



焊接金属学

HANJIE JINSHUXUE

主 编 王芝玲

主 审 安德锋



北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

焊接金属学

主 编 王芝玲

副主编 丁 肖 潘 鹤

主 审 安德锋

内 容 简 介

本教材分上下两篇,上篇为金属学及焊接热处理基础部分,内容包括金属的性能、金属与合金、钢的热处理、常用金属材料、焊件热处理工艺基础五个模块。下篇为金属熔化焊基础,内容包括焊接材料、焊接区温度的变化、焊接化学冶金过程、焊接接头的组织与性能、焊接冶金缺陷五个模块。每个模块的各个课题后均配有思考与练习题,便于学习和复习。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

焊接金属学/王芝玲主编. —北京:北京理工大学出版社,2014.8

ISBN 978-7-5640-9645-8

I. ①焊… II. ①王… III. ①金属材料-焊接-教材 IV. ①TG457.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第196041号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(总编室)

82562903(教材售后服务热线)

68948351(其他图书服务热线)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京高岭印刷有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/15

字 数/344千字

版 次/2014年8月第1版第1次印刷

定 价/46.00元

责任编辑/封雪

文案编辑/封雪

责任校对/孟祥敬

责任印制/边心超

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前 言

《焊接金属学》一书参考目前金属材料最新国家标准编写，全书共分上下两篇，主要内容有十个模块。上篇为金属学及焊接热处理基础部分，包含金属的性能、金属与合金、钢的热处理、常用金属材料、焊件热处理工艺基础五个模块。下篇为金属熔化焊基础，包含焊接材料、焊接区温度的变化、焊接化学冶金过程、焊接接头的组织与性能、焊接冶金缺陷五个模块。每个模块的各个课题后均配有思考与练习题，便于学习和复习，相关模块后附有试验，以增强学生的认知能力与动手能力。

本教材由安德锋担任主审，由王芝玲担任主编，丁肖、潘鹤担任副主编，其他参编的人员有林颖、李兴会、陈广涛、薛勇、吴刚、张佳、王宗伟、董英英、韩岩、冯春梅、胡敏。

本书在编写过程中，参考了有关院校相关教材和专业工具书等，谨向它们的作者致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏、不足之处，恳请各教学单位和读者在使用本教材的过程中给予关注，并多提宝贵意见。

编 者

目 录

绪论	1
----	---

上篇 金属学及焊接热处理基础

模块一 金属的性能	7
课题一 金属特性和金属键	7
思考与练习	9
课题二 金属的物理、化学和工艺性能	9
思考与练习	12
课题三 金属的力学性能	13
思考与练习	23
试验一 金属材料的硬度试验	24
试验二 对接接头拉伸试验	27
模块二 金属与合金	30
课题一 金属的晶体结构	30
思考与练习	32
课题二 金属的结晶	33
思考与练习	39
课题三 铁碳合金及其相图	39
思考与练习	55
课题四 金属的塑性变形与再结晶	56
思考与练习	60
课题五 碳素钢	61
思考与练习	64
试验三 显微试样的制备	64
试验四 观察铁碳合金平衡组织	65
试验五 角焊缝接头金相组织检验	67
模块三 钢的热处理	70
课题一 钢的热处理原理	70

思考与练习	83
课题二 退火与正火	83
思考与练习	86
课题三 淬火与回火	87
思考与练习	92
课题四 表面热处理及其他热处理方法简介	92
思考与练习	95
模块四 常用金属材料	97
课题一 合金钢	97
思考与练习	109
课题二 铸铁	110
思考与练习	116
课题三 常用有色金属	116
思考与练习	122
模块五 焊件热处理工艺基础	123
思考与练习	130

下篇 金属熔化焊基础

模块六 焊接材料	133
课题一 焊条	133
思考与练习	139
课题二 焊丝	139
思考与练习	145
试验六 焊条工艺性能评定	145
模块七 焊接区温度的变化	150
课题一 焊接热源	150
思考与练习	154
课题二 焊接温度场	154
思考与练习	160
课题三 焊接热循环	160
思考与练习	166
模块八 焊接化学冶金过程	167
课题一 焊缝金属的构成	167
思考与练习	173

课题二 焊接化学冶金过程·····	174
思考与练习·····	182
课题三 焊接熔渣·····	183
思考与练习·····	185
模块九 焊接接头的组织与性能·····	186
课题一 焊缝金属的结晶过程·····	186
思考与练习·····	193
课题二 焊接熔合区的组织与性能·····	193
思考与练习·····	196
课题三 焊接热影响区·····	197
思考与练习·····	205
模块十 焊接冶金缺陷·····	206
课题一 焊缝中的气孔·····	206
思考与练习·····	212
课题二 焊缝中的夹杂物·····	212
思考与练习·····	214
课题三 焊接裂纹·····	214
思考与练习·····	224
附录 化学元素周期表·····	225
参考文献·····	226

绪 论

材料是人类赖以生活和生产的物质基础，同时新材料的应用又是人类改造自然的历史标志。历史学家往往把人类和自然斗争的历史大致分为两大时代：石器时代和金属时代，而金属时代又分为铜器时代和铁器时代。三个时代标志着人类生产大发展的三个飞跃阶段。随着现代工业的发展，材料、能源、信息及生物工程已成为当代技术的四大支柱。人工合成材料的快速发展说明工程材料已进入一个由金属材料、非金属材料和高分子材料以及复合材料共同发展的新时代，但金属材料仍占整个材料应用的 80% ~ 90%。

一、金属材料及焊接技术的发展

金属材料是由金属元素或以金属元素为主而形成的具有一般金属特性的材料。对于我国金属材料的发展，据考证早在商朝初期即已出现高度发展的青铜文化，可见铜器时代应在商朝之前的夏朝就开始了。春秋时已能熔炼铸铁，到战国时，铸铁的生产和应用已显著扩大，并采用了热处理方法，能制造出“干将”“莫邪”之类的著名宝剑。西汉时，钢和铸铁的冶炼技术已大为进步，钢铁产量增多，质量提高，应用得到空前发展。后经一千多年的发展，直到明朝，我国的钢铁生产一直在世界领先，并对人类做出了巨大贡献。

焊接是通过加热、加压，或两者并用，并且用或不用填充材料，使焊件结合的一种加工方法。要使两部分金属材料达到永久连接的目的，就必须使分离的金属相互非常接近，只有这样才能使原子间产生足够大的结合力，形成牢固的接头。这对液体来说是很容易的，而对固体来说则比较困难，需要外部给予很大的能量，以使金属接触表面达到原子间的距离。为此，金属焊接时必须采用加热、加压或两者并用的方法。焊接能量可来自电能、化学能、机械能、光能、超声波能等。

焊接不仅可以使金属材料永久地连接起来，而且也可以使某些非金属材料达到永久连接的目的，如玻璃焊接、塑料焊接等，但应用最广泛的仍是金属的焊接。

焊接技术以第一次世界大战和第二次世界大战为转折而得到飞跃发展。现在，焊接在船舶、车辆、航空航天、建筑、桥梁、压力容器、建筑机械、管道、闸门和各种工业机械、家用电器制造等行业中已成为不可或缺的加工技术。

二、本书的主要内容

焊接结构的产生大致可以分为设计、材料、工艺、检验和设备几方面，除了设备以外的其余四个领域和金属学均有密切关系。金属学是研究金属和合金的成分、组织（结构）与性能之间关系的一门科学。对于焊接操作及工艺人员，只有掌握必要的金属学基础知识，熟悉金属的性能、构成和结晶特点，才能对金属材料在熔焊过程中所发生的变化（包括焊接接头成分、组织性能的变化）规律有所理解，做到正确合理地选用材料，制定结合实际

生产工艺, 焊接出高质量的焊接接头。

在金属结构和机器的制造中, 经常需要将两个或两个以上的零件按一定形式和位置连接起来, 通常可以根据这些连接的特点, 将其分为两大类, 一类是可拆卸连接, 即不必毁坏零件就可以拆卸, 如螺栓连接、键连接等, 如图 0-1 所示; 另一类是永久性的连接, 其拆卸只有在毁坏零件后才能实现, 如铆接、焊接等, 如图 0-2 所示。焊接与可拆卸连接及铆接等加工方法不同, 焊接是在短时间内伴随高温而发生的一种复杂的金属学意义的结合, 比如熔焊时, 伴随着母材金属和焊接材料的熔化、焊接熔池的形成及凝固过程的进行, 必然产生一系列物理和化学冶金反应, 导致焊接冶金过程非常复杂, 使焊接结构产生明显的材质恶化、焊接残余变形、残余应力和种种焊接缺陷, 从而降低焊接结构的性能。

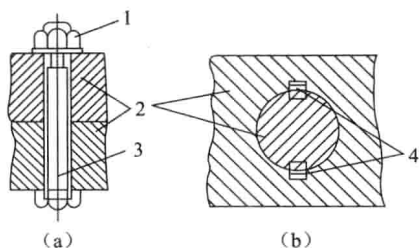


图 0-1 可拆卸连接

(a) 螺栓连接; (b) 键连接

1—螺母; 2—零件; 3—螺栓; 4—键

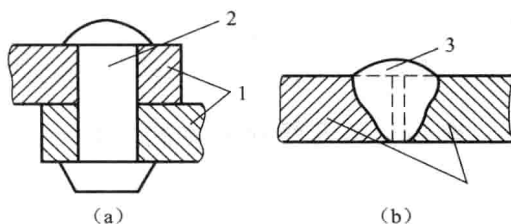


图 0-2 永久连接

(a) 铆接; (b) 焊接

1—零件; 2—铆钉; 3—焊缝

因此, 要焊成高质量的焊缝, 必须在设计、施工和材料方面有充分的知识, 本书结合焊接生产过程, 重点叙述金属学及焊接冶金学的基础知识。

一般的金属学大致分为制造冶金和物理冶金两部分。前者涉及从矿石中分离金属、还原、精炼、铸造以及产品的加工成型; 后者涉及有关热处理、材料试验、金相以及有关产品的各种检验等。焊接时, 由于金属局部熔化和凝固而形成焊缝金属, 为此必须了解熔化、精炼、铸造等制造冶金方面的知识。但是与普通制造冶金的情况相比, 焊接时的熔化或反应, 不仅温度非常高, 而且时间短, 因此必须注意到它不是一种平衡状态而是一种过渡现象。此外, 邻接焊缝金属的母材由于焊接而受到急热急冷的热处理, 同时还因膨胀或收缩而产生应力及塑性变形。另外, 为了检查焊接区各种物理的和机械的性能或有无缺陷要进行各种机械性能试验或物理性能试验。

以上叙述的焊接过程均应属于物理冶金。焊接金属学以前称作焊接冶金学, 但最近由于广泛使用金属学及这一措辞来替代冶金学, 故本书书名也就采用焊接金属学。作为配套的焊接金属学教材, 包含金属学及焊接冶金两方面基础知识, 因此, 本书所要讨论的内容分上下两篇进行编写。其中上篇为金属学及焊接热处理基础, 涉及五个模块内容, 包括金属的性能、金属与合金、钢的热处理、常用金属材料、焊件热处理工艺基础五部分内容。下篇为金属熔化焊基础, 共分为五个模块, 涉及焊接材料、焊接区温度的变化、焊接化学冶金过程、焊接接头的组织与性能、焊接冶金缺陷。

受篇幅所限, 本书内容不能包含全部焊接方法和焊接材料, 所以本书以碳钢为基础, 主要讨论碳钢、低合金钢和不锈钢等钢铁类材料以及电弧焊的焊接冶金学的基础知识。关于其他金属材料只做极为简单的介绍, 而对电阻焊和钎焊等相关的焊接冶金问题则予以省略。另

外,对于焊接热处理、焊接材料(焊条、焊丝、焊剂等)也只做简单的阐述。关于这方面的内容请参考示范校建设丛书中的另卷及在书后所列举的相关参考文献。

三、学习焊接金属学的方法

焊接金属学是一门从生产实践中发展起来,又直接为焊接生产服务的核心主干课程,具有很强的实践性,另外,由于材料的种类繁多,其性能千变万化,因此课程涉及的术语多、概念多,而且较抽象,学习起来有一定的难度。但只要弄清楚重要的概念和基本理论,按材料的成分、组织、性能和用途这一主线进行学习和记忆,注意理论联系实际,认真进行作业和实验等教学环节,是完全可以学好这门课程的。另外,还要求在学习本课程前,应该有物理、化学、材料力学、金工实习及金属工艺学等相关知识基础,应对焊条电弧焊方法及其他焊接方法有一定的感性认识。本课程尽量坚持理论联系焊接生产实际,结合生产、生活实例开展教学,提高学生实际应用的能力,为学习焊接专业课程奠定基础。

上篇 金属学及焊接热处理基础

模块一 金属的性能

金属元素或以金属元素为主构成的具有金属特性的材料统称为金属，包括纯金属、合金、金属间化合物和特种金属材料等。人类文明的发展和社会的进步同金属材料关系十分密切。继石器时代之后出现的铜器时代、铁器时代，均以金属材料的应用为其时代的显著标志。现代，种类繁多的金属材料已成为人类社会发展的物质基础，而作为金属材料主体的钢铁材料的发展在一定程度上推动着一个国家的科学技术发展。

课题一 金属特性和金属键

世界上的一切物质都是由元素组成的，目前已经发现 109 种元素，具体见书后附录元素周期表。物质的组成和结构决定物质的性质，物质的性质决定了物质的用途，如图 1-1 所示。

一、物质的组成

元素可分为金属元素和非金属元素。元素呈游离态时为单质，呈化合态时则形成化合物。分子、原子、离子是构成物质最基本的微粒。分子能独立存在，是保持物质化学性质的一种微粒。由分子构成的物质有：非金属单质如 O_2 、白磷等，稀有气体如单原子分子 Ar；非金属元素的化合物如氢化物、氧化物、含氧酸、大多数有机物等，它们在固态时也均为分子晶体。原子是化学变化中的最小微粒，在化学反应中，原子核外的价电子发生改变，原子重新组合形成新物质。原子可结合成分子；原子也可直接构成由原子晶体构成的物质，例如 SiO_2 是由 Si 原子和 O 原子按 1:2 比例直接连接构成的。金属单质也可视为由金属原子构成的物质，如 Fe、Mg、Al 等都是由原子构成的。离子是带电的原子或原子团，例如 Na^+ 、 OH^- 等。由阳、阴离子结合构成的物质，例如 NaCl、 NH_4Cl 、MgO 等，它们都是离子晶体。大多数盐、强碱、低价金属氧化物都是离子化合物。

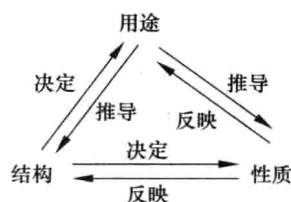


图 1-1 物质的结构、性质和用途的相互关系

二、关于金属

金属富有光泽，具有优良的导电性、导热性和塑性等。金属的这些特性是由金属原子的内部结构以及原子间的结合方式决定的。

1. 金属性

元素的金属性是指元素的原子失电子的能力。元素的金属性越强，它的单质的还原性越强。在现有已知元素中，金属约占 3/4。与非金属相比，金属在固态下（少数金属在液态下）具有以下一些特性：

- (1) 良好的导电性和导热性。
- (2) 正的电阻温度系数，即温度升高电阻增大。 0°C 时，电阻突降而趋近于零。
- (3) 具有金属光泽和良好的反射能力。
- (4) 具有好的延展性。
- (5) 除汞以外，在 25°C 时都是固体。

上述特性是由金属的原子结构及原子间的结合形式所决定的。金属的原子结构区别于非金属的显著特点是外层电子很少（一般是 $1\sim 2$ 个）。这些电子与原子的结合力很弱，容易脱离其束缚而成为自由电子。失去电子的金属原子成为正离子。金属原子结构的这一特点，又决定了其内部原子的结合形式。

2. 影响金属性的因素

(1) 元素周期表中的位置。

对于主族元素来说，同周期元素随着原子序数的递增，原子核电荷数逐渐增大，而电子层数却没有变化，因此原子核对核外电子的引力逐渐增强，原子半径逐渐减小，原子失电子能力逐渐降低，元素金属性逐渐减弱，而原子得电子能力逐渐增强，元素非金属性逐渐增强。例如：对于第三周期元素的金属性 $\text{Na} > \text{Mg} > \text{Al}$ ，非金属性 $\text{Cl} > \text{S} > \text{P} > \text{Si}$ 。同主族元素，随着原子序数的递增，电子层逐渐增大，原子半径明显增大，原子核对最外层电子的引力逐渐减小，元素的原子失电子能力逐渐增强，得电子能力逐渐减弱，所以元素的金属性逐渐增强，非金属性减弱。例如：第一主族元素的金属性 $\text{H} < \text{Li} < \text{Na} < \text{K} < \text{Rb} < \text{Cs}$ ，卤族元素的非金属性 $\text{F} > \text{Cl} > \text{Br} > \text{I}$ 。因此，在元素周期表中，越向左、下方，元素金属性越强，金属性最强的金属是 Cs（Fr 是放射性元素，不能稳定存在）；越向右、上方，元素的非金属越强，非金属性最强的元素是 F。例如：金属性 $\text{K} > \text{Na} > \text{Mg}$ ，非金属性 $\text{O} > \text{S} > \text{P}$ 。

(2) 其他方面。

另外，判断金属性的强与弱还可以通过单质与水（或酸）反应的难易、最高价氧化物对应水化物的碱性强弱、金属的相互置换、依据金属活动顺序表、用电化学的方法（构成原电池）、金属阳离子的氧化性强弱等来判断。

3. 金属键

金属原子的构造特点是围绕原子核运动的最外层电子数很少，通常只有 $1\sim 2$ 个，很容易摆脱原子核的束缚而变成自由电子。原子失去电子后便成为正离子，正离子又按一定几何

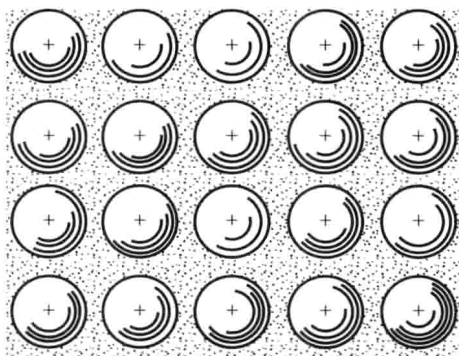


图 1-2 金属键模型

形式规则地排列起来，而脱离了原子束缚的那些价电子都以自由电子的形式在各离子间自由地运动，它们为整个金属所共有，这种共有化的自由电子称为“自由电子云”。金属晶体就是依靠各正离子与共有的自由电子云间的相互引力而结合起来的，而离子与离子间及电子与电子间的斥力则与这种引力相平衡，使金属处于稳定的晶体状态。这些共有化的自由电子云和正离子以静电引力结合起来的方式称为金属键（图 1-2）。

4. 金属键与金属性的关系

如何用金属键来解释金属所具有的特性呢？

金属具有光泽是因为金属晶体中的自由电子能吸收可见光的能量并跳到较高能级，当它重新跳回到原来的低能级时，就把所吸收的可见光的能量，以电磁波的形式辐射出来，宏观上就表现为金属光泽。金属中的自由电子在外电场作用下，会沿着电场方向做定向运动，形成电流，从而使金属具有优良的导电性。自由电子的运动和正离子的振动可以传递热能，因而使金属具有良好的导热性。当金属发生塑性变形（即晶体中原子发生相对位移）后，正离子与自由电子间仍能保持金属键的结合，使金属显示出良好的塑性，因而金属可以产生塑性变形而不被破坏。

总之，金属的主要特性及其结晶特点，都与金属键这一结合方式有密切关系。

思考与练习

1. 构成物质最基本的微粒有哪些？它们之间有何关系？
2. 何为金属性？如何判断金属性的强弱？
3. 何为金属键？如何用金属键判断金属的特性？

课题二 金属的物理、化学和工艺性能

金属材料是制造生产焊接结构最常用的材料，因此了解和掌握金属材料性能是十分必要的，通常所指的金属材料性能是指金属材料的使用性能和工艺性能。使用性能是指为保证机械零件、工程构件或工具正常工作，材料应具备的性能，它包括力学性能和物理性能、化学性能等。工艺性能是指机械零件在冷加工或热加工的制造过程中，材料应具备的性能，它包括铸造性能、锻造性能、热处理性能以及金属切削加工性能等。

一、金属的物理性能

物理性能是指材料固有的属性，金属的物理性能包括密度、熔点、电性能、热性能、磁性能等。

1. 密度

密度表示某种物质单位体积的质量。

$$\rho = m/v \text{ g/cm}^3 (\text{或 kg/m}^3)$$

式中 m ——质量；

v ——体积。

密度意义：密度的大小很大程度上决定了工件的自重，对于要求质轻的工件宜采用密度较小的材料（如铝、钛、塑料、复合材料等）；工程上对零件或毛坯的质量计算也要利用密度。常用的金属及合金的密度见表1-1。

表 1-1 常用的金属及合金的密度

名 称	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	名 称	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	名 称	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
铝	2.7	铅	11.3	黄铜	8.85
铁	7.8	钛	4.5	铝合金	2.55 ~ 3.1
铜	8.9	铸铁	6.6 ~ 7.4		
锡	7.3	碳钢	7.85		

2. 熔点

熔点是材料从固态转变为液态的温度。

纯金属有固定的熔点，绝大多数合金的熔点是一个温度范围，从开始熔化到熔化终了的温度相差十到几百摄氏度。如含碳 3% 的铸铁，其熔化温度范围为 $1\,148\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1\,279\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。熔点的高低表示金属熔化的难易程度。熔点高的金属在温度高时，其工作性能变化较小，如高速钢、硬质合金钢等。

3. 导电性

金属传导电流的性能称为导电性。

金属中银的导电性最好，铜与铝次之。通常金属的纯度越高，其导电性越好，合金的导电性比纯金属差，高分子材料和陶瓷一般都是绝缘体。导电器材常选用导电性良好的材料，以减少损耗；而加热元件、电阻丝则选用导电性差的材料制作，以提高功率。

4. 导热性

金属在加热或冷却时能够传导热量的性质称为导热性。

一般情况下，金属的导热性比非金属好，金属的导热性取决于热导率，热导率越大，金属的导热性就越好。金属的导热能力以银最好，铜、铝次之。散热器等传热元件应采用导热性好的材料制造；保温器材应采用导热性差的材料制造。热加工工艺与导热性有密切关系，在热处理、铸造、锻造、焊接过程中，若材料的导热性差，则会使工件内外产生大的温差而出现较大的内应力，导致工件变形或开裂。采用缓慢加热和冷却的方法可使零件内外温度均匀，防止变形和开裂。

5. 热膨胀性（线膨胀系数）

材料随温度的改变而出现体积变化的现象称为热膨胀性。

在一定温度下，固体的各个线度是一定的。当固体受热后，随着温度升高，它的各种线度都要增长。金属的热膨胀量虽然很微小，但会产生很大的内应力，使工件变形或断裂。工业上也常利用这一特性来装配组合件。

6. 磁性

金属被磁化或吸引的性能称为磁性。

铁、钴、镍等在磁场中能强烈地被磁化，是属于强磁性的铁磁材料。铁磁材料加热到某一温度时就会失去磁性，该温度称为居里点。铁的居里点为 $767\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，镍的居里点为 $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

非铁磁性物质不能被磁铁所吸引，即不能被磁化，如 Al、Cu 等，可用于制作要求避免电磁场干扰的零件和结构件。