

“十五”国家重点图书

材料科学与工程手册

▷ 上卷

◎ 主编 师昌绪 李恒德 周 廉



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

第 6 篇 金属材料篇

编委会、撰稿人和审稿人名单

一、钢铁部分

编委会主任 殷瑞钰

编委会副主任 杨树森 东 涛

委 员 (按姓氏笔画排序)

马应龙 王 勤 王新林 孙家华 张永权 柳学全 赵先存
曹 军

撰 稿 人 (按姓氏笔画排序)

万 永	马应龙	王 焰	王 勤	王 蕾	王 燧	王新林
方玉诚	邓陈虹	东 涛	吕清法	朱维翰	朱鉴清	刘正东
刘佑华	刘英华	刘国权	刘海明	刘慕怡	庄景云	孙桂琴
孙家华	杨其萍	杨树桂	李 军	李世琼	李汉康	李景东
何开元	沙永志	张 洛	张 烽	张正义	张永权	张成俊
张羊焕	张启轩	陈再枝	陈其安	陈国钧	林家善	罗 迪
罗锡裕	柳学全	赵 晖	赵先存	赵栋梁	姜振春	祖荣祥
祝景汉	姚俊怀	殷为宏	唐仁波	浦玉萍	曹 军	康喜范
葛立强	董学智	蒋伯群	程世长	蔡平海	魏果能	瞿清昌

审 稿 人 (按姓氏笔画排序)

仲增墉 刘嘉禾 孙桂琴 李世魁 赵先存

二、有色金属及稀有金属部分

编委会主任 殷为宏

编委会副主任 兰新哲 陈 铮 唐仁波

委 员 (按姓氏笔画排序)

王成刚	王快社	王经涛	刘光华	刘建章	汤慧萍	孙洪志
杨冠军	李中奎	李明利	吴全兴	吴爱珍	张 青	张廷杰
柏文超	赵西成	赵志龙	郭鸿镇			

撰 稿 人 (按姓氏笔画排序)

马 光 王成刚 王快社 兰新哲 刘光华 刘建章 汤慧萍

孙洪志	杨冠军	李中奎	李银娥	吴 贤	吴全兴	吴爱珍
张 青	张廷杰	陈 铮	柏文超	赵西成	赵志龙	殷为宏
郭鸿镇	唐仁波	阎应科	蔡兴顺			

审 稿 人 (按姓氏笔画排序)

王经涛	邓 炬	李佩志	李敬生	吴全兴	张廷杰	陈 铮
袁弘鸣	殷为宏	郭鸿镇	唐仁波			

目 录

6.1 导论	6-11	6.3.4.15 铁合金包芯线	6-33
6.2 铁	6-12	6.3.5 铁合金生产环境保护及综合利用	6-34
6.2.1 生铁	6-12	6.3.5.1 铁合金工业“三废”的产生及治理 要求	6-34
6.2.1.1 炼钢生铁	6-12	6.3.5.2 铁合金工业废气治理技术	6-34
6.2.1.2 铸造生铁	6-12	6.3.5.3 铁合金工业废水治理技术	6-36
6.2.2 直接还原铁	6-12	6.3.5.4 铁合金工业固体废弃物治理技术	6-36
6.2.2.1 海绵铁	6-12	6.3.5.5 铁合金炉渣的综合利用	6-36
6.2.2.2 热压块铁	6-12	6.3.5.6 铁合金工业煤气的回收与利用	6-36
6.2.2.3 直接还原铁的生产	6-13	6.3.5.7 铁合金电炉余热回收和利用	6-37
6.2.3 铸铁	6-13	参考文献	6-37
6.2.3.1 灰铸铁	6-13	6.4 钢	6-38
6.2.3.2 球墨铸铁	6-14	6.4.1 按冶炼方法和设备分类	6-39
6.2.3.3 蠕墨铸铁	6-15	6.4.1.1 沸腾钢	6-39
6.2.3.4 可锻铸铁	6-17	6.4.1.2 镇静钢	6-40
6.2.3.5 抗磨铸铁	6-18	6.4.1.3 半镇静钢	6-40
6.2.3.6 耐热铸铁	6-19	6.4.1.4 连铸钢	6-40
6.2.3.7 耐蚀铸铁	6-21	6.4.1.5 洁净钢	6-41
参考文献	6-23	6.4.1.6 平炉钢	6-44
6.3 铁合金	6-24	6.4.1.7 转炉钢	6-45
6.3.1 铁合金的用途和分类	6-24	6.4.1.8 电弧炉钢	6-46
6.3.1.1 铁合金的定义	6-24	6.4.1.9 真空冶炼钢	6-46
6.3.1.2 铁合金的用途	6-24	6.4.1.10 等离子熔炼钢	6-47
6.3.1.3 铁合金产品的分类	6-24	6.4.1.11 电渣重熔钢	6-47
6.3.2 铁合金生产的主要方法	6-24	6.4.2 非合金钢	6-47
6.3.2.1 按使用的设备分类	6-24	6.4.2.1 非合金钢中的合金元素	6-48
6.3.2.2 按热量来源分类	6-24	6.4.2.2 以规定最高强度为主要特性的非合 金钢	6-48
6.3.2.3 按操作方法和工艺分类	6-25	6.4.2.3 以规定最低强度为主要特性的 非合金钢	6-49
6.3.3 铁合金生产主要专用设备	6-25	6.4.2.4 以碳含量为主要特性的非合金钢	6-49
6.3.3.1 铁合金还原电炉	6-25	6.4.2.5 非合金易切削钢	6-50
6.3.3.2 铁合金精炼炉	6-25	6.4.2.6 非合金工具钢	6-51
6.3.3.3 配料、上料及炉顶布料设备	6-26	6.4.2.7 规定电磁性能的非合金钢	6-51
6.3.3.4 铁合金还原电炉炉口操作设备	6-26	6.4.3 低合金钢	6-54
6.3.3.5 铁合金还原电炉炉前操作设备	6-26	6.4.3.1 低合金高强度钢	6-54
6.3.3.6 合金浇铸成型设备	6-26	6.4.3.2 锅炉和压力容器用低合金钢	6-59
6.3.3.7 焙烧设备	6-26	6.4.3.3 普通船舶用低合金钢	6-61
6.3.4 铁合金品种	6-26	6.4.3.4 桥梁用低合金钢	6-63
6.3.4.1 硅系合金	6-26	6.4.3.5 舰船用低合金钢	6-64
6.3.4.2 锰系合金	6-28	6.4.3.6 抗层状撕裂低合金钢	6-67
6.3.4.3 铬系合金	6-29	6.4.3.7 油气管线用低合金钢	6-67
6.3.4.4 钒铁	6-30	6.4.3.8 低温用低合金钢	6-69
6.3.4.5 氮化钒	6-31	6.4.3.9 建筑用低合金钢	6-71
6.3.4.6 钼铁	6-31	6.4.4 合金钢	6-75
6.3.4.7 钛铁	6-31	6.4.4.1 合金结构钢	6-77
6.3.4.8 铌铁	6-31	6.4.4.2 合金弹簧钢	6-82
6.3.4.9 钨铁	6-31	6.4.4.3 超高强度钢	6-86
6.3.4.10 硼铁	6-31	6.4.4.4 轴承钢	6-90
6.3.4.11 锆铁	6-32	6.4.4.5 不锈钢	6-95
6.3.4.12 磷铁	6-33		
6.3.4.13 稀土铁合金	6-33		
6.3.4.14 多元铁合金	6-33		

6.4.4.6 耐热钢	6-102	参考文献	6-150
6.4.4.7 合金工具钢	6-105	6.6 镁及镁合金	6-151
6.4.4.8 高速工具钢	6-109	6.6.1 镁的基本性质	6-151
6.4.4.9 耐磨钢	6-112	6.6.1.1 镁的物理性质	6-151
6.4.4.10 功能合金钢	6-114	6.6.1.2 镁的力学性能	6-151
6.4.5 铸钢	6-118	6.6.1.3 镁的化学性质	6-151
6.4.5.1 非合金和合金结构铸钢	6-120	6.6.2 镁的矿物资源	6-152
6.4.5.2 耐磨铸钢	6-120	6.6.3 镁的冶炼	6-152
6.4.5.3 耐蚀铸钢	6-124	6.6.3.1 氯化镁熔盐电解法	6-152
6.4.5.4 耐热铸钢	6-126	6.6.3.2 热还原法	6-152
6.4.5.5 低温和深冷铸钢	6-127	6.6.4 镁及镁合金的加工	6-152
6.4.5.6 超高强度铸钢	6-129	6.6.4.1 镁及镁合金铸锭的生产	6-152
6.4.6 废钢与废铁	6-130	6.6.4.2 镁合金铸件的生产	6-153
6.4.6.1 废钢铁的来源	6-130	6.6.4.3 镁材及锻材的加工	6-154
6.4.6.2 废钢铁的标准	6-130	6.6.5 镁的金属学	6-154
6.4.6.3 废钢铁的管理	6-130	6.6.5.1 镁的合金化	6-154
6.4.6.4 废钢铁的代用品	6-132	6.6.5.2 镁合金的热处理	6-155
6.4.6.5 废钢铁的加工	6-133	6.6.6 镁及镁合金材料	6-155
参考文献	6-134	6.6.6.1 纯镁	6-155
6.5 铝及铝合金	6-136	6.6.6.2 变形镁合金	6-155
6.5.1 铝的基本性质	6-136	6.6.6.3 铸造镁合金	6-157
6.5.1.1 铝的物理性质	6-136	6.6.6.4 Mg-Li 合金	6-157
6.5.1.2 铝的力学性能	6-137	6.6.6.5 镁金属基复合材料	6-157
6.5.1.3 铝的化学性质	6-137	6.6.7 镁及镁合金的应用	6-158
6.5.2 铝的矿物资源	6-137	6.6.7.1 纯镁的应用	6-158
6.5.3 铝的冶炼	6-137	6.6.7.2 镁合金在航空航天工业中的应用	6-158
6.5.3.1 氧化铝的生产	6-137	6.6.7.3 镁合金在汽车工业中的应用	6-158
6.5.3.2 铝电解	6-138	6.6.7.4 镁合金在电子工业和其他工业中的 应用	6-159
6.5.4 铝及铝合金的加工	6-138	参考文献	6-159
6.5.4.1 铝及铝合金铸锭的生产	6-138	6.7 铜及铜合金	6-160
6.5.4.2 铝及铝合金板材、带材的生产	6-138	6.7.1 铜的基本性质	6-160
6.5.4.3 铝箔的生产	6-138	6.7.1.1 铜的物理性质	6-160
6.5.4.4 铝及铝合金型材、棒材的生产	6-138	6.7.1.2 铜的力学性能	6-160
6.5.4.5 铝及铝合金管材的生产	6-139	6.7.1.3 铜的化学性质	6-160
6.5.4.6 铝合金锻件的生产	6-139	6.7.2 铜的矿物资源	6-160
6.5.4.7 铝粉和铝镁合金粉的生产	6-139	6.7.3 铜的冶炼	6-160
6.5.4.8 铝及铝合金的阳极氧化	6-139	6.7.3.1 铜的火法冶炼	6-160
6.5.5 铝及铝合金的金属学	6-140	6.7.3.2 铜的湿法冶炼	6-162
6.5.5.1 铝合金的合金化	6-140	6.7.4 铜及铜合金的加工	6-162
6.5.5.2 合金的相组成	6-141	6.7.4.1 铜及铜合金的熔炼与铸造	6-162
6.5.5.3 铝合金的经典固溶时效理论	6-142	6.7.4.2 铜加工	6-165
6.5.5.4 现代沉淀理论	6-143	6.7.5 铜的金属学	6-166
6.5.6 铝及铝合金材料	6-144	6.7.5.1 铜中的杂质及合金元素	6-166
6.5.6.1 变形铝合金	6-144	6.7.5.2 铜及铜合金的热处理	6-168
6.5.6.2 铸造铝合金	6-147	6.7.5.3 铜的织构及各向异性	6-171
6.5.6.3 先进铝基结构材料	6-148	6.7.5.4 铜及铜合金的腐蚀	6-171
6.5.6.4 功能铝合金	6-149	6.7.6 铜及铜合金材料	6-172
6.5.7 铝及铝合金材料的应用	6-149	6.7.6.1 纯铜	6-172
6.5.7.1 食品包装和轻工业	6-149	6.7.6.2 黄铜	6-172
6.5.7.2 车辆	6-149	6.7.6.3 青铜	6-175
6.5.7.3 摩托车、自行车	6-149	6.7.6.4 白铜	6-175
6.5.7.4 航空、航天工业	6-150	6.7.7 铜的应用	6-180
6.5.7.5 建筑业	6-150	参考文献	6-182
6.5.7.6 电力和电子工业	6-150	6.8 镍和钴及其合金	6-183
6.5.7.7 其他应用	6-150		

6.8.1 镍和钴的基本性质	6-183	6.10.2.3 汞的矿物资源	6-204
6.8.1.1 镍的基本性质	6-183	6.10.3 锡、锑、汞的冶炼	6-204
6.8.1.2 钴的基本性质	6-183	6.10.3.1 锡的冶炼	6-204
6.8.2 镍和钴的矿物资源	6-183	6.10.3.2 锑的冶炼	6-205
6.8.2.1 镍的资源	6-183	6.10.3.3 汞的冶炼	6-205
6.8.2.2 钴的资源	6-184	6.10.4 锡的加工	6-205
6.8.3 镍和钴的冶炼	6-184	6.10.4.1 锡及其合金的熔炼	6-205
6.8.3.1 镍的冶炼	6-184	6.10.4.2 锡合金的铸造	6-206
6.8.3.2 钴的冶炼	6-185	6.10.4.3 锡及锡合金的加工	6-206
6.8.4 镍和钴及其合金的加工	6-185	6.10.5 锡和锑的金属学	6-206
6.8.4.1 镍及镍合金的熔炼与铸造	6-185	6.10.5.1 锡的金属学	6-206
6.8.4.2 钴基高温合金的熔炼与铸造	6-186	6.10.5.2 锑的金属学	6-206
6.8.4.3 镍及镍合金的加工	6-186	6.10.6 锡、锑和汞及其合金材料	6-207
6.8.4.4 钴合金的熔炼与加工	6-187	6.10.6.1 锡及其合金材料	6-207
6.8.5 镍和钴的金属学	6-188	6.10.6.2 锑及其合金材料	6-207
6.8.5.1 镍的金属学	6-188	6.10.6.3 汞及汞合金材料	6-208
6.8.5.2 钴的金属学	6-190	6.10.7 锡、锑和汞的应用	6-209
6.8.6 镍和钴及其合金材料	6-190	参考文献	6-209
6.8.6.1 镍及其合金材料	6-190	6.11 钛及钛合金	6-210
6.8.6.2 钴及其合金材料	6-191	6.11.1 钛的基本性能	6-210
6.8.7 镍和钴的应用	6-191	6.11.1.1 钛的物理性质	6-210
参考文献	6-192	6.11.1.2 钛的力学性能	6-210
6.9 铅和锌及其合金	6-193	6.11.1.3 金属钛的化学性质	6-211
6.9.1 铅和锌的基本性质	6-193	6.11.2 钛的矿物资源	6-211
6.9.1.1 铅的基本性质	6-193	6.11.2.1 钛矿物	6-211
6.9.1.2 锌的基本性质	6-193	6.11.2.2 世界钛资源	6-211
6.9.2 铅和锌的矿物资源	6-193	6.11.2.3 中国钛资源	6-212
6.9.2.1 铅的资源	6-193	6.11.3 钛冶金	6-212
6.9.2.2 锌的资源	6-193	6.11.3.1 制取金属钛的各种途径	6-212
6.9.3 铅和锌的冶炼	6-194	6.11.3.2 制取海绵钛的工业方法	6-213
6.9.3.1 铅的冶炼	6-194	6.11.3.3 制取海绵钛的新工艺	6-213
6.9.3.2 锌的冶炼	6-194	6.11.3.4 高纯钛的制取	6-213
6.9.4 铅和锌及其合金的加工	6-195	6.11.4 钛及钛合金	6-213
6.9.4.1 铅和铅合金的熔炼	6-195	6.11.4.1 钛与各元素的相互作用	6-213
6.9.4.2 铅及铅合金铸锭	6-195	6.11.4.2 钛中合金元素和杂质	6-213
6.9.4.3 铅及铅合金的加工	6-195	6.11.4.3 钛合金的分类	6-215
6.9.4.4 锌及锌合金的熔炼	6-196	6.11.4.4 工业钛合金	6-215
6.9.4.5 锌及锌合金的铸锭	6-196	6.11.4.5 金属间化合物为基的钛合金	6-215
6.9.4.6 锌及锌合金的加工	6-196	6.11.5 钛的加工	6-216
6.9.5 铅和锌的金属学	6-196	6.11.5.1 钛的熔炼及铸造	6-216
6.9.5.1 铅的金属学	6-196	6.11.5.2 钛的压力加工	6-217
6.9.5.2 锌的金属学	6-198	6.11.5.3 钛的成形加工	6-218
6.9.6 铅和锌及其合金材料	6-199	6.11.5.4 钛的机械加工	6-218
6.9.6.1 铅及其合金材料	6-199	6.11.5.5 钛的焊接	6-218
6.9.6.2 锌及其合金材料	6-201	6.11.5.6 钛的粉末冶金技术	6-218
6.9.7 铅和锌的应用	6-201	6.11.6 钛的相变与热处理	6-219
参考文献	6-202	6.11.6.1 钛的固态相变	6-219
6.10 锡、锑、汞及其合金	6-203	6.11.6.2 钛的热处理工艺	6-221
6.10.1 锡、锑、汞的基本性质	6-203	6.11.6.3 $\alpha+\beta$ 两相钛合金的显微组织类型	6-222
6.10.1.1 锡的基本性质	6-203	6.11.7 钛的成分分析	6-223
6.10.1.2 锑的基本性质	6-203	6.11.8 钛的应用	6-223
6.10.1.3 汞的基本性质	6-204	参考文献	6-225
6.10.2 锡、锑、汞的矿物资源	6-204	6.12 钨及钨合金	6-226
6.10.2.1 锡的矿物资源	6-204	6.12.1 钨的基本性质	6-226
6.10.2.2 锑的矿物资源	6-204	6.12.1.1 钨的物理性质	6-226

6.12.1.2 机械性能	6-226	6.13.7.3 高纯钼的分析	6-247
6.12.1.3 化学性质	6-226	6.13.8 钼的应用	6-247
6.12.2 钼的矿物资源	6-227	6.13.8.1 冶金工业	6-247
6.12.3 钼的冶金	6-227	6.13.8.2 电子和电工材料	6-248
6.12.3.1 钼精矿分解	6-227	6.13.8.3 航天工业	6-248
6.12.3.2 钼化合物提纯	6-228	6.13.8.4 化学工业	6-248
6.12.3.3 钼粉制取	6-228	参考文献	6-248
6.12.3.4 致密钼的制取	6-228	6.14 钽、铌及其合金	6-249
6.12.4 钼及钼合金的加工	6-228	6.14.1 钽、铌的基本性质	6-249
6.12.4.1 锭坯的制取及烧结制品	6-228	6.14.1.1 钽、铌的物理性质	6-249
6.12.4.2 加工	6-229	6.14.1.2 钽、铌的化学性质	6-249
6.12.4.3 深度加工	6-230	6.14.1.3 钽、铌的机械性能	6-250
6.12.5 钼的金属学	6-231	6.14.2 钽、铌的矿物资源	6-251
6.12.5.1 钼的合金化	6-231	6.14.2.1 世界钽、铌资源	6-251
6.12.5.2 钼及其合金的热处理	6-234	6.14.2.2 中国钽铌资源	6-251
6.12.5.3 钼的低温延性	6-234	6.14.3 钽、铌的冶炼	6-252
6.12.6 钼及钼合金	6-236	6.14.3.1 钽铌精矿的分解	6-252
6.12.6.1 钼及钼合金分类、牌号和化学成分	6-236	6.14.3.2 钽、铌化合物的分离	6-252
6.12.6.2 钼加工材的品种和规格	6-236	6.14.3.3 钽、铌金属的制取	6-252
6.12.6.3 钼合金	6-236	6.14.4 钽、铌及其合金材料加工	6-252
6.12.6.4 碳化钨硬质合金	6-236	6.14.4.1 粉末冶金坯锭	6-252
6.12.7 钼、钼发展的若干新动向	6-236	6.14.4.2 真空熔炼铸锭	6-253
6.12.7.1 钼、钼纳米技术与纳米粉末	6-236	6.14.4.3 铸锭开坯	6-253
6.12.7.2 梯度化技术与钼-铜梯度功能材料	6-237	6.14.4.4 棒材、丝材生产	6-254
6.12.7.3 稀土钼和稀土钼合金	6-238	6.14.4.5 板、带、箔材的生产	6-254
6.12.7.4 超高纯钼	6-238	6.14.4.6 钽、铌管材生产	6-254
6.12.8 钼的成分分析	6-239	6.14.4.7 钽、铌合金的热处理	6-255
6.12.9 钼的应用	6-239	6.14.5 钽、铌金属学	6-256
参考文献	6-240	6.14.5.1 间隙元素在钽、铌中的作用	6-256
6.13 钼及钼合金	6-241	6.14.5.2 稀土元素在钽、铌中的作用	6-257
6.13.1 钼的性质	6-241	6.14.6 钽、铌合金材料	6-257
6.13.1.1 钼的物理性质	6-241	6.14.6.1 常用钽、铌合金成分与性能	6-257
6.13.1.2 钼的力学性能	6-241	6.14.6.2 弹性钼合金	6-257
6.13.1.3 钼的化学性质	6-241	6.14.6.3 钽、铌的金属间化合物	6-257
6.13.2 钼的矿物资源	6-241	6.14.7 钽、铌成分分析	6-261
6.13.3 钼冶金	6-242	6.14.7.1 金属钽、铌及其氧化物分析	6-261
6.13.4 钼及钼合金加工	6-242	6.14.7.2 钽、铌合金、碳化物和晶体分析	6-261
6.13.4.1 粉末冶金法制取钼坯锭	6-243	6.14.8 钽、铌材料的应用	6-261
6.13.4.2 熔化法生产致密坯锭	6-243	6.14.8.1 钽及其合金的应用	6-261
6.13.4.3 钼及钼合金的板、带、箔材产品规格及生产工艺	6-243	6.14.8.2 铌及其合金的应用	6-262
6.13.4.4 深度加工	6-244	参考文献	6-262
6.13.4.5 钼及钼合金用的防护涂层	6-244	6.15 锆、铪及其合金	6-264
6.13.5 钼的金属学	6-244	6.15.1 锆和铪的基本性质	6-264
6.13.5.1 钼的合金化	6-244	6.15.1.1 锆和铪的物理性质	6-264
6.13.5.2 钼的脆性	6-245	6.15.1.2 锆和铪的力学性能	6-265
6.13.6 钼及钼合金	6-246	6.15.1.3 纯锆和铪的化学性质	6-265
6.13.6.1 钼及其合金的成分	6-246	6.15.2 锆和铪的矿物资源	6-266
6.13.6.2 钼及钼合金性能	6-246	6.15.3 锆和铪的冶炼	6-267
6.13.6.3 钼发展的新动向	6-246	6.15.3.1 海绵锆和海绵铪的生产	6-267
6.13.7 钼的成分分析	6-246	6.15.3.2 锆粉和铪粉生产	6-267
6.13.7.1 钼粉、钼条、三氧化钼、钼酸铵的分析	6-246	6.15.3.3 高纯锆和铪的制取	6-267
6.13.7.2 钼合金的分析	6-246	6.15.4 锆、铪及其合金加工	6-267
		6.15.5 锆的金属学	6-268
		6.15.5.1 合金和合金元素	6-268
		6.15.5.2 锆合金的热处理	6-270

6.15.5.3 锆的变形和织构	6-271	6.17.1.3 金的提炼	6-287
6.15.5.4 锆及锆合金的腐蚀与吸氢	6-271	6.17.1.4 金的精炼	6-288
6.15.5.5 锆及锆合金的堆内辐照	6-273	6.17.1.5 金及其合金的加工	6-288
6.15.6 锆、钎及其合金材料	6-273	6.17.1.6 金及金合金材料牌号和基本性能	6-289
6.15.6.1 锆、钎原材料的牌号和化学成分	6-273	6.17.1.7 金的合金化原理及相变	6-290
6.15.6.2 锆、钎及其合金材料牌号和化学成分	6-274	6.17.1.8 金的化学分析	6-290
6.15.6.3 其他工业(非核设施)用锆、钎及其合金的牌号和化学成分	6-274	6.17.1.9 金的应用	6-291
6.15.6.4 锆、钎及其合金材料的性能	6-276	6.17.2 银	6-291
6.15.6.5 锆粉	6-277	6.17.2.1 银的基本性质	6-291
6.15.7 锆(钎)的成分分析	6-277	6.17.2.2 银的矿产资源	6-291
6.15.8 锆和钎材料的应用	6-278	6.17.2.3 银的提炼	6-291
6.15.8.1 在核反应堆中的应用	6-278	6.17.2.4 银的精炼	6-292
6.15.8.2 在化工中的应用	6-278	6.17.2.5 银及银合金的加工	6-293
6.15.8.3 在其他工业方面的应用	6-278	6.17.2.6 银及其银合金材料牌号和基本性能	6-294
参考文献	6-279	6.17.2.7 银的合金化原理及相变	6-294
6.16 铈、钒及其合金	6-280	6.17.2.8 银的化学分析	6-295
6.16.1 铈的基本性质	6-280	6.17.2.9 银的应用	6-295
6.16.1.1 铈的物理性质	6-280	6.17.3 铂族金属	6-296
6.16.1.2 铈的力学性能	6-280	6.17.3.1 铂族金属的基本性质	6-296
6.16.1.3 铈的化学性质	6-280	6.17.3.2 铂族金属的矿产资源	6-297
6.16.2 铈的矿物资源	6-281	6.17.3.3 铂族金属的提炼	6-297
6.16.3 铈冶金	6-281	6.17.3.4 铂族金属及其合金的加工	6-298
6.16.4 铈的加工	6-281	6.17.3.5 铂族金属合金及其性能	6-300
6.16.4.1 锭坯制取	6-281	6.17.3.6 电镀	6-305
6.16.4.2 铈的加工	6-281	6.17.3.7 铂族金属合金化原理及相变	6-306
6.16.4.3 铈的近净形加工	6-281	6.17.3.8 铂族金属化学分析	6-307
6.16.4.4 铈的再生	6-282	6.17.3.9 铂族金属材料的应用	6-308
6.16.5 铈的金属学及铈合金	6-282	参考文献	6-308
6.16.5.1 铈效应	6-282	6.18 铍、锂及其合金	6-309
6.16.5.2 铈的加工硬化	6-282	6.18.1 铍和锂的基本性质	6-309
6.16.5.3 氧含量对铈力学性能的影响	6-282	6.18.1.1 铍的基本性质	6-309
6.16.5.4 铈合金	6-282	6.18.1.2 锂的基本性质	6-309
6.16.6 铈的应用	6-282	6.18.2 铍和锂的矿物资源	6-310
6.16.7 钒的基本性质	6-282	6.18.2.1 铍的矿物资源	6-310
6.16.7.1 钒的物理性质	6-282	6.18.2.2 锂的矿物资源	6-310
6.16.7.2 钒的力学性能	6-282	6.18.3 铍和锂的冶炼	6-310
6.16.7.3 钒的化学性质	6-282	6.18.3.1 铍的冶炼	6-310
6.16.8 钒的矿物资源	6-283	6.18.3.2 锂的冶炼	6-311
6.16.9 钒的冶金	6-283	6.18.4 铍和锂及其合金的加工	6-311
6.16.9.1 钒化合物提取	6-283	6.18.4.1 铍及铍合金的加工	6-311
6.16.9.2 钒的分离和提纯	6-283	6.18.4.2 锂的加工	6-312
6.16.9.3 五氧化二钒、钒铁及钒合金剂的生产	6-283	6.18.5 铍和锂及其合金	6-312
6.16.9.4 金属钒的生产	6-284	6.18.5.1 铍合金及铍的金属间化合物	6-312
6.16.9.5 金属钒的精炼	6-284	6.18.5.2 锂合金及锂的化合物	6-312
6.16.10 钒的加工	6-285	6.18.6 铍和锂的应用	6-313
6.16.11 金属钒和合金	6-285	6.18.6.1 铍及铍合金的应用	6-313
6.16.12 钒的成分分析	6-286	6.18.6.2 锂的应用	6-313
6.16.13 钒的应用	6-286	参考文献	6-313
参考文献	6-286	6.19 镓、铟	6-314
6.17 贵金属	6-287	6.19.1 镓、铟的基本性质	6-314
6.17.1 金	6-287	6.19.1.1 镓的基本性质	6-314
6.17.1.1 金的基本性质	6-287	6.19.1.2 铟的基本性质	6-314
6.17.1.2 金的矿产资源	6-287	6.19.2 镓、铟的矿物资源	6-314

6.19.2.1 镓的矿物资源	6-314	6.22.2 高温合金的重要特征和应用	6-341
6.19.2.2 铟的矿物资源	6-314	6.22.2.1 主要的金属特征	6-341
6.19.3 镓、铟的综合回收	6-314	6.22.2.2 合金元素的强化效应	6-341
6.19.3.1 镓的综合回收	6-314	6.22.2.3 合金的显微组织和高温强度特征	6-342
6.19.3.2 镓的提纯	6-315	6.22.2.4 高温合金的应用	6-343
6.19.3.3 铟的综合回收	6-316	6.22.3 高温合金的分类和牌号表示法	6-344
6.19.3.4 铟的提纯	6-316	6.22.4 变形高温合金	6-344
6.19.4 镓、铟及其化合物材料	6-316	6.22.4.1 固溶强化型铁基变形高温合金	6-345
6.19.4.1 镓、铟的化合物	6-316	6.22.4.2 析出沉淀强化型铁基变形合金	6-346
6.19.4.2 镓、铟基低熔点合金及焊剂	6-319	6.22.4.3 固溶强化型镍基变形高温合金	6-347
6.19.5 镓、铟的应用	6-320	6.22.4.4 析出沉淀强化型镍基变形高温合金	6-348
6.19.5.1 镓的应用	6-320	6.22.4.5 钴基变形高温合金	6-352
6.19.5.2 铟的应用	6-320	6.22.5 铸造高温合金	6-353
参考文献	6-321	6.22.5.1 铁基(铁-镍基)铸造高温合金	6-354
6.20 砷、硒	6-322	6.22.5.2 镍基铸造高温合金	6-355
6.20.1 砷、硒的基本性质	6-322	6.22.5.3 钴基铸造高温合金	6-356
6.20.1.1 砷的物理性质	6-322	6.22.6 粉末冶金高温合金	6-357
6.20.1.2 硒的物理性质	6-322	6.22.6.1 粉末蜗轮盘高温合金	6-358
6.20.1.3 砷的化学性质	6-322	6.22.6.2 氧化物弥散强化高温合金	6-361
6.20.1.4 硒的化学性质	6-322	6.22.7 发散冷却高温结构材料	6-362
6.20.2 砷、硒的矿物资源	6-322	6.22.8 新型高温合金	6-364
6.20.2.1 砷的矿物资源	6-322	6.22.8.1 低偏析高温合金	6-364
6.20.2.2 硒的矿物资源	6-323	6.22.8.2 耐热腐蚀高温合金	6-365
6.20.3 砷、硒的冶炼	6-323	6.22.8.3 低膨胀高温合金	6-367
6.20.3.1 氧化砷和砷的提取	6-323	6.22.8.4 定向凝固高温合金	6-368
6.20.3.2 高纯砷的制取	6-323	6.22.8.5 单晶高温合金	6-370
6.20.3.3 硒的提取	6-323	6.22.8.6 定向凝固共晶高温合金	6-372
6.20.3.4 高纯硒的制取	6-324	6.22.9 航天用高温合金	6-373
6.20.4 砷、硒化合物及盐类材料	6-324	6.22.10 民用高温合金	6-374
6.20.4.1 砷的化合物	6-324	6.22.11 高温合金焊丝	6-376
6.20.4.2 硒的化合物	6-324	6.22.12 金属间化合物基高温结构材料	6-377
6.20.5 砷、硒的产品标准及分析方法	6-325	6.22.12.1 钛-铝系金属间化合物基合金	6-378
6.20.6 砷、硒的应用	6-325	6.22.12.2 镍-铝系金属间化合物基合金	6-383
6.20.6.1 砷及其化合物的应用	6-325	6.22.12.3 铁-铝系金属间化合物基合金	6-385
6.20.6.2 硒及其化合物的应用	6-326	6.22.12.4 其他系金属间化合物基合金	6-386
参考文献	6-326	参考文献	6-387
6.21 稀土金属	6-327	6.23 粉末冶金材料	6-388
6.21.1 稀土金属的基本性质	6-327	6.23.1 粉末冶金多孔材料	6-389
6.21.1.1 稀土金属的物理性质	6-327	6.23.1.1 粉末冶金多孔材料的制备及特点	6-389
6.21.1.2 稀土金属的化学性质	6-328	6.23.1.2 粉末冶金多孔材料的应用	6-390
6.21.1.3 稀土金属的力学性能	6-328	6.23.2 粉末冶金减摩材料	6-391
6.21.2 稀土金属的矿物资源	6-328	6.23.2.1 减摩材料的特点	6-391
6.21.3 稀土金属冶炼	6-329	6.23.2.2 减摩材料种类、制造和应用	6-392
6.21.4 稀土金属加工	6-329	6.23.3 粉末冶金摩擦材料	6-394
6.21.5 稀土金属材料	6-329	6.23.3.1 粉末冶金摩擦材料的构成及其工艺特征	6-394
6.21.5.1 稀土合金材料	6-329	6.23.3.2 粉末冶金摩擦材料的性能和应用	6-394
6.21.5.2 稀土永磁材料	6-331	6.23.4 机械、器械零件使用材料	6-395
6.21.5.3 其他稀土磁性材料	6-331	6.23.4.1 机械、器械零件的材质(Fe基、Cu基、Ti基、W基、硬质合金)	6-395
6.21.5.4 稀土储氢材料	6-332	6.23.4.2 粉末冶金机械、器械零件制造工艺	6-396
6.21.5.5 稀土发光和激光材料	6-333	6.23.4.3 应用	6-397
6.21.5.6 稀土催化剂	6-337	6.23.5 硬质及超硬材料	6-398
6.21.6 稀土金属的应用	6-338	6.23.5.1 硬质合金的生产原理及工艺流程	6-398
参考文献	6-339	6.23.5.2 硬质合金的产品种类	6-399
6.22 高温合金	6-340		
6.22.1 高温合金发展概述	6-340		

6.23.5.3 硬质合金的基本性能和用途	6-400	6.24.4.5 冷轧取向硅钢	6-422
6.23.5.4 金刚石的主要性能	6-401	6.24.4.6 硅钢薄带	6-423
6.23.5.5 人造金刚石的合成及性能评价	6-401	6.24.5 软磁合金	6-424
6.23.5.6 人造金刚石的应用	6-401	6.24.6 永磁合金	6-428
6.23.5.7 立方氮化硼及其应用	6-402	6.24.6.1 稀土永磁合金	6-429
6.23.6 钨、钼及其合金	6-402	6.24.6.2 铝镍钴合金	6-439
6.23.6.1 钨合金	6-404	6.24.6.3 可变形永磁合金	6-442
6.23.6.2 掺杂钨丝	6-404	6.24.7 弹性合金	6-446
6.23.6.3 高密度钨合金	6-405	6.24.7.1 恒弹性合金	6-447
6.23.6.4 钨铜(银)复合材料	6-406	6.24.7.2 高弹性合金	6-453
6.23.6.5 钨钼合金	6-407	6.24.8 膨胀合金	6-460
6.23.6.6 钨-稀土氧化物合金	6-407	6.24.8.1 低膨胀合金	6-461
6.23.6.7 钨铼合金	6-408	6.24.8.2 定膨胀合金	6-462
6.23.6.8 钨钨合金	6-409	6.24.8.3 高膨胀合金	6-466
6.23.6.9 钨合金	6-409	6.24.9 热双金属	6-467
6.23.6.10 掺杂钨	6-410	6.24.9.1 热双金属概述	6-467
6.23.6.11 钨钼合金	6-411	6.24.9.2 热双金属的制造、牌号及用途	6-468
6.23.6.12 钨钼钨系合金	6-411	6.24.9.3 热双金属分类	6-472
6.23.6.13 钨钨合金	6-412	6.24.10 电性合金	6-473
6.23.6.14 钨铼合金	6-412	6.24.10.1 电阻合金	6-473
6.23.6.15 钨-稀土氧化物合金	6-412	6.24.10.2 电热合金	6-477
6.23.6.16 钨铜复合材料	6-413	6.24.10.3 热电偶合金	6-478
6.23.7 特殊粉体功能材料	6-413	6.24.11 非晶微晶合金	6-482
6.23.7.1 原子能工程用粉末冶金材料	6-414	6.24.11.1 制备方法	6-482
6.23.7.2 微波吸收材料	6-414	6.24.11.2 非晶和纳米晶软磁带材	6-483
6.23.7.3 磁控靶向释放生物材料——纳米 磁控药物制剂	6-415	6.24.11.3 快淬粉末	6-484
6.23.7.4 超细固体润滑添加剂	6-415	6.24.12 其他特种金属功能材料	6-484
参考文献	6-417	6.24.12.1 磁致伸缩材料	6-485
6.24 金属功能材料	6-418	6.24.12.2 磁性液体	6-486
6.24.1 金属功能材料定义和分类	6-418	6.24.12.3 磁电阻材料	6-488
6.24.2 金属功能材料特点	6-418	6.24.12.4 梯度功能材料	6-490
6.24.3 金属功能材料应用	6-419	6.24.12.5 隐身材料(吸波材料)	6-490
6.24.4 电工钢	6-419	6.24.12.6 触媒材料	6-493
6.24.4.1 电工纯铁	6-420	6.24.12.7 减振材料	6-494
6.24.4.2 热轧硅钢	6-421	6.24.12.8 生物医学材料	6-495
6.24.4.3 冷轧硅钢	6-421	6.24.12.9 磁性形状记忆合金	6-496
6.24.4.4 冷轧无取向硅钢	6-422	参考文献	6-497

6.1 导 论

材料是人类文明进步的物质基础,进入第3个千年,这一条认知没有改变。在现代日新月异的技术进展中,人们把材料科学并列于信息、生物、海洋、空间、新能源和环境科学技术,成为当今高科技体系的重要支柱之一。材料科学技术的发展,对于人类认识物质世界、改造传统材料、发展新型材料、促进社会文明,具有不可估量的影响。

材料有金属材料和非金属材料之分,金属材料有钢铁材料和有色金属材料之分。在钢铁材料的范畴内又有铁、铁合金、非合金钢、低合金钢、合金钢、高合金等。在有色金属范畴内又有常用有色金属及其合金(铝、镁、铜等)、稀有金属及其合金(钛、锆、钨、钼等)、贵金属及其合金(金、银、铂等)稀土金属材料等。据统计,就近百年而论全世界有数以千万计的发明和创新,哪一项又不是直接或间接地与金属材料相关。近20年来的事实又表明,金属材料生产需求接近饱和,世界金属产量没有显著增长,但金属材料生产技术和冶金工程科学仍在不断更新,新技术的应用层出不穷,金属材料品种继续增加,金属材料的性能和品质有大幅度的提高,金属材料在与复合材料、塑料、高分子材料、陶瓷等替代材料的竞争之中保持着无可比拟的综合优势。金属材料仍是目前工程结构用材的惟一选择,也是多种功能材料的基础,预测今后20年以至50年内,金属的基础原材料地位不会动摇,信息时代也不能没有金属材料。

20世纪钢铁工业和有色金属工业的蓬勃发展,取得了数以万计的技术进展,如钢铁业中的露天矿高效开采技术、尾矿资源的综合利用、小球烧结替代低品位原生矿、高炉富氧喷煤、熔融还原和直接还原铁生产、铁水预处理技术、转炉顶底复吹、超高功率电炉冶炼、近终形异型坯连铸、冶铸过程电磁技术的应用、薄带连铸、半凝固加工技术等,都是半个世纪前粗放生产的钢铁业不能相提并论的。炼铁的高炉流程在变革,世界上的平炉处于淘汰之中,转炉已成为炼钢的主要手段,炉外精炼技术使冶炼洁净钢和超洁净钢变得十分容易,钢水中夹杂元素的含量可以降低到 $100\mu\text{g/g}$,甚至达到 $40\mu\text{g/g}$ 以下,钢中有害元素和非金属夹杂物的数量、形态和分布可以得到有效的控制。超洁净钢的出现,改变了钢的形态、相变及钢材加工工艺、组织结构——性能之间的传统认识的规律,相对真理在提升。又如有色金属工业中的一水硬铝石型铝土矿冶炼技术、280kA大型预焙铝电解槽技术、白钨矿提炼技术、提高铝材质量的基础研究、紧凑化短工艺流程技术、近终形加工技术、半固态加工技术、特种异型材管材加工技术以及特种功能材料制造技术等不仅为创制性能更好的有色金属材料打下坚实的技术基础,而且带来了显著的经济效益。上述金属材料的种种进展,进一步以具体实例阐明了材料科学与工程四大要素(性质、使用性能、结构与成分、合成与加工)及其交互作用的规律和重要性,揭示了材料科学与工程这一多学科交叉的复杂系统的内在本质与外部环境条件的相关性与统一性,成为人们改造传统材料、创制新材料和发展先进合成与加工技术的共识。

在刚刚过去的20世纪,金属材料生产已显示出许多新特点,第一,是先进的金属生产流程将冶金、凝固、塑变过程置于多种物理场的综合作用之下,使金属材料成为高效化——高质量、低成本的生产典型。世纪之交出现的钢铁薄带铸轧技术使生产效率提高30%,产品成本下降25%。电炉短流程的“小钢厂”、钢铁和铝、铜的连铸连轧模式已进入大型联合产业,新一代钢铁企业将由多品种的“万能”工

厂逐步走向专业化生产。第二,当今人类已从合成材料时代推进到复合材料时代,试图合成一种新的、单一的均质材料使之满足各种高要求的综合指标是十分困难的,如果把以金属材料为基础,与现有的高分子、无机非金属及其他各种材料通过复合工艺组成复合型材料,则可以利用复合效应产生原组成材料所不具备的性能,而且还可以通过材料设计达到预期的性能指标,并起到节省能源、节约资源的效果。高新技术对材料“三性”(耐温性、耐蚀性、耐磨性)不断提出更高要求,要求金属复合材料不仅具有树脂复合材料的高强度、高模量、低膨胀系数等性能,而且还具有能耐高温、不燃烧、不吸潮、高导热和导电、抗辐射、不污染环境的功能。新世纪可以期待对混杂和超混杂复合材料制作工艺的更深入一步的掌握、复合材料力学体系的建立、复合材料结构设计智能化的实现以及概念复合材料仿生学问题的解决。材料工程一直是活跃的科学前沿,以钢铁和有色金属材料为基的金属复合材料已列入中国跨世纪的技术开发战略内容。第三,现代钢铁及有色金属企业重要发展之一是传统产品的延伸——多种经营和深加工,为了实现深加工产品的高质量和高适用性,钢铁业一直致力于钢的洁净度、钢材尺寸精度的控制和表面技术的应用,而有色金属业一直向“五性”(纯净性、细微性、强韧性、均质性、复合性)和“五特”(特细、特薄、特精、特异、特大)以及“五化”(高速化、连续化、自动化、紧凑化、近终形化)的高效、节能、低耗和低成本方向发展。

在20世纪中叶,所谓的金属材料合成设计还是十分原始的,依据拥有的生产统计数据所建立的化学成分与材料性能的关系,限定在一定的生产条件范围内,缺乏普遍适用性,无法实现对过程的控制。材料性能预测和控制模型的建立使合金设计由宏观进入介观,中国开发的材料优化设计软件已成功用于指导新一代高强高韧微合金化钢以及特种有色金属新材料的基础研究工作。材料学基本原理指出,只有选择适当的强化方式,才能在获得高强度的同时也能获得高韧性。高强度合金结构材料的破坏失效形式主要是断裂,为此,从晶界结构材料的薄弱环节着眼,通过计算添加元素或掺杂元素在晶界和表面的偏聚自由能来判断和预测材料的韧脆性质。中国工程院王崇愚院士主持下的微观合金设计工作已取得可喜的成绩,试图利用量子力学原理来探明微合金化元素在奥氏体中的作用,找出它的规律性,结构弛豫、掺杂P、N原子在铁的体心立方晶体点阵中的强化机制,微合金化元素Nb、V、Ti原子在铁的面心立方晶全点阵中的偏聚效应,以及相结构因子、界面结合因子的影响,为新型钢铁材料的合金设计提供了充分的理论依据。

钢铁工业和有色金属工业不仅消费着大量的矿产资源和能源,而且还在污染环境和破坏生态,为了金属工业的可持续发展,必须考虑合理开发资源和资源的回收。资源的有效利用与无废弃物的零排放相适应,在地球的自然资源与资源的再生之间保持平衡。依靠技术进步是中国金属工业环保的重要政策,实施以节能为中心的冶金环保改造,大力采用高效工艺技术,开发资源再生的先进工艺,实现零污染是可能的,钢铁工业和有色金属工业将成为真正的绿色产业。

撰稿人 东 涛 唐仁波 殷为宏
审稿人 刘嘉禾

6.2 铁

6.2.1 生铁

生铁 (pig iron) 是含碳 2% 以上的铁碳合金。是由铁矿石冶炼而成。除碳外, 还含有硅、锰和少量硫、磷, 有时还含有其他元素。生铁按用途可分为三类: 炼钢生铁、铸造生铁和用作脱氧剂或合金加入剂的铁合金 (特种生铁)。生铁是最普通的钢铁工业初级产品, 产量巨大。目前世界年生铁产量为 5 亿多吨, 我国为 1.4 亿吨, 占 1/3 以上, 是世界第一大产铁国。

6.2.1.1 炼钢生铁

根据国家标准, 炼钢生铁 (pig iron for steel making) 以硅含量的范围分为炼 04 (L04, Si $\leq 0.45\%$), 炼 08 (L08, Si $0.45\% \sim 0.85\%$), 炼 10 (L10, Si $0.85\% \sim 1.25\%$) 等品种。另外, 炼钢生铁还要求有害元素 S、P 含量尽量低。

在联合钢铁企业内部, 炼钢生铁通常是以高温液态铁水的形式直接供炼钢使用。作为产品外销的炼钢生铁则以铸块的形式出现。

炼钢生铁的生产设备主要是高炉, 其过程比较复杂。首先, 矿石开采的铁矿粉必须进行造块, 使之成为化学成分均匀, 并具有一定强度和冶金性能的块状料。造块工艺主要有烧结和球团两种。所生产的产品分别被称之为烧结矿和球团矿。当然, 某些满足粒度和质量要求的天然块矿也可直接使用。其次, 还需通过焦化工序生产具有一定强度和粒度的焦炭, 作为高炉冶炼的燃料、还原剂及炉料骨架。最后, 铁矿和焦炭以一定的比例和方式加入高炉, 通过从高炉下部连续鼓入大量高达 1200°C 的热空气, 使炉内进行燃烧及各种还原的复杂反应。最终液态铁水和炉渣不断地从炉内排出。

高炉炼铁的主要技术指标包括利用系数, 燃料比, 冶炼强度。利用系数是指每立方米炉容每天的产铁量, 反映高炉的生产率高低。燃料比是指生产一吨铁水所需的燃料量, 反映高炉的能量消耗水平。冶炼强度是指每立方米炉容每天消耗的燃料量, 反映高炉消耗燃料的密集程度。

高炉生产炼钢生铁时应努力降低生铁含硅量。这样不仅可使炼钢节能降耗, 还可使高炉降低燃料比, 提高利用系数。

高炉炼铁已有一百多年的发展历史, 是一个非常成熟的工艺。该工艺生产效率高、能量利用好、生产规模大。目前最大高炉的产量已达 1.1 万吨/日以上。近几十年来, 为减少焦炭的消耗, 高炉普遍采取了大量喷吹煤粉和天然气等措施, 取得明显效果。如我国的宝钢, 高炉煤比已长期稳定在 200kg/t 以上, 焦比降低到 300kg/t 以下。高炉炼铁今后的发展方向是高效、节能与环保。

熔融还原非高炉炼铁是一个正在发展中的领域。其中, Corex 工艺已实现工业化, 已建立了 5 套生产装置, 年生产能力超过 200 万吨。Hismelt 等工艺仍在开发之中。比较而言, 高炉在今后相当一个时期内仍将是主导炼铁设备。

我国炼铁设备全部是高炉。除了拥有像宝钢那样的现代化大型高炉外 (4000m^3 级), 还拥有众多 1000m^3 以下的小高炉。这些高炉在生产指标和装备水平上与先进国家还有一定差距。高炉的大型化是我国需要努力改进的方面。

6.2.1.2 铸造生铁

根据国家标准, 铸造生铁 (pig iron for casting) 按硅含量分为: 铸 34 (Z34, Si $3.20\% \sim 3.60\%$), 铸 30 (Z30, Si $2.80\% \sim 3.20\%$), 铸 26 (Z26, Si $2.40\% \sim 2.80\%$), 铸 22 (Z22, Si $2.00\% \sim 2.40\%$), 铸 18 (Z18, Si $1.60\% \sim 2.00\%$), 铸 14 (Z14, Si $1.25\% \sim 1.60\%$)。铸造生铁通常是以铸块的形式供给用户使用。

铸造生铁的生产设备也是高炉, 生产的基本过程与炼钢生铁相同。所不同的是, 生产铸造生铁时需要较高的炉缸温度和较多的炉缸热量, 并配合以较低的炉渣碱度, 以便使更多的硅还原进入生铁。因此, 生产铸造生铁的燃料消耗要有所增加, 生产率也相应有所下降。

6.2.2 直接还原铁

直接还原铁 (direct reduction iron) 是指铁矿石在低于熔化温度下被还原成的金属铁产品, 英文缩写为 DRI (Direct Reduced Iron)。该产品主要替代废钢用于电炉炼钢, 由于其化学成分和物理特性稳定一致, 有害杂质含量少, 通常被当作优质废钢使用。该产品也可作为转炉甚至高炉的原料。

直接还原铁的主要技术指标包括: 全铁含量, 金属铁含量, 金属化率, 碳含量, 硫、磷和脉石含量, 密度等。

该产品主要分为两类: 海绵铁和热压块铁。

6.2.2.1 海绵铁

海绵铁 (sponge iron) 是指铁矿石因直接还原失氧而形成众多微孔, 在显微镜下形似海绵而得名。为了与热压块铁相区别, 目前习惯上将由球团和块矿生产的海绵铁称之为直接还原铁。

该产品保持还原后的物料形状, 密度低, 容易被氧化, 长途运输和长期储存需加以保护。

6.2.2.2 热压块铁

为解决海绵铁的上述不足, 海绵铁在离开还原装置后在高温下被压制成具有一定形状 (通常是小枕状) 和密度的块状体, 称之为热压块铁 (hot briquette iron), 英文缩写为 HBI (Hot Briquetted Iron)。两者在化学成分上基本相同, 见表 6.2-1。主要生产消耗指标见表 6.2-2。

表 6.2-1 Midrex 工艺典型产品规格

名 称	DRI	HBI
全铁 (TFe)/%	90~94	90~94
金属铁 (MFe)/%	83~89	83~89
金属化率 (η)/%	92~95	92~95
C/%	1.0~3.5	0.5~2.5
P/%	0.005~0.09	0.005~0.09
S/%	0.001~0.03	0.001~0.03
脉石/%	2.8~6.0	2.8~6.0
(Mn, Cu, Ni, Cr, Mo, Sn, Pb, Zn)/%	微量	微量
堆积密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1600~1900	2400~2800
表观密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	3.4~3.6	5.0~5.5

表 6.2-2 Midrex 工艺主要消耗指标
(1t 金属化率 92%, C 2.0% 产品)

名 称	DRI	HBI
铁矿/t	1.42	1.45
天然气/Gcal	2.25	2.35
电/kW·h	95	115
氧气(标准状态)/m ³	12	12
水/m ³	1.2	1.5

6.2.2.3 直接还原铁的生产

直接还原铁生产的原料是铁矿石。因在固态下还原, 矿石中的脉石成分全部保留在产品中。因此, 对铁矿石的质量有严格要求。通常: $\text{Fe} \geq 67.0\%$, $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2) \leq 3.0\%$, $\text{P} \leq 0.03\%$, 对于使用催化剂转化的还原工艺, $\text{S} \leq 0.008\%$ 。此外, 铁矿石还要具有一定的物理特性和还原特性来满足工艺的需要。如要求球团粒度为 $6\text{mm} \times 16\text{mm}$, 抗压强度 $\geq 250\text{kg}$, 块矿粒度为 $10\text{mm} \times 35\text{mm}$ 。

直接还原铁生产的燃料和还原剂由生产工艺决定。气基还原工艺主要使用天然气为能源。天然气通过转化成为还原气进行还原。煤基还原工艺以煤为能源, 通过煤的直接和间接反应完成还原任务。

气基直接还原工艺的典型代表是 Midrex 工艺和 HYL III 工艺。2000 年两工艺生产的直接还原铁分别占世界总量的 68.2% 和 18.6%。两者均采用天然气转化竖炉生产流程。该流程具有生产效率高、节能、规模大(单套装置的产量已达 136 万吨/年)等特点。气基还原工艺中还有使用粉矿进行流化还原的 Finmet 工艺等, 但比例较小。气基还原由于依赖于天然气资源, 目前的生产集中在天然气资源丰富的国家和地区。今后的发展方向是开发新气源(如煤制气)和利于其他工艺的输出气(如 Corex 工艺输出气)。

煤基直接还原工艺的代表是 SL/RN 回转窑工艺, 但目前其产量比例仅占世界总量的很小部分(2000 年为 2.8%)。主要问题是生产效率低、能耗高、规模较小。今后的发展方向是开发新型高效煤基还原工艺。

在过去的 30 年中, 虽然世界钢产量保持相对稳定, 但直接还原铁的生产却一直保持快速增长态势。其产量已由 1970 年的 79 万吨增加到 2000 年的 4320 万吨, 其中 90% 以上是由气基还原工艺生产的。因受资源的限制, 我国的直接还原铁发展比较落后, 仅于 1997 年在天津无缝钢管公司建成 30 万吨/年的两套回转窑生产线。

6.2.3 铸铁

6.2.3.1 灰铸铁

灰铸铁(gray cast iron)是一种断面呈灰色、碳主要以片状石墨形式出现的铸铁。

灰铸铁被广泛地应用在机械制造、冶金、建筑等工业部门。灰铸铁之所以应用如此广泛是由于它有一系列的优点: 良好的减震性, 良好的切削性, 良好的耐磨性及对缺口的不敏感性, 具有一定的力学性能, 尤其是抗压强度比较高, 良好的铸造性能, 成本低廉。

(1) 金相组织特点 灰铸铁的金相组织主要由片状石墨、金属基体和晶界共晶物组成。按组织特征, 铸态或经热处理后的灰铸铁基体可以是铁素体、片状珠光体、粒状珠光体、托氏体、粒状贝氏体、针状贝氏体、马氏体。金相组织决定了灰铸铁的各种性能。炉料构成、化学成分、熔炼方式、铁液过热与孕育处理、冷却速度、热处理等各种因素最终都是通过改变金相组织而影响灰铸铁性能的。

(2) 灰铸铁的性能

① 力学性能

a. 抗拉强度。抗拉强度是评价灰铸铁的主要性能指标, 各国都以抗拉强度大小来划分灰铸铁的等级。灰铸铁的抗拉强度请见国家标准 GB 9439—88。

b. 伸长率。灰铸铁的伸长率很低, 从 HT150 到 HT300 的灰铸铁, 其拉伸断裂时的伸长率在 $0.3\% \sim 0.8\%$ 之间^[1], 且随抗拉强度的提高而提高, 随硅量的提高而降低。断裂时灰铸铁的永久变形为 $0.2\% \sim 0.6\%$ 。

c. 抗压强度。灰铸铁的抗压强度非常高, 可与钢相比。一般为抗拉强度的 3~4 倍。

d. 硬度。硬度在一定条件下可表示灰铸铁的强度大小、耐磨性高低以及切削性能的好坏。灰铸铁的硬度值在石墨和基体两者硬度之间, 请见国家标准 GB 9439—88。

e. 冲击性能。灰铸铁是一种脆性材料, 不推荐使用在需要高冲击性能的场合。

f. 高低温力学性能。由于珠光体在高温下的分解, 灰铸铁的抗拉强度、硬度在 400°C 后明显下降。添加微量合金能提高室温和高温下的抗拉强度, 但在高温下强度下降的百分比和不加合金的一样。反之, 无合金灰铸铁的蠕变却有明显的增加。拉伸和压缩应力作用下的弹性模量随温度的升高几乎呈直线下降。

② 物理性能

a. 密度。灰铸铁的密度取决于其结构中各组成物的相对量, 尤其受含碳量的影响最大。不同牌号灰铸铁的密度在 $6.95 \sim 7.35\text{g}/\text{cm}^3$ 之间。

b. 热导率。灰铸铁的热导率约为 $46.05\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 并且随温度的提高而降低。在 $100 \sim 450^\circ\text{C}$ 之间, 每增加 100°C , 热导率下降 $1.47 \sim 1.88\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

c. 电阻率。灰铸铁的电阻率在 $0.20 \sim 0.80\mu\Omega \cdot \text{m}$ 之间。石墨越粗大、越多, 灰铸铁的电阻率越大。抗拉强度为 $201 \sim 324\text{MPa}$ 的灰铸铁, 在受 80% 负载时, 电阻率会增加 $0.9\% \sim 1.6\%$ 。

d. 磁性能。灰铸铁磁性能的变化范围很大, 它可从低磁导率、高矫磁力一直变至高磁导率、低矫磁力。这些变化主要取决于灰铸铁的组织。常用牌号的灰铸铁, 基体以珠光体为主时, 其最大磁导率在 $309 \sim 400\mu\text{H}/\text{m}$ 之间。

③ 使用性能

a. 耐磨性。灰铸铁的显微组织决定了磨损特性, 片状石墨逐渐向粗、向 A 型石墨过渡, 粘着磨损减少; D 型石墨及其伴生的铁素体增加磨损; 珠光体、贝氏体、回火马氏体在硬度相同时, 耐磨性一样; 石墨类型相同时, 基体珠光体量越多、越硬, 耐磨性越好。

b. 减振性。灰铸铁中的片状石墨促使在循环应力下铸铁易产生微观塑像变形和位错, 使振动能量受到不可逆转的损耗, 加速振动的衰减, 因此灰铸铁具有良好的阻尼性能或减振性。这是灰铸铁具有的特殊性能之一, 是它广泛用于制造内燃机和机床零件的一个原因。灰铸铁中, 片状石墨越小、石墨量越少, 减振性越差。

c. 耐热疲劳性能。珠光体基体的铸铁具有较好的热疲劳性能; 强度相同时, 石墨量多有利于提高热疲劳性能。一般来说, 球墨铸铁、蠕墨铸铁的抗热疲劳能力比灰铸铁高。

d. 抗氧化和抗生长性能。有试验表明, 普通灰铸铁在 350°C 以下的大气中几乎不氧化和生长; 在 700°C 以下氧化较少, 但有生长, 并会造成尺寸变化; 700°C 以上, 氧化和生长两者都急剧增加。

e. 致密性。石墨的存在破坏了基体的连续性和致密性。为此灰铸铁的致密性在很大程度上取决于石墨的形状和数量。导致石墨数量增多、粗大以及缩孔、缩松、粗晶组织形

成的因素都会降低致密性。

④ 工艺性能。和其他铸造合金相比,灰铸铁具有较好的铸造性能。灰铸铁由于片状石墨对刀具的润滑作用和断屑作用,故有良好的切削性能。实际生产中常用抗拉强度与硬度的比值来控制切削性能,在提高强度时,希望获得较低的硬度,以保持良好的切削性。由于铸铁中石墨的存在,以及铁碳合金在冷却过程中的二重性,铸铁的焊补性能都较钢为差。但片状石墨较其他形状石墨易得,对灰铸铁的力学性能要求较低,故灰铸铁的焊补性能较球墨铸铁等为好。

(3) 灰铸铁的热处理及其他处理

① 灰铸铁常用的热处理工艺。灰铸铁常用的热处理工艺有减应力处理、石墨化退火、表面热处理以及正火、淬火回火、等温淬火、化学热处理等。

② 振动实效。振动实效在消除形状简单的零件因切削加工、锻造、焊接等加工工序所引起的应力上得到了应用,对于某些铸件它也有很好的效果。和传统的天然实效、减应力退火相比具有周期短、耗能少、投资小和使用方便等优点。但由于噪声大以及快速检测效果的方法不够完善,因此仅在有限的工厂内得到了应用。此外世界上对振动时效是否有效还是一个有争议的课题。

6.2.3.2 球墨铸铁

球墨铸铁(ductile cast iron)是20世纪40年代末期研究出来的一种结构材料。它是指铁液经过球化剂处理而不是经过热处理,使石墨大部或全部呈球状,有时少量为团状等形态石墨的铸铁。由于石墨呈球状,石墨空洞在金属基体上所产生的缺口作用大为减弱,使金属基体能够充分发挥作用,所以它比灰铸铁的力学性能要好很多,不少性能近于或优于钢。另外,它的生产工艺简单,成本低,容易掌握。因此,用球墨铸铁制造了大量原来用钢、铸钢、可锻铸铁、有色合金制造的零件,在机械制造、冶金、矿山、石油、化工、造船、国防等工业方面都获得了应用。

(1) 球墨铸铁的金相组织特点 球墨铸铁的金相组织与灰铸铁一样,包括石墨和基体两部分。

① 石墨。球墨铸铁中允许出现的石墨形态有球状及少量非球状石墨,如团状、团絮状、蠕虫状。

在球墨铸铁中,石墨通常不是以单一形态存在的,而是以几种形态并存。按其分布和形态的变化,将石墨的球化程度分为6级,详见GB 9441—88球墨铸铁金相检验标准。

球墨铸铁石墨的大小变化很大,它们对力学性能也有一定影响,可按球径的大小将石墨分为6级,详见GB 9441—88球墨铸铁金相检验标准。

② 基体。生产上常见的球墨铸铁的基体有铁素体、珠光体、贝氏体、渗碳体、磷共晶。特殊性能的球墨铸铁还会遇到马氏体及回火组织和奥氏体。球墨铸铁基体组织的晶体结构和性能与一般钢铁相同,只不过由于球墨铸铁含硅量比钢高4~5倍,硅要固溶到一些基体组织(如铁素体)中,使晶格发生明显的畸曲作用。

(2) 球墨铸铁的性能

① 力学性能

a. 静载荷性能

④ 硬度。球墨铸铁的硬度主要取决于基体组织,而且硬度与抗拉强度、伸长率等静载荷性能之间有相应关系。铁素体球墨铸铁的硬度为HBS 149~187,珠光体球墨铸铁的硬度为HBS 217~269,贝氏体或针状体球墨铸铁的硬度为HBS 260~350,回火马氏体球墨铸铁的硬度为HBS 350~550,奥氏体球墨铸铁的硬度为HBS 140~160。

⑤ 强度和塑性。球墨铸铁的强度和塑性主要取决于基体组织,即下贝氏体或回火马氏体球墨铸铁强度高,其次是

上贝氏体、索氏体、珠光体球墨铸铁。随铁素体增多,强度下降、伸长率增加。奥氏体或铁素体球墨铸铁强度较低,塑性较好。

与珠光体球墨铸铁相比,相同硬度的马氏体回火组织球墨铸铁具有较高的强度;贝氏体球墨铸铁也具有较高强度,但其伸长率低于马氏体回火组织球墨铸铁。

球墨铸铁在应力应变时不发生明显屈服变形。

③ 弹性模量。影响球墨铸铁弹性模量的最重要因素是球化率。球化率降低使弹性模量降低。石墨数量增加也可降低弹性模量。珠光体或铁素体数量并不影响弹性模量。由于含碳量变化,弹性模量在159~172GPa范围内变化,剪切模量为63~64GPa,泊松比为0.275~0.285。

b. 动载荷性能

④ 冲击初度。各种基体组织常温冲击初度(无缺口试样)分别为:铁素体50~150J/cm²,珠光体15~35J/cm²,贝氏体30~100J/cm²,回火索氏体20~60J/cm²。

⑤ 小能量多次冲击初度。很多零件如曲轴在工作时承受小能量多次冲击载荷。珠光体球墨铸铁的小能量多次冲击初度优于铁素体球墨铸铁,但常规一次冲击初度则相反。

③ 疲劳强度。疲劳强度与抗拉强度存在正比关系,抗拉强度高的材料,它的疲劳强度也高。

④ 断裂初度。上贝氏体球墨铸铁在具有高强度的同时还有很好的断裂初度。其次为铁素体球墨铸铁、下贝氏体球墨铸铁,珠光体球墨铸铁的断裂初度最低。

③ 疲劳裂纹扩展门槛值及疲劳裂纹开展速率。铁素体球墨铸铁的疲劳裂纹扩展门槛值最高,随材料强度的提高门槛值降低,下贝氏体球墨铸铁门槛值最低。在相同的应力强度因子幅度下,珠光体球墨铸铁裂纹开展速率最低,上贝氏体球墨铸铁介于二者之间。在较高的应力强度因子幅度下,上贝氏体球墨铸铁的裂纹开展速率最低。

c. 高温性能

④ 硬度。珠光体球墨铸铁在温度高于540℃时珠光体开始粒状化,温度高于650℃时珠光体开始分解,因此硬度开始下降并逐渐接近铁素体球墨铸铁的硬度。

⑤ 高温短时力学性能。铁素体球墨铸铁在低于315℃时强度没有明显变化,高于次温度时强度明显降低,760℃时抗拉强度降低到41MPa,伸长率从室温到540℃时降低至8%,高于540~760℃时随温度上升伸长率急剧增加。珠光体球墨铸铁抗拉强度随温度上升迅速降低,760℃时降至52MPa,伸长率自室温上升至425℃时逐渐降低至3%,自425℃上升至760℃时明显增加。

③ 蠕变和持久性。在较高最小蠕变率下珠光体球墨铸铁蠕变强度高于铁素体球墨铸铁。但在较高温度时珠光体分解,二者差别减小。珠光体球墨铸铁在较低温度(<650℃)下比铁素体球墨铸铁具有更好的蠕变和持久强度。

④ 高温疲劳强度。铸态珠光体球墨铸铁、退火铁素体球墨铸铁和正火珠光体球墨铸铁的高温疲劳强度均随温度的升高而降低。

d. 低温性能。随温度的下降,球墨铸铁逐渐发生由韧性向脆性的转变,尤其在脆性转变温度以下,冲击值急剧下降。随温度的降低,其屈服强度提高,伸长率下降,对应力集中敏感性明显增加,表现为屈服以后变形量较小即断裂。因此对于常温下伸长率较小的珠光体球墨铸铁,在低温下抗拉强度降低。而对于常温下塑性良好的铁素体球墨铸铁,低温下抗拉强度提高。随温度的下降,小能量多次冲击初度略有提高。

② 物理性能。

a. 密度。常温下球墨铸铁的密度为:铁素体球墨铸铁6.9~7.2g/cm³,珠光体球墨铸铁7.1~7.5g/cm³,中硅耐

热球墨铸铁(含硅4.5%~5.5%) 7.10g/cm³。增加石墨化程度促使密度减小,增加阻碍石墨化程度元素则密度增加。

b. 热导率。热导率取决于成分、组织、石墨形态和温度。球墨铸铁热导率高于钢,但低于灰铸铁。在100℃时它比灰铸铁降低20%~30%,高温时差别更大。热导率随温度升高而降低,随球化率降低而提高。

c. 比热容。球墨铸铁比热容与灰铸铁大体相同,常温为500~700J/(kg·K),一般取544J/(kg·K)。温度上升使比热容增大,含碳量增加也使比热容增大。

d. 电阻率。球墨铸铁电阻率低于灰铸铁,高于可锻铸铁,在55~59μΩ·cm之间。温度升高电阻率增加。

e. 磁性能。铁素体球墨铸铁的矫磁力为191A/m,最大磁导率1.76μH/m;珠光体球墨铸铁的矫磁力为716A/m,最大磁导率为0.69μH/m。

③ 工艺性能

a. 铸造性能。球墨铸铁流动性优于较高牌号的灰铸铁,但低于相同碳当量的灰铸铁,添加稀土、提高浇注温度可改善其流动性。由于球墨铸铁的凝固特点,球墨铸铁件易产生缩松和尺寸增大,应采用刚性大的铸型。球墨铸铁的制造应力为灰铸铁的2~3倍,与铸钢相近。

b. 切削性能。球墨铸铁含有较多的石墨,起切削润滑作用,因而切削阻力低于钢,切削速度较高。珠光体增多使切削性能下降,贝氏体球墨铸铁切削性能较差。

c. 焊补性能。焊缝及近焊区,当镁和稀土含量较高时易产生白口或马氏体,形成内应力和裂纹,当镁和稀土不足时焊缝呈现灰铸铁组织,使力学性能降低。国标GB 10044—88规定了球墨铸铁补焊用电焊条及气焊丝。

d. 表面涂镀性。和其他铸铁件一样,球墨铸铁表面也可涂镀以改善其外观或提高使用性能,如耐蚀、耐磨性等。

④ 使用性能

a. 耐热性。球墨铸铁中的球状石墨彼此分离,与片状石墨铸铁相比阻碍了高温下氧的扩散,因此球墨铸铁的抗氧化性和抗生长性优于灰铸铁,也优于可锻铸铁。

b. 耐蚀性。在大气中球墨铸铁耐蚀性优于钢,与灰铸铁、可锻铸铁相近。海滨大气腐蚀试验结果表明其耐蚀性也优于含铜(0.2%)钢。球墨铸铁在土壤中的耐蚀性远优于钢,与灰铸铁相近。球墨铸铁在室温0.5%的硫酸溶液中的耐蚀性与灰铸铁大体相同,在0.05%的硫酸溶液中二者相同。球墨铸铁和灰铸铁在碱溶液中的耐蚀性良好,与钢相近。碱金属的氯化物或硫化物对球墨铸铁腐蚀很弱。氨盐溶液腐蚀球墨铸铁,游离氨的存在将降低其腐蚀速度。球墨铸铁对有机物、硫化物、熔融金属(低熔点者)的腐蚀性 with 灰铸铁相近。

c. 耐磨性。球墨铸铁是良好的耐磨和减摩材料,耐磨性优于同样基体的灰铸铁、碳钢以及低合金钢。

(3) 球墨铸铁的熔炼及处理技术

① 球墨铸铁原铁水的熔炼。根据要求性能的不同确定球墨铸铁的化学成分,采用冲天炉熔炼、电炉(无芯感应电炉、有芯感应电炉、电弧炉)熔炼和双联熔炼等方法进行球墨铸铁原铁水的熔炼。

② 球墨铸铁的球化处理。常用的球化剂类别有纯镁、稀土硅铁镁合金、镁焦、钇基重稀土硅铁镁合金、铜镁合金、镍镁合金、镁硅铁合金、镁铁屑压块、稀土硅铁、含钡稀土硅铁镁合金等。其中我国使用最多的球化剂是稀土硅铁镁合金。纯镁也是使用较多的球化剂。球化工艺有冲入法、压力加镁法、转包法、盖包法、型内法、钟罩法、密封流动法、型上法等。

③ 孕育处理。孕育是保证凝固结晶过程中析出正常球状石墨的重要条件之一。常用的孕育剂有硅铁、钡硅铁、锶

硅铁、硅钙和铈。一般选用硅铁,其瞬间孕育效果最好,用于随流孕育、型内孕育,效果尤佳。孕育工艺有炉前孕育法、倒包孕育法、浇口杯孕育法、浇包漏斗随流孕育法、孕育丝法、浇包孕育棒法、型内孕育、浮硅孕育等。

(4) 球墨铸铁的热处理及表面强化

① 退火。目的是获得高韧性铁素体球墨铸铁。

② 正火

a. 普通正火。目的是获得珠光体或索氏体,如QT800-2、QT700-2、QT600-3。

b. 部分奥氏体化正火。目的与普通正火相似,但可通过控制破碎铁素体数量改善韧性,获得良好的强度。

③ 淬火和回火。铸态组织无渗碳、三元或复合磷共晶,具有细小均匀共晶团组织的铸件可进行淬火回火处理。铸态渗碳体≥3%、存在三元或复合磷共晶、共晶团粗大、组织不均匀者应先进行高温石墨化退火或正火,使其成为均匀的铁素体或珠光体组织后再施行此工艺。

④ 等温淬火。在中温贝氏体转变温度区进行等温淬火以获得贝氏体为主的基体,从而获得良好的综合性能。分为上贝氏体等温淬火和下贝氏体等温淬火两种工艺。

⑤ 表面淬火。表面淬火前珠光体量不应低于50%,最好大于70%。预先进行正火-回火或淬火-回火,可获得良好效果。包括感应淬火、火焰淬火、激光表面相变硬化等。

⑥ 化学热处理。为提高球墨铸铁最终机加工成品零件的表面硬度,改善其耐磨性、抗擦伤能力、耐蚀性,提高疲劳寿命等,可对其进行各种化学热处理。化学热处理的典型工艺有气体渗氮、氮碳共渗、离子渗氮、渗硫、渗铬、渗硼等。

⑦ 表面物理强化。采用冷滚压/喷丸等物理方法使工件表面变形强化。它使晶格畸变加剧,提高表面残留压应力和表面硬度,可明显改善工件疲劳强度。

6.2.3.3 蠕墨铸铁

蠕墨铸铁(vermicular cast iron)是近20多年来迅速发展起来的一种新型铸铁材料。由于其石墨大部分呈蠕虫状,间有少量球状,其组织和性能处于球墨铸铁和灰铸铁之间,具有良好的综合性能。

(1) 蠕墨铸铁金相组织特点

① 石墨。蠕墨铸铁的石墨形态是蠕虫状和球状石墨共存的混合形态,蠕虫状石墨是介于片状石墨和球状石墨之间的中间石墨形态。

② 共晶团。蠕墨铸铁的共晶团包括蠕虫状石墨-奥氏体共晶团和球状石墨-奥氏体共晶团两部分,它兼有灰铸铁与球墨铸铁两者的特点。

③ 基体组织。一般铸态蠕墨铸铁基体组织具有强烈形成铁素体的倾向,这导致强度和耐磨性有所降低。蠕墨铸铁中铁素体的形成主要取决于碳的扩散条件、基体中某些元素的显微偏析程度以及冷却速度。

(2) 蠕墨铸铁的性能 蠕墨铸铁的力学性能介于灰铸铁与球墨铸铁之间,其制造性能比球墨铸铁好,与灰铸铁相近。因此形状复杂的逐渐也能用蠕墨铸铁制造。此外,蠕墨铸铁尚有良好的致密性、耐热性和耐磨性。

① 力学性能

a. 常温力学性能

② 抗拉强度。生产中不应有蠕墨铸铁有要求过高的强度。蠕化率低时强度高,但会妨碍其他性能,如降低导热率等,从而失去它综合性能好的特点。蠕墨铸铁的抗拉强度因基体不同而异。同样蠕化率,珠光体基体的抗拉强度大于混合基体的,又大于铁素体基体的抗拉强度。

③ 伸长率。蠕墨铸铁的伸长率比球墨铸铁低。其伸长

率大小随蠕化率和基体不同而有差异,蠕化率低或基体中铁素体量多,则伸长率相对提高。

③ 硬度。蠕墨铸铁硬度首先决定于基体,其次取决于石墨形貌。

④ 疲劳性能。蠕墨铸铁的疲劳强度受蠕化率、基体及有无缺口的影响。降低蠕化率或增加基体中的珠光体比例,会提高疲劳强度。但基体对疲劳强度的影响不很明显,而当存在缺口时,疲劳强度则明显降低。

⑤ 弹性模量。蠕墨铸铁在一定应力下呈弹性变形,但其比例极限低于球墨铸铁。蠕墨铸铁因蠕化率、截面尺寸及基体不同,其弹性模量在 $(138 \sim 165) \times 10^3 \text{ MPa}$ 范围内变化。蠕化率低、截面薄、基体中珠光体量多则弹性模量值较高。蠕墨铸铁的泊松比为 $0.27 \sim 0.28$ 。

① 冲击韧度。蠕墨铸铁与球墨铸铁相似,当温度降低时有从韧性到脆性的转变点。蠕墨铸铁的冲击吸收功随珠光体量增加而下降,随碳当量增加而提高,随磷量的增加而降低。

b. 高温力学性能。随温度上升,退火铁素体蠕墨铸铁的抗拉强度下降,伸长率有所提高。

② 物理性能

a. 密度。蠕墨铸铁的密度随基体而异,铁素体基体的为 7.05 g/cm^3 ,珠光体基体的为 7.16 g/cm^3 。

b. 热导率。蠕墨铸铁的热导率居于灰铸铁和球墨铸铁之间。在 200°C 以下,温度升高,热导率增加;在 200°C 以上,温度升高,热导率减小。蠕化率下降,热导率也下降。

③ 工艺性能

a. 铸造性能

④ 流动性。蠕墨铸铁碳当量高,接近共晶成分,又经加蠕化剂去硫去氧,因此具有良好的流动性。

⑤ 收缩性。蠕墨铸铁的缩前膨胀大于灰铸铁,在共晶转变过程中有较大的膨胀力,因此,对铸型刚度要求较高。蠕墨铸铁的体收缩率与蠕化率有关,蠕化率越高,体收缩率越小,最终接近灰铸铁;反之蠕化率越低,体收缩率越大,最终接近球墨铸铁。增加含碳量可减少体收缩。蠕墨铸铁型壁移动倾向也介于灰铸铁和球墨铸铁之间,因而其获得无内外缩孔的致密件比球墨铸铁容易,但比灰铸铁仍然困难些。避免不必要高的浇注温度及采用共晶成分都能改善铸件的致密性。

③ 铸造应力。蠕墨铸铁的铸造应力比合金铸铁稍大,但比球墨铸铁小。用蠕墨铸铁生产汽缸盖等复杂铸件时,应和合金铸铁一样要重视消除应力退火。

④ 白口倾向。蠕墨铸铁在薄壁及尖角处的白口倾向比灰铸铁大,比球墨铸铁小。增加碳当量和加强孕育可减轻白口倾向。蠕墨铸铁的白口倾向与所用蠕化剂有密切关系。以稀土为主的蠕化剂,白口倾向较大,镁系蠕化剂白口倾向较小。

③ 断面敏感性。蠕墨铸铁的蠕化率越高,断面对蠕化率的敏感性越小。蠕墨铸铁强度的断面敏感性小于灰铸铁。

b. 切削性能。蠕墨铸铁的切削性能与球墨铸铁相似,但钻头磨损比灰铸铁的要大,铁素体愈多则钻头磨损量愈小。实践表明,蠕墨铸铁的切削性能和蠕化剂有关。含钛蠕化剂生产的蠕墨铸铁,其切削性能比用其他种类的蠕化剂差。

c. 焊补性能。蠕墨铸铁的焊补性能比球墨铸铁好,在其焊补区附近形成白口和淬火组织的倾向小。

④ 使用性能

a. 致密性。用蠕墨铸铁制造无缩孔、缩松的致密铸件比球墨铸铁容易,比普通灰铸铁困难些。这是由于蠕墨铸铁的体收缩率和铸型移动倾向介于灰铸铁和球墨铸铁之间。但

比之高牌号合金铸铁,用蠕墨铸铁获得致密件反显得容易,这是由于合金铸铁的体收缩率比蠕墨铸铁还大。

国内外有许多用蠕墨铸铁代替合金灰铸铁做耐压件取得良好效果的实例。如做大功率柴油机缸盖、液压阀体和集成块等,显著提高了铸件的致密性,提高了工艺出品率,减少了耐压试验中渗漏的废品。

b. 耐磨性。蠕墨铸铁具有良好的耐磨性。滚动摩擦的耐磨性试验表明,蠕墨铸铁和灰铸铁的磨损特征相同,但片状石墨的磨损量比蠕墨铸铁的大 $50\% \sim 70\%$ 。滑动摩擦时的特征也相似,当灰铸铁磨损量为 1.3 mg/h 时,蠕墨铸铁仅为 0.6 mg/h 。长期实际使用也证明蠕墨铸铁比灰铸铁具有较高的耐磨性。

c. 耐热疲劳性能。铸铁件在反复加热冷却引起交变热应力的条件下工作时,失效的形式一般有开裂、龟裂和变形。

英国铸铁研究协会测定了大断面的铁素体、珠光体和混合基体的灰铸铁、蠕墨铸铁及球墨铸铁的耐开裂、耐龟裂和耐热变形的性能。结果表明,材质由灰铸铁到蠕墨铸铁到球墨铸铁铸件的变形增加,而龟裂和开裂减轻。对于蠕墨铸铁和球墨铸铁,基体中铁素体增加,会使铸件变形增加,而开裂则减轻。

一般来说,蠕墨铸铁表现出比球墨铸铁和灰铸铁为优的综合耐热疲劳性能,因此特别适宜于制造大功率内燃机的汽缸盖等耐热件。

d. 抗氧化、抗生长性能。经测定各种铸铁在 850°C 保温 150 h 的氧化增重 $[\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})]$ 为:灰铸铁 13.6 ,蠕墨铸铁 11.8 ,球墨铸铁 6.2 。在该条件下,蠕墨铸铁的生长率为 0.46% ,灰铸铁为 1.59% 。有试验表明,大断面蠕墨铸铁和灰铸铁试样在空气中连续加热 32 周,在 500°C 时两者的生长和氧化无显著差别;而在 600°C 时,蠕墨铸铁的生长和氧化比灰铸铁小得多。

e. 减振性。蠕墨铸铁的减振性不因碳当量或基体的改变而有明显的变化,但蠕化率提高,减振性增加。

f. 耐腐蚀性。在 5% 硫酸溶液中试验表明,球墨铸铁的耐腐蚀性比灰铸铁好 $3 \sim 4$ 倍,蠕墨铸铁介于二者之间,在海水中的耐腐蚀能力试验也得到同样的结果。

(3) 蠕墨铸铁的处理和控制

① 蠕化剂及蠕化处理工艺

a. 蠕化剂

④ 镁系蠕化剂。典型的镁系蠕化剂有镁钛合金、镁钛稀土合金和镁钛铝合金。

⑤ 稀土系蠕化剂。以稀土为主的蠕化剂大致可分为四类:稀土硅铁合金、稀土钙硅铁合金、稀土镁硅铁合金和混合稀土金属。它们都有较强的蠕化能力,其中稀土硅铁合金在我国蠕墨铸铁生产中应用最多。

③ 钙系蠕化剂。典型的钙系蠕化剂有钙镁硅铁合金、稀土钙硅铁合金。

b. 蠕化处理工艺。蠕墨铸铁生产工艺与球墨铸铁相似,但工艺控制要求更为严格。若“过处理”(蠕化剂加入量或变质元素残留量过多),则易出现过球状石墨;若“处理不足”(蠕化剂加入量或变质元素残留量过少),则易产生片状石墨。几种常见蠕化处理工艺有:包底冲入法、炉内加入法、出铁槽随流加入法、中间包处理法。

② 蠕墨铸铁的孕育处理。虽然一般蠕化剂中含有较多的硅,但孕育处理仍是一项必不可少的工艺操作。根据蠕化处理工艺不同,孕育处理方法也不尽相同。

(4) 蠕墨铸铁的热处理 蠕墨铸铁的热处理主要为改善基体组织和力学性能,使之符合要求。除了铸件相当复杂或有特殊要求外,一般蠕墨铸铁件可不作消除铸造应力的热