

9318 / 1205

第5篇 工业材料

执笔者 磯野義人 今井丈夫 上田重朋 梅川莊吉
大石不二夫 音馬 峻 木村康夫 菊地 央
草川隆次 栗田 学 小西誠一 佐佐木敏美
雜賀喜規 島村昭治 菅野照造 梶山正孝
鈴木 寿 宗宮重行 田内省二 田北善暉
田中良平 高橋健太郎 土屋忠男 内木虎藏
中島勝久 中島常雄 波田野榮十 葉山房夫
日野太郎 藤田利夫 藤本邦彦 堀池 清
堀内 良 宮入裕夫 呂 戊辰 和田次郎
渡辺 治

审查委员 榎並豊一郎 雜賀喜規 芝 祐邦 島村昭治
鈴木 寿 田中良平 藤田利夫 丸山弘志

译者 陆智方 黄国柱 瞿家骅 方 成

校者 蔡德洪 高彩桥

目 录

第1章 总论	5-1
1.1 金属材料	5-1
1.1.1 元素的物理性能	5-1
1.1.2 金属材料的物理性能	5-4
1.1.3 金属材料的组织	5-4
1.1.4 热处理	5-8
1.1.5 残余应力	5-10
1.1.6 金属材料及金属制品材质的缺陷	5-10
1.2 金属材料的检验	5-12
1.2.1 金属材料的鉴别法	5-12
1.2.2 金相组织的检验法	5-13
1.2.3 金属材料的缺陷检验法	5-13
1.3 金属材料 JIS 的标志	5-14
1.4 非金属材料	5-17
1.4.1 非金属材料的分类	5-17
1.4.2 非金属材料的特征	5-17
第2章 钢铁材料	5-18
2.1 碳素钢	5-18
2.1.1 碳素钢的标准	5-18
2.1.2 纯铁的性能与用途	5-21
2.1.3 碳素钢的成分	5-21
2.1.4 沸腾钢和镇静钢	5-23
2.1.5 碳钢的热处理	5-23
2.1.6 含碳0.20%以下的低碳钢	5-24
2.1.7 含碳0.15~0.25%的碳素钢	5-27
2.1.8 含碳0.25~0.45%的碳素钢	5-28
2.1.9 含碳0.45~0.60%的碳素钢	5-29
2.1.10 含碳大于0.60%的高碳素钢	5-31
2.2 高强度钢	5-32
2.3 低温用钢	5-32
2.4 原子反应堆用钢板	5-32
2.5 合金结构钢	5-35
2.5.1 强韧钢	5-35
2.5.2 渗碳钢	5-38
2.5.3 渗氮钢	5-38
2.5.4 易切削钢	5-39

2.6 超高强度钢	5-40
2.7 轴承钢	5-41
2.8 弹簧钢	5-42
2.9 工具钢	5-43
2.9.1 碳素工具钢	5-43
2.9.2 合金工具钢	5-43
2.9.3 高速工具钢	5-46
2.9.4 特殊工具材料	5-48
2.10 不锈钢	5-48
2.10.1 马氏体系不锈钢	5-48
2.10.2 铁素体系不锈钢	5-48
2.10.3 奥氏体系不锈钢	5-48
2.10.4 弥散硬化系不锈钢	5-52
2.11 耐热钢与耐热合金	5-52
2.12 铸铁	5-55
2.12.1 普通铸铁	5-55
2.12.2 高强度铸铁	5-61
2.12.3 可锻铸铁	5-63
2.12.4 耐热铸铁	5-63
2.12.5 耐蚀铸铁	5-64
2.12.6 硬质铸铁	5-64
2.13 铸钢	5-65
2.13.1 碳素铸钢	5-65
2.13.2 合金铸钢	5-66
2.13.3 不锈钢	5-67
2.13.4 耐热铸钢	5-67
2.13.5 高锰铸钢	5-67
第3章 非铁金属材料	5-67
3.1 铜及其合金	5-67
3.1.1 铜及其合金	5-67
3.1.2 延展材料的性质	5-68
3.1.3 铜合金铸件	5-71
3.1.4 铜及其合金的耐蚀性	5-73
3.1.5 轴承用铜合金	5-74
3.2 镍及其合金	5-75
3.2.1 镍	5-75
3.2.2 镍铜合金	5-75

3.2.3 耐蚀镍合金	5-75
3.3 铝及其合金	5-75
3.3.1 纯铝	5-75
3.3.2 铝合金	5-78
3.3.3 延展用铝合金	5-82
3.3.4 铸造铝合金	5-83
3.4 镁及其合金	5-84
3.4.1 镁	5-84
3.4.2 铸造镁合金	5-84
3.4.3 延展用镁合金	5-85
3.4.4 镁合金的特征	5-86
3.5 钛及其合金	5-86
3.5.1 钛	5-86
3.5.2 钛合金	5-87
3.6 锌及其合金	5-88
3.6.1 锌	5-88
3.6.2 锌合金	5-89
3.7 铅及其合金、锡及其合金	5-91
3.7.1 铅及其合金	5-91
3.7.2 锡及其合金	5-93
3.7.3 镉及其合金	5-94
3.7.4 铟及其合金	5-94
3.7.5 低熔点合金	5-94
3.8 钎焊合金	5-95
3.8.1 软钎料	5-95
3.8.2 硬钎料	5-96
3.9 其他金属及合金	5-97
3.9.1 铍及其合金	5-97
3.9.2 锆及其合金	5-97
3.9.3 钽及其合金	5-97
3.9.4 铌及其合金	5-98
3.9.5 铬及其合金	5-98
3.9.6 钨、钼及其合金	5-98
3.9.7 银及其合金	5-99
3.9.8 金及其合金	5-99
3.9.9 铂(白金)及其合金	5-100
3.9.10 钨和钼	5-100
3.9.11 钨、钼、第一类稀土金属及其合金	5-100
3.9.12 铀及其合金	5-101
3.9.13 钍及其合金	5-102
3.9.14 钷及其合金	5-102

第4章 烧结材料.....5-102

4.1 概述	5-102
4.2 金属粉末	5-103
4.2.1 制粉方法	5-103
4.2.2 粉末的性质与测定方法	5-104
4.3 粉末冶金法	5-104
4.3.1 成形法	5-104
4.3.2 烧结	5-104
4.3.3 后处理	5-105
4.3.4 设计中的注意事项	5-105
4.4 烧结材料	5-105
4.4.1 机械零件	5-105
4.4.2 多孔零件	5-107
4.4.3 摩擦零件	5-108
4.4.4 硬质合金及金属陶瓷	5-109
4.4.5 其他	5-110

第5章 电磁材料.....5-111

5.1 导电材料	5-111
5.1.1 电线	5-111
5.1.2 电阻材料	5-113
5.1.3 超导材料	5-114
5.1.4 特殊导电材料	5-115
5.2 磁性材料	5-115
5.2.1 磁芯材料	5-115
5.2.2 永磁材料	5-117
5.2.3 无磁钢	5-117
5.3 绝缘材料	5-118
5.3.1 绝缘材料的性质	5-118
5.3.2 绝缘材料的种类和特性	5-119
5.4 半导体材料	5-120
5.4.1 半导体的性质	5-120
5.4.2 锗(Ge)	5-122
5.4.3 硅(Si)	5-123
5.4.4 化合物半导体	5-124
5.4.5 结晶特性评价法	5-125
5.4.6 半导体材料的用途及应用	5-125

第6章 金属表面处理.....5-126

6.1 概述	5-126
6.1.1 金属表面处理的意义	5-126
6.1.2 金属表面处理的方法	5-126
6.2 表面硬化法	5-126
6.2.1 高频淬火和火焰淬火	5-126

6.2.2 渗碳淬火.....	5-127	7.2.4 硅橡胶.....	5-155
6.2.3 渗氮.....	5-128	7.2.5 氟橡胶.....	5-156
6.3 扩散渗透表面处理.....	5-129	7.2.6 立构规整性橡胶.....	5-156
6.3.1 锌扩散渗镀法.....	5-129	7.2.7 泡沫橡胶.....	5-156
6.3.2 铝扩散渗镀法.....	5-129	7.3 木材.....	5-156
6.3.3 铬扩散渗镀法.....	5-129	7.3.1 木材的构造.....	5-156
6.3.4 硅扩散渗镀法.....	5-130	7.3.2 木材的物理性质.....	5-157
6.3.5 渗硫法.....	5-130	7.3.3 木材的力学特性.....	5-157
6.3.6 硼化处理.....	5-131	7.3.4 合成木材.....	5-159
6.4 金属保护膜法.....	5-131	7.3.5 木质系复合材料.....	5-159
6.4.1 电镀.....	5-131	7.3.6 木材的防腐及防燃法.....	5-159
6.4.2 熔融浸镀.....	5-133	7.4 纸及纤维制品.....	5-159
6.4.3 金属喷镀法.....	5-134	7.4.1 纸浆的分类.....	5-159
6.4.4 化学镀.....	5-134	7.4.2 纸, 无纺布.....	5-159
6.4.5 真空蒸镀.....	5-135	7.4.3 合成纸.....	5-161
6.5 防锈保护膜法.....	5-135	7.4.4 纤维、线.....	5-161
6.5.1 铝及铝合金的防锈保护膜.....	5-135	7.4.5 绳、软线.....	5-163
6.5.2 镁合金的防锈膜.....	5-136	7.4.6 其他纤维制品.....	5-163
6.5.3 锌及锌合金的防锈膜.....	5-137	7.5 涂料.....	5-164
6.5.4 钢铁的防锈膜.....	5-137	7.5.1 涂料的构成.....	5-164
6.6 覆面.....	5-138	7.5.2 涂料的分类.....	5-165
6.6.1 硬覆面.....	5-138	7.5.3 涂料的干燥.....	5-165
6.6.2 软覆面.....	5-138	7.5.4 涂刷.....	5-165
6.6.3 包层法.....	5-139	7.5.5 涂料使用标准.....	5-166
6.7 电化学处理.....	5-139	7.5.6 油漆公害的防止措施.....	5-167
6.7.1 电解抛光和化学抛光.....	5-139	7.6 皮革.....	5-168
6.7.2 阳极氧化.....	5-141	7.6.1 天然皮革的种类及其特性.....	5-168
6.8 衬里.....	5-142	7.6.2 合成皮革.....	5-169
6.8.1 金属衬里.....	5-143	7.7 胶粘剂.....	5-169
6.8.2 搪瓷和玻璃衬里.....	5-143	7.7.1 胶粘剂的种类与特性.....	5-169
6.8.3 塑料及橡胶衬里.....	5-143	7.7.2 金属的胶接.....	5-170
6.8.4 陶瓷包层.....	5-145	7.7.3 木材的胶接.....	5-171
第7章 非金属材料	5-145	7.7.4 橡胶、塑料的胶接.....	5-171
7.1 塑料.....	5-145	7.7.5 其他材料的胶接.....	5-171
7.1.1 塑料的种类.....	5-145	7.7.6 不同材料的胶接.....	5-171
7.1.2 塑料的成形方法.....	5-147	7.7.7 特种胶粘剂.....	5-172
7.1.3 塑料的性能.....	5-149	7.8 玻璃.....	5-173
7.1.4 用途.....	5-153	7.8.1 无机玻璃的分类.....	5-173
7.2 橡胶及橡胶制品.....	5-154	7.8.2 玻璃的成分及一般性能.....	5-173
7.2.1 生(橡)胶与橡胶制品.....	5-154	7.8.3 玻璃纤维.....	5-174
7.2.2 各种原料橡胶及其制品的性能.....	5-154	7.8.4 玻璃的主要性能.....	5-175
7.2.3 硬(质)橡胶.....	5-155	7.8.5 新型玻璃.....	5-176

7.9 水泥、砂浆、混凝土及石材.....5-176	8.3.2 微粒弥散强化.....5-213
7.9.1 水泥.....5-176	8.3.3 组织控制.....5-213
7.9.2 砂浆.....5-177	8.4 纤维增强橡胶.....5-213
7.9.3 混凝土.....5-177	8.4.1 分类与概述.....5-213
7.9.4 石材.....5-180	8.4.2 轮胎.....5-217
7.10 耐火材料.....5-180	8.5 木质系复合材料.....5-218
7.10.1 定义.....5-180	8.5.1 胶合板.....5-218
7.10.2 性能.....5-180	8.5.2 层压木材.....5-218
7.10.3 耐火材料的选择.....5-182	8.5.3 刨花板.....5-219
7.10.4 标准.....5-182	8.5.4 纤维板.....5-219
7.11 绝热材料.....5-184	8.6 薄膜材料.....5-220
7.11.1 建筑用隔热材料.....5-184	8.6.1 增强薄膜材料.....5-220
7.11.2 工业用绝热材料.....5-185	8.6.2 薄膜结构.....5-221
7.12 陶瓷.....5-190	8.7 多层复合板.....5-221
7.12.1 陶瓷的分类.....5-190	8.7.1 金属-塑料型.....5-221
7.12.2 主要陶瓷的特性.....5-191	8.7.2 双金属.....5-223
7.13 防音材料.....5-192	8.8 夹层板.....5-223
7.13.1 防音.....5-192	8.9 陶瓷型复合材料.....5-225
7.13.2 隔音材料.....5-192	8.9.1 无机纤维-陶瓷复合材料.....5-225
7.13.3 消音材料.....5-193	8.9.2 金属纤维-陶瓷复合材料.....5-225
7.14 磨削材料、磨料、磨具.....5-193	第9章 润滑剂5-226
7.14.1 天然磨削材料、磨料.....5-193	9.1 概述.....5-226
7.14.2 人造磨削材料、磨料.....5-194	9.1.1 润滑剂的作用.....5-226
7.14.3 天然砂轮.....5-195	9.1.2 润滑剂的种类.....5-226
7.14.4 人造砂轮.....5-195	9.2 石油系润滑油.....5-226
7.14.5 砂布、砂纸.....5-195	9.2.1 润滑油的炼制方法.....5-226
7.14.6 油性研磨材料.....5-196	9.2.2 润滑油的特性.....5-226
7.14.7 其他.....5-196	9.2.3 发动机油.....5-228
第8章 复合材料5-196	9.2.4 工业润滑油.....5-232
8.1 概述.....5-196	9.2.5 金属加工油.....5-232
8.1.1 分类.....5-196	9.2.6 防锈油.....5-233
8.1.2 复合工艺概述.....5-197	9.3 合成润滑油.....5-233
8.2 塑料型复合材料.....5-197	9.4 润滑脂.....5-233
8.2.1 纤维增强塑料.....5-197	9.4.1 概述.....5-233
8.2.2 其他.....5-209	9.4.2 润滑脂的种类与用途.....5-234
8.3 金属基复合材料.....5-212	9.5 固体润滑剂.....5-235
8.3.1 纤维增强.....5-212	

第1章 总 论

1.1 金属材料

1.1.1 元素的物理性能

元素的物理性能见表1⁽¹⁾。

表1 元素的物理性能

元素名称	符 号	原子序数	原子量	比 重 (20°C) g/cc	熔 点 °C	沸 点 °C	比热容 (20°C) cal/g°C	熔化潜热 cal/g	热膨胀系数 $\times 10^{-6}$ (20~40°C)	导热率 (20°C) cal/cms °C	电阻率 (20°C) $\mu\Omega\text{cm}$	纵弹性模量 $E \times 10^3$ kgf/mm ²	晶体结构
锌	Zn	30	65.38	7.133 (25°)	419.5050	906	0.0915	24.9	39.7⑫	0.27 (25°)	5.916	—	密排六方
铜	Ac	89	227	—	1050±50	—	—	—	—	—	—	—	—
砹	At	85	211	—	302估计	—	—	—	—	—	—	—	—
镅	Am	95	243	11.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—
氩	Ar	18	39.994	1.784×10^{-3}	-189.4 ±2	-185.8	0.125	6.7	—	0.406×10^{-4}	—	—	面心立方
铝	Al	13	26.98	2.699	660	2450	0.215 (0°)	94.5	23.6⑩	0.53	2.6548	6.3	面心立方
铋	Sb	51	121.76	6.62	630.5± 0.1	1380	0.049	38.3	8.5~ 10.8⑩	0.045 (0°)	39.0 (0°)	7.9	菱面体
硫	S	16	32.066	2.07	119.0± 0.5	444.6	0.175	9.3	64	6.31×10^{-4}	2×10^{23}	—	面心正斜方⑦
镱	Yb	70	173.04	6.96	824	1530	0.035	12.71	25	—	29(25°)	—	面心立方
钇	Y	39	88.92	4.47	1509	3030	0.071	46	—	0.035 (-2.22°)	57	12	密排六方⑦
铱	Ir	77	192.2	22.5	245.4±3	5300	0.0307	—	6.8	0.14	5.3	53	面心立方
铟	In	49	114.82	7.31	156.2	2000	0.057	6.8	33	0.057	8.37	1.1	面心立方
铀	U	92	238.07	19.07	1132.3± 0.8	3818	0.0279 (27°)	—	6.8~14.1	0.071 (76°)	30	17	正斜方⑦
铒	Er	68	167.27	9.15	1497	2630	0.040	24.5	9	0.023 (28°)	107(25°)	11	密排六方
氯	Cl	17	35.457	3.214×10^{-3}	-100.99	-34.7	0.116	21.6	—	0.172×10^{-4}	—	—	正方
锇	Os	76	190.2	22.57	2700± 200	5500	0031	—	4.6(50°)	—	9.5	57	密排六方
镉	Cd	48	112.41	8.65	320.9	765	0.055	13.2	29.8	0.02	6.83	5.6	密排六方
钆	Gd	64	157.26	7.86	1312	2730	0.071	23.5	4(40°)	0.021 (28°)	140.5 (25°)	5.6~9.8	密排六方
钾	K	19	39.100	0.86	63.7	760	0.177	14.5	83	0.24	6.15(0°)	—	体心立方
镓	Ga	31	69.72	5.907	29.78	2237	0.079	19.6	18⑥	0.07~ 0.09(30°)	17.4 (a轴)	—	正方
锎	Cf	98	251	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
钙	Ca	20	40.08	1.55	838	1440	0.149⑦	52	22.3⑧	0.3	3.91(0°)	2.2~2.7	面心立方
氙	Xe	54	131.30	5.896×10^{-3}	-111.9	-108.0	—	—	—	1.24×10^{-4}	—	—	体心立方
镧	Cm	96	247	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
金	Au	79	197.0	19.32	1063.0± 0.0	2970	0.0312 (18°)	16.1	14.2	0.71	2.35	8.2	面心立方

(1) Metals Handbook, (1961), ASM.

(续)

元素名称	符号	原子序数	原子量	比重 (20°C) g/cc	熔点 °C	沸点 °C	比热容 (20°C) cal/g°C	熔化潜热 cal/g	热膨胀系数 $\times 10^{-6}$ (20~40°C)	导热率 (20°C) cal/cm s °C	电阻率 (20°C) $\mu\Omega\text{cm}$	纵弹性模量 $E \times 10^3$ kgf/mm ²	晶体结构
银	Ag	47	107.880	10.49	960.80	2210	0.056 (0°)	25	19.68⑦	1.0(0°)	1.59	7.2~7.9	面心立方
氩	Kr	36	83.8	3.743×10^{-3}	-157.3	-152	—	—	—	0.21×10^{-4}	—	—	体心立方
铬	Cr	24	52.01	7.19	1875	2665	0.11	96	6.2	0.16	12.9(0°)	25	体心立方
硅	Si	14	28.09	2.32 (25°)	1410	2680	0.162 (0°)	432	28~7.3	0.20	10(0°)	11	菱形立方
锗	Ge	32	72.60	5.323×10^{-3} (25°)	937.4 ± 1.5	2830	0.073	—	5.75	0.14	46	—	菱形立方
钴	Co	27	58.92	8.85	149.5 ± 1	2900	0.099	58.4	13.8	0.165	6.24	21	密排六方
钐	Sm	62	150.35	7.49	1072	1630	0.042 计算	17.29	—	—	88(25°)	5.6	正斜方⑦
氧	O	8	16.00	1.429×10^{-3}	-218.83	-183.0	0.218	3.3	—	0.59×10^{-4}	—	—	立方⑦
镝	Dy	66	162.94	8.55	1407	2330	0.041	25.2	9	0.024 (28)	57(25°)	7.7	密排六方
溴	Br	35	79.916	3.12	-7.2 ± 0.2	58	0.070	16.2	—	—	—	—	正斜方
锆	Zr	40	91.22	6.489	1852	3580	0.067 ± 0.001	60估计	5.85	0.211①	40	9.6	密排六方
汞	Hg	80	200.61	13.546	-3836	357	0.033	2.8	—	0.0196 (0°)	98.4 (50°)	—	菱面体
氢	H	1	1.0080	0.0899×10^{-3}	-259.19	-252.7	3.45	15.0	—	4.06×10^{-4}	—	—	六方
钪	Sc	21	44.96	2.99	1539	2730	0.134	84.52	—	—	61(22°)	—	密排六方
锡	Sn	50	118.70	7.2984	231.912	2270	0.054	14.5	23⑦	0.150 (0°)	11(0°)	4.2~4.6	正方⑦
锶	Sr	38	87.63	2.60	768	1380	0.176	25	—	—	23	—	面心六方
铯	Cs	55	132.91	1.903 (0°)	28.7	690	0.04817	3.8	97⑤	—	20	—	体心六方
铈	Ce	58	140.13	6.77	804	3470	0.045	8.5	8	0.026 (28°)	75(25°)	4.2	面心六方⑦
硒	Se	34	78.96	4.79	217	685 ± 1	0.084 (28°)	16.4	37	$7 \sim 18.3 \times 10^{-4}$	12(0°)	5.9	六方⑦
铋	Bi	83	209.00	9.80	271.3	1560	0.0294	12.5	13.3	0.20	106.8 (0°)	3.2	菱面体
铊	Tl	81	204.39	11.85	303	1457	0.031	5.04	28	0.093	18(0°)	—	密排六方
钨	W	74	183.86	19.3	3410	5930	0.033	44	4.6	0.397 (0°)	5.65 (27°)	35	体心六方⑦
碳	C	6	12.011	2.25	3727升华	4830	0.165	—	0.6~ 4.3⑩	0.057	1.375×10^3 (0°)	0.5	六方⑦
钽	Ta	73	180.95	16.6	2996 ± 50	5425 ± 100	0.034 (25°)	38	6.5	0.130	12.45 (25°)	19	体心六方
钛	Ti	22	47.90	4.507	1668 ± 10	3260	0.124	104估计	8.41	6.6②	4.2	11.8	密排六方
氮	N	7	14.008	1280×10^{-3}	-209.97	-195.8	0.247	6.2	—	0.60×10^{-4}	—	—	六方⑦
铥	Tm	69	168.94	9.31	1545	1720计算	0.038	26.04	—	—	79(25°)	—	密排六方
铪	Hf	72	178.49	13.31	2130估计	—	—	—	—	—	—	—	—
铁	Fe	26	55.85	7.87	1536.6 ± 1	3000 ± 150	0.11	65.5	11.76(25°)	0.18(0°)	9.71	20	体心立方⑦
铽	Tb	65	158.93	8.25	1356	2530	0.044	24.54	7	—	—	—	密排六方

(续)

元素名称	符 号	原子序数	原子量	比 重 (20°C) g/cc	熔 点 °C	沸 点 °C	比热容 (20°C) cal/g°C	熔化潜热 cal/g	热膨胀系数 $\times 10^{-6}$ (20~40°C)	导热率 (20°C) cal/cms °C	电阻率 (20°C) $\mu\Omega\text{cm}$	纵弹性模量 $E \times 10^3$ kgf/mm ²	晶体结构
碲	Te	52	127.61	6.24	449.5 ± 0.3	839.8 ± 3.8	0.047	32	16.75	0.014	4.36 $\times 10^6$ (23°)	4.2	六方①
铜	Cu	29	63.54	8.96	1083.0 ± 0.1	2595	0.095	50.6	16.5	0.941 ± 0.005	1.6730	11	面心立方
钍	Th	90	233.05	11.66	1750	3850 ± 350	0.034	<19.82	12.5⑩	0.090 (100°)	13(0°)	4.9~7.0	面心立方
钠	Na	11	22.991	0.9712	97.82	892	0.295	27.5	71	0.32	4.2(0°)	—	体心立方
铅	Pb	82	207.21	11.36	327.4258	1725	0.0309 (0°)	6.26	29.3⑨	0.083 (0°)	20.648	1.4	面心立方
铌	Nb	41	92.91	8.57	2468 ± 10	4927	0.065 (0°)	69	7.31	0.125 (0°)	12.5	11	体心立方
镍	Ni	28	58.71	8.902 (25°)	1453	2730	0.105	73.8	13.3⑦	0.22 (25°)	6.84	21	面心立方
钕	Nd	60	144.27	7.00	1019	3180	0.045	11.78	6	0.031 (-2.22°)	64(25°)	—	六方①
氖	Ne	10	20.183	0.8999 $\times 10^{-3}$	-248.6 ± 0.3	-246.0	—	—	—	1.1 $\times 10^{-4}$	—	—	体心立方
镎	Np	93	237	—	6.37 ± 2	—	—	—	—	—	—	—	—
锝	Tc	43	98	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
铂	Pt	78	195.09	21.45	1769	4530	0.0314 (0°)	26.9	8.9	0.165 (17°)	10.6	15	面心立方
钒	V	23	50.95	6.1	1900 ± 25	3430	0.119⑦	—	8.3⑤	0.074 (100°)	24.8~ 26.0	13~14	体心立方
铪	Hf	72	178.58	13.09	2222 ± 30	5400	0.0351	—	519⑪	0.223③	35.1 (25°)	—	密排六方
钯	Pd	46	106.7	12.02	1552	3980	0.0584 (0°)	34.2	11.76	0.168 (18°)	10.8	11	面心立方
钡	Ba	56	137.36	3.5	714	1640	0.068	—	—	—	—	—	体心立方②
砷	As	33	74.91	5.72	817④	613升华	0.082	88.5	47	—	33.3	—	菱面体①
氟	F	9	19.00	1.696 $\times 10^{-3}$	-219.6	-188.2	0.18	10.1	—	—	—	—	—
镨	Pr	59	140.92	6.77	919	3020	0.045	11.71	4	0.028 (-2.22°)	68(25°)	4.9~7.0	立方②
钫	Fr	87	223	—	27估计	—	—	—	—	—	—	—	—
钚	Pu	94	242	19.00~ 19.72	640	3235	0.033 (25°)	—	55⑬	0.020 (25°)	141.4 (107°)	10	单斜②
镤	Pa	91	231	15.4	1230估计	—	—	—	—	—	—	—	—
镤	Pm	61	147	—	1027估计	—	—	—	—	—	—	—	—
氦	He	2	4.003	0.1785 $\times 10^{-3}$	-269.7	-268.9	1.25	—	—	3.32 $\times 10^{-4}$	—	—	密排六方
铍	Be	4	9.013	1.848	1277	2770	0.45	260	11.6⑩	0.35	4	2.8~3.1	密排六方
硼	B	5	10.82	2.34	2030近似	—	0.309	—	8.3⑩	—	1.8 $\times 10^{12}$ (0°)	—	正斜方
铈	Ho	67	164.94	6.79	1461	2330	0.039	24.9	—	—	87(25°)	7.7	密排六方
钋	Po	84	210	—	254 ± 10	—	—	—	—	—	—	—	单斜
镁	Mg	12	24.32	1.74	650 ± 2	1170 ± 10	0.245	88 ± 2	27.1(a轴)	0.367	4.45	4.5	密排六方
锰	Mn	25	54.94	7.43	1245	2150	0.115	63.7	22	—	185	16	复杂立方②

(续)

元素名称	符号	原子序数	原子量	比重 (20°C) g/cc	熔点 °C	沸点 °C	比热容 (20°C) cal/g°C	熔化潜热 cal/g	热膨胀系数 $\times 10^{-6}$ (20~40°C)	导热率 (20°C) cal/cm·s °C	电阻率 (20°C) $\mu\Omega\text{cm}$	纵弹性模量 $E \times 10^3$ kgf/mm ²	晶体结构
钼	Mo	42	95.95	10.22	2610	5560	0.066	69.8估计	4.9⑩	0.34	5.2(0°)	约42	密排六方⑪
铕	Eu	63	152.0	5.245	826	1490	0.039	16.5	26	—	90(25°)	—	体心立方
碘	I	53	126.91	4.94	113.7	183	0.052	14.2	93	1.04× 10 ⁻³	1.3× 10 ¹⁵	—	正斜方
镭	Ra	88	226	5.0	700	—	—	—	—	—	—	—	—
氡	Rn	86	222	9.960× 10 ⁻³	-71估计	-61.8	—	—	—	—	—	—	—
镧	La	57	138.92	6.19	920	3470	0.048	17.3	5	0.033	57(28°)	7.0~7.7	面心立方⑫
锂	Li	3	6.940	0.534	180.54	1330	0.79	104.2	56	0.17	8.55(0°)	—	体心立方
磷	P	15	30.975	1.83	44.25	280	0.177	5.0	125	—	1×10 ¹⁷ (11°)	—	六方⑬
镥	Lu	71	174.99	9.85	1652	1930	0.037	26.29	—	—	79(25°)	—	密排六方
钌	Ru	44	101.1	12.2	2500+ 100	4900	0.057 (0°)	—	9.1	—	7.6(0°)	42	密排六方⑭
铷	Rb	37	85.48	1.53	38.9	688	0.080	6.5	90	—	12.5	—	体方立方
铼	Re	75	186.22	21.04	3180±20	5900	0.030	—	6.7⑮	0.17	19.3	47	密排六方
铑	Rh	45	102.91	12.44	1966±3	4500	0.059 (0°)	—	8.3	0.21 (17°)	4.51	30	面心立方⑯

①—W/cm/°C(27°)

②—BTU/sq·ft/ft/h/°F(-20°)

③—W/cm/°C(50°)

④—28大气压

⑤—0°~26°

⑥—0°~30°

⑦—0°~100°

⑧—0°~400°

⑨—17°~100°

⑩—20°~100°

⑪—20°~200°

⑫—20°~250°

⑬—20°~500°

⑭—21°~104°

⑮—23°~100°

⑯—25°~100°

⑰—在一般晶体结构中也有同素异形体

1.1.2 金属材料的物理性能

表2为主要金属材料的物理性能⁽²⁾。

1.1.3 金属材料的组织

金属是一种晶体，是电、热的优良导体，具有正电阻温度系数。纯金属也可作为金属材料使用，但多数情况以合金状态使用。在一种金属中加入其他金属或非金属元素组成合金，仍然具有金属的特性。金属材料在工业上所以被广泛应用，在于强度高，加工方便是其他非金属材料所不及。而金属材料的强度及加工性与其组织有密切关系。

纯金属加热，在某特定温度即熔化成液态。反之，液态缓慢冷却亦在特定温度凝固。在凝固时金属中产生按一定位置排列的原子群（晶核），晶核长大成晶粒。整体金属由一颗晶粒构成称为单晶，通常我们使用的是多晶体，由金属的许多晶粒集合体构成。晶粒的大小取决于凝固时成核速度及晶核的

长大速度。至于凝固后金属及合金的晶粒大小也可通过变形加工与热处理来调整。

合金是纯金属、固溶体及金属间化合物的单相或多相的集合体。以二元合金为例，有时合金元素A和B完全不互溶而机械地混合，构成二相组织（例如Cu与Pb合金）。有时金属成分之间按任何比例也互溶，就成单相的固溶体。多数固溶体是置换型固溶体，即在A原子位置中由B原子所置换。在特殊情况下，有时A原子点阵的间隙中楔入B原子，形成间隙式固溶体。Fe与C，Fe与N等合金是间隙固溶体，与置换型固溶体相比，其合金元素的强化作用大，这也是使钢成为高强度材料的主要原因。有时合金元素A与B构成化合物，假如金属相互的比例适宜，则全部形成单一的化合物，这也是一种相组织，如CuZn，Fe₃C等即为一例。

(2) 机械设计便览，(昭49-3)，日刊工业新闻社。

表2 金属材料的物理性质

合金名称	化 学 成 分 %	比 重	熔 点 °C	纵弹性模量 E kgf/mm ² (18°C)	横弹性模量 G kgf/mm ² (18°C)	导热率 kcal/mh°C (20°C)	热膨胀系数 ×10 ⁻⁶ /°C (20°C)	电阻率 μΩcm (20°C)	比热容 cal/g°C (20°C)
超硬铝	Cu3.8~4.8, Mg1.2~1.8, Mn0.4~1.0, Fe<0.6, Si<0.6, 余量Al	2.8	约650	7510 (热处理材料)	2695	0.45cgs 退火0.29 cgs 固溶 后时效	22.8退火 23.2固溶 后时效	3.448 退火 5.747 固溶 后时效	0.23
硬 铝	Cu40, Mg0.5, Mn0.5, 余量Al	2.79	约650	约7000 (淬火后 常温时效 材料)	2700 (退火 线材)	78(- 180°C) 142 (20°C) 167 (200°C)	22.6	—	约0.2
Y合金	Cu4, Ni2, Mg1.5, 余量Al	2.8	550~640	7420	2695	134 (100~ 300°C)	22	4.310 时效	0.23
埃雷克特龙 镁 合 金	Al13.5~7.5, Zn0.5~3.5, Mn0.25~0.7, 余量Mg	1.8	620~530	4550	1680	100	26	13.5	0.25
硅铝明 (13合金)	Si11~14.5, Fe<0.7, 余量Al	2.65	575~585	7210 (压铸)	2695 (压铸)	140 (砂型 28°C)	19.8~ 21.2	414	0.23
超低碳钢	C0.08~0.12 (其它Si, P, S<0.05) 余量Fe	7.856~ 7.861	1500	21000	8100	49~52	11.28~ 11.60	13.29~ 13.4	0.1132~ 0.1140
中碳钢	C0.40~0.50	7.836~ 7.846	1390~ 1420	20900	8360	38	10.72~ 10.73	19.2~ 19.7	0.1168~ 0.1180
高碳钢	C0.8~1.6	7.810~ 7.833	1335~ 1450	20000~ 20600	8200~ 8300	32~37	9.58~ 10.87	20.4~ 24.4	0.1210~ 0.1240
特种软钢	C<0.08	7.859	1500	21300	8430	50	11.60	13.4	0.1132
软 钢	C0.12~0.20	7.855~ 7.863	1470~ 1490	21150	8400~ 8420	43~52	11.16~ 11.28	13.7~ 15.8	0.1136~ 0.1146
中碳结构钢	C0.30~0.45	7.836~ 7.854	1420~ 1450	21100	8400	36.5~ 43.5	10.73~ 10.92	18.8~ 19.2	0.1158~ 0.1168
铸 钢	C0.2~0.5, Mn0.7, Si0.4, P, S0.04	7.84	1410~ 1470	21000	7850	32~37	从1600°C 总收缩 11.8%	14~16	0.117
黑心可锻铸铁	C2.5~2.6, Si1.0, Mn0.4	7.35	约1130	17500	8750	34 (58°C)	11.55	32	0.111
灰口铸铁	C2.8~3.8 (其它含Mn, Si, P, S)	7.05~ 7.30	1145~ 1275	7500~ 13000	2900~ 4000	27~48	9.2~ 11.80	70~120 (0°C)	0.1285~ 0.1350 (0~ 100°C)
球墨铸铁	C3.2~4.0, Mn<0.8, Si1.8~3.0, Mg处理	7.1	1120~ 1180	15400	8000	0.08cgs	10	57~66	0.12
铝青铜	Al9~10, Mn<0.6, Fe<0.25, 余量Cu	7.6	1040	11200	—	0.144cgs (退火)	17 (0~ 100°C)	13.7	0.104
七三黄铜	Cu69~72 余量Zn	8.54	950	11000 (退火)	4220 (27°C)	76(- 100°C) 96(20°C) 177 (400°C)	19 (0~ 100°C)	6.2	0.09

(续)

合金名称	化 学 成 分 %	比 重	熔 点 °C	横弹性 模 量 $E \text{ kgf/mm}^2$ (18°C)	横弹性 模 量 $G \text{ kgf/mm}^2$ (18°C)	导热率 $\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ (20°C)	热膨胀 系 数 $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (20°C)	电阻率 $\mu\Omega\text{cm}$ (20°C)	比热容 $\text{cal/g}^\circ\text{C}$ (20°C)
四六黄铜	Cu58~61, 余量Zn	8.39	905	105	3900	约70 (20°C)	18.4 (100°C)	6.2	0.091
磷青铜 (锻材)	Sn 10, P 0.03~0.25, 余量Cu	8.78	1000	11200	—	0.12cgs	18.4 (20~ 300°C)	16	0.09
德 银	Cu 60~65, Ni 12~22, Zn 18~23	8.3~ 8.7	950~ 1180	11000	4000	215~360	18~21 (0~ 100°C)	17~41	0.095~ 0.106
铍 铜	Be2, Co 0.25(或Ni 0.35) 余量Cu	8.2	864~955	11300 (热处理)	—	0.25 (热处理)	16.6(20 ~100°C)	6.8~9.8 (热处理)	0.1
高强度 锰青铜	Fe 3, Al 5.5, Mn 3.5, Zn 26, Cu 62	7.9	899	10850	—	铜13%	19.8 (21~ 260°C)	—	—
铬 钢 (渗碳钢)	C 0.09~0.25, Cr 0.55~1.50	约7.84	—	20500~ 21500 (退火)	—	36~43	约11.2 (20~ 100°C) 约14.3 (20~ 600)	约16~18	0.111~ 0.113
Cr不锈钢	C<0.2, Mn<0.5, Cr 11~15, Ni<1.0	7.6~ 7.75	1510~ 1532	20700~ 21200 (原材料)	—	21.5 (200°C) 24.5 (500°C)	11.0 (0~ 100°C)	60	0.11 (0~ 100°C)
铬 镍 不锈钢	低碳, Cr 18, Ni 8(或Cr 8, Ni 18)	7.91	1400~ 1420	19700~ 20400 (退火)	—	14(0~ 100°C) 18(0~ 500°C)	17.1 (0~ 100°C) 18.4 (0~ 500°C)	70 70~82 (冷加工)	0.12 (0~ 100°C)
硅 钢	C<0.08, Mn<0.35, Si 0.8~4.3	7.8~7.6	1430~ 1530	约22100 ~22500 (轧态)	—	0.5~1.2 (纵向) 0.013~ 0.014 (横向)	12~15	24~66	—
镍铬钢	C 0.25, Ni 1.0~5.0, Cr 0.3~2.0	7.8	1450~ 1510	20800(C 0.3%, Cr 0.4%, Ni 3.5 %)	—	29~38	13.3 (20~400 °C) 14.8 (20~700 °C)	—	—
钼 钢	C 0.30~0.4, Mo<1.0	—	1440~ 1520	—	—	36~43	13.3	—	—
扎马克 2 (压铸及砂型用)	Al 4, Cu 3, Mg 0.03, 余量Zn	6.7	390~380	—	—	25cgs (70~ 140°C)	27.7 (20~ 100°C)	6.849	0.10 (20~ 100°C)
白合金 (轴承合金)	Sn 80~90, Sb 4~10, Cu 2~7	7.38	355~240	5320	—	—	约20	—	—
含As的铅基 巴氏合金	Sb 15, Sn 1, As 1, Pb 83	10.1	353~247	2940	—	—	—	—	—
因瓦合金	Fe 64, Ni 36	8.15	1425	1500	—	9	1.2	75~85	0.123
康 铜	Ni 40~45, Cu 50~60	8.9~8.6	1300~ 1220	15600	6200	1.9	14.9 (20~ 100°C)	49	0.094 (Cu 60%, Ni 40%)

(续)

合金名称	化 学 成 分 %	比 重	熔 点 °C	纵弹性模量 $E \text{ kgf/mm}^2$ (18°C)	横弹性模量 $G \text{ kgf/mm}^2$ (18°C)	导热率 $\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ (20°C)	热膨胀系数 $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (20°C)	电阻率 $\mu\Omega\text{cm}$ (20°C)	比热容 $\text{cal/g}^\circ\text{C}$ (20°C)
哈氏耐蚀高镍合金	Mo20, Fe20, Ni60	8.8	1330~1300	18900	—	1.4	2.72	126.7 (24°C)	0.094
坡莫合金	Ni78.5, Mn0.5, 余量 Fe	8.6	1440~1470	约14000 (原材料) 约20000 (热处理材料)	—	—	13.5	22	—
锰 铜	Ni4, Mn12, Cu84	8.15	—	12600	4700	7.5 (0~100°C)	约17	48	0.4~0.42 (0~100°C)
高强度耐蚀镍铜合金	Ni65~70, Cu26~30, Fe0~30, Mn0~1.5	8.84	1300~1350	17500~18000	6300~6600	22 (0~100°C)	14 (25~100°C)	42.5	0.127 (0~400°C)
镍铬耐热合金	Cr20, Mn2, Ni78	8.4	1400	21700	—	—	17.6 (70~1000°C)	107.9	0.107
镍铬铁耐热合金	Fe6, Cr14, Ni80	8.51	1425~1395	21700	—	0.36cgs (0~100°C)	11.5 (20~100°C)	98.1	0.109 (25~100°C)

合金的金相组织相应于不同的化学成分及温度,在热力学稳定状态下平衡,其关系用合金平衡状态图表示。但在实际使用中,重要钢的淬火组织,硬铝的时效硬化组织和各种金属的变形组织等,多数并非处于热力学上最稳定状态,而处于亚稳定状态。所以使用金属材料时,必须注意这些材料是由怎样的金相组织所构成,是处于稳定状态呢,还是以多大程度偏离稳定状态的组织。

金属及合金的强度⁽³⁾是指外力作用下是否容易引起塑性变形。此时,假定在整个金属结晶面上产生相同的滑移,则滑移面上滑移方向的临界剪切应力 τ_m 为 $G/2\pi$ (G 为横弹性模量)。此 τ_m 值要比金属与合金中通常测得的值高得多。表3为不同溶媒原子构成的各种合金,在目前通过各种强化方法,而有可能获得的最高强度值。表中所列的抗拉强度与横弹性模量之比约为0.3时,可以认为其合金与上述 τ_m 的强度几乎一致。因此,一般认为金属晶体的滑移,由位错而引起,即由于晶内原子排列不规则部分引起的运动使局部滑移扩展到整个晶体。实际上证实了位错的存在。位错是在凝固时产生,由于加工和热处理使位错的数量及排列状态发生变化。如上所述金属与合金的塑性变形,主要由

位错运动而引起,因此金属材料的强度决定于外力作用下位错运动的难易程度,或在外力作用下,滑动位错数的多少,这都与金属组织有密切关系。表3⁽⁴⁾所列的各种合金是阻止位错运动而强化的一些例子,晶须因极少存在位错,故很难发生塑性变形。阻止位错运动使金属材料强化的方法有:(1)形成固溶体;(2)使其塑性变形而加工硬化;(3)通过热处理,或引起相变、或使化合物析出、或使溶

表3 各种合金的极限强度(常温)⁽⁴⁾

基体金属	抗 拉 强 度 kgf/mm^2	抗拉强度横弹性模量
铝	66	0.025
铜	135	0.043
镁	36	0.021
铁	420	0.055
镍	136	0.016
钛	118	0.028
铜(晶须)	300	0.081
铁(晶须)	1340	0.22

(3) 日本金属学会编,金属材料の強度と破壊,(昭29),丸善。

(4) McLean, D., Mechanical Properties of Metals, (1962), John Wiley & Sons.

质原子偏析；(4)可采用上述三种方法适当组合起来进行。

钢铁材料采用上述强化方法的例子⁽⁵⁾如下：高纯度铁的屈服点仅2.8 kgf/mm²左右，若固溶0.0001~0.005% C时其屈服点达4.9~19.0 kgf/mm²，0.02%碳钢，经冷变形加工后，可获得抗拉强度为21~70 kgf/mm²。又如低合金马氏体钢的抗拉强度为154~225 kgf/mm²，经冷变形加工后强度可达280~420 kgf/mm²。还有奥氏体形变处理钢的抗拉强度可达210~350 kgf/mm²。

1.1.4 热处理^{(6), (7)}

a. 概述 热处理操作采用加热和冷却的各种组合，能使材料获得符合设计要求的性质。实际上主要目的是改进材质性能，其次也包括消除锻件、铸件或焊接压力容器等的残余应力的去应力退火和脱氢处理等。在热处理过程中，要注意升温速度，温度控制，保温时间及冷却速度，必须按照所定的标准和操作规范进行。热处理炉有电炉，煤气炉及重油炉等，周围的环境有真空、还原性盐浴及油等。加热金属材料时，加热温度TK与加热时间t之间的关系，即为：

$$1/t = A \exp(-Q/RT)$$

式中 A——常数；

Q——从一种状态转变为另一种状态时需要的激活能；

R——气体常数。

Q虽也有已知数，假如在未知数时，则通过数次试验即可求出T与t的关系。此外，钢的直径或厚度与奥氏体化温度区的加热保温时间之关系，通常由MIL-H-6875B规定如图1⁽⁸⁾所示的条件。其次在热处理时必须注意伴随而产生的缺陷，为此，重要的是要充分了解材料的热处理特性、工件的大小、形状及热处理操作方式，在适当综合考虑后进行热处理。

b. 退火 退火操作是将金属材料加热到适当温度，并在此温度保温以后进行缓冷。其目的包括消除由加工引起的内部应力，降低硬度，改善抗应力腐蚀开裂性能、提高被切削性能、改善冷变形加工性、调整晶粒度或获得所要求的机械、物理及其他性能等。加工硬化后的材料由于退火引起的性质变化如图2所示。图中I是回复过程，此时因冷变形而产生的大量位错重新排列，虽在显微镜下观察不

到晶粒尺寸变化，也未发现软化，但残余应力减少。II是发生再结晶的温度区域，受到形变的晶粒界面上产生出未变形的晶粒，并逐渐长大到形变晶粒消失，同时软化。III为再结晶终止后的晶粒长大过程。金属及合金的第II过程起始温度大致恒定，称为再结晶温度。由于冷变形而硬化的材料，若将其加热到超过再结晶温度，则完全回复到变形前的状态。表4为某些金属的再结晶温度。冷变形量较少时，其再结晶温度有增高的倾向。钢的典型退火操作有软化退火、消除应力退火、低温退火、扩散退火、球化退火及中间退火等。

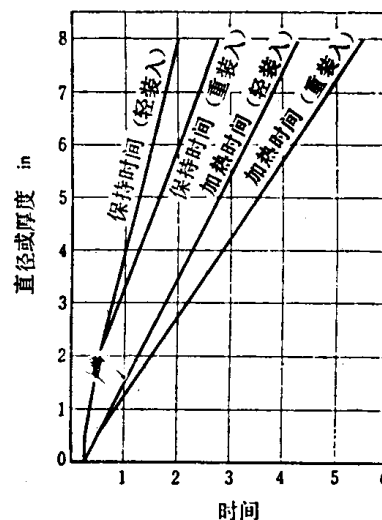


图1 奥氏体化温度区保温时间

c. 正火 正火是指钢加热到Ac₃点或Acm点以上的适当温度(30~50°C)，加热后通常在空气中冷却的操作。主要为了消除前道工序加工的影响，调整晶粒度和改善机械性能。

d. 淬火 淬火是将金属材料加热到高温，然后进行急冷的处理，目的是为了获得所谓亚稳定状态过饱和固溶体的金相组织。例如对钢来说，从奥氏体化温度淬火，能获得马氏体硬化组织(Fe与C的过饱和间隙固溶体，也有其他合金元素以置换型而固溶)。与此相似的操作，有沉淀硬化型不锈钢所进行的固溶处理，这与通常的淬火有所区别。钢淬火时为了获得马氏体组织，必须以大于临界冷却速度进

(5) Strengthening Mechanisms in Solid, (1962), ASM.

(6) 金属热处理技术便览，(昭35)，日刊工业新闻社。

(7) 铁钢热处理用语，JIS G 0201-1969.

(8) MIL-H-6875 B, 10, (1959-7).

行冷却,此速度与钢的化学成分和奥氏体晶粒度有相依关系。如钢中含有 Ni、Cr、Mn、Mo 等合金元素,临界冷却速度慢,

淬透性好。淬透性好的钢即使大尺寸零件,也可能淬硬到中心部位,这种钢称为质量效应小的钢。钢的淬透性原则上由端淬试验法表示⁽⁹⁾,以 H 钢

(保证淬透性的钢)

列入 JIS 标准。

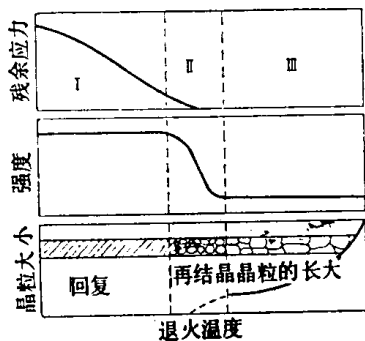


图2 变形材料退火三过程

表4 金属的再结晶温度

金 属	再结晶温度 ℃	金 属	再结晶温度 ℃	金 属	再结晶温度 ℃
铁	450	铝	150	钨	900
镍	600	铂	450	锌	常温
金	200	镁	150	锡	常温
银	200	钛	700	铅	常温以下
铜	200	钨	1200		

钢进行淬火时必须加热到获得最高硬度的温度,但重要的是尽量选择低的加热温度,使钢的韧性、强度、淬火变形及金相组织等各方面均获得良好效果。

e. 回火 回火是将淬火获得的亚稳定金相组织通过加热和冷却,使它发生相变或析出而接近于稳定组织,达到所要求的性能及状态的操作过程。钢的回火应在 A_{c1} 点以下的适当温度进行,也有在正火后回火的。钢的马氏体组织在 200°C 以下回火时,仅析出 ϵ -碳化物,几乎不软化,比淬火状态更韧。当回火温度大于 400°C 时,马氏体转变成铁素体与渗碳体的细微混合组织,即变成相当强韧的状态。含有 Ni、Cr、Mo 等的结构钢淬火后经过 $550^{\circ}\text{C} \sim 680^{\circ}\text{C}$ 回火状态使用,这种高温回火称为调质处理。

f. 钢的特殊热处理工艺 钢有相变,经过热处理可在较宽的范围内改变机械性能,因有这样的特性,除了单独的淬火、回火外,还适用于其他热处理工艺。当钢在奥氏体化温度,以大于临界速度冷却时,即转变为马氏体。这种马氏体相变的起始温

度称为 M_s 点,与钢的化学成分有关,可用下面经验公式表示: $M_s(^{\circ}\text{C}) = 550 - 350 \times \% \text{C} - 40 \times \% \text{Mn} - 35 \times \% \text{V} - 20 \times \% \text{Cr} - 17 \times \% \text{Ni} - 10 \times \% \text{Cu} - 10 \times \% \text{Mo} - 5 \times \% \text{W} + 15 \times \% \text{Co} + 30 \times \% \text{Al}$ 。

将钢从奥氏体化温度急冷到 M_s 点以上任意温度,并在此温度保温,当经过一定的时间后,会析出铁素体或贝氏体组织,发生所谓恒温转变。钢的恒温转变曲线通常称为 S-曲线、C-曲线或 TTT 曲线,钢的特殊热处理法就是利用了这种曲线。图 3 以图解方式表示的等温淬火处理⁽¹⁰⁾,钢经淬火后获得贝氏体组织,淬火变形少而强韧性好,已在部分工具钢中应用。图 4 为马氏体等温淬火操作(处理)⁽¹⁰⁾的图解,为了防止钢淬火时产生变形与淬裂,而且获得适当的淬火组织,淬火保持在马氏体形成温度区上部或稍高于此温度的冷却液中,使各部位均达到此温度然后进行冷却。这又称分级淬火,已应用于精密机械零件的处理。图 5 为形变热处理的图解⁽¹⁰⁾,保持在较 M_s 点高的温度,此时经 50~90% 的变形(多数为轧制),然后进行常温淬火。此

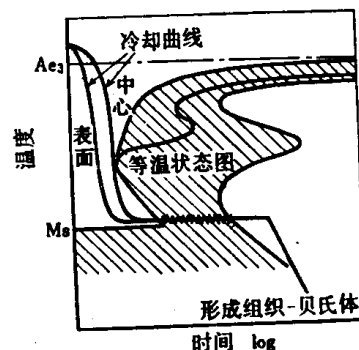


图3 等温淬火处理

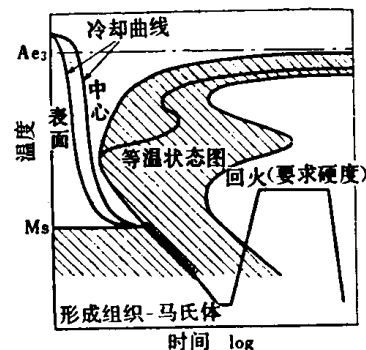


图4 分级淬火处理

生沉淀硬化现象,能获得抗拉强度约 200 kgf/mm^2

(9) JISG 0561-1965.

(10) 河上益夫,等2名 熟处理の基礎(I), (昭46), 日刊工業新聞社。

的高强韧钢⁽¹¹⁾, 17-4PH, 17-7PH 不锈钢及Be-Cu合金等也用沉淀硬化热处理方法。

g. 其他 以耐磨、强韧化等为目的, 有渗碳、渗氮、渗硫、高频表面硬化、火焰硬化等, 除了渗碳外通常必须先进行淬火-回火的前处理。

1.1.5 残余应力^{(12), (13)}

由于压延、拉丝、弯曲、切削、热处理、铸造、锻造及焊接等各种加工,

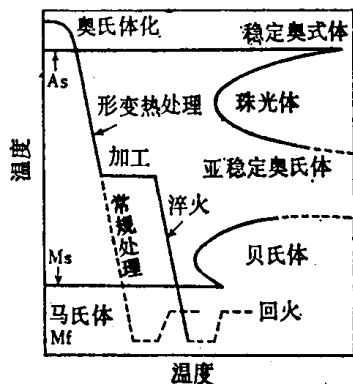


图5 形变热处理模式示意图

使金属材料内部引起体积或尺寸变化而产生残余应力。残余应力对静拉伸试验结果几乎无影响。但是, 当材料遇到难于变形的金相组织或试验条件时, 残余拉应力将促进裂纹的产生, 与无残余应力的情况相比, 在低负荷下也会断裂。若允许有某种程度的塑性时, 则残余应力的影响就消除, 对塑性变形极少的疲劳破坏残余应力有显著影响。多数情况下, 疲劳裂纹在材料近表面处由拉应力引起, 所以在这一部分有残余拉应力就容易发生断裂, 若有残余压应力则难以发生裂纹。当钢制机械零件表面进行轧制、喷丸、渗碳、渗氮及高频淬火时, 在表面强化的同时有残余压应力, 这些残余压应力对交变弯曲应力引起的疲劳强度都是有利的。此外, 残余应力对材料的尺寸变化, 应力腐蚀开裂及氢脆开裂等也有影响, 因此尚须考虑与化学成分及金相组织之间的关系。

加热能够消除残余应力。钢的加热温度为600~700℃, 铜合金为180~300℃, 灰铸铁为510~650℃。其次, 为了防止冷却时再次产生残余应力, 因此, 采用温度梯度尽量小的缓冷。也有采用其他机械振动, 使残余应力分布均匀化稳定化的方法。残余应力的测定, 可用某些方法间接地求出与材料内部应力相对应的应变, 然后用弹性理论推导的公式进行推算。

1.1.6 金属材料及金属制品材质的缺陷

金属材料及金属制品在制造过程中往往会产生种种缺陷。其中除表面缺陷, 内在缺陷外, 作为材料质量的缺陷有合金元素的偏析、组织不良及晶粒粗

大等。在铸件, 锻件中产生的主要缺陷以及由热处理, 焊接等各种加工产生的主要缺陷分别列举如下。

a. 铸件的缺陷⁽¹⁴⁾

(1) 冲砂 沿铁水流动方向引起冲砂, 随后产生的不规则结疤, 成块状并较多地伴随着夹砂。

(2) 表面皱皮 因铸型表面不干净而产生的表皮皱纹, 只是铸件表面缺陷, 并不增加厚度。

(3) 铸件飞边 主要是与铸件表面成直角部位上出现形状多样的扁平凸起。这是由于铸型合箱面不严形成缝隙, 而在合箱面处产生披缝。

(4) 内部缩孔 是铸件内部产生的缩孔, 限于长期处于高温的部分及厚壁部分, 其孔洞多数形成树枝状的粗糙内壁, 下侧呈长漏斗状, 有时会有若干连续的封闭孔洞。

(5) 疏松 出现以巢状或树枝状小孔密集方式的缩孔, 存在于最后凝固的壁厚部分。

(6) 铸瘤 下部型砂的一部分坍塌, 从铁水中浮起后出现不规则的稍大的结瘤, 同时在铸件的其他部位有粘砂或不规则的凹坑。

(7) 落砂 因上部型砂一部分掉落, 随后出现不规则的稍大凸耳(鼓包), 对应于凸耳的位置上出现粘砂或不规则的凹坑。

(8) 夹砂 在浇注过程中夹入型砂, 浇道砂而形成。

(9) 组织缺陷 由于成分, 铸造条件等不完善, 产生了晶粒粗大, 树枝晶, 异常硬化区及其他反常组织。

(10) 收缩凹陷 产生在铸件顶部的缩孔, 表面有凹陷的或表面开口的。在开口状的内部呈漏斗状, 下部尚有断续不等的小缩孔。

(11) 冷硬层 在铸件急冷部分产生的硬化层。

(12) 热裂 是由铸件凝固时的收缩应力而产生的裂纹, 用肉眼勉强能观察到裂纹的大小, 其断口已氧化。

(11) Decker, R. F., 等2名, Trans. Amer. Soc. Metals, 55(1962), 58.

(12) 日本热处理技术协会编, 残留应力, (昭38), 12, 共立出版。

(13) 应力测定法, (昭36), 朝倉書店。

(14) 日本铸物协会, 国际铸物会议缺陷委员会编, 铸物缺陷写真集, (昭35)。

(13) 针孔 它与气孔一样是内侧平滑的球状孔穴, 分散在整个铸件或均匀分散在铸件的部分区域, 孔径小于2~3 mm的小孔叫针孔。

(14) 气孔 是内侧平滑的球形孔穴, 以单独或不规则聚集的形式分散分布, 直径大于2~3 mm, 在同样的铸件内气孔的大小各不相同。

(15) 偏析 是指合金元素、杂质在凝固时分布不均, 产生局部的浓度差。铸件的断面分成明显的二层, 有时异相区波及的范围较广。

(16) 缺肉 在铸模内由于铁水不能充分流动而产生的缺陷, 在铸件的棱角处产生圆弧形。

b. 锻件的缺陷^{(15)、(16)}

(1) 鬼线 主要是由于磷、硫的偏析引起的缺陷, 在大型碳钢锻件截面上, 出现于轧制或锻延方向。虽然不产生裂纹或开裂, 但偏析显著时容易发生由此而来的二次缺陷, 故必须注意。

(2) 白点 含Ni, Cr, Mo及W等元素的特殊钢锻件容易出现, 白点这种裂纹缺陷, 在断口上呈现银白色粒状, 由于过饱和氢产生的应力和在锻压加工中残余变形应力引起的。

(3) 夹渣 在熔炼及浇铸操作过程中生成的氧化物, 硫化物等非金属夹杂物聚集长大的产物及耐火材料的熔融混入物, 而被宏观, 磁粉, 渗透探伤法等检查出的称为夹渣, 通常对强度的影响小。

(4) 二次缩孔 采用高温高速浇注等熔炼铸造操作及冒口补缩效果以及铸模形状不适当时, 在钢锭中心部位产生二次缩孔。

(5) 异物混入 由于铸锭操作时不注意而使异物混入钢锭中所产生的缺陷, 机加工后可观察到反常光泽, 在同基体的交界处可以断续地观察到非金属夹杂物。

(6) 急热裂纹 在锻造前加热或热处理加热过程中由于急热而产生的表面或内部裂纹, 局部加热或冷料受到较快的升温时容易产生。

(7) 急冷裂纹 是锻造后或回火后产生的裂纹, 相对于材质, 质量, 形状及残余应力而进行不适当的急冷处理, 就容易产生。

(8) 时效裂纹 锻造后或热处理后经长期放置而产生的裂纹, 主要原因是残余应力或相变应力过大。这种裂纹在气温剧烈变化时容易产生, 并往往发出较大的声音。

(9) 龟裂 因锻造而在表面出现龟甲状的较

浅裂纹, 发生于Cu、Sn、As及S等杂质元素较多时, 锻造初期温度不适宜等时候。

(10) 过烧 由于加热温度过高或时间过长而引起过热, 直至内部有显著的晶界氧化裂纹, 或产生激烈的晶粒长大的现象。

(11) 剥落 是产生于硬面轧辊, 轴承钢或外套圈等上面的剥离状缺陷, 除材质不良外, 在热处理、磨削方法及使用方法不当时发生。

(12) 气割裂纹 锻造后用气体加工方法成形或气割时产生的裂纹, 除材质不均匀外, 在气割方法上及加工后热操作不当时产生。

(13) 折叠 在完工锻造面上产生的折叠缺陷, 是由于锻造砧子形状不符合要求, 一次压下量过大及原材料形状不当时产生。

(14) 皱纹缺陷 在完工锻造面上产生的锻造皱纹, 当锻造工艺及锻造操作不适宜时因加热不均及钢锭表面粗糙而产生。

(15) 锻裂 与材质, 温度等因素相比, 主要是由锻造变形量过大时产生的裂纹, 如高铬钢等变形抗力大的钢种容易产生锻裂。

(16) 鳞皮疤 在完工锻造面上存在严重的鳞皮, 或者由于鳞皮脱落而形成凹坑缺陷。

(17) 划伤 与其他制品或器具等碰撞或跌落等产生的缺陷。

(18) 锈蚀 由于清洗, 防锈处理及切削液不适当, 机械加工后在加工表面上产生的锈蚀。

(19) 折断 在黑锻, 矫直等操作时产生的断裂, 其原因是由锻造温度过低, 加热温度过低, 矫直操作不当。

c. 热处理的缺陷⁽¹⁷⁾

(1) 淬裂 是因淬火产生的线状裂纹, 由热应力, 相变应力所引起。

(2) 氧化 在氧化性气氛中加热时, 金属表面产生氧化皮的现象, 作为氧化所造成的缺陷有桔皮状表面, 脱碳, 此外, 以带有氧化皮状态进行淬火, 有时就会产生淬火不均, 硬度不足或淬裂。

(3) 脱碳 由于在与钢或铸铁中的碳发生反

(15) 日本鍛鋼会技術委員会, 鍛鋼品に現れる欠陥とその考え方, (昭47-6)。

(16) 機械設計便覧編集委員会編, 機械設計便覧, (昭33-6), 丸善。

(17) 日本熱処理技術協会, 日本金屬熱處理工業会, 熱處理技術入門, (昭49), 大河出版。

应的介质中加热时,碳从钢或铸铁表面逸出而使材料表层含碳量降低。

(4) 变形 在加热、冷却不匀,急热、急冷或零件厚度不同、形状复杂时,零件内部因温度不匀而引起的变形。

(5) 淬火不匀(软点) 淬火零件的表面硬度不均匀和出现局部未淬透的软点现象。

(6) 磨削裂纹 是指调质钢磨削完毕后,在与磨削方向垂直的方向上产生平行线状或者龟甲状裂纹,属于回火裂纹的一种。

(7) 磨削烧伤 研磨加工时,由于加工热量而发生氧化变色或回火的现象叫研磨烧伤。

d. 焊接缺陷⁽¹⁸⁾

(1) 咬边 由于母材熔融区熔敷金属不足,在熔敷金属表面与母材表面的连接部位上产生了较母材表面低的槽。

(2) 溢流 在焊缝边界处熔敷金属未与母材或熔敷金属熔合而形成重叠的部分。

(3) 焊趾裂纹 在焊缝边界处主要是母材的热影响区产生的裂纹。

(4) 根部裂纹 由于焊接根部缺口造成应力集中而产生的裂纹,它与焊趾裂纹相同,在约200℃以下发生的一种低温裂纹。氢是引起缺陷的重要因素。

(5) 夹渣 在熔敷金属中或母材熔合处有熔渣残留或留下的焊渣所造成的缺陷。

(6) 气孔 在熔敷金属中产生的气泡,凝固时不能逸出,而残存于焊缝内造成的缺陷。

(7) 焊道下的裂纹 是热影响区裂纹的一种,它不会延伸到母材表面,通常极接近于焊道,这种缺陷主要产生在高碳钢及低合金钢中,通常在焊道下即可见到的一种低温裂纹。

(8) 焊道裂纹 是产生在焊道上的裂纹。在熔敷金属裂纹中,为了区别于弧坑裂纹,所以除了弧坑裂纹外,产生在焊道上的裂纹叫焊道裂纹,也有用作熔敷金属裂纹的同义词。

(9) 弧坑裂纹 产生在焊道弧坑上的裂纹。电弧焊焊道的终端,由于急冷凝固而产生的凹坑即弧坑,此时因收缩而产生了弧坑裂纹。

(10) 未焊透 是指焊缝中未焊透部分。

(11) 硫(带)裂纹 若偏析的硫以层状存在于钢材,用此钢材进行焊接时,即形成低熔点硫化

铁共晶,它在熔敷金属中会产生一次晶界裂纹。

(12) 纵向裂纹 平行于焊道而产生的焊接裂纹。焊接裂纹按其形状及方向可分成纵向裂纹、横向裂纹及星形裂纹等。纵向裂纹及横向裂纹,有时也会在熔敷金属及热影响区产生,在弧坑处容易产生星形裂纹。

(13) 横向裂纹 与焊接线或气割线成直角的方向上所产生的裂纹。

(14) 高温裂纹 在凝固温度范围或稍低于凝固温度的较高温度下所产生的焊接接头的裂纹。

1.2 金属材料的检验⁽¹⁹⁾

1.2.1 金属材料的鉴别法

研究金属材料的化学成分时,通常采用JIS等规定的湿式定量分析。此外为了便于检验,列出了如下简单而迅速的鉴别方法。因此要充分理解这些方法的特殊性,若能与其他分析法所取得的结果及已知化学成分的试样进行对照,则会取得更好的效果。

i. 快速分析法 此法是除了JIS中规定的定量化学分析法之外的简单快速分析法。例如关于钢炉渣方面有日本学术振兴会第19小组委员会规定的快速分析法,几分钟至20分钟左右可获得相当正确的分析结果。此外,随着光谱分析法,光量计,极谱分析法的发展,能在短时间内处理大量试样。最近有取代定量化学分析法的趋势,具有简单、快速、精确度高的优点。

ii. 砂轮火花试验法 当钢样在砂轮上磨削时,即发射出火花,由于所含元素种类及含量不同,所产生的火花形态,即流线的颜色、形状、长度及火花爆裂的形状、数量、色彩等也不同。可与已知化学成分材料的火花进行比较,再加上丰富的经验就能较易地鉴别。这方面可参照日本机械学会机械材料部门委员会制订的火花检验操作标准⁽²⁰⁾。

iii. 粉末火花试验法 此法是将试样锉成粉末,在本生灯的氧化火焰上将此粉末燃烧,根据火花的形态及爆裂声进行鉴别的方法。也可用于铜合金,轻合金。

iv. 颗粒试验法 虽然钢种不同,但火花很相

(18) 溶接学会,溶接学会用語辞典,(昭47)。

(19) 金属便覧,(昭35-1),丸善。

(20) 日本機械学会誌,53-379(昭25-8),313。