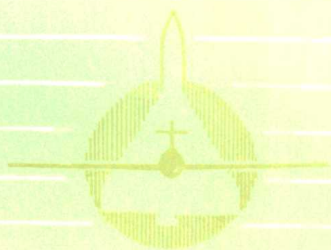


合金钢锻造

西北工业大学 陈诗荪 主编



国防工业出版社

合金钢锻造

西北工业大学 陈诗荪 主编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书包括合金结构钢和工具钢锻造、高速钢和高铬模具钢锻造、不锈钢锻造以及高温合金锻造等四章。各章对钢材或合金的材质、锻造性能、锻造热力学参数的合理选择、锻造工艺和锻件质量控制等方面都作了详细分析讨论,并对设备选择作了简单介绍。在第三、第四章中,分别对锻模寿命、锻模材料选择以及锻模设计特点作了叙述。本书可作高等院校锻压专业的教材,也可作锻压专业科技人员的参考书。

合 金 钢 锻 造

西北工业大学 陈诗荪 主编

责任编辑 王德康

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $1/32$ 印张 $5\frac{3}{8}$ 138千字

1984年6月第一版 1984年6月第一次印刷 印数, 0,001—2,500册

统一书号: 15034·2729 定价: 0.70元

前 言

本书是《有色金属与合金钢锻造》课程中合金钢锻造部分的教材，是根据航空锻压专业《合金钢锻造》教学大纲编写的。

本书共有四章。第一章讨论低、中合金钢的锻造问题；第二章至第四章讨论高合金钢和高合金化镍基合金的锻造问题。这样安排便于把后三章与第一章加以对比。

本教材第一、第二章由苏祖武编写，第三章、第四章由陈诗荪编写。全书由陈诗荪主编。

本书由西安交通大学汪大年审阅。

由于编者水平有限，书中难免有不少缺点错误，诚恳希望广大读者批评指正。

在本书编写过程中，曾得到西北工业大学、南昌航空工业学院一些同志的帮助，在此表示衷心感谢。

目 录

第一章 合金结构钢和工具钢锻造

一、概述	1
二、锻造用原材料	1
1. 冶炼方法对钢材质量的影响	1
2. 钢锭结晶构造	6
3. 钢锭和钢材低倍冶金缺陷	6
4. 电渣重熔钢锭的冶金特点	10
三、可锻性	11
1. 杂质和合金元素对钢塑性的影响	11
2. 高温塑性	13
3. 变形抗力	15
四、锻造温度范围	16
1. 始锻温度的确定	17
2. 终锻温度的确定	18
3. 锻造温度范围的精确化	20
五、锻造对钢材组织和机械性能的影响	24
1. 锻造比和锻粗比	25
2. 锻造比对钢锭低倍组织和机械性能的影响	27
3. 锻造比的选择	30
4. 锻造对钢晶粒度的影响	31
六、锻造工艺	33
1. 备料	33
2. 加热	34
3. 锻造	36
4. 锻模预热	39
5. 锻模的润滑与冷却	40
6. 锻件的冷却	40

七、锻件内部典型缺陷	43
1. 残余缩孔	43
2. 裂纹和裂缝	44
3. 夹杂和夹渣	44
4. 层状断口	44
5. 蔡状断口	44
6. 石状断口	45
7. 低倍粗晶	45
8. 本质晶粒度不合格	46
9. 成分偏析带	47

第二章 高速钢和高铬模具钢锻造

一、概述	48
二、高速钢和高铬模具钢的铸态组织	51
三、钢材中的碳化物分布规律及其对钢材机械性能的影响	52
四、锻造前的加热与锻后冷却	54
1. 锻造温度范围	54
2. 加热规范	55
3. 冷却规范	58
五、锻造方法对改善钢中碳化物偏析的影响	60
1. 不变向锻造	60
2. 变向锻造	64
3. 锻拔次数及锻拔变形量的确定	65
4. 关于锻件碳化物偏析评级的标准	66
六、锻造设备吨位选择和锻造工艺要点	70
七、锻后热处理	71
1. 高速钢锻件的退火	71
2. 高铬模具钢锻件的退火	72
八、锻件典型缺陷及其防止方法	73
1. 锻造裂纹	73
2. 表面裂纹或龟裂	78
3. 蔡状断口	78

第三章 不锈钢锻造

一、概述	79
1. 不锈钢的性能、用途及分类	79
2. 不锈钢中的主要合金元素	82
3. 锻造不锈钢时的主要问题	83
二、可锻性	83
1. 不锈钢在高温下的变形抗力	83
2. 过剩 α 相对钢工艺塑性的影响	84
三、锻造温度范围	88
1. 铁素体不锈钢	88
2. 奥氏体不锈钢	89
3. 马氏体不锈钢	89
4. 沉淀硬化不锈钢	90
四、设备吨位的确定	91
1. 直接确定设备吨位	91
2. 通过估算打击能量确定设备吨位	93
五、锻造工艺特点	95
1. 匀整毛坯的切割	95
2. 毛坯的加热	95
3. 模锻	97
4. 切边	97
5. 冷却	97
6. 表面清理	98
六、锻模寿命与锻模材料选择	99
七、模锻工艺举例	102
1. 环状模锻件的模锻工艺	102
2. 长轴类模锻件的模锻工艺	103
八、锻件典型缺陷	107

第四章 高温合金锻造

一、概述	109
------------	-----

1. 变形高温合金的分类	109
2. 铁基变形高温合金	109
3. 镍基变形高温合金	111
4. 钴基高温合金	114
二、杂质和微量元素的影响	114
1. 杂质对高温合金性能的影响	114
2. 杂质对高温合金晶界强度的影响	114
3. 微量硼、锆、铈等元素的作用	116
三、高温合金的冶炼特点	116
四、可锻性	119
1. 铁基高温合金的可锻性	120
2. 镍基高温合金的可锻性	121
五、锻件中的局部粗晶	123
1. 三种不同类型的粗晶	123
2. 临界变形粗晶的形成原因	125
3. 影响粗晶形成的主要因素	127
4. 防止粗晶的方法	132
5. 细化晶粒的新工艺——粉末锻造	134
六、锻造温度范围	135
1. 始锻温度的确定	135
2. 终锻温度的确定	139
七、模锻设备的选择	141
1. 设备类型的选择	141
2. 设备吨位的确定	142
八、锻模设计特点	143
九、锻造工艺特点	147
1. 匀整毛坯的切割	147
2. 毛坯表面缺陷的清理与探伤	148
3. 毛坯在锻造前的加热	149
4. 自由锻造	156
5. 模锻	157
6. 切边	157

VIII

7. 冷却	158
8. 清理	158
十、模锻工艺举例	159
1. GH33 涡轮盘模锻件的锻造工艺	159
2. GH78 铁基高温合金涡轮盘的模锻	160
十一、锻件典型缺陷及其防止方法	161
参考文献	163

第一章 合金结构钢和工具钢锻造

一、概 述

合金结构钢按其用途分类，可分为渗碳钢、调质钢、弹簧钢和轴承钢。

航空工业上常用的合金结构钢的牌号、化学成分以及按退火状态和正火状态的金相组织分类，见表 1-1 所示。

工业上常用的合金工具钢的牌号、化学成分及按退火状态和正火状态的金相组织分类，见表 1-2 所示。

二、锻造用原材料

锻造用原材料有钢锭和钢材。锻件的冶金质量主要取决于原材料的生产工艺，即冶炼方法、浇铸工艺、轧制工艺等因素。

1. 冶炼方法对钢材质量的影响

现代炼钢的方法有三种：转炉炼钢法、平炉炼钢法和电炉炼钢法。这三种炼钢法所用的炼钢炉的炉衬是碱性的或酸性的耐火材料，因此，又有碱性的转炉、平炉、电炉和酸性的转炉、平炉、电炉之分。由于在酸性炼钢炉中炼钢时，不能去除生铁中的硫和磷，所以，工业上大都采用碱性的炼钢炉来炼钢。

碱性底吹转炉炼钢法可去除生铁中的硫和磷，但钢中氮、氧含量较多，钢的质量低，主要用来冶炼碳含量低的钢。纯氧顶吹转炉钢中氮、氢、氧等气体，硫、磷和非金属夹杂物的含量均较少，与平炉钢的质量相当或比它更高。而且这种钢的产钢率高，成本低，目前国外有很大的发展⁽¹⁾。

电弧炉钢和感应电炉钢中含有的气体、硫和磷、氧化物夹杂少，比转炉、平炉钢的质量好。一般要求较高的合金钢锻件均用电炉钢。

表 1-1 合金结构钢的牌号、化学成分及组织分类

序号	钢号	化 学 成 分 (%)						退火状态 分类	正火状态分类
		碳	锰	硅	磷	硫	其 它		
1	15CrA	0.12~0.17	0.40~0.70	0.17~0.37	0.70~1.00	≤0.25		亚共析钢	珠光体钢
2	38CrA	0.35~0.42	0.50~0.80	0.17~0.37	0.80~1.10	≤0.40		亚共析钢	珠光体钢
3	13Ni5A	0.10~0.17	0.30~0.60	0.17~0.37	≤0.30	4.50~5.00		亚共析钢	珠光体-马氏体钢
4	21Ni5A	0.18~0.25	0.30~0.60	0.17~0.37	≤0.30	4.50~5.00		亚共析钢	珠光体-马氏体钢
5	12CrNi3A	0.10~0.16	0.30~0.60	0.17~0.37	0.60~0.90	2.75~3.15		亚共析钢	珠光体-马氏体钢
6	37CrNi3A	0.33~0.41	0.25~0.55	0.17~0.37	1.20~1.60	3.00~3.50		亚共析钢	珠光体-马氏体钢
7	12CrNi4A	0.10~0.15	0.30~0.60	0.17~0.37	1.25~1.65	3.25~3.65		亚共析钢	珠光体-马氏体钢
8	40CrVA	0.37~0.44	0.50~0.80	0.17~0.37	0.80~1.10	≤0.25	钒: 0.10~0.20	亚共析钢	珠光体钢
9	50CrVA	0.46~0.54	0.50~0.80	0.17~0.37	0.80~1.10	≤0.25	钒: 0.10~0.20	亚共析钢	珠光体钢
10	16Cr2MnTiA	0.13~0.18	1.00~1.30	0.17~0.37	1.50~1.80	≤0.25	钛: 0.06~0.12	亚共析钢	珠光体钢
11	30CrMnSiA	0.28~0.35	0.80~1.10	0.90~1.20	0.80~1.10	≤0.40		亚共析钢	珠光体钢
12	38CrMoAlA	0.35~0.42	0.30~0.60	0.17~0.37	1.35~1.65	≤0.25	铝: 0.15~0.25 钼: 0.70~1.10	亚共析钢	珠光体钢
13	40CrNiMoA	0.37~0.44	0.50~0.80	0.17~0.37	0.60~0.90	1.25~1.65	钼: 0.15~0.25	亚共析钢	珠光体-马氏体钢

14	30Cr2Ni2WA	0.27~0.34	0.30~0.60	0.17~0.37	1.60~2.00	1.40~1.80	钨: 1.20~1.60	亚共析钢
15	30Cr2Ni2WVA	0.27~0.34	0.30~0.60	0.17~0.37	1.60~2.00	1.40~1.80	钨: 1.20~1.60 钒: 0.18~0.28	亚共析钢
16	18CrNi4WA	0.14~0.20	0.25~0.55	0.17~0.37	1.35~1.65	4.00~4.40	钨: 0.80~1.20	马氏体钢
17	30CrMnSiNi2A	0.27~0.34	1.00~1.30	0.90~1.20	0.90~1.20	1.40~1.80		亚共析钢
18	15Cr2MnNi2TiA	0.13~0.18	0.70~1.00	0.17~0.37	1.40~1.80	1.40~1.80	钛: 0.06~0.12	亚共析钢
19	25CrMnNiTiA	0.22~0.29	0.80~1.10	0.20~0.50	1.30~1.70	0.90~1.30	钛: 0.06~0.12	亚共析钢
20	40CrMnSiMoA(GC-4)	0.37~0.42	0.80~1.20	1.20~1.60	1.20~1.50	≤0.25	钼: 0.45~0.60	亚共析钢
21	18CrMn2MoBA(GC-11)	0.16~0.21	1.60~1.90	≤0.30	1.00~1.30	≤0.25	钼: 0.45~0.60 钒: 0.002~0.004	亚共析钢

表1-2 合金工具钢的牌号、化学成分及组织分类

序号	钢 号	化 学 成 分					退火状态 分类	正火状态分类
		碳	锰	硅	铬	其 它		
1	Cr	0.95~1.10	≤0.40	≤0.35	1.30~1.60	—	过共析钢	珠光体钢
2	CrO5	1.25~1.40	0.20~0.40	≤0.35	0.40~0.60	—	过共析钢	珠光体钢

(续)

序号	钢 号	化 学 成 分 (%)				退火状态 分类	正火状态分类
		碳	锰	硅	磷		
3	7Cr3	0.60~0.75	0.20~0.40	≤0.35	3.20~3.80	—	珠光体钢
4	9CrSi	0.85~0.95	0.30~0.60	1.20~1.60	0.95~1.25	—	珠光体钢
5	CrMn	1.30~1.50	0.45~0.70	≤0.35	1.30~1.60	—	珠光体钢
6	CrMnSi	0.95~1.10	0.80~1.20	0.50~1.00	1.40~1.80	—	珠光体钢
7	V	0.95~1.05	0.20~0.40	≤0.35	—	钒: 0.20~0.40	珠光体钢
8	W1	1.05~1.25	0.20~0.40	≤0.35	0.10~0.30	钨: 0.80~1.20 钒: 0.15~0.30	珠光体钢
9	3Cr2W8V	0.30~0.40	0.20~0.40	≤0.35	2.20~2.70	钨: 7.5~9.0 钒: 0.2~0.5	马氏体钢
10	CrW5	1.25~1.50	≤0.30	≤0.30	0.40~0.70	钨: 4.50~5.50	马氏体钢
11	4CrW2Si	0.35~0.44	0.20~0.40	0.60~0.90	1.00~1.30	钒: 0.15~0.30 钨: 2.00~2.50	珠光体钢
12	CrWMn	0.90~1.05	0.80~1.10	0.15~0.35	0.90~1.20	钨: 1.20~1.60	珠光体-马氏体钢
13	9CrWMn	0.85~0.95	0.90~1.20	0.15~0.35	0.50~0.80	钨: 0.50~0.80	珠光体钢
14	5CrNiMo	0.50~0.60	0.50~0.80	≤0.35	0.50~0.80	钼: 1.40~1.80 钒: 0.15~0.30	珠光体-马氏体钢
15	5CrMnMo	0.50~0.60	1.20~1.60	0.25~0.65	0.60~0.90	钼: 0.15~0.30	珠光体-马氏体钢

为了进一步减少钢中的气体和非金属夹杂物，生产上还发展了新的炼钢技术，如真空感应炉、真空自耗炉、电渣重熔以及炉外真空处理等新技术。

真空感应电炉钢中气体含量比非真空电炉钢少许多，但因钢水在冶炼过程中仍要和耐火材料炉衬接触，钢中仍不能避免非金属夹杂物的污染。

经炉外真空处理（主要是脱氢）的钢中，脱氢率可达50~80%，钢中含氢量很少，适于制造白点敏感钢种的大锻件。经炉外真空处理过的钢中仍含有一定量的氧、氮、硫和非金属夹杂物。

真空自耗电极电弧重熔和电渣重熔原理，分别见图1-1和图1-2所示。两者的

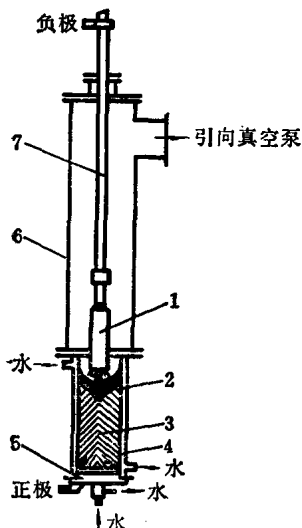


图1-1 真空自耗电极电弧重熔原理
1—自耗电极；2—熔融钢液；3—钢锭；
4—水冷结晶器；5—水冷口；6—真空
室；7—通电流电极。

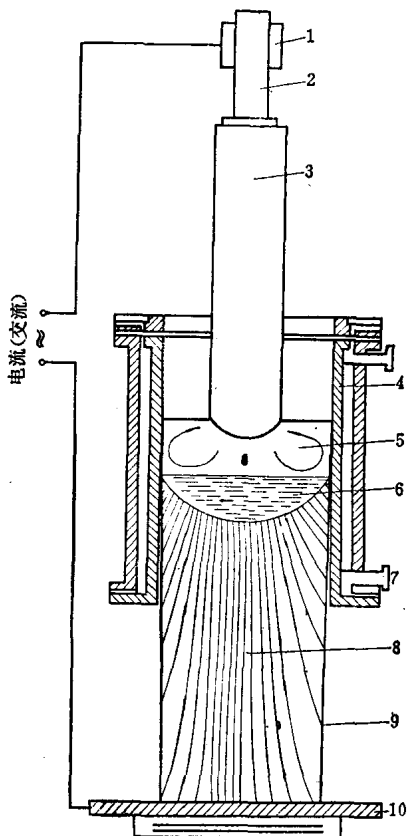


图1-2 电渣重熔原理
1—电极夹；2—电极接头；3—电极；4—
结晶器；5—渣池；6—钢熔池；7—冷却水
入口；8—钢锭；9—渣壳；10—引锭极。

电极均为普通炼钢法的钢锭制成。电极经重熔后成为重熔钢锭。由于结晶由下而斜向上方，凝固时生长起来的晶体前方得到钢水充分的补缩，所以得到的钢锭组织致密而均匀，没有缩孔和中心疏松，钢的质量高。航空上重要的合金结构钢锻件多用电渣钢。

2. 钢锭结晶构造

锻造用的钢锭一般都是在炼钢时添加硅铁、锰铁和铝铁等脱氧剂，使钢中的一氧化碳充分还原而得的镇静钢钢锭。

众所周知，镇静钢钢锭典型结晶构造由三个晶区组成，即表面等轴细晶区、中心等轴粗晶区和上两者之间的粗大柱状晶区。表面等轴细晶区组织致密性能好，但此层薄，对钢锭性能影响不大。粗大柱状晶区的大小主要决定于钢的化学成分和钢锭浇注条件。例如，随着钢中含镍量和含铬量的增加，钢锭中的柱状晶区增大；又如，钢水在高温下静置浇铸而后快冷，浇铸后铸锭中柱状晶区也大。柱状晶区组织致密，疏松和气泡较少。但当钢锭横截面形状为方形或长方形时，沿锭模相邻壁部长大起来的柱状晶区接合面，组织却很松软，往往含有低熔点非金属夹杂物或氧化物等，锻造时易沿此部位开裂。

在等轴粗晶区晶粒与晶粒之间啮合牢固，没有柱状晶区的晶体之间的松软部位。如果该区疏松较少，其强度将高于柱状晶区。

对于合金结构钢和工具钢钢锭来说，希望有大的等轴粗晶区为好。因为柱状晶区大的钢锭不但锻造时可能开裂，而且为了破碎枝晶需要较大的锻造比。

3. 钢锭和钢材低倍冶金缺陷

钢锭和钢材的冶金缺陷可分为两类：一类是使钢的连续性产生宏观破坏的缺陷（如肉眼可见的缩孔、残余缩孔、夹杂、气泡、裂缝、由点等）一般不允许存在。它们的存在常常是生产工艺不正常的反映。另一类是在正常生产条件下不可避免地存在于钢中的缺陷，只在它们超出规定的技术要求时，才能把钢判为不合格。这一类缺陷包括疏松、偏析、发纹、显微组织的不均匀性

(碳化物的不均匀性等)、过剩的 α 相、断口组织不均匀性等等。

下面主要叙述钢锭和钢材的低倍冶金缺陷。

(1) 缩孔、残余缩孔

缩孔位于钢锭冒口部分(见图1-3),因钢锭凝固时体积收缩,补缩不良引起。缩孔表面被氧化,非金属夹杂物偏析多,锻造时不能焊合。锻造时切除的冒口部分一般占钢锭重量的20~30%或更多。

在锻造或轧制时,若钢锭冒口部分切除太少,则在钢件或钢材上会留下残余缩孔。

(2) 中心疏松和一般疏松

疏松是指钢的不致密性。它位于钢锭的上部和中部,特别是缩孔下面。形成疏松的原因是:钢液凝固结晶时,各树枝晶晶间空隙富集了低熔点的夹杂和气体,以及被分隔在晶间空隙内的钢液在凝固收缩时得不到钢液补充而留下的小孔隙。疏松处集中了较多的夹杂和气体。

位于钢锭和钢材轴心部分的疏松称中心疏松;分布在钢锭或钢材整个截面上的疏松称一般疏松。

经过锻、轧以后,可使钢材的疏松程度减轻,提高钢的致密性。但当严重的中心疏松存在时,也可能使锻、轧件产生内部裂纹。严重的疏松将降低钢的机械性能,特别是塑性。例如,45Cr钢200×200毫米钢坯的正常断面收缩率为40~50%,有一般疏松缺陷时,则降至28~30%。

航空用钢的疏松评级,一般规定不超过2级(YB49-64)。

(3) 皮下气泡和蜂窝气泡

皮下气泡位于钢锭表面下方,蜂窝气泡位于钢锭内部,它们都是钢锭内气体形成的空洞。皮下气泡因其通过钢锭表面的细小孔隙和微裂纹与大气相通,表面被氧化,锻造和轧制时不能被焊合。钢坯或钢材的皮下气泡,实际上是表面发裂。在横向切片上

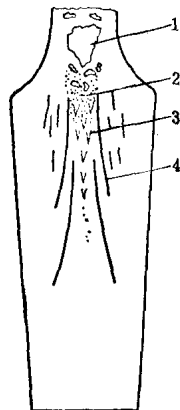


图1-3 钢锭缺陷
1—缩孔; 2—疏松;
3—心部偏析; 4—心
外偏析。

多为垂直于钢材表面分布的小裂纹，深度一般在表面下几毫米至十几毫米。裂纹处可能有氧化或脱碳。若皮下气泡的深度在加工余量范围内，则清除后可以使用。蜂窝气泡一般认为在锻压时可以焊合，但这并非是绝对的。因为它不仅与气泡的大小和数量有关，并且与锻压工艺有关。例如，高频炉冶炼的18CrNi4WA钢，锭重30公斤，钢内含氮量达0.03~0.04%。锻造比达到20时，钢锭中的蜂窝气泡也未得到焊合。因此，优质合金钢钢锭不允许有蜂窝气泡。

(4) 偏析

钢锭、钢坯或钢材中的化学成分分布不均匀称为偏析。树枝晶内各部分化学成分的不均匀性称为树枝晶偏析。它是晶体范围内的化学成分不均匀性，属于显微偏析。钢锭中心区域和外围区域的化学成分不均匀称为区域偏析。钢锭中的区域偏析呈V型（心部偏析）和八型（心外偏析），见图1-3所示。八形偏析区内，碳、硫、磷的含量高，氧化物和硫化物夹杂多；V形偏析区内，氧化物、硫化物夹杂更多。

钢锭锻造成钢坯或轧制成钢材后，区域偏析则成为钢坯或钢材中的方框偏析或点状偏析缺陷。

钢材或锻件的树枝状偏析严重时，会使钢的机械性能变坏，特别是使塑性和冲击韧性降低。这种情况在大型锻件生产中常可遇到，尤其是以中碳铬钼钢、铬钼钒钢和铬镍钢大型锻件最为普遍。例如，35CrMoVA钢叶轮的机械性能，由于轮毂部分锻压比比轮缘小，树枝状偏析保留较明显，在强度水平相同时，轮毂的冲击值（ $a_k=5.6$ 公斤·米/厘米²）比轮缘（ $a_k=8.1$ 公斤·米/厘米²）低。点状偏析、方框偏析也使钢的冲击值降低30~40%。

树枝晶偏析和由于合金元素分布不均引起的点状偏析（含铝的合金钢如88CrMoAlA钢中常会发现有点状偏析，在点状偏析处碳、硅、铬、钼含量偏高，铝含量偏低），一般可通过高温均匀化（1150~1200℃保温8小时或更长）予以消除。但是方框偏析和点状偏析中的非金属夹杂则不能用此法消除。需要靠提高钢