

铸造手册

铸造非铁合金

3

中国机械工程学会铸造分会 组编
戴圣龙 主编

第3版



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

铸造手册

第 3 卷

铸造非铁合金

第 3 版

中国机械工程学会铸造分会 组编

戴圣龙 主编



机械工业出版社

《铸造手册》共分为铸铁、铸钢、铸造非铁合金、造型材料、铸造工艺和特种铸造6卷出版。本书为第3卷《铸造非铁合金》。

本卷第3版在第2版的基础上,进行了全面的修订,更新了技术标准和工艺规范,增加了部分国外标准资料,完善和补充了铸造非铁合金新的技术内容。本卷共11章,绪论介绍了非铁合金的发展简史、前景与展望;基础知识介绍了非铁合金概念、相图、熔炼基本原理和铸造、物理力学性能测试;铸造铝合金、铸造镁合金、铸造钛合金、铸造铜及铜合金、铸造锌合金、铸造轴承合金、铸造高温合金各章分别详细叙述了各种铸造非铁合金的牌号、化学成分、力学性能、金相组织、应用特点、熔炼与浇注工艺、热处理规范、质量控制和缺陷分析等内容;手册还列举了铸造非铁合金常用的金属材料和非金属材料、熔炼炉等相关资料。附录中列出了铸造铝合金、铸造镁合金、铸造铜合金、铸造锌合金的国际标准、国外主要国家标准和国内外标准对照等资料。

本手册主要供从事铸造工作的技术人员使用,也可以供从事产品设计人员、材料研究的科研人员及高等院校相关专业的师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

铸造手册. 第3卷, 铸造非铁合金/戴圣龙主编; 中国机械工程学会铸造分会组编. —3版. —北京: 机械工业出版社, 2011. 4

ISBN 978-7-111-33638-9

I. ①铸… II. ①戴…②中… III. ①铸造-手册
②铸造合金-有色金属合金-手册 IV. ①TG2-62②TG29-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第034131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: 余茂祚

责任编辑: 余茂祚

责任校对: 张莉娟 任秀丽 封面设计: 姚毅

责任印制: 杨曦

北京京丰印刷厂印刷

2011年7月第3版·第1次印刷

184mm×260mm·47.25印张·4插页·1559千字

0 001—3 000册

标准书号: ISBN 978-7-111-33638-9

定价: 168.00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

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

铸造手册第3版编委会

顾 问	周尧和	柳百成		
编委会主任	李新亚	李荣德		
副 主 任	娄延春	李 奇		
委 员	张伯明	娄延春	戴圣龙	
	黄天佑	李新亚	姜不居	
	李超群	苏仕方	余茂祚	

铸造非铁合金卷第3版编委会

主 编	戴圣龙			
副 主 编	王红红	刘金水	王英杰	
编 委	郎业方	杨守杰	丁文江	
	张兴国	徐玉松	程和法	
	张福全	黄 敏		
主 审	任忠鸣			
总 策 划	余茂祚			

铸造手册第2版编委会

顾问 陶令桓 周尧和

主任委员 赵立信

副主任委员 房贵如

委员 (按姓氏笔画为序)

王君卿 刘兆邦 刘伯操

张伯明 余茂祚 (常务)

范英俊 钟雪友 姚正耀

黄天佑

铸造非铁合金卷第2版编委会

主编 刘伯操

副主编 郎业方 杨长贺

编委 王红红 刘金水 程和法

徐玉松 陈荣章

主审 翟春泉

第3版前言

建国以来,我国铸造行业获得很大发展,年产量超过3500万t,位居世界第一;从业人员超过300百万人,是世界规模最大的铸造工作者队伍。为满足行业及广大铸造工作者的需要,机械工业出版社于1991年编辑出版了《铸造手册》,2002年出版了第2版,手册共6卷813万字。第2版手册自出版发行以来,先后分别重印4~6次,深受广大铸造工作者欢迎。两院院士、中国工程院副院长师昌绪教授,科学院院士、上海交通大学周尧和教授,科学院院士、机械科学研究院名誉院长雷天觉教授,工程院院士、中科院沈阳金属研究所胡壮麒教授,工程院院士、西北工业大学张立同教授,工程院院士清华大学柳百成教授等许多著名专家、学者都对这套手册的出版给予了高度评价,认为手册内容丰富、数据可靠,具有科学性、先进性、实用性。这套手册的出版发行对跟踪世界先进技术、提高铸件质量、促进我国铸造技术进步起到了积极推进作用,在国内外产生较大影响,取得了显著的社会效益及经济效益。第1版手册1995年获机械工业出版社科技进步(暨优秀图书)一等奖,1996年获中国机械工程学会优秀工作成果奖,1998年获机械工业部科技进步二等奖。

第2版手册出版后的近8年来,科学技术迅猛发展,先进制造技术不断涌现,标准及工艺参数不断更新,特别是高新技术的引入,使铸造行业的产品及技术结构发生很大变化,手册内容已不能适应当前生产实际及技术发展的需要。应广大读者要求,我们对手册进行了再次修订。第3版修订工作由中国机械工程学会铸造分会和机械工业出版社负责组织和协调。

修订后的手册基本保留了第2版风格,仍由铸铁、铸钢、铸造非铁合金、造型材料、铸造工艺、特种铸造共6卷组成。第3版除对第2版已显陈旧落后的内容进行删改外,着重增加了近几年来国内外涌现出的新技术、新工艺、新材料、新设备的相关内容,并以最新的国内外技术标准替换已作废的旧标准,同时采用法定计量单位,修改内容累计达40%以上。第3版手册详细介绍了先进实用的铸造技术,数据翔实,图文并茂,基本反应了21世纪初的国内外铸造领域的技术现状及发展趋势。新版手册将以崭新的面貌为铸造工作者提供一套完整、先进、实用的技术工具书,对指导生产、推进21世纪我国铸造技术进步,使我国从铸造大国向铸造强国转变将发挥积极作用。

按GB/T 229—2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》规定,材料冲击性功用吸收能量KV、KU表示,V、U分别代表试样缺口形状。但由于2007年后新制定的一些材料国家标准仍用过去的 A_K 和 a_K ,而且脆性材料的冲击试样往往不开缺口,故本手册在各章材料力学性能中仍使用符号 A_K 和 a_K 表示。

第3版手册铸造的编写班子实力雄厚,共有来自工厂、研究院所及高等院校40多个单位的110名专家教授参加编写,而且有不少是新起之秀。各卷主编是:

第1卷铸铁 中国农业机械化科学研究院原副院长张伯明研究员。

第2卷铸钢 沈阳铸造研究所所长姜延春研究员。

第3卷铸造非铁合金 北京航空材料研究院院长戴圣龙研究员。

第4卷造型材料 清华大学黄天佑教授。

第5卷铸造工艺 机械科学研究总院院长李新亚研究员。

第6卷特种铸造 清华大学姜不居教授。

本书为《铸造手册》的第3卷铸造非铁合金,编写组织工作得到北京航空材料研究院的大力支持,并在该卷编委会的主持下,经过许多同志辛勤劳动完成的。在主编戴圣龙研究员全面负责的基础上,由副主编王红红研究员、刘金水教授和王英杰高级工程师主持编写工作,并与各编委共同进行各章的审定工作。各章编写分工如下:

第1、2章 大连理工大学:张兴国教授。

第3章 北京航空材料研究院:王英杰高级工程师。

第4章 上海交通大学:丁文江教授、袁广银教授。

第5章 北京航空材料研究院:王红红研究员、王红工程师。

第6章 江苏科技大学:徐玉松教授。

第7章 湖南大学:刘金水教授、张福全教授。

第8章 合肥工业大学:程和法教授、陈翌庆教授、苏勇教授。

第9章 北京航空材料研究院:李青高级工程师。

第10章 北京航空材料研究院:黄敏高级工程师。

第11章 北京航空材料研究院:郎业方研究员;

辽宁锦州电炉有限责任公司:佟勃勇总经理。

本书统稿工作由王英杰、郎业方协助责任编辑余茂祚研究员级高工共同完成。主审为上海大学任忠鸣教授。

本书在编写过程中得到北京航空材料研究院、大连理工大学、江苏科技大学、湖南大学、合肥工业大学、上海交通大学、辽宁锦州电炉有限责任公司、上海大学等单位的大力支持,在此表示感谢。由于编者水平有限,不周之处,在所难免,敬请读者指正。

中国机械工程学会铸造分会
机械工业出版社

第2版前言

建国以来,我国铸造行业获得很大发展,年产量超过千万吨,位居世界第二;从业人员超过百万人,是世界规模最大的铸造工作者队伍。为满足行业及广大铸造工作者的需要,机械工业出版社于1991年编辑出版了《铸造手册》,共6卷610万字。第1版手册自出版发行以来,先后分别重印3~6次,深受广大铸造工作者欢迎。两院院士、中国工程院副院长师昌绪教授,科学院院士、上海交通大学周尧和教授,科学院院士、机械科学研究院名誉院长雷天觉教授,工程院院士、中科院沈阳金属研究所胡壮麒教授,工程院院士、西北工业大学张立同教授等许多著名专家学者都对这套手册的出版给予了高度评价,认为手册内容丰富、数据可靠,具有科学性、先进性、实用性。这套手册的出版发行对跟踪世界先进技术、提高铸件质量、促进我国铸造技术进步起到了积极推进作用,在国内外产生较大影响,取得了显著的经济效益及社会效益。手册1995年获机械工业出版社科技进步(暨优秀图书)一等奖,1996年获中国机械工程学会优秀工作成果奖,1998年获机械工业部科技进步二等奖。

第1版手册出版后的近十年来,科学技术迅猛发展,先进制造技术不断涌现,标准及工艺参数不断更新,特别是高新技术的引入,使铸造行业的产品及技术结构发生很大变化,手册内容已不能适应当前生产实际及技术发展的需要。应广大读者要求,我们对手册进行了修订。第2版修订工作由中国机械工程学会铸造分会和机械工业出版社负责组织和协调。

修订后的手册基本保留了第1版风格,仍由铸铁、铸钢、铸造非铁合金、造型材料、铸造工艺、特种铸造共6卷组成。为我国进入WTO,与世界铸造技术接轨,并全面反映当代铸造技术水平,第2版除对第1版已显陈旧落后的内容应进行删改外,着重增加了近十几年来国内外涌现出的新技术、新工艺、新材料、新设备的相关内容,并以最新的国内外技术标准替换已作废的旧标准,同时采用新的计量单位,修改内容累计达40%以上。第2版手册详细介绍了先进实用的铸造技术,数据翔实,图文并茂,基本反应了20世纪90年代末至21世纪初国内外铸造领域的技术现状及发展趋势。新版手册将以崭新的面貌为铸造工作者提供一套完整、先进、实用的技术工具书,对指导生产、推进21世纪我国铸造技术进步将发挥积极作用。

第2版手册的编写班子实力雄厚,共有来自工厂、研究院所及高等院校40多个单位的109名专家教授参加编写。各卷主编是:

第1卷 铸铁 中国农业机械化研究院副院长张伯明研究员。

第2卷 铸钢 中国第二重型机械集团公司总裁姚正耀研究员级高工。

第3卷 铸造非铁合金 北京航空材料研究院院长刘伯操研究员。

第4卷 造型材料 清华大学黄天佑教授。

第5卷 铸造工艺 沈阳铸造研究所总工程师王君卿研究员。

第6卷 特种铸造 中国新兴铸管集团公司董事长范英俊研究员级高工。

本书为《铸造手册》的第3卷《铸造非铁合金》,编写组织工作得到北京航空材料研究院的大力支持,并在该卷编委会的主持下,经过许多同志辛勤劳动完成的。在主编刘伯操研究员全面负责的基础上,由副主编郎业方研究员、杨长贺教授主持编写工作,并与各编委共同进行各章的审定工作。各章编写分工如下:

第1章、第2章 大连理工大学:杨长贺教授。

第3章 北京航空材料研究院：王英杰工程师、戴圣龙研究员、刘伯操研究员。

第4章 北京航空材料研究院：赵志远研究员。

第5章 北京航空材料研究院：薛志庠研究员、周彦邦研究员、王红红研究员。

第6章 华东船舶工程学院：徐玉松副教授（原洛阳船舶材料研究所）。

第7章 湖南大学：刘金水教授。

第8章 合肥工业大学：程和法副教授、陈翌庆副教授。

第9章 北京航空材料研究院：陈荣章研究员。

第10章 北京航空材料研究院：罗太平高工。

第11章 北京航空材料研究院：郎业方研究员。

附录 北京航空材料研究院：袁成祺高工。

本书统稿工作由陈荣章研究员、郎业方研究员协助责任编辑余茂祚研究员级高工共同完成。主审为上海交通大学翟春泉教授。

本书在编写过程中得到北京航空材料研究院、大连理工大学、华东船舶工程学院、洛阳船舶材料研究所、湖南大学、合肥工业大学、上海交通大学等单位的大力支持，还得到了浙江永康华洋机械有限公司董事长楼海淮和北京航空材料研究院贾泮江工程师、余应梅高工的支持和帮助，在此一并表示感谢。由于编者水平有限，不周之处，在所难免，敬请读者指正。

中国机械工程学会铸造分会编译出版工作委员会

本书常用的量和单位符号

一、物理量单位和符号

名 称	符号	单位	名 称	符号	单位
应力	σ	MPa	疲劳裂纹扩展速率	da/dN	mm/周
最大应力	$\sigma_{\max}$		疲劳极限、疲劳强度极限	σ_D	MPa
最小应力	$\sigma_{\min}$		弯曲疲劳极限	σ_{-D}	
平均应力	σ_m		扭转比例极限	τ_P	
临界应力	σ_c		扭转疲劳极限	τ_D	
塑性应变率	ε_p	%	应力循环周	N	
变形率、蠕变率	ε		应力比	R	
抗拉强度	R_m	MPa	应变比	R_ε	
抗压强度	R_{mc}		泊松比	μ	
规定非比例压缩强度	R_{pc}		强度系数	η	
上屈服强度	R_{eH}		离散系数(变异系数)	C_V	
下屈服强度	R_{eL}		缺口敏感系数	σ_{bH}/R_m	
屈服强度	$R_{p0.2}$		疲劳缺口系数	K_f	
条件屈服强度	$R_{p0.5}$		理论应力集中系数	K_t	
抗弯强度	σ_{bb}		断后伸长率	$A, A_{11.3}$	%
规定非比例延伸强度	R_p		断面收缩率	Z	
抗剪强度	τ_b		布氏硬度	HBW	
抗扭强度	τ_m		洛氏硬度	HRA	
蠕变强度	$\sigma_{p/t}^0, \sigma_{0.1/100}^0$		马氏硬度	HM	
疲劳强度	S		弹性模量	E	GPa
弯曲疲劳强度	S_D		压缩弹性模量	E_c	
疲劳强度极限	S_{-1D}		弹性模量(动)	E_D	
旋转弯曲疲劳强度	S_{PD}		切变模量	G	
疲劳极限	σ_D		样本标准差	S	
抗扭屈服强度	$\tau_{0.3}$		样本均值	X	
持久强度	σ_{st}^0		样本数	n	
承载强度	σ_{bru}		密度	ρ	Mg/m ³ 、g/cm ³
承载屈服强度	σ_{bry}		热导率	λ	W/(m·K)
缺口抗拉强度	σ_{bH}		电导率	γ	S/m、% IACS
缺口疲劳极限	σ_{DH}		电阻率	ρ	10 ⁻⁶ Ω·m
缺口持久强度	σ_{tH}^0		比热容	c	W/(kg·K)
弹性极限	σ_e		温度	t, T, θ	℃、K
疲劳极限	σ_{-1}		长度	l, L	cm、mm、m
蠕变极限、蠕变强度极限	$\sigma_{0.1/100}^t$	MPa	宽度	b	
冲击吸收能量	KU, KV	J	厚度	δ	
线(膨)胀系数	α_l	10 ⁻⁶ /K	时间	t	s
平面应变断裂、断裂韧度	K_{IC}	MN/m ^{3/2}	物质的量	n	mol
平面应力断裂	K_C	MPa	摩擦因数	μ	

二、合金铸造方法、变质处理代号

S——砂型铸造	Li——离心铸造
K——壳型铸造	La——连续铸造
J——金属型铸造	F——铸态
R——熔模铸造	B——变质处理
Y——压力铸造	

目 录

第3版前言

第2版前言

本书常用的量和单位符号

第1章 绪论	1
1.1 铸造非铁合金的发展简史	1
1.1.1 铸造铝合金	1
1.1.2 铸造铜合金	1
1.1.3 其他铸造非铁合金	3
1.2 铸造非铁合金的前景与展望	3
1.2.1 广阔的前景	3
1.2.2 可望的进展	3
1.2.3 不懈努力,赶超国际先进水平	4
参考文献	4
第2章 铸造非铁合金基础知识	5
2.1 元素的分类、物理性能及铸造非铁合金的概念	5
2.1.1 元素的分类	5
2.1.2 元素的物理性能	5
2.1.3 铸造非铁合金的概念	5
2.2 常用非铁合金相图	12
2.2.1 Al基二元合金相图	12
2.2.2 Al基三元合金相图	35
2.2.3 Mg基二元合金相图	37
2.2.4 Ti基二元合金相图	49
2.2.5 Cu基二元合金相图	59
2.2.6 Cu基三元合金相图	76
2.2.7 Zn基二元合金相图	77
2.2.8 Sn基二元合金相图	79
2.2.9 Pb基二元合金相图	89
2.2.10 Ni基二元合金相图	97
2.2.11 Co基二元合金相图	113
2.3 熔炼过程的物理化学基础与精炼效果的检测	116
2.3.1 各种金属氧化物的性质	116
2.3.2 金属液的吸气与除气	117
2.3.3 金属液的氧化与脱氧	120
2.3.4 精炼效果的检测方法	123
2.4 合金的铸造性能及其测试	127
2.4.1 流动性	127

2.4.2 收缩	130
2.4.3 热裂	133
2.4.4 铸造应力	136
2.5 合金的物理性能及其测试	138
2.5.1 电阻	138
2.5.2 密度	138
2.5.3 热导率	138
2.5.4 线胀系数	139
2.6 材料拉伸性能及其测试	139
2.6.1 拉伸性能	139
2.6.2 拉伸试验速度	140
2.6.3 拉伸试样	140
2.6.4 引伸计	141
2.6.5 高温拉伸试验	142
2.6.6 低温拉伸试验	142
参考文献	143
第3章 铸造铝合金	144
3.1 合金及其性能	144
3.1.1 Al-Si合金	144
3.1.2 Al-Cu合金	182
3.1.3 Al-Mg合金	208
3.1.4 Al-Zn合金	213
3.1.5 其他铸造铝合金	217
3.2 熔炼和浇注	219
3.2.1 金属炉料	219
3.2.2 熔炼用工艺材料	231
3.2.3 熔炼及浇注工艺	234
3.2.4 炉前检查	248
3.3 热处理	253
3.3.1 热处理工艺分类及状态符号意义	253
3.3.2 热处理设备及仪表	256
3.3.3 热处理工艺参数及操作	257
3.3.4 热处理质量控制	265
3.4 质量控制和铸造缺陷	269
3.4.1 质量控制项目和方法	269
3.4.2 常见的铸造缺陷	272
3.5 表面处理	274
3.5.1 机械精整	274
3.5.2 阳极氧化	275

3.5.3 镀层	276	5.2.2 铸件的熔铸工艺	358
3.5.4 化学抛光和电解抛光	277	5.3 热处理	364
3.5.5 化铣	277	5.3.1 热处理的种类和工艺参数	364
3.5.6 修补	277	5.3.2 铸件热处理后表面污染的处理	366
3.5.7 涂漆	279	5.3.3 钛合金铸件热处理效果的评定	366
3.5.8 喷丸和抛丸	280	5.4 钛及其合金的铸件设计	367
参考文献	281	5.4.1 铸造工艺分类及应用	367
第4章 铸造镁合金	282	5.4.2 铸件结构设计	369
4.1 合金及其性能	283	5.4.3 铸件工艺设计	369
4.1.1 镁-铝系合金	283	5.4.4 浇冒口系统	370
4.1.2 镁-锌-锆系合金	291	5.5 钛合金铸造用造型材料及造型工艺	371
4.1.3 镁-稀土金属-锆系合金	296	5.5.1 造型材料的选择	371
4.2 熔炼和浇注	304	5.5.2 金属型及石墨加工型的铸造 工艺	373
4.2.1 原材料与回炉料	304	5.5.3 石墨捣实型工艺	374
4.2.2 中间合金	304	5.5.4 熔模精密铸造工艺	375
4.2.3 熔剂	305	5.5.5 其他造型工艺	377
4.2.4 熔炼前的准备工作	306	5.6 钛铸件的清理精整	377
4.2.5 镁合金的熔炼	310	5.6.1 清理精整	377
4.2.6 浇注工艺	312	5.6.2 钛铸件的常见缺陷和修复	377
4.2.7 熔炼浇注安全技术	314	5.7 钛合金铸件的质量控制	378
4.3 热处理	315	参考文献	380
4.3.1 热处理状态和选择	315	第6章 铸造铜及铜合金	381
4.3.2 热处理工艺参数及影响	315	6.1 合金及其性能	383
4.3.3 热处理用保护气氛	317	6.1.1 纯铜	383
4.3.4 热处理质量控制	317	6.1.2 青铜	387
4.3.5 焊后热处理	319	6.1.3 黄铜	425
4.3.6 热处理安全技术	320	6.1.4 白铜	440
4.4 铸造镁合金表面处理	320	6.1.5 特殊用途的铜合金	446
4.4.1 化学氧化处理	320	6.2 熔炼和浇注	452
4.4.2 阳极氧化	325	6.2.1 原材料和回炉料	452
4.5 质量控制和常见的铸造缺陷	326	6.2.2 中间合金	453
4.5.1 质量控制项目和方法	326	6.2.3 熔剂	457
4.5.2 常见的缺陷和防止方法	329	6.2.4 熔炼准备	462
参考文献	332	6.2.5 熔炼工艺	467
第5章 铸造钛合金	333	6.3 热处理和表面处理	480
5.1 合金及其性能	333	6.3.1 热处理	480
5.1.1 合金牌号	333	6.3.2 表面处理	484
5.1.2 合金化学成分	333	6.4 铸造缺陷及修补	488
5.1.3 物理和化学性能	335	6.4.1 铸造缺陷及防止方法	488
5.1.4 力学性能	341	6.4.2 修补	488
5.1.5 工艺性能	348	参考文献	498
5.1.6 显微组织	351	第7章 铸造锌合金	500
5.1.7 特点和应用	352	7.1 合金及其性能	500
5.2 熔炼和浇注	353	7.1.1 合金牌号	500
5.2.1 自耗电极铸锭的制备工艺	353		

7.1.2	化学成分	500
7.1.3	物理和化学性能	502
7.1.4	力学性能	504
7.1.5	摩擦磨损特性	508
7.1.6	工艺性能	509
7.1.7	显微组织	512
7.1.8	特点和用途	515
7.2	熔炼和浇注	515
7.2.1	熔炼用的金属材料和非金属材料	515
7.2.2	熔炼工艺	515
7.2.3	净化与变质处理	516
7.2.4	炉前检查	517
7.2.5	浇注	517
7.3	热处理	517
7.3.1	稳定化处理(低温时效)	517
7.3.2	均匀化	518
7.4	表面处理	518
7.4.1	电镀	518
7.4.2	涂漆	519
7.4.3	金属喷镀	519
7.4.4	阳极氧化处理	519
7.5	质量控制	520
7.5.1	质量检查	520
7.5.2	铸造缺陷分析	521
7.6	其他铸造锌合金	522
7.6.1	减振锌合金	522
7.6.2	耐磨锌合金	522
7.7	铸造锌基复合材料	522
7.7.1	分类	522
7.7.2	制备方法	523
7.7.3	性能	523
	参考文献	525
第8章	铸造轴承合金	526
8.1	锡基和铅基轴承合金	527
8.1.1	锡基轴承合金	527
8.1.2	铅基轴承合金	530
8.1.3	锡基和铅基轴承合金的熔铸	536
8.1.4	锡基和铅基合金轴承的质量检验	540
8.1.5	锡基和铅基轴承合金的铸造缺陷分析	542
8.1.6	锡基和铅基轴承合金废料的回收	542
8.2	铜基轴承合金	543

8.3	铝基轴承合金	551
	参考文献	557
第9章	铸造高温合金	559
9.1	合金牌号、标准、成分和性能	559
9.1.1	合金牌号和标准	559
9.1.2	合金化学成分	560
9.1.3	物理和化学性能	563
9.1.4	力学性能	567
9.1.5	工艺性能	581
9.1.6	显微组织	583
9.1.7	特点和应用	585
9.2	合金的熔炼	586
9.2.1	母合金的制备	586
9.2.2	母合金的重熔	589
9.2.3	定向凝固	590
9.2.4	细晶铸造	592
9.3	合金的热处理	592
9.3.1	热处理设备	593
9.3.2	热处理工艺	593
9.3.3	热等静压处理	593
9.3.4	表面防护处理	594
9.4	质量控制和检验方法	595
9.4.1	质量检验方法	595
9.4.2	常见的铸造缺陷及防止方法	595
	参考文献	597
第10章	金属及非金属原材料	598
10.1	纯金属	598
10.1.1	普通轻金属	598
10.1.2	普通重金属	601
10.1.3	贵金属	604
10.1.4	稀有难熔金属	605
10.1.5	稀土金属	608
10.1.6	钢铁材料(黑色金属)	609
10.2	非金属原材料	610
10.3	非金属辅助材料	612
10.3.1	氧化物	612
10.3.2	氯化物和氟化物	615
10.3.3	盐类	619
10.3.4	气体	623
10.3.5	氢氧化物	624
10.3.6	其他	625
第11章	铸造非铁合金熔炼炉	632
11.1	对熔炼设备的要求、分类和选用	632
11.1.1	对熔炼设备的基本要求	632

11.1.2 熔炼炉的分类和选用	632
11.2 电阻熔炼炉	632
11.2.1 电阻炉用主要材料	632
11.2.2 电气配套和温度控制	634
11.2.3 电阻炉的技术发展趋势	634
11.2.4 坩埚电阻炉	634
11.2.5 反射电阻炉	638
11.2.6 箱式电阻炉	639
11.2.7 红外熔炼炉	639
11.3 感应熔炼炉	642
11.3.1 工频无心感应熔炼炉	642
11.3.2 工频有心感应熔炼炉	645
11.3.3 中频无心感应熔炼炉	649
11.3.4 真空感应熔炼炉	653
11.3.5 真空感应熔炼定向凝固炉	655
11.3.6 冷坩埚感应凝壳熔炼炉	659
11.4 真空电弧炉	661
11.4.1 真空自耗电极电弧炉	661
11.4.2 真空自耗电极电弧凝壳炉	663
11.5 火焰炉	663
11.5.1 火焰反射炉	663
11.5.2 燃料坩埚炉	669
11.6 我国主要电炉及其配套厂家	670
参考文献	672

附录	673
附录 A 铸造铝合金国外标准	673
A.1 铸造铝合金国际标准	673
A.2 铸造铝合金美国标准	678
A.3 铸造铝合金欧洲标准	688
A.4 铸造铝合金日本标准	696
附录 B 铸造镁合金国外标准	700
B.1 铸造镁合金国际标准	700
B.2 铸造镁合金欧洲标准	702
B.3 铸造镁合金美国标准	704
B.4 铸造镁合金日本标准	710
附录 C 铸造铜合金国外标准	712
C.1 铸造铜合金国际标准	712
C.2 铸造铜合金美国标准	716
C.3 铸造铜合金俄罗斯标准	728
C.4 铸造铜合金日本标准	732
附录 D 铸造锌合金国外标准	738
D.1 铸造锌合金国际标准	738
D.2 铸造锌合金美国标准	738
D.3 铸造锌合金欧洲标准	739
D.4 铸造锌合金日本标准	740
D.5 铸造锌合金俄罗斯标准	741
附录 E 元素周期表	插页

第 1 章 绪 论

1.1 铸造非铁合金的发展简史

1.1.1 铸造铝合金

铸造铝合金是较为年轻的铸造非铁合金。虽然元素铝 (Al) 在地壳中蕴藏量极大 (约占 7.5%, 比其他非铁金属元素蕴藏量的总和还要多), 分布又最广, 但是自 1855 年世界上首次出现铝制的制品以来, 铝的使用历史至今才 156 年。并且, 初期的铝十分昂贵, 只用来制造首饰。随着铝产量的不断增长及其价格的不断降低, 直到 20 世纪初才出现作为结构材料的铸造铝合金, 至今不过 100 多年。

最早获得工业应用的铸造铝合金属于 Al-Cu 类铸铝。当 1920 年欧洲人 Pacz 发现了金属 Na 对 Al-Si 合金的显微组织有变质作用, 进而提高其力学性能后, Al-Si 类铸铝便成为一种优良的铸造铝合金在世界范围内获得越来越广泛的应用。Al-Mg 类铸铝由于熔铸工艺复杂而使用较晚, 直至第二次世界大战后, 逐步掌握了熔铸工艺, 才获得了工业应用。

铸造铝合金是一种典型的铸造轻合金。它密度小, 比强度高, 还兼具导热性好、耐蚀性优良等许多特殊性能, 因此铸造铝合金的科研、生产及应用均获得了飞速的发展。如 Al-Si 基铸造铝合金, 由于具有优良的铸造性能和较好的力学性能, 通过采用先进铸造技术, 被广泛用来制造气缸缸盖、轮毂、叶轮等许多重要结构的零件, 依然是目前产量最大、用处最广的铸造铝合金; 共晶型、过共晶型的 Al-Si 基多元铸造铝合金, 由于导热性好、线胀系数小、耐磨性好, 已成为铸造活塞的理想材料; 具有高强度、高耐热性能的 Al-Cu 基铸造铝合金以及耐蚀性好、比强度高、密度小的 Al-Mg 基铸造铝合金等新的铸造铝合金不断出现, 使得铸造铝合金已经成为现今产量最大的铸造非铁合金。

我国铸铝工业由于历史原因起步较晚, 在建国前, 铸铝工业几乎是一片空白。但新中国成立后获得了蓬勃发展。铸造铝合金的新品种及熔铸生产的新技术不断涌现。高强度铸造铝合金等研究成果获得成功应用, 并具有国际先进水平。现已能铸造 2t 以上的大型铝合金铸件, 有铸造铝合金国家标准牌号已达 26 个品种, 其年产量已远远超过其他所有各种铸造非铁合金年产量的总和。铸造铝合金现已成为我国国

防建设及工农业生产不可缺少的重要的铸造合金材料。

1.1.2 铸造铜合金

我国铜合金的铸造历史悠久, 并且技艺高超, 已经成为我国作为世界文明古国的重要考证之一。根据考古研究, 在河南浙川文化遗址中发现了相当于夏朝的青铜器; 在四千多年前的甘肃齐家文化遗址中也发现了红铜器。而后到殷、商时代进入了古代历史上的青铜时期。当时已能铸造出如后母戊大方鼎 (见图 1-1) 这样精美的大型青铜铸件。商末周初, 是古代青铜铸造步入发达的时期, 造型雄伟、冶铸精良、花纹细丽而光洁的四羊方尊 (见图 1-2) 以及造型优美、工艺精巧的西周早期凤纹卣等青铜铸品已成为当时的代表作。到了春秋战国时代, 已是青铜铸造的鼎盛时期。楚之曾国的侯乙, 组织生产了大量珍贵的金属器物, 以青铜铸造的编钟和尊盘, 乃是稀世之宝, 如其中的曾侯乙尊、盘两件一套, 造型优美, 结构玲珑, 铸工精细, 堪称中国古代青铜器中的极品。东周时期的代表性兵器越王勾践剑 (见图 1-3), 其表面规则地分布着具有约几十微米厚的细枝层的菱形纹饰, 极具装饰性。春秋末期铸造出的双金属剑, 以韧性好的低锡青铜作中脊合金, 以硬度很高的高锡青铜作两刃, 做到利剑不断。春秋战国以后, 铸造青铜器仍有较大发展。虽然, 由于奴隶社会的崩溃而使礼器

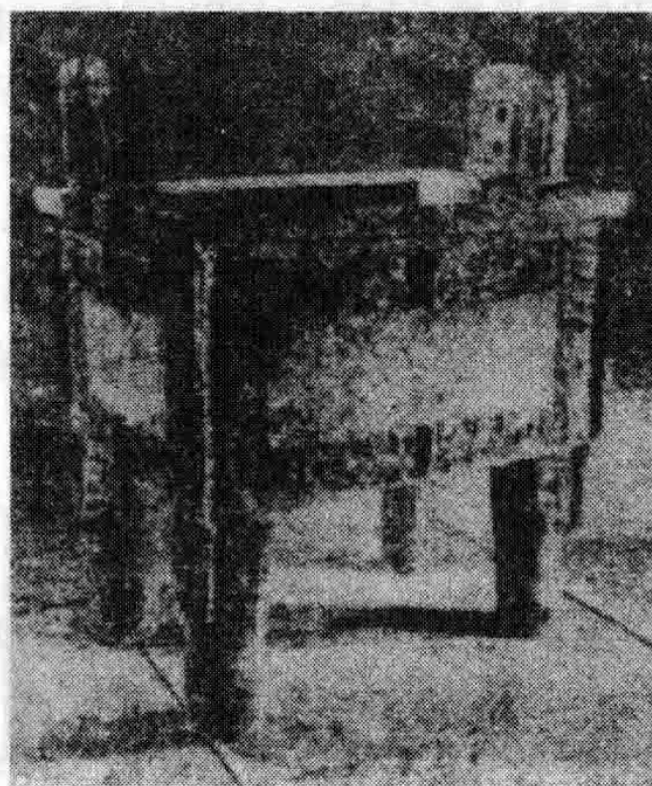


图 1-1 后母戊大方鼎

(1939 年河南安阳出土。带耳高 1370mm, 器口长 1100mm, 宽 780mm, 重 875kg, 内壁铸铭文“后母戊”三个字)

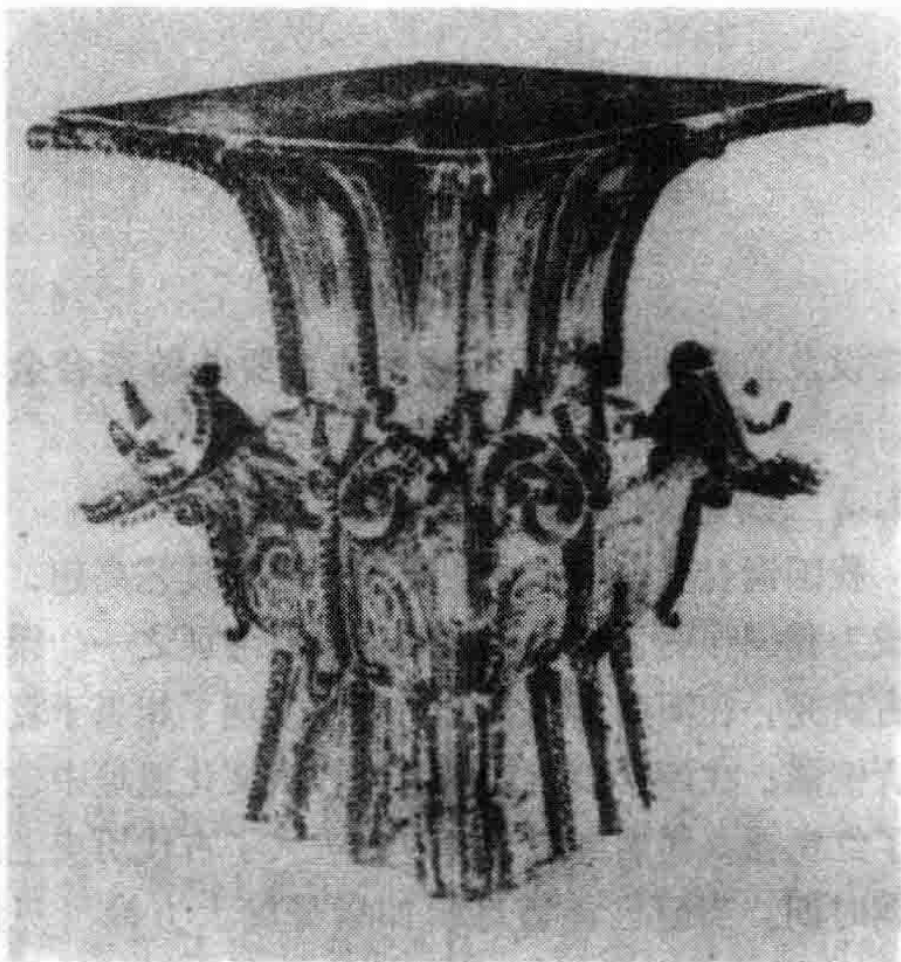


图 1-2 四羊方尊

(商后期酒器。1938 年湖南宁乡出土。高 583mm，上口每边长 524mm，重 34.5kg，尊的颈部为蕉叶夔文、兽面纹、云雷纹，肩部浮雕出围绕的四条龙，前肩四面以圆雕形式各铸一大卷角羊的前半身，而头、腹部构成器腹四角)

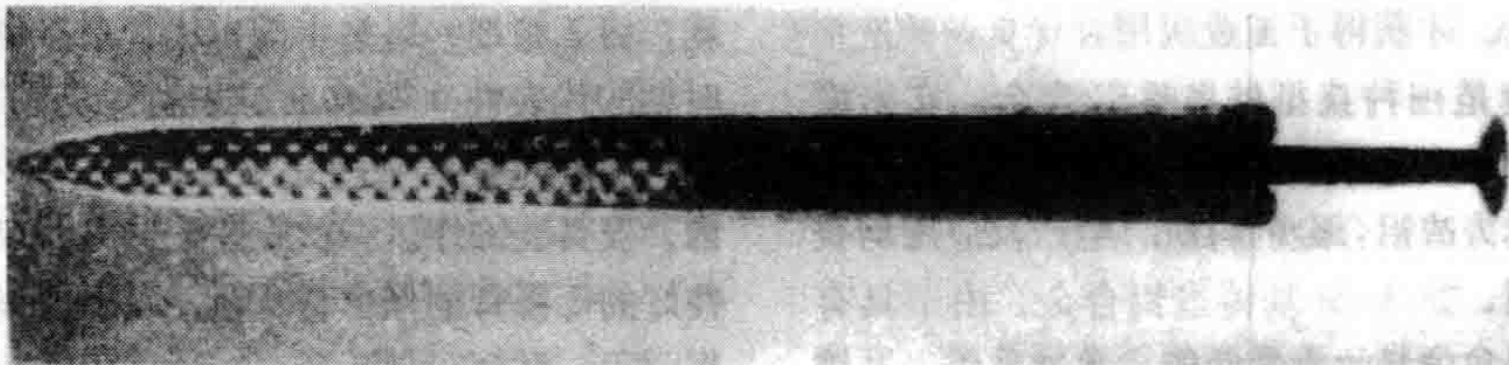


图 1-3 越王勾践剑



图 1-4 武当山金殿

(建于 1416 年。通高 5.5m，宽 5.8m，深 4.2m；二层层面上的八条戗脊上各饰有七个一组的仙人走兽；殿内铜像 1700kg)

的生产渐少，但是铜镜、铜币、铜钟和铜鼓等四大类铜铸件乃至在整个“铁器时代”长盛不衰。如西汉时期铸造的“透光”镜，不但花纹精细，更奇妙的是，在日光的照射下，镜面的反射光照在墙壁上，竟能把镜背面的花纹、图案、文字等都清晰地显现出来，被国际冶金界誉为“魔镜”。此外，还有秦始皇铜马车、明代喷水鱼洗和龙洗等。举不胜举的实例都充分显示了我国历代青铜铸造的精湛技术水平，青铜铸造业已具有相当的规模，并且无论在合金化、熔炼技术及铸型工艺等方面都已远远走在同时代世界各国的前面。

我国也是使用黄铜历史最早的国家之一。南北朝的炼丹士们已能用炉甘石（碳酸锌矿石）炼得黄铜。建于明代的武当山金殿（见图 1-4），可称其为精美的铸造黄铜代表作。整个金殿从门窗、梁柱、菩萨到香案供桌全部用黄铜铸造，巍然屹立在天柱峰的悬崖峭壁之上，历来被认为是“天上的瑶台金阙”。

然而，我国到建国前，具有悠久历史并且技艺非凡的铸铜业已是奄奄一息，直到建国后才重新获得了迅速发展。铸造铜合金的内涵已发生非常大的变化。如铸造青铜早已不是锡青铜，而产生了诸如铝青铜、

铅青铜、铍青铜等一系列具有特殊性能和用途的铸造青铜；铸造黄铜也早已不只是普通黄铜，而产生了诸如铝黄铜、锰黄铜、铁黄铜、硅黄铜、铅黄铜等一系列特殊黄铜；铸造纯铜、铸造白铜在某些专门的部门获得了较快发展和应用。作为结构材料的铸造铜合金，现已发展到 30 多个品种，有的具有优良的力学性能，有的具有很高的耐磨性能，有的具有很高的耐蚀性能，有的具有优良的综合性能而被广泛地应用着。我国铸铜业已发展到一个崭新的水平，已能铸造具有国际先进水平重达近 30t 的大型铜合金船用螺旋桨，并成为发展军事与民用工业不可缺少的重要领域。20 世纪 90 年代，传统的艺术铸铜大放异彩，例如，我国政府赠送给联合国成立 50 周年庆典礼物的“世纪宝鼎”，已作为中华文化的象征，永远屹立在纽约联合国广场；祖国内地为香港宝莲寺铸造了坐高

26.4m, 重达 177t 的天坛大佛, 促使香港大屿岛成为闻名的佛教和旅游胜地; 首都北京为迎接 21 世纪而建造的中华世纪坛的青铜甬道及中华世纪钟将会在世人的产生久远的影响。所有这些铸品, 其艺术品位不断提高并在改革开放中产生良好的经济效益和重要的社会价值。近十多年来, 中国的铸铜业更是获得巨大的发展, 电子、电器行业铜合金及特殊用途的铜合金获得飞速发展, 中国铜合金产业在国际上已经占有极为重要的地位。

1.1.3 其他铸造非铁合金

铸造锌合金、铸造巴氏合金的生产历史较长。前者主要适用于压力铸造或重力铸造, 用来浇注汽车、拖拉机等机电部门的各种仪表壳体类铸件或各种起重设备、机床、水泵等的轴承, 并且近些年来又发展了高强度高耐磨铸造锌合金。后者主要指铸造锡基和铅基合金, 它是典型的减磨合金, 主要用于浇注双金属轴瓦。

我国铸造镁合金的生产还是解放后的事情, 它是随着国防工业发展的需要而发展起来的。在工业应用的铸造合金中, 铸造镁合金密度最小, 以比强度和疲劳强度高、比弹性模量高著称, 并有良好的减磨等性能。因此广泛地应用在交通、3C 产业和航空航天领域中。但是, 由于镁 (Mg) 化学活性强, 在熔铸工艺过程中极易氧化, 甚至燃烧, 而且镁的氧化物 (MgO) 质地疏松, 没有保护性能, 因此熔铸工艺较为复杂, 给铸造生产带来很大困难。但是, 由于镁合金具有许多其他合金无法比拟的优点, 因此, 目前镁合金成为关注的热点, 镁合金的铸造技术也获得很大的突破, 已经铸造出优质的汽车缸体铸件, 应用潜力巨大。

铸造钛合金是目前最年轻的铸造非铁合金结构材料, 具有很高的比强度、耐蚀性和耐热性, 在工业中应用越来越多, 已成为现代工业与科技领域引人注目的新材料。特别是在航空、航天、造船、化工等工业中, 钛合金大多用于浇注关键零部件, 如飞机、导弹上的重要结构件, 小型快艇上的螺旋桨, 化学工业中的各种耐蚀泵, 乃至医疗用的假肢、假牙和骨架, 体育用的高尔夫球头等。它的性能好坏通常决定了产品水平的高低, 也有人将钛合金的用量作为一个国家科技水平的标志。但是, 由于钛 (Ti) 的化学活性极强, 在熔融条件下几乎能与所有耐火材料起反应, 导致熔铸工作十分困难。我国从 20 世纪 60 年代开始研究钛合金的精密铸造技术, 而且近些年来发展迅速。钛合金从真空自耗电极电弧炉熔炼开始研制, 到今天已能成功地应用先进的水冷铜坩埚真空感应凝壳熔炼

(ISM) 技术。同时已经很好地掌握了永久性铸型和一次性铸型的铸造工艺。

铸造高温合金是第二次世界大战期间随着航空涡轮发动机的出现而发展起来的一种重要结构材料, 主要用于燃气轮机及军工和航空航天领域的热端部件。近些年来, 我国的铸造高温合金发展较快, 现已有 Ni 基、Co 基和 Fe-Ni 基三大系列近 40 个品种, 已经成为航空、航天、造船、发电、石化和交通运输等部门的重要结构材料。

1.2 铸造非铁合金的前景与展望

1.2.1 广阔的前景

展望未来, 铸造非铁合金生产有广阔的发展前景, 主要反映在:

(1) 地位日显重要 由于各种铸造非铁合金均有各自的特殊性能, 如高强度、高耐蚀性、高耐热性、高耐磨性或优良的其他综合性能, 而其中铸造轻合金又有卓著的各种比性能等优点, 因此它在许多军事工业乃至民用工业中已经成为不可缺少的结构材料, 并且在各国建设中的这种地位显得越来越重要。若没有铝合金、镁合金和钛合金, 那么航空、航天等工业是不可能发展的; 若没有铜合金, 那么造船、化工等部门也很难维持。

(2) 产量不断增长 许多非铁金属元素储量丰富, 并随着冶炼技术及能力的提高, 必将导致其产量不断增长, 价格日渐降低, 从而促进铸造非铁合金生产的发展; 与此同时, 随着铸造非铁合金熔铸技术与能力的提高, 必然会有力地推动其产量不断扩大。

(3) 用途日益扩展 许多铸造非铁合金作为结构材料开始应用时, 或因价格昂贵或因开发较晚而只用于军事工业。今天, 随着产量的增长和价格的降低, 铸造非铁合金材料已经广泛地应用到各种民用工业。可以说, 现在从航天、航空、航海, 到一般工业、农业, 乃至家庭生活用具、体育用品等, 到处都有铸造非铁合金铸件, 并且其应用范围还在不断扩大。

1.2.2 可望的进展

展望未来, 铸造非铁合金必将在已有的基础上获得快速发展, 并主要表现在:

1) 研制新的高性能 (高强韧性、高耐蚀性、高耐热性、高耐磨性或各种高比性能等) 的铸造非铁合金, 仍然是一个需要不懈攻克的重要课题, 并且必将获得新进展。

2) 研究新的更加先进的并具特色的熔铸技术, 实现优质、低耗、无公害生产仍然是同行的众望, 也