



普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

有色金属塑性加工

主编 罗晓东 赵亚忠 周志明



冶金工业出版社
www.cnmip.com.cn



普通高等教育“十三五”规划教材

有色金属塑性加工

主 编 罗晓东 赵亚忠 周志明
副主编 王维青 刘传璞 胡宾宾
主 审 毕 雁

北 京

冶金工业出版社

2016

内 容 提 要

本书系统介绍了挤压、拉拔、轧制、锻压等成型方法及工艺,内容包括各种有色金属塑性加工的理论基础、加工工具、加工设备、加工模具、加工工艺、加工制品缺陷分析及消除,同时也涵盖了有色金属塑性加工的一些新技术、新设备,并且重点突出典型材料、典型零件成型工艺过程的设计与加工。本书内容与生产实际紧密结合,具有很强的实用性。

本书适合作为高等院校材料成型与控制工程专业及相关专业的教材,也可作为有色金属企业岗位操作人员的培训教材,还可供从事有色金属加工的工艺设计人员和现场指导人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

有色金属塑性加工/罗晓东,赵亚忠,周志明主编. —北京:
冶金工业出版社, 2016. 5

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-7217-7

I. ①有… II. ①罗… ②赵… ③周… III. ①有色金属—
金属压力加工—高等学校—教材 IV. ①TG3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 075290 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 杨 敏 美术编辑 吕欣童 版式设计 彭子赫

责任校对 禹 蕊 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7217-7

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
2016 年 5 月第 1 版, 2016 年 5 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 12.25 印张; 295 千字; 187 页

30.00 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 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

有色金属是国民经济、人民生活及国防工业、科学技术发展必不可少的基础材料和重要的战略物资。农业现代化、工业现代化、国防和科学技术现代化都离不开有色金属。例如飞机、导弹、火箭、卫星、核潜艇等尖端武器以及原子能、电视、通信、雷达、电子计算机等尖端技术所需的构件或部件大都是由有色金属中的轻金属和稀有金属制成的。有色金属塑性加工是有色金属发展和壮大的有效手段,是实现产业化,增强企业竞争力的重要途径。

本书根据应用型本科院校材料成型及控制工程专业培养目标以及教学大纲要求编写,内容涵盖有色金属及其合金的特点、分类、合金牌号、产品等,以及挤压、拉拔、轧制、锻压等生产实践中学生应该了解和掌握的知识,如各种有色金属塑性加工的理论基础、加工工具、加工设备、加工模具、加工工艺、加工制品缺陷分析及消除等。本书将理论知识与企业生产实际紧密结合起来,对学生系统地了解有色金属加工理论、工艺及设备方面的知识,以及今后从事有色金属加工工作,提高有色金属加工业务水平大有帮助。

本书在内容的组织安排上,立足于基本概念清晰,重点突出,简明扼要,基本理论必需、够用,面向生产实际,服务实践。

本书由罗晓东、赵亚忠、周志明担任主编,王维青、刘传璞、胡宾宾担任副主编,重庆科技学院毕雁高级工程师主审。全书共5章,重庆科技学院罗晓东编写第1章和第4章,重庆理工大学周志明编写第5章,南阳理工大学赵亚忠编写第2章,重庆大学刘传璞编写第3章的第1、2节,中冶赛迪工程技术股份有限公司胡宾宾编写第3章的第3节,重庆理工大学王维青编写第3章的第4、5节。全书由罗晓东负责统稿与整理。

在编写过程中,参考了有关书籍、资料和国家标准,在此,对文献资料的

作者一并表示衷心的感谢!

由于水平有限,书中不妥之处,敬请广大读者批评指正!

编 者

2016年1月

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
中国冶金百科全书·金属塑性加工	本书编委会	248.00
金属学原理(第2版)(本科教材)	余永宁	160.00
楔横轧零件成形技术与模拟仿真	胡正寰	48.00
加热炉(第4版)(本科教材)	王 华	45.00
轧制工程学(第2版)(本科教材)	康永林	46.00
金属压力加工概论(第3版)(本科教材)	李生智	32.00
型钢孔型设计(本科教材)	胡 彬	45.00
金属塑性成形力学(本科教材)	王 平	26.00
轧制测试技术(本科教材)	宋美娟	28.00
金属塑性加工概论(本科教材)	王庆娟	32.00
金属学与热处理(本科教材)	陈惠芬	39.00
轧钢厂设计原理(本科教材)	阳 辉	46.00
冶金热工基础(本科教材)	朱光俊	30.00
材料成型设备(本科教材)	周家林	46.00
材料成形计算机辅助工程(本科教材)	洪慧平	28.00
金属塑性成形原理(本科教材)	徐 春	28.00
金属压力加工原理(本科教材)	魏立群	26.00
金属压力加工工艺学(本科教材)	柳谋渊	46.00
钢材的控制轧制与控制冷却(第2版)(本科教材)	王有铭	32.00
金属压力加工实习与实训教程(高等实验教材)	阳 辉	26.00
塑性变形与轧制原理(高职高专教材)	袁志学	27.00
锻压与冲压技术(高职高专教材)	杜效侠	20.00
金属材料与成型工艺基础(高职高专教材)	李庆峰	30.00
有色金属轧制(高职高专教材)	白星良	29.00
有色金属挤压与拉拔(高职高专教材)	白星良	32.00
金属热处理生产技术(高职高专教材)	张文莉	35.00
金属塑性加工生产技术(高职高专教材)	胡 新	32.00
加热炉(职业技术学院教材)	戚翠芬	26.00
参数检测与自动控制(职业技术学院教材)	李登超	39.00
黑色金属压力加工实训(职业技术学院教材)	袁建路	22.00
轧钢车间机械设备(职业技术学院教材)	潘慧勤	32.00
铝合金无缝管生产原理与工艺	邓小民	60.00
冷连轧带钢机组工艺设计	张向英	29.00
中型H型钢生产工艺与电气控制	郭新文	55.00

目 录

1 绪论	1
1.1 常见的有色金属材料	1
1.1.1 铝及铝合金	1
1.1.2 镁及镁合金	3
1.1.3 铜及铜合金	4
1.1.4 钛及钛合金	5
1.1.5 其他合金材料	6
1.2 金属塑性加工方法及其特点	6
1.2.1 有色金属塑性加工方法	7
1.2.2 金属塑性加工方法的特点	9
1.3 金属塑性加工的发展趋势	9
2 挤压	11
2.1 概述	11
2.1.1 基本概念	11
2.1.2 挤压的特点	12
2.1.3 挤压的发展趋势	14
2.2 挤压原理	14
2.2.1 金属的流动	14
2.2.2 挤压力	23
2.3 挤压工具	30
2.3.1 挤压工具的组成	30
2.3.2 挤压筒	31
2.3.3 挤压轴	34
2.3.4 挤压垫片	35
2.3.5 穿孔针	36
2.3.6 挤压模	38
2.3.7 挤压工具用材料	48
2.4 挤压设备	50
2.4.1 挤压机的类型及其结构	50
2.4.2 挤压机的液压传动和控制	53
2.5 挤压工艺	55

2.5.1 挤压工艺参数的确定	55
2.5.2 挤压过程中的温度-速度控制	59
2.5.3 锭坯尺寸的选择	61
2.5.4 挤压制品的裂纹	62
2.5.5 挤压润滑	63
2.5.6 挤压制品的产品质量分析与缺陷消除	65
复习思考题	69
3 拉拔	71
3.1 概述	71
3.1.1 拉拔的基本概念	71
3.1.2 拉拔的特点	71
3.1.3 拉拔的发展趋势	72
3.2 拉拔原理	72
3.2.1 实心材拉拔过程中的应力与应变	72
3.2.2 空心材拉拔时的应力与应变	77
3.2.3 拉拔力	87
3.3 拉拔工具	97
3.3.1 拉拔模	97
3.3.2 芯头	100
3.4 拉拔设备	101
3.4.1 链式拉拔机	101
3.4.2 圆盘拉拔机	103
3.4.3 联合拉拔机	105
3.4.4 拉线机	106
3.5 拉拔工艺	111
3.5.1 概述	111
3.5.2 拉拔配模	111
3.5.3 拉拔润滑	121
3.5.4 产品质量分析与缺陷消除	124
复习思考题	126
4 轧制	128
4.1 概述	128
4.1.1 轧制的基本概念	128
4.1.2 轧制的特点	128
4.1.3 轧制的发展趋势	129
4.2 轧制原理	129
4.2.1 轧制过程的建立	129

4.2.2 轧制过程的应力与应变	130
4.2.3 轧制时的宽展、前滑和后滑	131
4.2.4 轧制压力	132
4.2.5 轧制力矩	132
4.3 轧制设备	133
4.3.1 概述	133
4.3.2 轧机的类型及其结构	133
4.3.3 轧机的主要部件及其结构	134
4.3.4 轧制车间辅助设备	135
4.4 轧制工艺	136
4.4.1 概述	136
4.4.2 热轧板带材生产	137
4.4.3 冷轧带材生产	139
4.4.4 产品质量分析与缺陷消除	145
复习思考题	147
5 锻造与冲压	148
5.1 锻造	148
5.1.1 概述	148
5.1.2 有色金属锻造工艺	155
5.1.3 锻件质量控制	166
5.1.4 锻造设备	168
5.2 冲压	171
5.2.1 概述	171
5.2.2 冲裁	172
5.2.3 拉深	174
5.2.4 成型	176
5.2.5 弯曲	178
5.2.6 旋压	179
5.2.7 冲压设备	181
复习思考题	185
参考文献	186



绪 论

金属塑性加工过程，就是使金属在外力作用下产生塑性变形，获得所需尺寸、规格和一定性能要求的制品的一种基本的金属加工技术。

金属塑性加工的种类很多，根据加工时工件的受力和变形方式，基本的塑性加工方法有锻造、轧制、挤压、拉拔、拉深、弯曲、剪切等几类。本书主要结合目前的有色金属行业现状对挤压、拉拔、轧制、锻压进行详细分析。

1.1 常见的有色金属材料

有色金属材料作为重要的原材料，广泛应用于机械、冶金、化工、石油、纺织、电子、军工等国民经济各行各业，其品种规格繁多，性能及用途各异。

有色金属材料包括镁及镁合金、铝及铝合金、铜及铜合金、锌及锌合金、钛及钛合金、镍及镍合金、高温合金、高温复合材料、稀土金属及其合金、稀有金属及其合金、贵金属及其合金。另外，还包括有色金属合金粉末、半金属等。有色金属的简单分类如表 1-1 所示。

表 1-1 有色金属简单分类

类 型	特 性
轻有色金属 (Al、Mg、Ti、Na 等)	密度在 $4.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 以下，化学性质活泼。纯的轻有色金属主要用于配制轻质金属
重有色金属 (Cu、Ni、Co、Zn、Sb 等)	密度均大于 $4.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，重有色金属主要用于配制磁性、高温合金及钢中的重要合金元素
贵金属 (Au、Ag、Pt、Ir、Ru、Pd 等)	储量少，提取困难，价格昂贵，具有很好的可塑性和良好的导电导热性能，主要用于电工、电子、宇航、仪表等
稀有金属 (W、Mo、Nb、Ti、Li、Zr 等)	储量少，难提取。通常作为合金元素
稀有放射性金属 (Po、Ra、Ac、Th、U 等)	是科学研究和核工业的重要材料

1.1.1 铝及铝合金

铝 (aluminium) 具有面心立方结构，是一种轻金属材料，以化合物的形式存在于自然界的矿石 (如长石、云母、高岭石、铝土矿、明矾石等) 中，地壳中铝的含量约为

8%，仅次于氧和硅，居第三位。在所有金属产品中，仅次于钢铁，是第二大类金属，在有色金属产品中占居首位。

铝作为广泛使用的金属材料，除了有丰富的蕴藏量、冶炼简单外，还因为其有一系列的优良特性，主要特性如下：

(1) 重量轻。铝的密度小 ($\rho \approx 2.7 \text{g/cm}^3$)，与铜 ($\rho \approx 8.9 \text{g/cm}^3$) 和铁 ($\rho \approx 7.9 \text{g/cm}^3$) 相比，约为它们的 1/3。用于制造飞机、汽车、船舶、桥梁、高层建筑和重量轻的容器等。

(2) 可强化。纯铝的力学性能不如钢铁，但比强度高。纯铝通过冷加工可使强度提高一倍以上，而且还可以添加镁、锌、铜、锰、硅、锂、铈等元素合金化，制成铝合金。在通过相应的热处理进一步强化后，铝合金的强度可以和优质的合金钢媲美。用于制造桥梁（特别是吊桥、可动桥）、飞机、压力容器、建筑结构材料等。

(3) 易加工。铝的延展性优良，加工速度快。可轧制成薄板和箔；拉成管材和线材；易于挤压出形状复杂的中空型材和各种民用型材；适用于各种冷热塑性变形。用于受力结构框架，一般用品及各种容器、光学仪器及其他形状复杂的精密零件。

(4) 美观。铝及其合金表面有氧化膜，呈银白色光泽，经机加工后可达到很低的粗糙度和很高的光亮度，相当美观。如果阳极经过氧化处理，用染色和涂刷等方法，还可以制造出各种颜色和光泽的表面。用于建筑用壁板、器具装饰、标牌、门窗、室内外装饰材料等。

(5) 耐蚀性、耐气候性好。因铝及其合金表面会形成硬而致密的 Al_2O_3 薄膜，这层保护膜只有在碱性离子和卤素离子的激烈作用下才会遭到破坏，所以铝及其合金有很好的耐气候性和耐蚀性。常用于门板、汽车、船舶外部覆盖材料、厨房器具、化学器具、海水淡化等。

(6) 无低温脆性。铝在低温时，它的强度和塑性反而增加而无脆性，因此它是理想的低温装置材料。用于冷藏库、冷冻库、南极科考用车辆、氧及氢的生产装置等。

(7) 导热、导电性好。铝的热导率 $\lambda = 247 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，电导率 $\kappa = 64.96 \text{S/m}$ 仅次于银、铜、金，约为铁的 3~4 倍。用于电线接头、母线接头、热交换器、汽车散热器、电子元件等。

(8) 反射性强。铝对光的反射率，抛光铝为 70%，高纯度铝经过电解抛光的为 94%，比银 (92%) 还高，且纯度越高，反射率越高。同时，铝对红外线、紫外线、电磁波、热辐射等都有良好的反射性能。用于照明器具、反射镜、抛物面天线、投光器、冷暖器的隔热材料等。

(9) 无磁性。铝是非磁性体，对于某些特殊用途这种特性十分重要。用于船用罗盘、天线、电气设备的屏蔽材料、易燃、易爆物的生产器材等。

(10) 有吸音性。铝对声音是非传播体，有吸收声波的性能。用于室内装修的器材，也可配制成减震铝合金。

(11) 无毒。铝本身没有毒性。用于食品包装、医疗器械、食品容器等。

大多数金属元素可以和铝形成合金，使铝获得固溶强化和沉淀强化。铝合金可加工成板、带、条、箔、棒、型、线、管、自由锻件和模锻件等加工材（也称变形铝合金），也可加工成铸件、压铸件等铸造材（也称铸造铝合金）。铝及铝合金的具体分类见图 1-1。

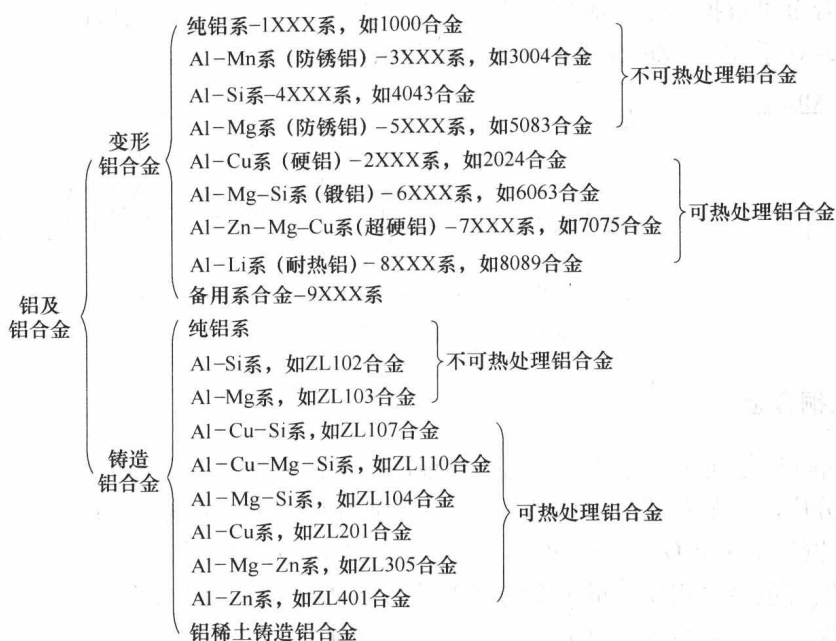


图 1-1 铝及铝合金分类图

1.1.2 镁及镁合金

镁(magnesium)是密排六方结构, 镁的资源丰富, 是地壳中排位第六的富有元素, 约为地壳质量的 2.77%。同时, 也是海水中的第三富有元素, 约占海水质量的 0.14%。

镁是一种非常活泼的金属, 电极电位极低, 抗蚀性很差, 在潮湿大气、淡水、海水及绝大多数酸、盐溶液中易受腐蚀。镁在所有结构金属中具有最低的价位, 即镁对其他任何结构金属都呈阳性。镁在无水条件下氧化成 MgO 薄膜, 有水条件下生成 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 。表面膜可以减轻或防止金属镁的进一步氧化, 但与铝和钛相比, 镁的保护膜致密性较差且易被穿透, 保护基体的效果相对较差。

镁为密排六方晶格, 滑移系少, 使得塑性比铝低很多 ($\delta=10\%$ 左右), 而且强度很低(铸造镁 $\sigma_b=115\text{MPa}$), 因而不能直接用作结构材料。然而, 镁却是工程应用中密度最小的金属结构材料, 其密度仅相当于铝的 $2/3$ 、钢的 $1/4$ 。所以镁一般都被合金化, 以镁合金的形式广泛应用于各个领域, 如国防、航空、汽车等领域。

常见镁合金分为铸造镁合金和变形镁合金两类。

铸造镁合金按合金中的主要添加元素, 可分为 Mg-Mn 、 Mg-Al 、 Mg-RE 等合金系列。铸造镁合金的牌号以“ZM”表示, 后面标以序号, 如 ZM1、ZM5 等。牌号示例如图 1-2 所示。

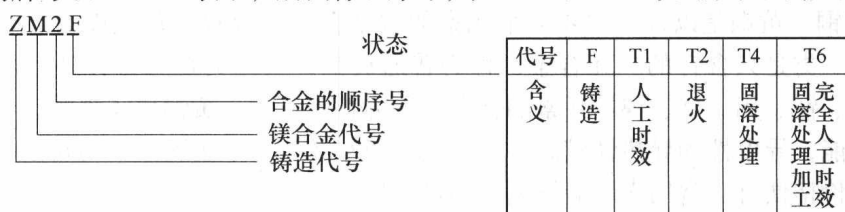


图 1-2 铸造镁合金牌号示例

变形镁合金可根据其化学成分、性能或变形方式分类。常用的变形镁合金以其成分及特性分为 Mg-Al 系和 Mg-Zn-Zr 系两大类, 牌号示例如图 1-3 所示。

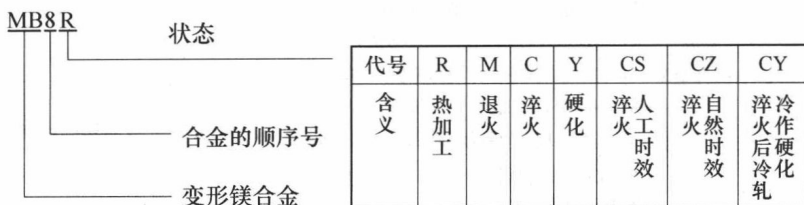


图 1-3 变形镁合金牌号示例

1.1.3 铜及铜合金

铜 (copper) 是面心立方结构, 色泽典雅古朴, 在地壳中占 0.01%, 在自然界含铜的矿物分布十分广泛, 如黄铜矿 (CuFeS_2)、辉铜矿 (Cu_2S)、斑铜矿 (Cu_3FeS_4)、赤铜矿 (Cu_2O)、蓝铜矿 ($2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$) 和孔雀石 ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$) 等。

铜与其他有色金属相比, 最主要的特点是导电导热性、耐蚀性、适宜的强度、易加工成型、可焊性、无磁性等。目前已成为第二大有色金属, 是全球经济各行各业中广泛需求的基础材料。

铜及铜合金分为四类: 纯 (紫) 铜、黄铜、青铜、白铜。

(1) 纯铜。纯铜呈玫瑰红色, 表面形成氧化铜膜后呈紫色, 故工业纯铜通常称为紫铜。纯铜又可分为普通纯铜 T1、T2 等; 无氧铜 TU1、TU2 等; 脱氧铜 TUP (磷脱氧铜)、TUMn (锰脱氧铜)。纯铜的导电性很好, 用于制造电线、电缆等; 塑性极好, 易于冷热压加工, 可制成管、棒、线、条、带等铜材; 无磁性, 常用来制造需要防磁性干扰的磁学仪器、仪表, 如罗盘、屏蔽罩、航空仪表等零件。纯铜的各类牌号及表示方法如表 1-2 所示。

表 1-2 纯铜的牌号及表示方法

牌号名称	牌号举例	表示方法说明
普通纯铜	T1、T2	P 表示脱氧剂, 只有脱氧纯铜有此项 TU 表示无氧纯铜, 普通纯铜用 T 表示, 后面加上金属顺序号即可
无氧纯铜	TU1、TU2	
脱氧纯铜	TUP、TUMn	

(2) 黄铜。黄铜是以锌为主要合金元素的铜基合金, 因常呈黄色而得名。黄铜可分为两类: 第一类是只含锌的二元合金, 称为普通黄铜; 第二类是除含锌外, 还含有诸如铅、锡、铁、锰、铝、硅、镍等元素的合金, 称为特殊黄铜。黄铜色泽美观, 有良好的工艺和力学性能, 导电性和导热性较高, 在大气、淡水和海水中耐腐蚀, 易切削和抛光, 焊接性能好且价格便宜。常用来制造导电、导热元件、耐蚀结构件、弹性元件、日用五金及装饰材料等。黄铜的牌号及表示方法如图 1-4 所示。

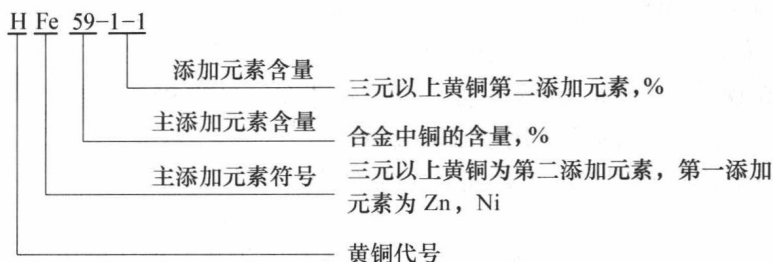


图 1-4 黄铜的牌号及表示方法

(3) 青铜。青铜是以 Sn、Al、Be、Si、Cr、Cd 等为主要合金元素的铜合金, 因颜色呈青灰色, 故称青铜。锡青铜有较高的力学性能, 较好的耐蚀性、减摩性和好的铸造性能; 对过热和气体的敏感性小, 焊接性能好, 无铁磁性, 收缩系数小。锡青铜在大气、海水、淡水和蒸汽中的抗蚀性都比黄铜高。铝青铜有比锡青铜高的力学性能和耐磨、耐蚀、耐寒、耐热、无铁磁性, 有良好的流动性, 无偏析倾向。常用作制造致密的构件等。青铜的牌号及表示方法如图 1-5 所示。

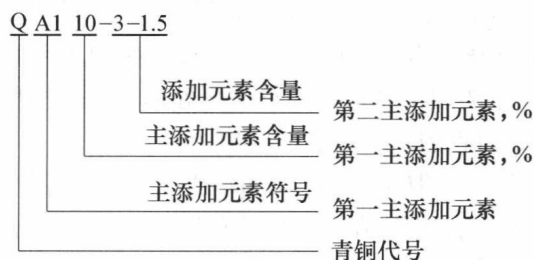


图 1-5 青铜的牌号及表示方法

(4) 白铜。白铜是以镍为主要合金元素的铜基合金, 因呈银白色, 故称为白铜。铜镍二元合金称普通白铜, 加锰、铝、锌、铁等元素的铜镍合金称为复杂白铜, 纯铜加镍能显著提高强度、耐蚀性、电阻和热阻性。这类材料具有优良的抗蚀性、中等以上的强度、弹性好、加工成型和可焊性好, 易于热、冷加工, 易于焊接的特点, 广泛用于制造耐蚀性构件、各种弹簧与接插件等。白铜的牌号及表示方法如图 1-6 所示。

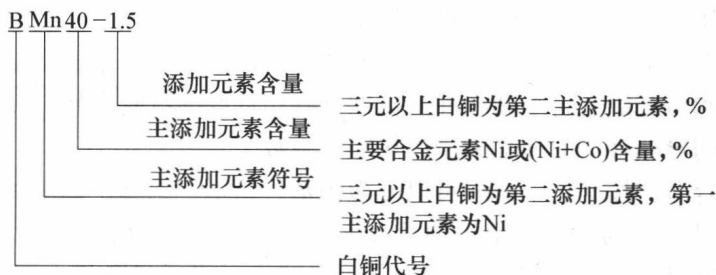


图 1-6 白铜的牌号及表示方法

1.1.4 钛及钛合金

钛具有同素异构转变, 低温 α 相具有密排六方结构, 而高温 β 相具有体心立方结构, 同素异构转变温度为 882.5°C 。

钛一般被称为“稀有金属”，但钛在地壳中的含量是很丰富的，它在全部元素中排第10位，在金属元素中排第4位，仅次于铁、铝、镁。钛在地壳中多以金红石（含 TiO_2 90%以上）和钛铁矿（含 TiO_2 50%左右）等形式存在，目前95%的钛矿用于制取化工产品（钛白粉），只有约5%的 TiO_2 用于制取金属钛。

通常按退火状态的相组成，可以将钛合金分为 α 型钛合金、 β 型钛合金、 $\alpha+\beta$ 型钛合金。

(1) α 型钛合金（TA1~TA8等）。 α 型钛合金的退火状态为单相的 α 固溶体，含有 α 相稳定元素及一些中性强化元素。常见的 α 型钛合金有TA4，抗拉强度比工业纯钛稍高，可做中等强度范围的结构材料，国内主要用作焊丝；TA5、TA6用于400℃以下在腐蚀介质中工作的零件及焊接件，如飞机蒙皮、骨架零件、压气机壳体、叶片、船舶零件等；TA7用于500℃以下长期工作的结构零件和各种模锻件，短时使用可到900℃，亦可用作超低温（-233℃）部件（如超低温用的容器）；TA8用于500℃长期工作的零件，可用于制造发动机压气机盘和叶片，但合金的组织稳定性较差，在使用上受到一定限制。

(2) β 型钛合金（TB1、TB2等）。 β 型钛合金的主要合金元素是钼、铬、钒等。在正火或淬火时很容易将高温 β 相保留到室温，获得介稳定的 β 单相组织，故称 β 型钛合金。 β 型钛合金可热处理强化，有较高的强度，焊接性能和压力加工性能良好；但性能不够稳定，熔炼工艺复杂。主要用于制造各种整体热处理的板材冲压件和焊接件，如压气机叶片、轮盘、轴类等重载荷旋转件，以及飞机的构件等。

(3) $\alpha+\beta$ 型钛合金（TC1~TC10等）。 $\alpha+\beta$ 型钛合金含有较多的 α 相稳定元素和 β 相稳定元素，具有 $\alpha+\beta$ 相混合组织结构。它具有良好的综合力学性能，大多可热处理强化（但TC1、TC2、TC7不能热处理强化），锻造、冲压及焊接性能较好，可切削加工，室温强度高，良好的抗海水应力腐蚀及抗热盐应力腐蚀能，有较好的耐热性，有的（如TC1、TC2、TC3、TC4）具有良好的低温韧性。

1.1.5 其他合金材料

除上述合金外，还有轴承合金，镍、铅、锌、锡、镉及其合金，其中应用最广泛的是轴承合金。轴承合金又称轴瓦合金，用于制造滑动轴承。轴承合金的组织是在软相基体上均匀分布着硬相质点，或硬相基体上均匀分布着软相质点。

轴承合金具有如下性能：良好的耐磨性能和减摩性能；有一定的抗压强度和硬度，有足够的疲劳强度和承载能力；塑性和冲击韧性良好；良好的抗咬合性；良好的顺应性；好的嵌镶性；良好的导热性、耐蚀性和小的热膨胀系数。

常用的轴承合金，按其化学成分可以分为锡基、铅基、铝基、铜基和铁基等多种，前两种（锡基、铅基）称为巴氏合金。轴承合金一般在铸态下使用，其牌号为ZCh + 基本元素符号 + 主加元素符号 + 主加元素平均含量 + 辅加元素元素含量。如ZChPbSn5-9，表示含5%Sn、9%Sb的铅基轴承合金。

1.2 金属塑性加工方法及其特点

金属塑性加工是金属材料生产加工的主要方法之一。金属通过塑性变形，不仅可以使

外形尺寸、表面状态发生改变,而且可以使其内部组织结构和性能也发生显著的变化,这是其他机械加工或其他成型方法所不能达到的。基本的塑性成型方法有锻造、轧制、挤压、拉拔和冲压五大类。其中轧制、挤压、拉拔主要用于金属材料的加工生产上,而锻造和冲压则主要应用于机械制造业,用于各种机加工零件毛坯的制造。

1.2.1 有色金属塑性加工方法

1.2.1.1 挤压

所谓挤压,就是对放在容器(挤压筒)中的坯料一端施加压力,使之通过模孔成型的一种压力加工方法。

(1) 按成型时的温度,可分为热挤压、温挤压和冷挤压三种。其中热挤压主要应用于大型坯锭,以获得具有相当长度的棒材或各种型材的半成品;温挤压和冷挤压则主要采用小型坯锭,可获得成品零件或只需要进行少量机械加工的半成品件。

(2) 按金属流动方向和挤压轴运动方向的关系,又可分为正挤压、反挤压、复合挤压和侧向挤压。正挤压时金属流动方向和挤压轴运动方向相同,最主要的特点是金属与挤压筒内摩擦壁有相对滑动,故存在很大的外摩擦,摩擦力的作用方向与金属运动方向相反。适用于生产有色金属型、棒材。反挤压时的金属流动方向与挤压轴的运动方向相反,反挤压可分为挤压杆动反挤压和挤压筒动反挤压。除靠近模孔附近之外,金属与挤压筒内壁间无相对滑动,故无摩擦。适用于挤压硬合金型、棒、管材以及要求尺寸精度高、组织细密无粗晶环的制品。

(3) 其他挤压方法。

1) 静液挤压。静液挤压又称为高压液体挤压。挤压时,坯锭借助于其周围的高压液体的压力由模孔中挤出,实现塑性变形。

2) CONFORM 连续挤压法。CONFORM 连续挤压法是英国能资管理局于 20 世纪 70 年代初研制成功的一种新的铝合金连续挤压法。

3) 无压余挤压。无压余挤压是铝和铝合金润滑挤压的较高发展阶段。在无压余挤压时,必须遵守润滑挤压时的条件,其中最基本的是润滑剂能在坯料表面上均匀地滑动,以防止形成滞留区和消除分层、起皮、压入等缺陷。

1.2.1.2 拉拔

对金属坯料施以拉力,使之通过模孔以获得与模孔尺寸、形状相同的制品的塑性加工方法称为拉拔。拉拔是管材、棒材、型材以及线材的主要生产方法之一。

(1) 按制品截面形状拉拔可分为实心材拉拔与管材拉拔。实心材拉拔主要适用于棒材、型材及线材的拉拔。管材拉拔也可称为空心材拉拔,主要包括管材及空心异型材的拉拔。管材拉拔包括空拉(拉拔时管坯内部不放芯头,通过模孔后外径减小,管壁一般略有变化)、长芯杆拉拔(将管坯自由地套在表面抛光的芯杆上,使芯杆与管坯一起拉过模孔)、固定短芯头拉拔(拉拔时将带有芯头的芯杆固定,管坯通过模孔实现减径和减壁)、游动芯头拉拔、顶管法、扩径拉拔六种方法。

(2) 其他拉拔工艺。

1) 无模拉拔。将棒料的一端夹住不动,另一端用可动的夹头拉拔,用感应线圈在拉拔夹头附近对棒料边局部加热边拉拔,直至该处出现局部细颈为止。

2) 玻璃膜金属液抽丝。利用玻璃的可抽丝性由熔融状态的金属一次制得超细丝的

方法。

3) 集束拉拔。将两根以上断面为圆形或异型的坯料同时通过圆的或异型孔的模子进行拉拔,以获得特殊形状的异型材的一种加工方法。

4) 静液挤压拉线。通常的拉拔,由于拉应力较大,故道次延伸系数很小。为了获得大的道次加工率,发展的静液挤压拉线法。

1.2.1.3 轧制

轧制是指在旋转的轧辊间,借助轧辊施加的压力使金属发生塑性变形的过程。

(1) 根据轧辊的配制、轧辊的运动特点和产品的形状,轧制分为纵轧、横轧和斜轧。

纵轧的特点是两辊轴心线平行,旋转方向相反,轧件作垂直于轧辊轴心线的直线运动,进出料靠轧辊运动完成。

横轧的特点是两辊轴心线平行,旋转方向相同,轧件作平行于轧辊轴心线并与轧辊旋转方向相反的旋转运动,进出料需靠专门的装置。

斜轧的特点是两辊的轴心线交叉一个不大的角度,旋转方向相同,轧件在两个轧辊的交叉中心线上作旋转前进运动,与纵轧一样进出料靠轧辊自动完成。

(2) 根据轧制时轧件的温度,可分为热轧与冷轧。

热轧是在金属再结晶温度以上的轧制过程。金属在该过程中无加工硬化,所以热轧时金属具有较高的塑性和较低的变形抗力,这样可以用较少的能量得到较大的变形。所以,大多数的金属都要进行热轧,只有少量的金属,由于在高温时塑性较低而不适用于进行热轧。一般情况下,热轧的温度都远高于室温,但也有个别金属的热轧温度比较低,如铅由于室温时能再结晶,因此,铅在室温下轧制也属于热轧。

冷轧是金属在再结晶温度以下的轧制过程,因此轧制不发生再结晶过程,只产生加工硬化,即金属的强度和变形抗力提高,同时塑性降低。

(3) 根据轧辊的形状,可分为平辊轧制和型辊轧制。

所谓平辊,就是轧辊为均匀的圆柱体,用平辊轧制的过程就称为平辊轧制。平辊轧制适用于生产板、带、条、箔等半成品。

所谓型辊,即刻有轧槽的轧辊,用型辊轧制各种型材的过程称为型辊轧制。与平辊轧制板材相比,不均匀变形是其显著特点之一。

(4) 其他轧制工艺。

除以上列出的主要轧制工艺外,还有其他轧制工艺,如铝带的无铤轧制、粉末轧制、不对称轧制等工艺。

1.2.1.4 锻造

锻造是利用锻造设备使金属塑性变形得到一定形状的制品,同时提高金属力学性能的一种加工方法。负荷大、工作条件严格的关键零件,如发电机组的转子、主轴、叶轮、汽车的曲轴、齿轮等,都是锻造加工而成的。

(1) 自由锻。使用自由锻设备及通用工具,直接使坯料变形以获得所需的几何形状及内部质量的锻件的锻造方法称为自由锻。其基本工序有镦粗、拔长、冲孔、扩孔、弯曲、切割、扭转、错移、锻接等几种。

(2) 模锻。利用模具使坯料变形以获得锻件的锻造方法称为模锻。根据锻件生产批量和形状复杂程度,可在一个或数个模膛中完成变形过程。模锻生产率高,机械加工余量