速度	262
7.1 钢件的正火与退火	124	10.2.3 金属在真空中加热后的冷却	263
7.1.1 正火与退火工艺分类及代号	124	10.2.4 真空热处理工艺	264
7.1.2 正火与退火工艺	124	10.2.5 真空热处理设备	266
7.2 钢件的淬火与回火	133	10.2.6 真空热处理和真空技术术语及 实用数据	269
7.2.1 一般淬火与回火	133	10.3 盐浴热处理	274
7.2.2 锻造余热淬火与回火	144	10.3.1 热处理加热和冷却用盐	274
8 钢件的表面热处理	148	10.3.2 钢在盐浴中加热时的行为	275
8.1 感应加热表面热处理	148	10.3.3 钢在盐浴中的冷却	277
8.2 火焰加热表面淬火	188	10.3.4 盐浴热处理炉	277
8.3 接触电阻加热表面淬火	194	10.4 流态床加热热处理	278
8.4 电解液加热表面淬火	195	10.5 其他少无氧化加热方法	280
8.5 盐浴加热表面淬火	195	10.5.1 装箱加热	280
9 钢件的化学热处理	196	10.5.2 调整燃料炉的燃烧系数	280
9.1 原子扩散	196	10.5.3 保护涂料	281
9.1.1 基本规律	196	10.5.4 包装热处理	281

11 等离子体热处理	282	14.4 淬火钢冷处理后的性能变化	322
11.1 等离子体热处理基础	282	14.5 冷处理设备	322
11.1.1 等离子体	282	14.5.1 冰冷保温罐	322
11.1.2 低压气体放电	282	14.5.2 冷却循环空气的热交换器	322
11.2 等离子体化学热处理	287	14.5.3 液氮蒸发式深冷处理设备	323
11.2.1 等离子体化学热处理的基本 原理	287	14.5.4 和制冷机连通的容器	323
11.2.2 等离子体化学热处理设备	290	14.6 展望	323
11.2.3 等离子体化学热处理工艺	292	14.6.1 美国冷处理和深冷处理 行业现状	323
11.3 等离子体基离子注入技术	299	14.6.2 冷处理和深冷处理在其他方面的 应用	324
11.3.1 等离子体基离子注入技术的 基本原理	299	14.6.3 深冷处理技术展望	324
11.3.2 等离子体基离子注入技术的 工作模式	299	参考文献	324
11.3.3 等离子体基离子注入技术的 特点	301	15 铸铁的热处理	325
11.3.4 离子注入技术改善表面性 能的机理	301	15.1 铸铁的分类和应用	325
11.3.5 等离子体基离子注入技术的 应用	302	15.2 铸铁热处理基础	329
参考文献	302	15.2.1 Fe-C-Si 三元相图	330
12 超硬化合物层的离子沉积法	303	15.2.2 铸铁的共析温度范围及其 影响因素	330
12.1 真空溅射法	304	15.2.3 加热时的组织转变	330
12.2 离子镀渗法	307	15.2.4 冷却时的组织转变	332
12.3 其他镀渗方法	308	15.3 白口铸铁的热处理	337
13 高密度能加热表面热处理	309	15.3.1 去应力退火	337
13.1 高频电脉冲感应淬火	309	15.3.2 淬火与回火	337
13.2 激光热处理	309	15.3.3 等温淬火	338
13.3 电子束热处理	315	15.4 灰铸铁的热处理	338
13.4 离子注入合金化	317	15.4.1 退火	338
14 淬火钢的冷处理	319	15.4.2 正火	340
14.1 淬火钢组织中的残留奥氏体	319	15.4.3 淬火与回火	341
14.1.1 残留奥氏体产生的原因	319	15.5 球墨铸铁的热处理	342
14.1.2 影响残留奥氏体量的因素	319	15.5.1 退火	342
14.1.3 残留奥氏体对钢性能的影响	320	15.5.2 正火	345
14.2 奥氏体的稳定化	321	15.5.3 淬火与回火	347
14.3 钢的冰冷和深冷处理	321	15.5.4 等温淬火	351
14.3.1 冷处理工艺	321	15.6 可锻铸铁的热处理	352
14.3.2 冰冷和深冷处理注意事项	321	15.6.1 白心可锻铸铁的热处理	352
		15.6.2 黑心可锻铸铁的热处理	352
		15.6.3 珠光体可锻铸铁的热处理	353
		15.6.4 球墨可锻铸铁的热处理	355
		16 非铁合金的热处理	358
		16.1 铜和铜合金的热处理	358
		16.2 铝和铝合金的热处理	364

16.3 钛和钛合金的热处理.....	375	18.3.1 弹簧的服役条件和失效方式.....	455
16.4 镁和镁合金的热处理.....	380	18.3.2 弹簧用材料.....	456
16.5 镍和镍合金的热处理.....	384	18.3.3 弹簧的一般热处理.....	458
17 粉末冶金件的热处理	385	18.3.4 弹簧的其他强化处理.....	463
17.1 粉末冶金方法和适用范围	385	18.3.5 弹簧的稳定化处理.....	463
17.2 铁基粉末冶金件的热处理	388	18.3.6 耐蚀、耐热弹簧的热处理.....	464
17.2.1 铁基粉末冶金材料的分类.....	389	18.4 紧固件的热处理	467
17.2.2 铁基粉末冶金件的应用.....	389	18.4.1 螺纹紧固件的热处理.....	467
17.2.3 铁基粉末冶金件的热处理.....	390	18.4.2 垫圈、挡圈、销和铆钉的 热处理.....	473
17.3 钢结硬质合金的热处理	397	18.5 汽车、拖拉机及柴油机零件的 热处理	475
17.3.1 钢结硬质合金的特点、牌号、 性能和用途.....	397	18.5.1 活塞环的热处理.....	475
17.3.2 钢结硬质合金的热处理.....	398	18.5.2 活塞销的热处理.....	477
17.3.3 钢结硬质合金的组织与性能.....	400	18.5.3 连杆的热处理.....	479
17.4 粉末高速钢的热处理.....	401	18.5.4 曲轴的热处理.....	481
17.4.1 粉末高速钢的类别和性能.....	401	18.5.5 凸轮轴的热处理.....	484
17.4.2 粉末高速钢的热处理工艺.....	402	18.5.6 气门挺杆的热处理.....	486
17.5 硬质合金的热处理.....	402	18.5.7 排气阀的热处理.....	490
17.5.1 硬质合金的分类和用途.....	403	18.5.8 半轴的热处理.....	491
17.5.2 硬质合金的热处理工艺.....	404	18.5.9 喷油泵柱塞副和喷油嘴偶件的 热处理.....	494
18 机器零件的热处理	407	18.5.10 履带板的热处理	498
18.1 齿轮的热处理	407	18.6 金属切削机床零件的热处理	498
18.1.1 齿轮的服役条件和失效形式.....	407	18.6.1 机床导轨的热处理.....	498
18.1.2 齿轮用钢及技术要求.....	407	18.6.2 机床主轴的热处理.....	504
18.1.3 齿轮的调质处理.....	411	18.6.3 机床丝杠的热处理.....	505
18.1.4 齿轮的表面淬火.....	412	18.6.4 机床铸件的热稳定化处理.....	508
18.1.5 齿轮的渗碳和碳氮共渗.....	420	18.6.5 其他机床零件的热处理.....	509
18.1.6 齿轮的渗氮和氮碳共渗.....	426	18.7 大型锻件的热处理	515
18.1.7 减少齿轮热处理畸变的措施.....	430	18.7.1 大型锻件的材料和技术要求.....	515
18.2 滚动轴承零件的热处理	430	18.7.2 大型锻件的锻后热处理.....	515
18.2.1 滚动轴承零件的服役条件和 失效形式.....	430	18.7.3 大型锻件的最终热处理.....	522
18.2.2 滚动轴承材料.....	431	18.7.4 大型锻件的其他热处理工艺.....	530
18.2.3 铬钢轴承零件的热处理.....	437	18.8 轧辊的热处理	531
18.2.4 渗碳钢制轴承零件的热处理.....	448	18.8.1 热轧辊的热处理.....	531
18.2.5 中碳合金钢轴承零件的热处理.....	449	18.8.2 冷轧工作辊的热处理.....	531
18.2.6 微型轴承零件的热处理.....	449	18.8.3 支承辊的热处理.....	535
18.2.7 耐蚀轴承零件的热处理.....	451	18.9 切削工具的热处理	537
18.2.8 耐高温轴承零件的热处理.....	451	18.9.1 服役条件和失效形式.....	537
18.2.9 08、10 钢冲压成形轴承零件的 热处理.....	454	18.9.2 切削工具用钢及技术要求.....	537
18.3 弹簧的热处理	455	18.9.3 工具用钢的热处理.....	539
		18.9.4 工具用钢热处理后的金相 组织.....	545

18.9.5 工具热处理举例	550	21.4 断口低倍观察分析	642
18.10 模具的热处理	553	21.5 断口的微观观察分析	644
18.10.1 冷作模具的热处理	553	21.6 典型断口形貌特征	645
18.10.2 热作模具的热处理	561	22 显微组织检验	648
18.10.3 塑料模具的热处理	565	22.1 光学显微镜分析方法	648
18.10.4 提高模具性能和寿命的热处 理方法	569	22.2 定量金相分析方法	653
18.10.5 模具热处理畸变与控制	572	22.3 晶粒度测定方法	655
18.11 量具的热处理	577	22.4 高温和低温金相分析方法	657
18.11.1 量具用钢及要求	577	22.5 电子显微镜分析方法	657
18.11.2 量具的热处理工艺	578	22.6 钢铁零件典型热处理显微组织与 缺陷的金相特征	658
18.11.3 量具的热处理举例	580	23 力学性能测试方法	661
18.12 液压元件、零件的热处理	584	23.1 硬度	661
18.13 自行车零件的热处理	593	23.2 拉伸	684
18.14 手表零件的热处理	595	23.3 压缩、弯曲和扭转	686
18.15 轻纺机零件的热处理	600	23.4 冲击	687
18.15.1 家用缝纫机零件的热处理	600	23.5 疲劳	688
18.15.2 工业用缝纫机零件的热处理	605	23.6 断裂韧度	691
18.15.3 纺织机械零件的热处理	609	23.7 蠕变和持久强度	693
18.16 农机具零件的热处理	613	23.8 摩擦磨损	695
18.16.1 农机具零件的失效形式与 性能要求	613	24 热处理质量的无损检测	698
18.16.2 耕作机械典型零件的热处理	616	24.1 磁粉检测	698
18.16.3 其他农机具零件的热处理	620	24.2 涡流检测	702
18.17 常用五金和木工工具的 热处理	624	24.3 渗透检测	703
19 金属和合金的化学成分分析	626	24.4 超声波检测	707
19.1 化学分析法	626	24.5 X射线和 γ 射线检测	711
19.2 火花鉴别法	633	25 内应力测定	721
19.3 光谱分析法	636	25.1 应力释放法	721
19.4 微区分析	636	25.2 X射线法	721
20 金属材料缺陷的宏观和低倍 检验	639	25.3 磁性法	723
20.1 常见的低倍缺陷特征	639	25.4 超声波法	724
20.2 低倍检验的一般方法	640	25.5 深层应力分布测量	724
20.3 硫、磷元素偏析的检验方法	640	26 耐蚀性能测试	725
21 断口分析	641	26.1 工程上常见的腐蚀类型	725
21.1 断口分析的用途	641	26.2 腐蚀速率评定方法	725
21.2 样品的切取和制备	641	26.3 均匀腐蚀试验	726
21.3 常用的断口分析方法	641	26.4 点腐蚀试验	726

26.5	晶间腐蚀试验	727	28.3.1	WMNK 系列数字调节仪	768
26.6	缝隙腐蚀试验	727	28.3.2	XTM 系列显示调节仪	768
26.7	应力腐蚀开裂试验	728	28.3.3	智能调节仪	769
26.8	大气腐蚀与高温氧化	729	28.4	其他温度显示仪表	771
27	热处理质量控制	730	28.4.1	全辐射温度计	771
27.1	热处理质量控制的目的及主要内容	730	28.4.2	光学高温计	771
27.2	热处理质量控制体系	730	28.4.3	光电高温计	773
27.3	产品设计中的热处理质量控制	732	28.5	温度控制执行器	774
27.4	工艺设计中的热处理质量控制	732	28.5.1	电阻炉控温执行器	774
27.5	原材料质量控制	736	28.5.2	燃料炉控温执行器	777
27.6	热处理工序的过程质量控制	736	29	热处理的节能	780
27.7	热处理质量检验控制	740	29.1	热处理的节能潜力	780
27.8	操作者技能和责任质量控制	741	29.2	节能的热处理工艺	781
27.9	热处理质量控制中的统计技术	741	29.2.1	不均匀奥氏体化淬火	781
27.10	热处理产品质量的信息化控制	743	29.2.2	节能的加热时间计算	782
27.11	热处理质量控制要求 (JB/T 10175—2008)	745	29.2.3	提高炉温的快速加热	783
27.12	热处理炉有效加热区测定方法 (GB/T 9452—2003)	749	29.2.4	渗层深度的斟酌	783
	参考文献	756	29.2.5	降低淬火加热温度	783
28	温度测量传感器和测温仪表	757	29.2.6	低温化学热处理	784
28.1	温度传感器	757	29.2.7	化学热处理催渗	785
28.1.1	热电偶和补偿导线	757	29.2.8	高温渗碳	786
28.1.2	热电阻	765	29.2.9	以局部加热代替整体加热	788
28.1.3	半导体温度计	765	29.2.10	简化或取消热处理工序	789
28.1.4	玻璃温度计	766	29.2.11	余热利用	789
28.1.5	压力温度计	766	29.3	节能的热处理设备	790
28.1.6	双金属温度计	766	29.3.1	热处理设备的节能途径	790
28.2	温度显示与调节仪表	766	29.3.2	合理选择能源	790
28.2.1	动圈式显示与调节仪表	766	29.3.3	合理选择炉型	791
28.2.2	电子自动平衡式温度显示与调节仪表	767	29.3.4	减少炉壁散热和炉衬蓄热	791
28.2.3	力矩电动机式温度指示调节仪	768	29.3.5	优化燃烧过程	792
28.3	数字式温度显示调节仪表	768	29.3.6	充分利用余热	792
			29.3.7	料盘、料筐、夹具轻量化	794
			29.3.8	热能多项综合利用的渗碳淬火、回火生产线	794
			29.3.9	气体燃料的热化学重整	794
			29.4	节能的管理措施	795
				参考文献	795
			30	热处理生产的安全技术	797
			30.1	热处理生产中的危险因素	797
			30.1.1	易燃物质	797
			30.1.2	易爆物质	799
			30.1.3	毒性物质	801

30.1.4 高压电	802	30.6.4 盐浴热处理	825
30.1.5 炽热物体及腐蚀性物质	803	30.6.5 真空热处理	826
30.1.6 制冷剂	804	30.7 安全、卫生防护技术措施	826
30.1.7 坠落物体或进出物	804	30.7.1 基本要求	826
30.2 热处理生产中的有害因素	804	30.7.2 四防	827
30.2.1 热辐射	804	31 热处理生产环境及污染处理	828
30.2.2 电磁辐射	805	31.1 热处理生产的污染源	828
30.2.3 噪声	805	31.1.1 煤的燃烧	828
30.2.4 粉尘	806	31.1.2 油、煤气、液化气和天然 气的燃烧	828
30.2.5 有害气体	807	31.1.3 液态工艺材料的蒸发	828
30.3 热处理生产作业环境	809	31.1.4 喷砂粉尘	828
30.3.1 作业环境	809	31.1.5 生产剩余物料排放对水 体的影响	829
30.3.2 车间卫生	809	31.1.6 废渣	829
30.3.3 作业场地空气中有害物质的最 高允许浓度	809	31.1.7 噪声	829
30.3.4 噪声控制	809	31.1.8 电磁辐射	829
30.3.5 照度标准及应急照明	809	31.2 热处理有害废物排放的限值	829
30.3.6 设备间的距离	809	31.2.1 三废排放规定	829
30.3.7 车间通道、安全标志和报警 装置	810	31.2.2 空气中有害物质的限值	831
30.4 生产物料和剩余物料	810	31.3 热处理温室气体的排放	832
30.4.1 生产物料	810	31.4 有害有毒废弃物的无害化 处理	832
30.4.2 剩余物料	810	31.4.1 有害废弃物的判定	832
30.5 生产装置及其安全措施	811	31.4.2 有害盐渣的无害化处理	833
30.5.1 电阻炉	811	32 常用数据资料	835
30.5.2 燃烧炉	812	32.1 化学元素的物理化学性质	835
30.5.3 盐浴炉和流动粒子炉	814	32.2 常见无机化合物的物理化学 性质	839
30.5.4 感应加热装置	816	32.3 常见有机化合物的物理化学 性质	842
30.5.5 离子化学热处理设备	817	32.4 钢中碳化物的结构和性质	843
30.5.6 激光和电子束的热处理装置	817	32.5 金属氧化物的性质和结构	844
30.5.7 淬火及回火油槽	817	32.6 钢牌号表示方法	845
30.5.8 火焰淬火装置	818	32.6.1 总则	845
30.5.9 可控气氛的制备和可控气氛炉	820	32.6.2 碳素结构钢	845
30.5.10 冷处理设备	821	32.6.3 优质碳素结构钢	846
30.5.11 清洗设备	822	32.6.4 碳素工具钢	846
30.5.12 喷砂、喷丸和高压水清理 设备	822	32.6.5 易切削钢	846
30.5.13 酸浸设备	822	32.6.6 合金结构钢	846
30.5.14 校直机	823	32.6.7 合金工模具钢、高速钢	846
30.5.15 炉用构件、料盘和夹具	823		
30.6 热处理工艺安全作业	824		
30.6.1 一般要求	824		
30.6.2 表面热处理	824		
30.6.3 化学热处理	825		

32.6.8 高碳轴承钢	846	变图	926
32.6.9 铸钢	846	32.16 钢的淬透性曲线	940
32.7 常用钢的化学成分	847	32.17 淬火钢在不同温度回火后的力学性能曲线	965
32.8 常用钢的力学性能	878	32.18 各国结构用钢牌号对照	995
32.9 常用钢铁材料的物理性质	882	32.18.1 碳素结构钢牌号近似对照	995
32.10 世界各国钢牌号对照	883	32.18.2 各国工具钢牌号对照	1002
32.11 铸铁的分类、代号、化学成分和性能	893	32.18.3 各国不锈钢和耐热钢牌号对照	1004
32.11.1 分类	893	32.18.4 各国铸铁牌号对照	1011
32.11.2 灰铸铁	893	32.19 常用单位换算	1014
32.11.3 球墨铸铁	893	32.19.1 常用物理量单位换算	1014
32.11.4 蠕墨铸铁	894	32.19.2 硬度换算	1023
32.11.5 可锻铸铁	894	32.19.3 冲击值换算	1028
32.11.6 抗磨白口铸铁	894	32.19.4 气体中水分、湿度、露点间的关系	1031
32.11.7 高硅耐蚀铸铁	896	32.19.5 摄氏温度与华氏温度换算	1031
32.11.8 耐热铸铁	896	32.20 热处理标准目录	1036
32.12 非铁金属和合金的分类、代号、化学成分和性能	897	32.21 美国与热处理行业有关的环境安全法令	1039
32.12.1 说明及代号	897	32.22 热处理常用符号	1041
32.12.2 非铁金属和合金的化学成分和性能	899	32.23 常用物理量法定计量单位	1043
32.13 非铁金属和合金的热物理性质	907	32.24 与热处理有关的国际组织、术语、法规、标准的缩写和代号	1048
32.14 钢的过冷奥氏体等温转变图	909		
32.15 钢的奥氏体连续冷却转			

1 化学元素

1.1 化学元素周期表(见表 1-1)

表 1-1 化学元素周期表

金属																非金属			
I ^a	II ^a	III ^b	IV ^b	V ^b	VI ^b	VII ^b	VIII	IX ^b	X ^b	XI ^b	II ^b	III ^a	IV ^a	V ^a	VI ^a	VII ^a	0	电子轨道	
1 +1 H 1.0079 1	2 +2 He 4.00260 2																	K	
3 +1 Li	4 +2 Be																	K-L	
6.939 2-1 2-2	9.0122 2-1 2-2																	K-L	
11 +1 Na	12 +2 Mg																	K-L-M	
22.9898 2-1 2-2	24.312 2-1 2-2																	K-L-M	
19 +1 K	20 +2 Ca	21 +3 Sc	22 +3 Ti	23 +3 V	24 +3 Cr	25 +3 Mn	26 +2 Fe	27 +2 Co	28 +2 Ni	29 +1 Cu	30 +2 Zn	31 +3 Ga	32 +2 Ge	33 +3 As	34 +3 Se	35 +2 Br	36 +0 Kr		
39.09 3-1 3-2	40.08 3-1 3-2	44.9559 3-1 3-2	47.9 3-1 3-2	50.941 3-1 3-2	51.996 3-1 3-2	54.938 3-1 3-2	55.847 3-1 3-2	58.9332 3-1 3-2	58.71 3-1 3-2	63.54 3-1 3-2	65.38 3-1 3-2	69.723 3-1 3-2	72.64 3-1 3-2	74.9216 3-1 3-2	78.96 3-1 3-2	79.904 3-1 3-2	83.80 3-1 3-2		
37 +1 Rb	38 +2 Sr	39 +3 Y	40 +4 Zr	41 +5 Nb	42 +6 Mo	43 +6 Tc	44 +3 Ru	45 +3 Rh	46 +2 Pd	47 +1 Ag	48 +2 Cd	49 +3 In	50 +2 Sn	51 +3 Sb	52 +4 Te	53 +2 I	54 +0 Xe		
85.467 3-1 3-2	87.62 3-1 3-2	88.9059 3-1 3-2	91.22 3-1 3-2	92.9064 3-1 3-2	95.94 3-1 3-2	98.9062 3-1 3-2	101.07 3-1 3-2	102.905 3-1 3-2	106.4 3-1 3-2	107.868 3-1 3-2	112.40 3-1 3-2	114.82 3-1 3-2	118.69 3-1 3-2	121.75 3-1 3-2	127.60 3-1 3-2	126.9045 3-1 3-2	131.30 3-1 3-2		
55 +1 Cs	56 +2 Ba	57 +3 La	58 +3 Ce	59 +3 Pr	60 +3 Nd	61 +3 Pm	62 +2 Sm	63 +2 Eu	64 +3 Gd	65 +3 Tb	66 +3 Dy	67 +3 Ho	68 +3 Er	69 +3 Tm	70 +2 Yb	71 +3 Lu			
132.9054 3-1 3-2	137.3 3-1 3-2	138.9055 3-1 3-2	140.9077 3-1 3-2	144.24 3-1 3-2	147 3-1 3-2	150.4 3-1 3-2	151.96 3-1 3-2	157.25 3-1 3-2	158.925 3-1 3-2	162.50 3-1 3-2	164.9304 3-1 3-2	167.26 3-1 3-2	173.04 3-1 3-2	175.07 3-1 3-2	173.04 3-1 3-2	174.967 3-1 3-2			
87 +1 Fr	88 +2 Ra	89 +3 Ac	90 +4 Th	91 +5 Pa	92 +6 U	93 +3 Np	94 +4 Pu	95 +5 Am	96 +6 Cm	97 +3 Bk	98 +3 Cf	99 +3 Es	100 +3 Fm	101 +2 Md	102 +2 No	103 +3 Lr			
(223) 3-1 3-2	(226) 3-1 3-2	(227) 3-1 3-2	231.0369 3-1 3-2	238.0289 3-1 3-2	238.0289 3-1 3-2	237.0482 3-1 3-2	238.0289 3-1 3-2	244.0642 3-1 3-2	244.0642 3-1 3-2	247.0732 3-1 3-2	251.1089 3-1 3-2	252.0839 3-1 3-2	257.1037 3-1 3-2	261.1018 3-1 3-2	265.1010 3-1 3-2	269.1009 3-1 3-2			
																		-O-P-O	

金属																非金属			
I ^a	II ^a	III ^b	IV ^b	V ^b	VI ^b	VII ^b	VIII	IX ^b	X ^b	XI ^b	II ^b	III ^a	IV ^a	V ^a	VI ^a	VII ^a	0	电子轨道	
1 +1 H 1.0079 1	2 +2 He 4.00260 2																	K	
3 +1 Li	4 +2 Be																	K-L	
6.939 2-1 2-2	9.0122 2-1 2-2																	K-L	
11 +1 Na	12 +2 Mg																	K-L-M	
22.9898 2-1 2-2	24.312 2-1 2-2																	K-L-M	
19 +1 K	20 +2 Ca	21 +3 Sc	22 +3 Ti	23 +3 V	24 +3 Cr	25 +3 Mn	26 +2 Fe	27 +2 Co	28 +2 Ni	29 +1 Cu	30 +2 Zn	31 +3 Ga	32 +2 Ge	33 +3 As	34 +3 Se	35 +2 Br	36 +0 Kr		
39.09 3-1 3-2	40.08 3-1 3-2	44.9559 3-1 3-2	47.9 3-1 3-2	50.941 3-1 3-2	51.996 3-1 3-2	54.938 3-1 3-2	55.847 3-1 3-2	58.9332 3-1 3-2	58.71 3-1 3-2	63.54 3-1 3-2	65.38 3-1 3-2	69.723 3-1 3-2	72.64 3-1 3-2	74.9216 3-1 3-2	78.96 3-1 3-2	79.904 3-1 3-2	83.80 3-1 3-2		
37 +1 Rb	38 +2 Sr	39 +3 Y	40 +4 Zr	41 +5 Nb	42 +6 Mo	43 +6 Tc	44 +3 Ru	45 +3 Rh	46 +2 Pd	47 +1 Ag	48 +2 Cd	49 +3 In	50 +2 Sn	51 +3 Sb	52 +4 Te	53 +2 I	54 +0 Xe		
85.467 3-1 3-2	87.62 3-1 3-2	88.9059 3-1 3-2	91.22 3-1 3-2	92.9064 3-1 3-2	95.94 3-1 3-2	98.9062 3-1 3-2	101.07 3-1 3-2	102.905 3-1 3-2	106.4 3-1 3-2	107.868 3-1 3-2	112.40 3-1 3-2	114.82 3-1 3-2	118.69 3-1 3-2	121.75 3-1 3-2	127.60 3-1 3-2	126.9045 3-1 3-2	131.30 3-1 3-2		
55 +1 Cs	56 +2 Ba	57 +3 La	58 +3 Ce	59 +3 Pr	60 +3 Nd	61 +3 Pm	62 +2 Sm	63 +2 Eu	64 +3 Gd	65 +3 Tb	66 +3 Dy	67 +3 Ho	68 +3 Er	69 +3 Tm	70 +2 Yb	71 +3 Lu			
132.9054 3-1 3-2	137.3 3-1 3-2	138.9055 3-1 3-2	140.9077 3-1 3-2	144.24 3-1 3-2	147 3-1 3-2	150.4 3-1 3-2	151.96 3-1 3-2	157.25 3-1 3-2	158.925 3-1 3-2	162.50 3-1 3-2	164.9304 3-1 3-2	167.26 3-1 3-2	173.04 3-1 3-2	175.07 3-1 3-2	173.04 3-1 3-2	174.967 3-1 3-2			
87 +1 Fr	88 +2 Ra	89 +3 Ac	90 +4 Th	91 +5 Pa	92 +6 U	93 +3 Np	94 +4 Pu	95 +5 Am	96 +6 Cm	97 +3 Bk	98 +3 Cf	99 +3 Es	100 +3 Fm	101 +2 Md	102 +2 No	103 +3 Lr			
(223) 3-1 3-2	(226) 3-1 3-2	(227) 3-1 3-2	231.0369 3-1 3-2	238.0289 3-1 3-2	238.0289 3-1 3-2	237.0482 3-1 3-2	238.0289 3-1 3-2	244.0642 3-1 3-2	244.0642 3-1 3-2	247.0732 3-1 3-2	251.1089 3-1 3-2	252.0839 3-1 3-2	257.1037 3-1 3-2	261.1018 3-1 3-2	265.1010 3-1 3-2	269.1009 3-1 3-2			
																		-O-P-O	

金属																非金属			
I ^a	II ^a	III ^b	IV ^b	V ^b	VI ^b	VII ^b	VIII	IX ^b	X ^b	XI ^b	II ^b	III ^a	IV ^a	V ^a	VI ^a	VII ^a	0	电子轨道	
1 +1 H 1.0079 1	2 +2 He 4.00260 2																	K	
3 +1 Li	4 +2 Be																	K-L	
6.939 2-1 2-2	9.0122 2-1 2-2																	K-L	
11 +1 Na	12 +2 Mg																	K-L-M	
22.9898 2-1 2-2	24.312 2-1 2-2																	K-L-M	
19 +1 K	20 +2 Ca	21 +3 Sc	22 +3 Ti	23 +3 V	24 +3 Cr	25 +3 Mn	26 +2 Fe	27 +2 Co	28 +2 Ni	29 +1 Cu	30 +2 Zn	31 +3 Ga	32 +2 Ge	33 +3 As	34 +3 Se	35 +2 Br	36 +0 Kr		
39.09 3-1 3-2	40.08 3-1 3-2	44.9559 3-1 3-2	47.9 3-1 3-2	50.941 3-1 3-2	51.996 3-1 3-2	54.938 3-1 3-2	55.847 3-1 3-2	58.9332 3-1 3-2	58.71 3-1 3-2	63.54 3-1 3-2	65.38 3-1 3-2	69.723 3-1 3-2	72.64 3-1 3-2	74.9216 3-1 3-2	78.96 3-1 3-2	79.904 3-1 3-2	83.80 3-1 3-2		
37 +1 Rb	38 +2 Sr	39 +3 Y	40 +4 Zr	41 +5 Nb	42 +6 Mo	43 +6 Tc	44 +3 Ru	45 +3 Rh	46 +2 Pd	47 +1 Ag	48 +2 Cd	49 +3 In	50 +2 Sn	51 +3 Sb	52 +4 Te	53 +2 I	54 +0 Xe		
85.467 3-1 3-2	87.62 3-1 3-2	88.9059 3-1 3-2	91.22 3-1 3-2	92.9064 3-1 3-2	95.94 3-1 3-2	98.9062 3-1 3-2	101.07 3-1 3-2	102.905 3-1 3-2	106.4 3-1 3-2	107.868 3-1 3-2	112.40 3-1 3-2	114.82 3-1 3-2	118.69 3-1 3-2	121.75 3-1 3-2	127.60 3-1 3-2	126.9045 3-1 3-2	131.30 3-1 3-2		
55 +1 Cs	56 +2 Ba	57 +3 La	58 +3 Ce	59 +3 Pr	60 +3 Nd	61 +3 Pm	62 +2 Sm	63 +2 Eu	64 +3 Gd	65 +3 Tb	66 +3 Dy	67 +3 Ho	68 +3 Er	69 +3 Tm	70 +2 Yb	71 +3 Lu			
132.9054 3-1 3-2	137.3 3-1 3-2	138.9055 3-1 3-2	140.9077 3-1 3-2	144.24 3-1 3-2	147 3-1 3-2	150.4 3-1 3-2	151.96 3-1 3-2	157.25 3-1 3-2	158.925 3-1 3-2	162.50 3-1 3-2	164.9304 3-1 3-2	167.26 3-1 3-2	173.04 3-1 3-2	175.07 3-1 3-2	173.04 3-1 3-2	174.967 3-1 3-2			
87 +1 Fr	88 +2 Ra	89 +3 Ac	90 +4 Th	91 +5 Pa	92 +6 U	93 +3 Np	94 +4 Pu	95 +5 Am	96 +6 Cm	97 +3 Bk	98 +3 Cf	99 +3 Es	100 +3 Fm	101 +2 Md	102 +2 No	103 +3 Lr			
(223) 3-1 3-2	(226) 3-1 3-2	(227) 3-1 3-2	231.0369 3-1 3-2	238.0289 3-1 3-2	238.0289 3-1 3-2	237.0482 3-1 3-2	238.0289 3-1 3-2	244.0642 3-1 3-2	244.0642 3-1 3-2	247.0732 3-1 3-2	251.1089 3-1 3-2	252.0839 3-1 3-2	257.1037 3-1 3-2	261.1018 3-1 3-2	265.1010 3-1 3-2	269.1009 3-1 3-2			
																		-O-P-O	

金属																非金属			
I ^a	II ^a	III ^b	IV ^b	V ^b	VI ^b	VII ^b	VIII	IX ^b	X ^b	XI ^b	II ^b	III ^a	IV ^a	V ^a	VI ^a	VII ^a	0	电子轨道	
1 +1 H 1.0079 1	2 +2 He 4.00260 2																	K	
3 +1 Li	4 +2 Be																	K-L	
6.939 2-1 2-2	9.0122 2-1 2-2																	K-L	
11 +1 Na	12 +2 Mg																	K-L-M	
22.9898 2-1 2-2	24.312 2-1 2-2																	K-L-M	
19 +1 K	20 +2 Ca	21 +3 Sc	22 +3 Ti	23 +3 V	24 +3 Cr	25 +3 Mn	26 +2 Fe	27 +2 Co	28 +2 Ni	29 +1 Cu	30 +2 Zn	31 +3 Ga	32 +2 Ge	33 +3 As	34 +3 Se	35 +2 Br	36 +0 Kr		
39.09 3-1 3-2	40.08 3-1 3-2	44.9559 3-1 3-2	47.9 3-1 3-2	50.941 3-1 3-2	51.996 3-1 3-2	54.938 3-1 3-2	55.847 3-1 3-2	58.9332 3-1 3-2	58.71 3-1 3-2	63.54 3-1 3-2	65.38 3-1 3-2	69.723 3-1 3-2	72.64 3-1 3-2	74.9216 3-1 3-2	78.96 3-1 3-2	79.904 3-1 3-2	83.80 3-1 3-2		
37 +1 Rb	38 +2 Sr	39 +3 Y	40 +4 Zr	41 +5 Nb	42 +6 Mo	43 +6 Tc	44 +3 Ru	45 +3 Rh	46 +2 Pd	47 +1 Ag	48 +2 Cd	49 +3 In	50 +2 Sn	51 +3 Sb	52 +4 Te	53 +2 I	54 +0 Xe		
85.467 3-1 3-2	87.62 3-1 3-2	88.9059 3-1 3-2	91.22 3-1 3-2	92.9064 3-1 3-2	95.94 3-1 3-2	98.9062 3-1 3-2	101.07 3-1 3-2	102.905 3-1 3-2	106.4 3-1 3-2	107.868 3-1 3-2	112.40 3-1 3-2	114.82 3-1 3-2	118.69 3-1 3-2	121.75 3-1 3-2	127.60 3-1 3-2	126.9045 3-1 3-2	131.30 3-1 3-2		
55 +1 Cs	56 +2 Ba	57 +3 La	58 +3 Ce	59 +3 Pr	60 +3 Nd	61 +3 Pm	62 +2 Sm	63 +2 Eu	64 +3 Gd	65 +3 Tb	66 +3 Dy	67 +3 Ho	68 +3 Er	69 +3 Tm	70 +2 Yb	71 +3 Lu			
132.9054 3-1 3-2	137.3 3-1 3-2	138.9055 3-1 3-2	140.9077 3-1 3-2	144.24 3-1 3-2	147 3-1 3-2	150.4 3-1 3-2	151.96 3-1 3-2	157.25 3-1 3-2	158.925 3-1 3-2	162.50 3-1 3-2	164.9304 3-1 3-2	167.26 3-1 3-2	173.04 3-1 3-2	175.07 3-1 3-2	173.04 3-1 3-2	174.967 3-1 3-2			
87 +1 Fr	88 +2 Ra	89 +3 Ac	90 +4 Th	91 +5 Pa	92 +6 U	93 +3 Np	94 +4 Pu	95 +5 Am	96 +6 Cm	97 +3 Bk	98 +3 Cf	99 +3 Es	100 +3 Fm	101 +2 Md	102 +2 No	103 +3 Lr			
(223) 3-1 3-2	(226) 3-1 3-2	(227) 3-1 3-2	231.0369 3-1 3-2	238.0289 3-1 3-2	238.0289 3-1 3-2	237.0482 3-1 3-2	238.0289 3-1 3-2	244.0642 3-1 3-2	244.0642 3-1 3-2	247.0732 3-1 3-2	251.1089 3-1 3-2	252.0839 3-1 3-2	257.1037 3-1 3-2	261.1018 3-1 3-2	265.1010 3-1 3-2	269.1009 3-1 3-2			
																		-O-P-O	

金属																非金属			
I ^a	II ^a	III ^b	IV ^b	V ^b	VI ^b	VII ^b	VIII	IX ^b	X ^b	XI ^b	II ^b	III ^a	IV ^a	V ^a	VI ^a	VII ^a	0	电子轨道	
1 +1 H 1.0079 1	2 +2 He 4.00260 2																	K	
3 +1 Li	4 +2 Be																	K-L	
6.939 2-1 2-2	9.0122 2-1 2-2																	K-L	
11 +1 Na	12 +2 Mg																	K-L-M</	

表 1-2 金属晶体原子位置、原型、结构符号、空间群标记和点阵参数

0	I	II	III	H-1 (-58) ▲ ⊗ xx ▲ (-36) ⊗ xx										IV	V	VI	VII
He-2	Li-3 ⊗ (+23) BCC*	Be-4 ● (-11) HCP*	B-5 ⊗ (-29) ⊗ xx	在括号内的原子尺寸因子是 23.89°C (75°F) 时小于 (-) 或大于 (+) γ-Fe (FCC) 的百分数。 考虑点阵配位数 (CN)，除了间隙原子 H、B、C、N 和 O 为 6 外，其余 CN 为 12。 VI、VIIb、VII 和 VIIIb 族与金属形成离子化合物。 注 1: 镧系 (57~71) 和铷系 (90~103) 稀土元素省略。 注 2: C 化合价是 4，N 和 P 是 3。 注 3: (2) 和 (1) 不是合金化合价。										C-6 ⊗ (-34) ⊗ xx	N-7 ⊗ (-36) ⊗ xx	O-8 ⊗ (-33) ⊗ xx	F-9
Ne-10	Na-11 ⊗ (+50) BCC*	Mg-12 ⊗ (+27) HCP	Al-13 ⊗ (+14) FCC											Si-14 ● (+7) xx	P-15 ● (+2) xx	S-16 ● (+1) xx	Cl-17 xx
FCC (其他)																	
0	Ia	IIa	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	VIII				IIb	IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb
Ar-18	K-19 ⊗ (+86) BCC	Ca-20 ⊗ (+56) FCC*	Sc-21 ⊗ (+29) HCP*	Ti-22 ⊗ (+16) HCP*	V-23 ● (+6) BCC	Cr-24 ● (+1) BCC	Mn-25 ● (+1) xx*	Fe-26 ● (0) BCC*	Co-27 ● (-1) HCP*	Ni-28 ● (-1) FCC	Cu-29 ● (+1) FCC	Zn-30 ● (+6) HCP	Ga-31 ● (+12) xx	Ge-32 ● (+9) xx	As-33 ● (+11) xx	Se-34 ● (+11) xx	Br-35 xx
Kr-36	Rb-37 ⊗ (+97) BCC	Sr-38 ⊗ (+71) FCC*	Y-39 ⊗ (+42) HCP*	Zr-40 ⊗ (+27) HCP*	Cb-41 ⊗ (+15) BCC	Mo-42 ● (+10) BCC	Tc-43 ● (+8) HCP	Ru-44 ● (+6) HCP	Rh-45 ● (+6) FCC	Pd-46 ● (+9) FCC	Ag-47 ● (+14) FCC	Cd-48 ⊗ (+20) HCP	In-49 ⊗ (+25) xx	Sn-50 ⊗ (+23) xx	Sb-51 ⊗ (+27) xx	Te-52 ⊗ (+27) xx	I-53 xx
Xe-54	Cs-55 ⊗ (+12) BCC	Ba-56 ⊗ (+76) BCC	La-57 ⊗ (+48) HCP*	Hf-72 ⊗ (+26) HCP*	Ta-73 ⊗ (+16) BCC	W-74 ● (+11) BCC	Re-75 ● (+9) HCP	Os-76 ● (+7) HCP	Ir-77 ● (+8) FCC	Pt-78 ● (+10) FCC	Au-79 ● (+14) FCC	Hg-80 ⊗ (+25) xx	Tl-81 ⊗ (+36) HCP*	Pb-82 ⊗ (+39) FCC	Bi-83 ⊗ (+35) xx	Po-84 ⊗ (+40) xx	At-85
Rn-86	Fr-87	Ra-88	Ac-89 ⊗ (+49) FCC														
合金 化合价	1	2	3	4	5	6	6	6	6	6	5.56	4.56	3.56	2.56 注 2	1.56 注 2	(2) 注 3	(1) 注 3

结构

置换式固溶体

- 有利的尺寸因子: $0 \sim \pm 13\%$
- 边界的尺寸因子: $\pm 14\% \sim \pm 16\%$
- ⊗ 不利的尺寸因子: $< -16\%$ 或 $> 16\%$

间隙式固溶体

▲有利的尺寸因子: >-40%
△边界的尺寸因子: -30%~-40%
▲不利的尺寸因子: <-30%

结构

BCc—体心立方
FCC—面心立方
HCP—密集六方
XX—非体心，非面心或密集六方，
通常是更复杂的结构

*——在23.89°C(75°F)时的结构
+——也是FCC ≠——也是BCC

*——在23.89°C(75°F)时的结构
+——也是FCC ≠——也是BCC

与铁合金化形成的 γ —Fe(FCC)相区的类型

形成 γ 相圈, 例如Cr

形成有限 γ 相圈, 例如B

扩大 γ 区,例如Ni

◆ 缩小 γ 区, 例如C

2 金属的晶体结构

2.1 金属的一般特征

已知 106 种化学元素中有 83 种是金属元素。化学元素周期表的右部是非金属，而中间部分的 Si、As、Se、Te 被看做是居于金属和非金属间的过渡元素。

固态金属和个别液态金属具有下列特征：

- 1) 高的导热、导电性。
- 2) 电阻温度系数为正值，即随温度升高，电阻增大。
- 3) 约 30 种金属具有超导性，即接近绝对零度时，电阻急剧减小，趋近于零。
- 4) 具有热电子发射功能，即加热到较高温度能发射出电子。
- 5) 有较大的塑性变形特性。
- 6) 具有优异的反射能力，不透明，有光泽。

所有金属和合金都是结晶体，金属中的原子（离子）都呈规则排列，形成所谓的点阵（晶格）。物质金属状态的主要特性是存在自由电子。金属状态在于多个原子的组合，当这些原子相互接近时，其外层电子会脱离单个原子成为共同电子，即电子聚集，并在带正电和在空间周期排列的离子间，按一定能阶（布里渊带）自由运动。因此，离子-电子体系金属的稳定性取决于带正电离子和聚集电子间的相互作用，这种离子骨架和电子云间的相互作用被称作金属键。

金属的键合力取决于离子和电子间的排斥力和吸引力比值。原子（离子）间的距离要保证相互的作用能最低（见图 2-1）。与此状态相应的是图中的平衡态 R_0 。要针对压力或引力做一定量的功才能使原子（离子）间距小于或大于 R_0 。当金属中的原子作规则排列，形成正确点阵时，就是原子间最小作用能的理想状态。

晶体点阵中原子潜（势）能的变化特征示于图 2-1b。原子（离子）占据的位置具有最低潜能。由于相互作用力不平衡，表面层原子具有较高潜能，在原子（离子）周围形成球面应力场。

掌握和研究金属学、物理冶金和热处理原理必须了解下面一系列专业术语和概念。

1) 纯金属：任何纯金属都或多或少含有杂质，绝对纯的金属是不存在的。所谓纯金属可理解为基本

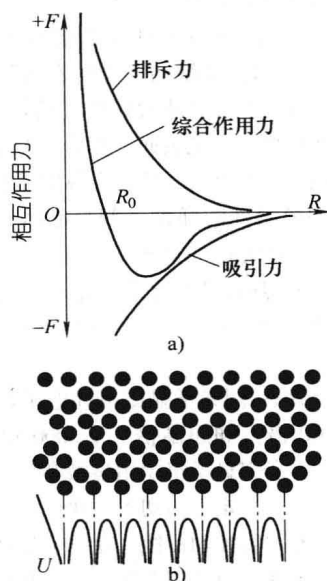


图 2-1 两原子相互作用力和
晶体点阵中原子势能变化

a) 两原子相互作用力 b) 晶体点阵中原子势能变化

金属含量（质量分数）在 99.99% ~ 99.999% 范围的金属。

2) 工业纯金属：是指杂质含量（质量分数）在 0.1% ~ 0.5%、纯度（质量分数）为 99.5% ~ 99.9%，以普通方式冶炼成的金属。

3) 合金：将两种或多种金属或金属与非金属用熔炼法或烧结法（很少用沉积法）制备出的是合金。纯金属在一般组织状态下的强度不高，不具备各种工况要求的性能，故很少有工业应用。合金的强度高，力学、物理、化学性能好，具有金属状态的各种特性，故被广泛使用。

4) 晶粒：用普通方法生产的金属（合金）是由相互不同取向的晶体微粒（0.1 ~ 1000 μm ）构成的多晶体。由于结晶条件不同，晶体具有不规则形状，这些形状各异的晶体就是晶粒。

5) 相：平衡状态下的相组合被称作系统。具有一定成分、晶体结构、性质、相同聚集状态，且和其他部分有分割界面的系统组合部分被称作相。例如，均匀的纯金属或合金是单相系统，同时有液态合金（金属）和固态结晶的状态则为双相系统。如果固态

合金具有金属晶粒基体和碳化物微粒, 则此合金为双相合金。

6) 组织: 相应相在金属和合金中的形状、尺寸和相互排列特征。合金的组织成分被看成是具有独特性质和相同结构的合金独立部分。

7) 宏观组织: 肉眼可见或低倍放大 (30 ~ 40 倍) 观察的金属和合金结构。研究宏观组织使用宏观磨片。为制备磨片, 可从大坯件 (铸锭、锻件等) 或零件上切下样块、磨光表面, 然后用专用腐蚀剂侵蚀。研究宏观磨片可以得知铸态金属的晶粒形貌和分布、自由锻和模锻件的纤维 (变形晶体) 取向、破坏金属密实性的缺陷 (疏松、气孔、缩孔、裂纹等), 由于结晶、热处理和化学热处理 (渗碳、渗氮等) 导致的合金化学成分的不均匀性 (硫、磷偏析) 等。

8) 显微组织: 用光学显微镜和电子显微镜在高倍 (100 ~ 2000 倍) 和超高倍 (> 5000 倍) 放大下观察到的组织。研究显微组织用显微磨片。为此, 从半成品或零件上按一定方向切下一块试样, 磨光其一个平面, 并用专用腐蚀剂侵蚀。在电子显微镜下观察显微组织不用磨片, 而是用金属制件上截取的薄片经腐蚀减薄制成的薄膜或从试样表面拓下的复膜。

9) 显微镜的分辨 (能) 力: 最小可分辨的物件 (组织细节) 尺寸。光学显微镜的最高分辨力是 0.2, 有效放大倍率是 2000 倍。进一步提高光学显微镜的放大倍率是无益的, 还是看不到更细的组织细节, 因为其分辨力是由光的波动本质决定的。电子显微镜利用波长极短 $[(0.04 \sim 0.12) \times 10^{-1} \text{ nm}]$ 的电子束可以把研究对象的细节区别到 0.2 ~ 0.5 nm。用光学显微镜可显示出相的分布、形状和尺寸。用电子显微镜能仔细研究金属的精细结构 (亚结构), 还可直接观察金属的晶体结构缺陷。

10) 断口和断口分析: 金属的破断表面即为断口。断口类型有韧性断口、解理断口、疲劳断口、氢脆断口之分, 取决于加载条件、金属 (合金) 金相结构和显微组织、熔炼与成形工艺、热处理、零件工作温度和介质。断口研究也有宏观与微观 (放大 5×10^4 倍以上) 之分。断口的肉眼观察和用低倍光学显微镜的研究被称为断口分析。在电子显微镜下研究断口的精细组织特征被称为显微断口分析。用断口分析法可研究金属材料的破断机理、组织、工艺和其他因素对破坏行为的影响。断口显微分析用扫描式电子显微镜, 靠一次电子束在被研究断口表面连续移动和由表面发射的二次电子流形成图像。扫描电镜分辨力为 15 ~ 20 nm, 比透射电镜低。

2.2 金属的原子晶体结构

(1) 晶体结构 可理解为晶体中原子的相互位置。晶体由按一定顺序排列在三维空间、延续重复的原子 (离子) 群构成。

(2) 晶体点阵 为了描述原子晶体结构, 采用了空间点阵或晶体点阵的概念。晶体点阵 (见图 2-2) 是一种想象的空间网格, 其节点被原子 (离子) 占据, 形成金属在已知条件下的固态结晶体。图 2-2 中用粗线分隔成一个最小的平行六面体, 使其在空间沿三轴线依次叠加, 就可以绘出整体点阵。

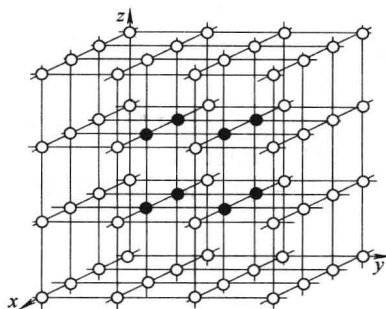


图 2-2 晶体点阵

(3) 单位晶胞 能表现金属原子结构晶体的最小容积。

(4) 晶系 晶体空间点阵 (晶格) 按轴单位和轴间夹角关系可划分为七个晶系。设晶胞 (平行六面体) 棱边为 a 、 b 、 c , 棱边夹角为 α 、 β 、 γ , 则和七个晶系相应的有以下晶胞类型:

- ① 三斜晶系, $a \neq b \neq c$, $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$;
- ② 单斜晶系, $a \neq b \neq c$, $\alpha = \gamma = 90^\circ$, $\beta \neq 90^\circ$;
- ③ 斜方晶系, $a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$;
- ④ 六方晶系, $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$;
- ⑤ 斜方六面晶系, $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$;
- ⑥ 正方晶系, $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$;
- ⑦ 立方晶系, $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 。

(5) 简单点阵 每个单位晶胞平均只有一个原子的晶体点阵。

(6) 复杂点阵 每个单位晶胞平均有几个原子的晶体点阵。

(7) 金属的晶体点阵 大多数重要工业金属都形成以下具有密排原子、高度对称的复杂点阵之一: 体心立方, 面心立方, 六方。图 2-3 所示为条件设定的多种金属晶体点阵和原子密排方式。在原子密排图中所示的球体是相互接触的, 但不应该认为这些球体