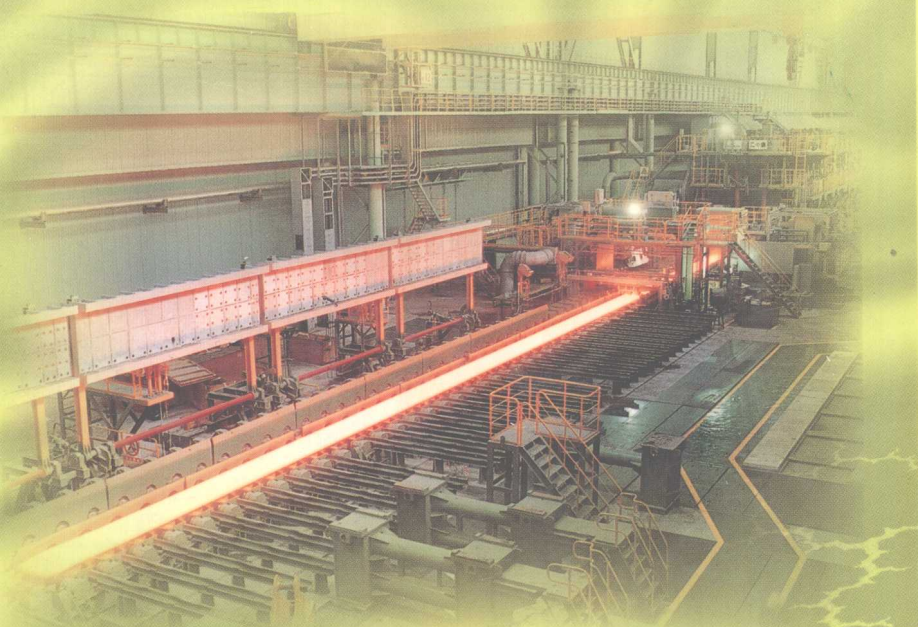


职业技术学院教学用书

# 金属压力加工理论基础

段小勇 主编



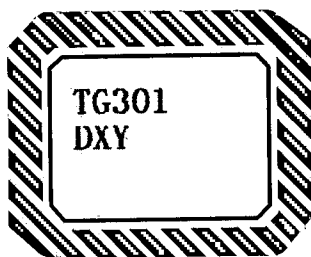
JINSHU YALI JIAGONG LILUN JICHU

冶金工业出版社

职业技术学院教学用书

# 金属压力加工理论基础

主    编    段小勇  
副 主 编    付俊薇  
审    稿    袁  康    韦  光



北  京  
冶 金 工 业 出 版 社

2004

## 内 容 简 介

本书为职业技术学院教学用书。全书分金属学及热处理、金属塑性变形理论、轧制理论、挤压理论和拉拔理论五篇,共 25 章,每章末都附有复习思考题。书中较全面地讲述了金属压力加工的理论基础,它是学习金属压力加工工艺前的必修课程。

本书可作为金属压力加工专业职业技术学院教材,也可供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

金属压力加工理论基础/段小勇主编. —北京:冶金工业出版社,2004. 8(2004. 9 重印)

职业技术学院教学用书

ISBN 7-5024-3416-X

I. 金… II. 段… III. 金属压力加工—专业学校—教材 IV. TG3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 053093 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 王秋芬 美术编辑 李 心

责任校对 符燕蓉 李文彦 责任印制 李玉山

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2004 年 8 月第 1 版,2004 年 9 月第 2 次印刷

787mm×1092mm 1/16;21.75 印张;523 千字;334 页;2001—5000 册

37.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

## 冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者
轧制工程学	康永林 主编
楔横轧零件成形技术与模拟仿真	胡正寰 等著
塑性变形与轧制原理	黄守汉 主编
模具钢手册	陈再枝 等编著
高精度轧制技术	黄庆学 等著
金属塑性变形的实验方法	林治平 等编著
英汉金属塑性加工词典(附:汉英索引)	叶建林 等主编
金属挤压理论与技术	谢建新 等著
钢管斜轧理论及生产过程的数值模拟	双运华 等著
重要用途线材制品生产新技术	戴宝昌 主编
金属轧制过程人工智能优化	王国栋 等编著
型钢孔型设计(第2版)	赵松筠 等编著
特殊钢压力加工	薛懿德 等主编
连铸坯热送热装技术	余志祥 主编
轧制工艺参数测试技术(第2版)	黎景全 主编
带钢热连轧的模型与控制	孙一康 编著
金属塑性加工力学	赵志业 主编
金属塑性加工学——轧制理论与工艺(第2版)	王廷溥 等主编
金属塑性加工学——挤压、拉拔与管材冷拔	马怀宪 主编
轧钢车间设计基础	袁 康 主编
轧钢机械(第3版)	邹家祥 主编
轧钢车间机械设备	潘慧勤 主编
冶金机械安装与维护	谷士强 主编
炼铁机械(第2版)	严允进 主编
炼钢机械(第2版)	罗振才 主编
机械制造装备设计	王启义 主编
真空获得设备(第2版)	杨乃恒 主编
有色冶金工厂设计基础	蔡祺凤 主编
薄板坯连铸连轧(第2版)	田乃媛 编著
三十辊轧机及高精度冷轧钢带生产	潘纯久 编著
轧机传动交流调速机电振动控制	李崇坚 等著
轧机轴承与轧辊寿命研究及应用	黄庆学 等著

# 前 言

本书是为满足职业技术教育的需要,根据职业教育课程的教学大纲要求,并参照冶金行业的职业技能鉴定规范及中、高级技术工人等级考核标准编写的。全书共五篇 25 章。书中较系统地阐明了金属学及热处理,金属塑性变形理论及轧制、拉拔、挤压理论,是学习金属压力加工工艺前的必修课程。为便于自学,书中每章后面都附有复习思考题。

参加本书编写的人员有山西工程职业技术学院段小勇(第 13~16 章)、李学文(第 1~8 章),河北工业职业技术学院付俊薇(第 17 章),山东工业职业学院白星良(第 18~20 章),天津工业学校董琦(第 21~25 章),北京钢铁学校李琳(第 9~11 章),太钢职工钢铁学院李刚(第 12 章)。全书由段小勇任主编,付俊薇任副主编;北京科技大学袁康、韦光教授审稿。

由于编者水平所限,书中不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2004 年 5 月

# 目 录

## 第一篇 金属学及热处理

1 概论 .....	1
1.1 金属材料及金属学发展梗概 .....	1
1.2 金属材料的一般特性 .....	2
1.3 决定金属材料性能的基本因素 .....	3
1.4 金属学的研究对象、方法和目的 .....	3
复习思考题 .....	4
2 金属的组织 and 结构 .....	5
2.1 金属原子结构及其特点和类型 .....	5
2.2 金属与合金的晶体结构 .....	10
复习思考题 .....	17
3 金属与合金的结晶及组织 .....	18
3.1 液态金属的结构 .....	18
3.2 结晶的热力学条件 .....	19
3.3 结晶过程的一般规律 .....	21
3.4 铸锭的组织 .....	24
3.5 固态金属的同素异形转变 .....	26
3.6 金属的变形 .....	28
复习思考题 .....	36
4 固态金属组织与铁碳合金相图 .....	37
4.1 塑性变形对金属组织和性能的影响 .....	37
4.2 塑性变形后的金属在加热时的组织变化 .....	40
4.3 再结晶退火后的组织 .....	42
4.4 合金相结构及合金组织 .....	42
4.5 合金状态图的基本概念 .....	46
4.6 铁碳合金状态图 .....	50
4.7 Fe-Fe <sub>3</sub> C 相图的应用 .....	59

4.8	碳素钢	60
	复习思考题	64
<b>5</b>	<b>钢的热处理原理和工艺</b>	<b>65</b>
5.1	概述	65
5.2	钢加热时的组织转变	65
5.3	过冷奥氏体的转变	68
5.4	钢的退火与正火	73
5.5	钢的淬火与回火	75
5.6	钢的化学热处理	78
5.7	其他热处理工艺简介	80
	复习思考题	82
<b>6</b>	<b>合金钢</b>	<b>84</b>
6.1	钢中的合金相	84
6.2	合金元素在钢中的作用	86
6.3	合金钢的分类与编号	90
6.4	低合金结构钢与合金结构钢	92
	复习思考题	97
<b>7</b>	<b>铸铁</b>	<b>99</b>
7.1	铸铁的石墨化及其影响因素	99
7.2	灰铸铁	102
7.3	球墨铸铁	104
7.4	铸铁的牌号及用途	105
	复习思考题	109
<b>8</b>	<b>有色金属</b>	<b>111</b>
8.1	铝及其合金	111
8.2	铜及其合金	116
	复习思考题	121

## 第二篇 金属塑性变形理论

<b>9</b>	<b>塑性变形的力学基础</b>	<b>122</b>
9.1	力与变形	122
9.2	应力状态及其图示	124
9.3	变形图示与变形的力学图示	127
9.4	变形量的表示方法	129

9.5	外摩擦	132
	复习思考题	136
<b>10</b>	<b>塑性变形基本规律</b>	138
10.1	体积不变定律	138
10.2	最小阻力定律	139
10.3	移位体积与变形速度	140
10.4	不均匀变形	144
	复习思考题	148
<b>11</b>	<b>金属的塑性、变形抗力和屈服条件</b>	149
11.1	金属的塑性	149
11.2	变形抗力与屈服条件	154
	复习思考题	162
<b>12</b>	<b>塑性变形中的断裂</b>	163
12.1	断裂的基本类型	163
12.2	压力加工中金属的断裂	165
	复习思考题	167

### 第三篇 轧制理论

<b>13</b>	<b>轧制过程的建立</b>	168
13.1	简单轧制条件	168
13.2	实现轧制的条件	169
13.3	平均工作辊径与平均压下量	173
13.4	三种典型轧制情况	174
13.5	轧制变形区的应力状态	177
	复习思考题	182
<b>14</b>	<b>轧制时的宽展、前滑和后滑</b>	184
14.1	宽展的种类与组成	184
14.2	影响宽展的因素	187
14.3	宽展的计算公式	193
14.4	轧制时的前滑与后滑	195
	复习思考题	202
<b>15</b>	<b>轧制压力</b>	203
15.1	轧制压力的概念	203



15.2	接触面积的计算	205
15.3	平均单位压力的计算	207
	复习思考题	221
<b>16</b>	<b>轧制力矩与主电机容量校核</b>	<b>222</b>
16.1	辊系受力分析	222
16.2	轧制力矩的确定	224
16.3	轧机传动力矩的组成和计算	229
16.4	主电机容量校核	231
	复习思考题	237
<b>17</b>	<b>轧制时的弹塑性曲线与张力方程</b>	<b>238</b>
17.1	轧件的塑性曲线	238
17.2	轧机的弹性曲线	239
17.3	轧制时的弹塑性曲线	241
17.4	轧制弹塑性曲线的实际意义	244
17.5	连轧基本理论	245
	复习思考题	249

## 第四篇 挤压原理

<b>18</b>	<b>概述</b>	<b>250</b>
18.1	挤压的基本方法	250
18.2	挤压法的优、缺点	251
18.3	挤压生产的发展与现状	253
	复习思考题	254
<b>19</b>	<b>挤压时的金属变形规律</b>	<b>255</b>
19.1	不同挤压阶段的金属流动特点	255
19.2	反挤压时的金属流动	266
19.3	影响金属流动的因素	268
19.4	挤压时的典型流动类型	274
	复习思考题	275
<b>20</b>	<b>挤压力</b>	<b>276</b>
20.1	影响挤压力的因素	276
20.2	挤压力的实测方法	279
20.3	计算挤压力的理论公式	280
20.4	挤压力计算公式中的参数确定	283

20.5 其他挤压力计算公式·····	287
20.6 挤压力计算例题·····	289
复习思考题·····	291

## 第五篇 拉拔理论

<b>21 拉拔概述</b> ·····	292
21.1 拉拔方法及特点·····	292
21.2 拉拔的变形程度指数及其计算·····	294
复习思考题·····	296
<b>22 拉拔时的变形分析和应力分布</b> ·····	297
22.1 实现拉拔的条件·····	297
22.2 金属在变形区的流动特性·····	298
22.3 金属在变形区内的应力分布规律·····	300
复习思考题·····	304
<b>23 拉拔时工作条件的影响</b> ·····	305
23.1 拉拔时接触摩擦的特点和润滑剂的导入·····	305
23.2 拉拔时钢丝和模具的发热及冷却·····	306
23.3 变形工作条件的分析·····	308
23.4 拉拔时的断丝原因及断口形状·····	311
复习思考题·····	312
<b>24 拉拔力及拉丝机功率计算</b> ·····	313
24.1 影响拉拔力的因素·····	313
24.2 拉拔力的确定·····	314
24.3 拉丝机功率的计算·····	318
复习思考题·····	320
<b>25 拉拔产品的应力状态与力学性质</b> ·····	321
25.1 拉拔后钢丝性能的变化·····	321
25.2 金属弹性变形及模具对拉拔材料的影响·····	325
25.3 拉拔条件对拉拔产品的物理性能和力学性能的影响·····	327
25.4 拉拔过程中的残余应力·····	328
复习思考题·····	333
<b>参考文献</b> ·····	334

# 第一篇 金属学及热处理

## 1 概 论

### 1.1 金属材料及金属学发展梗概

在所有应用材料中，凡由金属元素或以金属元素为主而形成的，并具有一般金属特性的材料统称之为金属材料，它是材料的一大类，是人类社会发展的极为重要的物质基础之一。金属学是关于金属材料方面的一门学科，它与金属材料的发明和发展是密切相关的，两者是相互促进和相辅相成的，都是千百年来，广大劳动人民和科学工作者密切合作，经过生产实践和科学实验，反复总结提高而逐步发展和完善起来的，都是人类生产活动的产物，是劳动的结晶。

人类和自然斗争的历史大致可分为两大时代：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。它标志着人类生产大发展的三个飞跃阶段，也是记载着人类文化进展的三个里程碑。

人类由石器时代进入金属时代是以青铜的发现和作为重要标志的；由铜器时代进入铁器时代是以铸铁(或生铁)的熔炼和应用而开始的；而由铸铁到炼钢，则又是一个较大的飞跃。青铜曾对古代文明起过非常重要的作用，而钢铁又在近代文明中占据着特殊重要的位置。历史事实表明，自从钢铁的冶炼和应用兴起以后，人类社会生产和科学技术的发展便日益紧密地和钢铁逐步联系在一起，并以前所未有的增长速度迅猛向前发展。进入 20 世纪以后，这种关系表现得更为突出。钢铁的发展促进了科学技术的发展，而科学技术的发展，返回来又促进了钢铁和其他有色金属材料的发展。五十年代以后，尽管有人认为已开始进入原子或电子时代，各种尖端技术相继涌现，各个生产领域不断革新，但是金属材料的发展不是慢了，而是更迅速地又进入了一个大发展的新阶段，各种新型金属材料也随之大量出现。到目前为止，全世界金属材料的年总产量(包括钢、铸铁和有色金属材料)已高达十几亿吨以上，质量和品种的发展也相当快。由此可见，一个国家或一个历史时期，金属材料产量的多少、发展速度的大小以及质量的高低已经成了衡量其生产水平和科学技术发达程度的重要标志之一。

我国古代劳动人民和科学工作者在有关金属学早期知识的积累方面有很大的贡献，这从现已发现的大量古代金属遗物中即可以看到。例如，精致的冶炼、铸造、锻造和焊接技术，以及惊人的热处理和化学热处理——渗碳工艺等，它表明当时已相当准确地掌握了金属材料的许多工艺性能和使用性能，并应用于生产实践中。另一方面从现存的许多古籍中还可以找到有力的文字证据，除了零星记载外，还有不少系统的文献，其中最著名的有先秦时代的《考工记》(作者难考)、宋代沈括的《梦溪笔谈》以及明代宋应星的《天工开物》等。它们都

属于举世公认的,世界上最早或较早的有系统的科学技术著作,其中也记载着关于金属材料的冶炼、铸造、焊接、热处理等工艺方面,以及成分、性能和用途方面的珍贵资料,即使今天读起来,也令中外人士惊叹不已。同样我国金属材料的生产,据考证早在商朝(公元前 1652~前 1066 年)初期即已出现高度的青铜文化,可见铜器时代至少应在夏朝就已开始了。春秋(公元前 722~前 481 年)时已能熔炼铸铁,到战国(公元前 403~前 221 年)时,铸铁的生产和应用已有较大发展,所谓白口铁、展性铸铁、麻口铁相继出现,随后发展到由铸铁而炼钢,并相继开始采用各种热处理方法:退火、淬火、正火和渗碳等来改善钢和铸铁的性能。西汉时,钢和铸铁的冶炼技术已大大提高,产量、质量应用得到空前的发展。后经近一千五、六百年,直到明朝(1368~1661 年),特别是中间又经过盛唐时代的大发展后,钢铁生产一直在世界遥遥领先。与此同时,铜合金也由青铜而发展到黄铜和白铜,并因此而闻名于世,其他金属材料也有了相应的发展。

## 1.2 金属材料的一般特性

金属材料,尤其是钢铁,之所以能够对人类文明发挥那样重要的作用,一方面是由于它本身具有比其他材料远为优越的综合性能,诸如物理性能、化学性能、力学性能、工艺性能,因而能够适应科学技术方面和人民生活方面所提出的各种不同的要求;另一方面,是它那始终蕴藏着在性能方面以及数量和质量方面的巨大潜在能力,可供随时挖掘,因而能够随着日益增长的名目繁多的要求,而不断地更新和发展。

现代科学技术和工农业生产以及人民日常生活对金属材料性能方面所提出的要求,尽管名目繁多,但是归纳起来大致可分为两大类:一类是工艺性能;另一类是使用性能。使用性能在于保证能不能应用的问题,而工艺性能则在于能不能保证生产和制作的问题,也就是说解决怎么样去应用的问题。

金属材料从冶炼到作为成品使用以前,需要经过铸造、压力加工、机械加工、热处理以及铆焊等一系列的工艺过程,它能否适应这些工艺过程中的要求,以及适应的程度如何,是决定它能否进行生产,或如何进行生产的重要因素。金属材料所具有的那种能够适应实际生产工艺要求的能力统称工艺性能,例如铸造性、锻造性、深冲性、弯曲性、切削性、焊接性、淬透性等等。这类性能虽然是金属材料本身所固有的,但是如何测试和表达它呢?它的物理实质又是什么呢?这是个相当复杂的问题,因为这类性能往往是由几种参变量(包括物理的、化学的、力学的)综合作用所决定的。例如,所谓铸造性能既与金属的熔点、黏度以及液态和固态的膨胀系数有关,又和液态与其周围介质的化学作用以及由此而产生的化合产物的物理性质相联系,企求用单一的物理参量来表示是相当困难的,也是十分繁杂的。于是工程上用特定的所谓流动性、填充性、凝固收缩性、热裂性等综合起来表示铸造性能。其他工艺性能,也作类似的处理。为了进行预测或比较,且为了方便起见,工程上多采用模拟实验的方法,即模拟实际生产条件而设计出一套实验装置,测出所规定的一套数值指标,用来作为判别工艺性能的规定标准。通常所说的工艺性能,即指这些数值指标。严格说,它只能在一定程度上或近似地反映材料本身在具体生产流程中所表现的实际工艺性能,但由于具有实用价值,而且测试比较方便,所以被广泛采用。

金属材料制作成工件后,在使用过程中,则要求它能适应或抵抗作用到它上面的各种外界作用。随构件和使用条件的不同,这些外界作用是相当复杂的,既有质的区别,又有量的

不同。它包括诸如各种力学、化学、辐射、电磁场以及温度的作用等等。这些作用有强有弱，有大有小，有单一的，也有复合的。例如，作为结构材料，一般都首先要求能够分别或同时承受各种动力学或静力学的作用，但随使用条件不同，又会附加对抵抗其他作用的要求，例如：大气下要求抗天气腐蚀；航海中要求抗海水腐蚀；化工上要求抗各种化学介质腐蚀；电机上要求抵抗或顺应电磁场的作用；原子能工业中则要求抗辐射作用；用于空间技术则要求耐高温或耐低温的性能等。金属材料满足这些要求的能力，合起来统称为使用性能，分别称力学性能、抗腐蚀性能(或化学性能)、电磁性能、耐热性能等。这些性能大部分可以和材料的一些基本物理量直接地联系起来，但工业上为了实用的方便，也大多是采用模拟实验指标来表示。例如由拉伸试验测出的所谓屈服强度、抗拉强度、延伸率、面缩率；由冲击试验测得的所谓韧性值；由裂口试样测得的所谓断裂韧性等即属于此，这意味着这些指标和实际有一定差距，因此，改进现有的测试技术和创造新的测试技术，以便能更方便更准确地由实验室的小试样反映金属材料的各种构件在使用过程中的实际性能，也是发挥材料潜力的另一个重要领域。

工艺性能和使用性能是既有联系又不相同的两类性能，尽管它们都是金属材料本身蕴藏着的，但由于目的不同，这两类性能的好与坏或高与低，有时是一致的，有时却是互相矛盾的。例如，一些要求高强度或高硬度或耐高温的材料常常会给压力加工、机械加工、铸造等工艺带来不少困难，有时甚至会达到否定某些材料的程度。因此一方面需要改进加工工具和加工制做方法以提高材料的工艺性能，另一方面应使材料具有多变性或多重性以提高其使用性能。大部分钢铁和一部分有色金属材料已在一定程度上具有这方面的许多特点，这也是金属材料的可贵之处。由此可见，工艺性能和使用性能之间的这对矛盾的解决过程，也是一个促进金属材料发展的过程。

工艺性能和使用性能的不断改善和创新，是金属材料发展进程中的显著特征，也是将来发展的重要内容。它的潜在能力仍然是很大的，有待于我们进一步去挖掘和发挥。例如，近年来已经发现苗头，利用完整的金属晶体或金属玻璃（非晶态金属）有可能使金属材料的强度提高几倍，甚至几十、几百或几千倍以上。

### 1.3 决定金属材料性能的基本因素

金属材料在性能方面所表现出的多样性、多变性和特殊性，使它具有远比其他材料较为优越的性能，这种优越性是其固有的内在因素在一定外在条件下的综合反映。这内在因素首先应从原子结构的特点以及原子间的相互作用来探讨；其次要探讨金属材料内部原子总体的组合状态——即内部原子总体的运动状态。这个问题所涉及的范围是很广的，有的已超出了本书范围，有的是后面章节将要讨论的，本书作为普通金属学教学内容，着重阐述基本概念，基本理论及其在碳钢、铸铁和合金钢等实际材料中的应用，为学习其他专业课奠定基础。

### 1.4 金属学的研究对象、方法和目的

金属学是关于金属材料——金属和合金的科学，它的中心内容应是研究金属和合金的成分、结构、组织和性能，以及它们之间的相互关系和变化规律。目的在于利用这些关系和规律来指导科学研究和生产实践，以便更充分有效地发挥现有金属材料的潜力，并进而创制

新的金属材料。金属学基本上是一门应用科学,也是一门偏重于实验的科学。

金属学的研究方法可分为实验和理论两个方面。

分析成分,测定结构,观察和鉴别组织,测试性能以及从动力学方面分析结构和组织的形成和变化,应是金属学的基本实验内容。X线分析法,光学显微镜(以下简称光镜)分析法,电镜和电子探针等技术以及各种测试力学、电磁学、热学和化学性能的实验技术等等,则是进行金属学实验的重要方法和手段。

研究组织的最简单的方法是肉眼观察,这种方法称为宏观分析法,它能分辨出金属和合金的低倍组织—材料在宏观范围内的化学的和物理的不均匀性,如铸件的偏析、气孔、疏松、裂纹、晶带,压力加工所造成的流线、经化学热处理后的渗碳层,断口的形式(韧断或脆断)等等。宏观分析作为一种检查产品或半成品质量的方法,现在仍然广泛地应用于生产上。

观察细微组织可借助于光学显微镜。在光镜下所观察到的组织,一般称为显微组织。光镜由于受到光波长的限制,分辨能力约为  $1.5 \times 10^{-4}$  cm,有效放大率为 1000~1500 倍。更细致的组织,必须借助电子显微镜。电镜的分辨能力可达  $10^{-6} \sim 10^{-7}$  cm。在电镜下所观察到的组织称电镜组织。此外,场离子显微镜的应用,可将分辨能力进一步提高,而达到近于原子大小的尺度。

利用 X 衍射方法可以测定金属和合金内部各种相的晶体结构。电子探针(微区 X 谱分析)则可用于分析组织中显微区域内的化学成分。

借助于力学的、电学的、热学的、热电的、磁学的和化学的实验方法可以测定金属和合金的各种有关性能。同时,由于其性能的变化是结构组织变化的反映,所以也可以利用这些方法来间接地研究结构组织的形成和变化过程。

金属学理论方面的研究主要包括热力学、分子动力学以及电子理论在金属学中的应用。热力学分析法用于研究合金系中相的形成和相平衡的条件以及条件变化时相变的方向、限度和驱动力。分子动力学分析法则用于研究金属和合金中各种转变过程中的速度和机理方面的问题。电子理论可使有关结构和性能方面的研究更深化一步。

在实际的研究工作中,通常是将各种实验方法结合起来,取长补短,相互补充,以取得可靠的资料或数据,再进行理论的分析 and 综合,找出规律性的东西。金属学已有的基本原理就是由此而取得的,进一步的理论也得靠此来探索和补充。

本篇作为普通金属学内容,着重阐述基本概念,基本理论及其在碳素钢、铸铁和合金钢等实际材料中的应用。为学习其他专业课奠定基础。

### 复习思考题

1. 什么是金属材料?
2. 什么是金属材料的工艺性能?
3. 什么是金属材料的使用性能?

## 2 金属的组织 and 结构

### 2.1 金属原子结构及其特点和类型

在全部的化学元素中约有四分之三是金属元素(见表 2-1 元素周期表及各元素的晶体结构)。金属与非金属的区分通常是以从硼到砷划一斜线来作为分界线的,其右为非金属,左为金属,斜线附近元素则具有二重性。

金属在物理、化学及力学性能方面具有以下的一些特征:有的金属硬度很高,有的金属塑性很大;有的金属导电率很大;有的金属电阻较高;有的金属具有较大的磁性,有的则几乎没有磁性;有的能抵抗酸碱侵蚀,有些则没有高的耐蚀能力等等。此外,很多金属还具有可铸性、锻压性、切削性和焊接性等一系列的工艺性能。有的金属同时具有几个特征,有的则某个特征较为突出。

近代合金的发展,使金属的上述特征得以综合应用。金属为什么能有以上的这些特征?这和金属的组织 and 内部结构有关。金属与合金的内部原子(或分子)间的结合,取决于组成物质的各元素本身和元素相互之间的化学行为。而元素的化学行为则取决于其原子的电子结构,特别是取决于其最外层的电子结构。

在元素周期表中,化学性最稳定的元素是 0 族元素,即惰性气体 He、Ne……等,它们几乎完全不和其他元素化合,自身也难以结合,所以多呈原子气态。它们在元素周期表中都分别位于每个周期的最后,它们的电子结构特点是,所有按量子力学规律应该填满的各电子层,特别是最外部的  $s$ 、 $p$  电子层都被电子填满了。这就意味着这样的电子结构能量低,化学上最稳定。正因为如此,所以元素在相互作用中,都力求使其原子外层的电子结构变得与它相邻近的惰性元素相似。这个概念很重要,它是讨论元素化学行为的基点。

#### 2.1.1 金属原子结构的特点

所有化学元素,除 0 族外,大致可分为两大类:金属和非金属。

由近代物理的概念知道,各种元素的原子都是由带正电荷的原子核和绕核运动的带有负电荷的一定数目的电子所构成的,电子的数目等于该元素的原子序数。原子内的电子是按电子层分布的,各电子层中的电子数目遵从  $N=2n^2$  ( $n$  代表层数,即所谓主量子数)的规律,即:

在第一层内可有:  $N=2 \times 1^2=2$  个电子

在第二层内可有:  $N=2 \times 2^2=8$  个电子

在第三层内可有:  $N=2 \times 3^2=18$  个电子

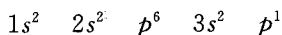
在第四层内可有:  $N=2 \times 4^2=32$  个电子

在各层中,根据各电子运动轨道的能级高低不同,每层还可分成为若干次层,各以如下的符号来表示:

$$s^2, p^6, d^{10}, f^{14}$$

符号右上角的数字表示该次层中所能容纳的最大电子数。

由上所述,各元素原子中的电子层分布可按如下方式来描述。如:铝原子中的电子层结构可表示为:



即在铝原子的电子层中,在其第一层中的  $s$  次层内有 2 个电子;在第二层中的  $s$  次层中有 2 个电子,在  $p$  次层中有 6 个电子;而在第三层中的  $s$  次层中有 2 个电子,在  $p$  次层中有 1 个电子;总共有 13 个电子。

在各元素原子结构中,最值得注意的是其最外层的价电子数目(如铝的价电子数为 3),它决定着该元素的主要的物理与化学性质。金属元素原子结构的特点就是它的价电子数目少(一般公有 1、2 或 3 个),价电子与原子核的结合力很弱,极易于形成正离子的特征,这就使金属在形成固体时有如下所述的原子结合方式的特点以及一系列的金属特性。

在这里还值得提出的是,在各金属元素中,从原子序数为 21 的钪(Sc)到原子序数为 28 的镍(Ni),以及在周期表中所对应在它以下的各金属元素,在它们的原子结构中均有内部次层电子尚未填满的特征,如铁的原子结构即如此( $\text{Fe}-1s^2 2s^2 p^6 3s^2 p^6 d^6 4s^2$ ),其  $4s$  层中虽已填满 2 个电子,但在其  $3p$  次层中尚缺少 4 个电子。这是因为,  $4s$  次层的电子较  $3d$  次层的能级较低所致,如图 2-1 所示。这些元素统称为“过渡族元素”,它们除了也具有一般的金属特性以外,由于它们的  $d$  电子有时也会参与原子间结合的缘故,所以还具有一系列的象变价性,高硬度和高熔点等的性能特征。由此得出,金属原子的特点在于它的最外层的电子数较少,大多 1 个或 2 个,最多不超过 4 个;而非金属原子则相反,外层电子数较多(4~8 个)。因此,金属原子易于丢失外层电子,以便达到与其相邻的前一周期的惰性元素相似的电子结构;而非金属原子则易于取得电子,以便达到与其同周期的惰性元素相似的电子结构。这样一来金属原子就会变成正离子,而非金属原子则会变成负离子。所以化学中就把元素分为两大类:正电性元素——易于失掉电子的元素,如金属;负电性元素——易取得电子的元素,如非金属。但某一元素究竟是否是金属,还要从具体化学行为中来鉴别。虽然如此,但这样分类有利于我们去理解原子(或分子)间的结合规律。

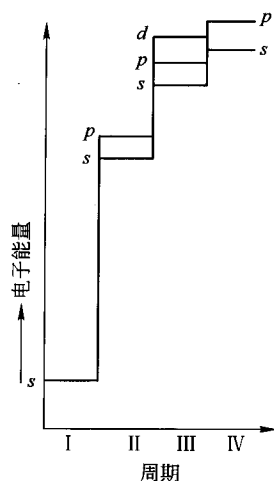


图 2-1. 电子的能级图

### 2.1.2 金属原子间结合的类型和特点

金属和合金中的原子结合,主要是同种或异种金属原子间的结合,但有时也可以出现金属与非金属原子间,甚至非金属原子间的结合,这种原子与原子之间的结合称之为结合键。结合键的基本类型可以包括以下四类。

#### 2.1.2.1 离子键

当一正电性元素和一负电性元素相接触时,由于电子一失一得,它们各自变成正离子和负离子,二者靠静电作用相互结合起来,这种结合方式就叫离子键。图 2-2(a)为其示意图。在元素周期表(表 2-1)上,越靠左下方的元素,正电性越强;而越靠右上方的元素,负电性越强(0 族除外)。这两类元素最易以离子键结合,而且相互在周期表上的距离越远,键越强;



表 2-1 元素周期表及各元素的晶体结构

1 (H) H 氢		2 (A <sub>2</sub> ) (A <sub>3</sub> ) He 氦	
3 A <sub>2</sub> A <sub>1</sub> (A <sub>3</sub> ) 锂 Li	4 A <sub>2</sub> A <sub>1</sub> (A <sub>2</sub> ) (A <sub>3</sub> ) 铍 Be	11 A <sub>1</sub> A <sub>3</sub> 钠 Na	12 A <sub>3</sub> 镁 Mg
19 A <sub>2</sub> A <sub>1</sub> 钾 K	20 A <sub>3</sub> A <sub>1</sub> 钙 Ca	21 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 钪 Sc	22 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 钛 Ti
37 A <sub>2</sub> A <sub>1</sub> 铷 Rb	38 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 锶 Sr	39 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 钇 Y	40 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 锆 Zr
55 A <sub>2</sub> A <sub>1</sub> 铯 Cs	56 A <sub>2</sub> A <sub>1</sub> 钡 Ba	57 A <sub>2</sub> A <sub>1</sub> 镧 La	58 A <sub>2</sub> A <sub>1</sub> 铈 Ce
87 A <sub>2</sub> A <sub>1</sub> 钫 Fr	88 A <sub>2</sub> A <sub>1</sub> 镭 Ra	89 A <sub>2</sub> A <sub>1</sub> 锕 Ac	90 A <sub>2</sub> A <sub>1</sub> 钍 Th
VIII			
I <sub>B</sub>		II <sub>B</sub>	
29 A <sub>1</sub> (A <sub>2</sub> ) (A <sub>3</sub> ) 铜 Cu	28 A <sub>1</sub> (A <sub>2</sub> ) (A <sub>3</sub> ) 镍 Ni	30 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 锌 Zn	31 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 镓 Ga
47 A <sub>1</sub> 银 Ag	46 A <sub>1</sub> 钯 Pd	48 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 镉 Cd	49 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 铟 In
79 A <sub>1</sub> 金 Au	78 A <sub>1</sub> 铂 Pt	80 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 汞 Hg	81 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 铊 Tl
107 A <sub>1</sub> 錀 Ts	106 A <sub>1</sub> 𨨏 Og	108 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 铂 Pt	109 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 铊 Tl
111 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 铊 Tl	112 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 铅 Pb	113 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 铋 Bi	114 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 钋 Po
151 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	152 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	153 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	154 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
155 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	156 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	157 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	158 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
159 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	160 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	161 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	162 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
163 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	164 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	165 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	166 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
167 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	168 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	169 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	170 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
171 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	172 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	173 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	174 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
175 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	176 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	177 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	178 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
179 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	180 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	181 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	182 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
183 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	184 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	185 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	186 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
187 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	188 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	189 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	190 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
191 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	192 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	193 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	194 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
195 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	196 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	197 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	198 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
199 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	200 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	201 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	202 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
203 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	204 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	205 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	206 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
207 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	208 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	209 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	210 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
211 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	212 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	213 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	214 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
215 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	216 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	217 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	218 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
219 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	220 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	221 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	222 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
223 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	224 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	225 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	226 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
227 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	228 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	229 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	230 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
231 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	232 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	233 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	234 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
235 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	236 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	237 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	238 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
239 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	240 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	241 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	242 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
243 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	244 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	245 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	246 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
247 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	248 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	249 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	250 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
251 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	252 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	253 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	254 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
255 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	256 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	257 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	258 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
259 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	260 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	261 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	262 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
263 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	264 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	265 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	266 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
267 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	268 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	269 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	270 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
271 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	272 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	273 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	274 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
275 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	276 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	277 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	278 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
279 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	280 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	281 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	282 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
283 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	284 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	285 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	286 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
287 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	288 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	289 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	290 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
291 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	292 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	293 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	294 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
295 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	296 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	297 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	298 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
299 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	300 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	301 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	302 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
303 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	304 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	305 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	306 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
307 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	308 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	309 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	310 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
311 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	312 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	313 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	314 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
315 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	316 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	317 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	318 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
319 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	320 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	321 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	322 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
323 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	324 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	325 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	326 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
327 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	328 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	329 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	330 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
331 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	332 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	333 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	334 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
335 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	336 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	337 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	338 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
339 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	340 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	341 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	342 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
343 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	344 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	345 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	346 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
347 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	348 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	349 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	350 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
351 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	352 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	353 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	354 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
355 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	356 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	357 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	358 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
359 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	360 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	361 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	362 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
363 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	364 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	365 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	366 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
367 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	368 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	369 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	370 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
371 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	372 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	373 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	374 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
375 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	376 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	377 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	378 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
379 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	380 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	381 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	382 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
383 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	384 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	385 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	386 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
387 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	388 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	389 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	390 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
391 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	392 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	393 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	394 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
395 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	396 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	397 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	398 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
399 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	400 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	401 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	402 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
403 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	404 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	405 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	406 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
407 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	408 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	409 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	410 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
411 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	412 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	413 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	414 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
415 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	416 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	417 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	418 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
419 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	420 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	421 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	422 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
423 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	424 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	425 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	426 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
427 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	428 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	429 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	430 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
431 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	432 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	433 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	434 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
435 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	436 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	437 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	438 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
439 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	440 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	441 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	442 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu
443 A <sub>2</sub> A <sub>3</sub> 鉕 Uu	444 A <sub>2</sub> A		