

(试用教材)

合 金 钢

及 有 色 金 属

上 册

清华大学金属材料专业

1975. 3.

目 录

第一篇 合金化基本规律

第一章 鋼的分类及编号	1
§ 1. 鋼的分类及冶炼方法对鋼材质量的影响	1
§ 2. 鋼的编号	4
思考题	5
第二章 合金强化的基本因素	6
§ 1. 固溶强化	6
§ 2. 第二相强化	7
§ 3. 结构因素——晶粒度及亚结构	9
思考题	10
第三章 合金元素对组织及性能影响的基本规律	12
§ 1. 概述	12
1. 炭鋼的不足、合金鋼的提出	12
2. 我国资源简介	12
§ 2. 合金元素在鋼中的存在形式及对性能影响	13
1. 鉄与合金元素的作用	13
2. 炭与合金元素的作用	20
§ 3. 合金元素对鉄炭状态图的影响	24
§ 4. 合金元素对奥氏体晶粒度的影响	27
§ 5. 合金元素对过冷奥氏体转变的影响	28
1. 奥氏体分介	28
2. 马氏体转变	32
3. 合金元素对淬透性影响及近似计算	34
§ 6. 合金元素对回火转变及性能的影响	36
1. 马氏体分介	36
2. 残余奥氏体转变	37
3. 炭化物转变及聚集长大	37
4. 对鉄素体回复再结晶的影响	39
5. 回火脆性与防止	40
§ 7. 稀土元素作用	41
§ 8. 合金结构鋼性能估算	44
思考题	47

第二篇 合金结构钢

第四章 调质钢	47
§ 1. 概述	47
1. 调质钢性能要求	48
2. 调质钢分类	48
§ 2. 常用调质钢的合金化特点、性能及使用	48
1. 低淬透性调质钢——Mn、Cr、MnB 及 SiMn 钢	48
2. 中淬透性调质钢——CrMn、CrMo、CrMnMo、CrMnSi 及 CrNi 钢	56
3. 高淬透性调质钢 CrNi、CrNiMo、SiMnMoV 钢等	60
§ 3. 我国调质钢新钢种研究情况	61
§ 4. 调质钢小结	71
思考题	72
第五章 渗碳钢	73
§ 1. 渗碳钢性能要求	73
§ 2. 常用渗碳钢的合金化特点、性能及应用	74
1. 低淬透性渗碳钢 ($\sigma_b=80\sim 100\text{kg/mm}^2$)——Mn、Cr、MnB 钢	78
2. 中淬透性渗碳钢 ($\sigma_b=100\sim 120\text{kg/mm}^2$) CrMnTi、MnTiB、MnVB 及 CrNi 钢	78
3. 高淬透性渗碳钢 ($\sigma_b>130\text{kg/mm}^2$)	80
§ 3. 我国渗碳钢新钢种研究情况	81
思考题	83
第六章 普通低合金钢	84
§ 1. 普通低合金钢性能要求	84
§ 2. 合金元素对力学性能影响	85
§ 3. 合金元素对焊接性能影响	86
§ 4. 合金元素对大气腐蚀性能影响	87
§ 5. 我国普通低合金钢使用和发展情况	88
σ_s 为 30kg/mm^2 级、 35kg/mm^2 级、 40kg/mm^2 级、 45kg/mm^2 级、 50kg/mm^2 级、 65kg/mm^2 级的钢种	
思考题	93
第七章 超高强度钢	94
§ 1. 概述	94
§ 2. 中炭超高强度合金钢	97

§ 3. 半奥氏体沉淀硬化不锈钢	101
§ 4. 马氏体时效钢	103
§ 5. 超高强度钢生产和使用过程中的问题	103
思考题	107
第八章 冶炼及热加工对结构钢的质量影响及常见缺陷	109
§ 1. 结构钢的冶炼、热加工对质量的影响	109
1. 合金结构钢冶炼时的成份控制	109
2. 合金结构钢的锻轧	110
§ 2. 合金结构钢的缺陷	111
1. 钢中的白点	111
2. 层状断口与带状组织	113
§ 3. 合金结构钢生产中的检验标准	114
思考题	116

第三篇 弹簧钢及轴承钢

第九章 弹簧钢	117
§ 1. 弹簧钢的工作特点及性能要求	117
§ 2. 提高弹簧钢 σ_s 、 σ_s/σ_b 、 σ_{-1} 的途径	117
1. 合金化及热处理	117
2. 形变强化	118
3. 弹簧表面状态	120
4. 冶炼因素	121
§ 3. 常用弹簧钢的成份、性能及使用情况	121
§ 4. 我国普通弹簧钢新钢种研究情况	123
思考题	124
第十章 滚动轴承钢	126
§ 1. 滚动轴承钢工作条件及性能要求	126
§ 2. 滚动轴承钢的合金化及常用钢种	127
§ 3. 冶金因素对轴承钢性能的影响	130
1. 轴承钢的非金属夹杂物及冶炼特点	130
2. 锻轧对轴承钢组织及性能的影响	134
§ 4. 轴承钢的热处理	135
思考题	136
第 1~3 篇附录: 1. 钢的淬透性试验方法	136
2. 断裂韧性测试方法	141
3. 国外某些钢种的编号方法	143

第四篇 工具钢

第十一章 刀具钢	147
§ 1. 切削工具的工作条件和对刀具钢的性能要求	147
§ 2. 刀具钢的合金化和合金刀具钢	148
§ 3. 合金刀具钢的热加工与热处理	152
1. 刀具钢的锻造	152
2. 刀具钢的热处理	153
退火	153
淬火	155
回火	157
§ 4. 刀具钢的缺陷	158
1. 锻造缺陷	158
1. 退火缺陷	158
3. 淬火缺陷	159
4. 刀具钢的石墨化	159
思考题	160
第十二章 高速钢	161
§ 1. 高速钢的提出及钢种概况	161
§ 2. 高速钢的合金化	163
1. 炭	163
2. 钨、钼、钒	165
3. 铬	167
4. 钴	169
5. 其它元素 (S, Al, Si, Ti, N 等)	170
§ 3. 高速钢的铸造组织	170
§ 4. 碳化物不均匀性对高速钢性能的影响	173
1. 对机械性能及红硬性的影响	173
2. 对淬火工艺性能的影响	173
§ 5. 锻轧及其他改善碳化物不均匀性的途径	173
1. 冶炼浇注因素	173
2. 锻轧热加工	174
3. 粉末冶金高速钢	176
§ 6. 高速钢的热处理	176
1. 退火	176
2. 高速钢的成品热处理	177
(1) 淬火	177

(2) 回火	181
思考题	183
第十三章 模具鋼及量具鋼	185
§ 1. 冷作模具鋼	185
一、炭素工具鋼和低合金工具鋼	185
二、Cr12 型高合金模具鋼	187
三、受冲击載荷較大的冷作工具鋼 (高韌性鋼)	192
§ 2. 热作模具鋼	192
一、热鍛模鋼	194
二、热压及压鑄模具鋼	195
§ 3. 量具鋼	196
思考题	199

第五篇 不 锈 钢

第十四章 腐蚀原理及不銹鋼的合金化	201
§ 1. 概述	201
§ 2. 金属腐蚀与防腐蚀	201
1. 腐蚀介质及腐蚀类型	201
2. 电化学腐蚀	202
3. 金属防腐蚀的途径	204
§ 3. 不銹鋼的合金化	205
1. 金属的鈍化	205
2. 鋼中合金元素对耐蚀性能的影响	206
思考题	210
第十五章 鉻不銹鋼	211
§ 1. 马氏体不銹鋼	211
§ 2. 铁素体不銹鋼	216
思考题	218
第十六章 鎳鉻不銹鋼	220
§ 1. 鎳鉻奥氏体不銹鋼	220
1. 单相奥氏体的获得	220
2. 1Cr18Ni9 与晶间腐蚀	224
3. 低炭及超低炭奥氏体不銹鋼——0Cr18Ni9, 00Cr18Ni9	226
4. 鋼中加入强炭化物形成元素 ——1Cr18Ni9Ti, 1Cr18Ni11Nb	226
5. 鋼中加入 Mo, Cu, Si 等——1Cr18Ni12Mo2Ti, 00Cr17Ni13Mo2, Cr18Ni18Mo2Cu2Ti	227

6. 鎳鉻奧氏體不銹鋼的力學性能·····	229
§ 2. 鎳鉻奧氏體——鐵素體復相不銹鋼·····	231
思考題·····	233
第十七章 鉻錳氮及鉻錳鎳氮不銹鋼·····	235
§ 1. 不銹鋼節約用鎳問題·····	235
§ 2. 鉻錳氮不銹鋼·····	235
§ 3. 鉻錳鎳氮不銹鋼·····	237
思考題·····	238

第一篇 合金化基本规律

第一章 钢的分类及编号

迄今发展的钢种极多，为便于生产、使用及研究，必需对钢进行分类和编号。

§ 1. 钢的分类及冶炼方法对钢材质量影响

可根据钢种特点进行分类，各种分类方法适合在不同的场合应用。

1. 按用途：

1) 结构钢：包括(1)工程用钢——例如用作钢筋、钢梁(架)、钢轨、车辆、船舶等。这类钢多轧成型钢，如角钢、槽钢、工字钢、钢板等。(2)机械制造用钢——用作各种机器零件，包括调质钢、渗碳钢、弹簧钢、滚珠钢等。这类钢多锻、轧成各种断面的圆钢、方钢、扁钢、线材等。(3)高强钢——指屈服极限 $> \sim 140 \text{ kg/mm}^2$ 的钢，目前多用作高压容器及宇航工业(飞机、火箭等)中的结构材料。

2) 工具钢：包括刀具钢、模具钢、量具钢等。

3) 具有特殊物理——化学性能的钢：包括耐热钢、不锈钢及精密合金等。

4) 易削钢：包括各钢类的易削钢、如易削结构钢、易削工具钢、易削不锈钢等。

2. 按正火组织：包括珠光体类、贝氏体类、马氏体类、奥氏体类及铁素体类钢。

3. 按化学成份：

1) 碳钢：包括低碳钢($\leq 0.25\% \text{C}$)、中碳钢($0.25 \sim 0.60\% \text{C}$)及高碳钢($> 0.60\% \text{C}$)，三者炭量并无严格界限。

2) 合金钢：根据合金元素含量有低合金钢($< 3.5\%$)、中合金钢($3.5 \sim 10\%$)及高合金钢($> 10\%$)，三者也无明确界限。

4. 按杂质元素含量：

1) 普通钢：也即普通碳素钢，特点是含S、P较高， $S = 0.055 \sim 0.070\%$ 、 $P = 0.045 \sim 0.090\%$ 。上述S、P量波动范围依冶炼方法及钢号有所限制，碱性平炉钢偏下限，侧吹碱性转炉钢偏中限，侧吹酸性转炉钢偏上限，具体成份可查阅国标GB700—65。普通碳素钢按出厂技术条件又分：甲类钢——保证机械性能；乙类钢——保证化学成份；特类钢同时保证机械性能及化学成份。

2) 优质钢：包括碳素结构钢 $S > 0.045\%$ 、 $P > 0.040\%$ ；合金结构钢 S、P 均不大于 0.040% ；碳素工具钢 $S > 0.030\%$ 、 $P > 0.035\%$ 。各种钢中自原材料带入的其它杂质元素量(如Cu、Cr、Ni等)均有严格限制。上述S、P含量的限制仅属部颁标准规定，实际上各冶金厂还可根据生产实际情况在规定范围内调整S、P量。例如合金结

构钢出厂的 a_k 性能不符合要求时, 冶炼时进一步降低 P 量即为途径之一。

3) 高级优质钢: 合金结构钢 $S > 0.030\%$ 、 $P > 0.035\%$; 炭素工具钢 $S > 0.020\%$ 、 $P > 0.030\%$ 。其它杂质元素较优质钢限制更严。

4) 特级优质钢: 杂质元素量较前有特殊要求。

5. 按冶炼方法分类及冶炼浇注方法对钢材质量影响:

根据现在大量冶炼钢的炉子可将钢分为: 电(弧)炉钢; 转炉钢、平炉钢。

按所用炉衬材料每类钢又分为酸性及碱性二种, 从酸性平炉、碱性平炉及碱性电炉来说, 酸性平炉钢的非金属夹杂物少, 并且多数是含 SiO_2 较高的硅酸盐夹杂物, 它的高温塑性差、不易延伸, 故呈球形, 因此对钢材横向力学性能指标影响较小。而碱性平炉钢中有较多的可塑性夹杂物, 如 FeS 、 MnS 及 $FeO \cdot SiO_2$ 等, 热加工时沿加工方向延伸较剧烈, 故使钢材性能的各向异性较大, 纵向与横向的强度指标差别虽不明显, 但横向的塑性及韧性显著降低。与碱性平炉钢相比, 碱性电炉钢的夹杂物较少, 故钢材各向异性介于酸性及碱性平炉钢之间。酸性平炉钢除了钢材各向异性小以外, 所含气体也少(表 I-1), 由于含氢量低, 故白点敏感性小。酸性平炉钢虽有上述优越性, 但酸性平炉中不能去除 S、P, 要求原材料中 S、P 含量低, 因此酸性炉较少采用, 有些生产重要大锻件(如电机转子及汽轮机主轴)的重型机械厂或钢厂多采用酸性平炉和酸性电炉。需指出的是碱性电炉钢水进行真空处理后, 其氢含量也可达到酸性平炉钢水平。以下限于讨论生产中大量采用的碱性炉钢。

碱性电炉几乎能冶炼各种成份的钢, 成份能精确控制, 合金元素烧损少, 并可将 S、P 含量控制很低, 可降到 $0.01 \sim 0.015\%$ 以下, 气体及非金属夹杂物少。故目前绝大部分的合金钢, 尤其是高合金钢都由碱性电炉冶炼, 其不足是含气量较高(表 1-1), 白点敏感性较大。碱性平炉主要用于生产普通炭素钢、大部份优质炭素钢及部份低合金钢。侧吹转炉钢质量较差, 含氮、氧、磷及非金属夹杂物较多, 冷脆倾向及时效敏感性大(图 I-1), 焊接时也易产生裂缝, 但冶炼周期短, 成本低, 我国部分中小型钢厂中在尚无制氧设备配套的条件下, 仍以侧吹转炉生产为主, 它主要用于生产普通炭素钢。当钢材用于较大冲击负荷及低温条件时, 仍以采用平炉镇静钢为宜。

五十年代初期发展的纯氧顶吹转炉钢, 质量已可胜过平炉钢, S、P 量可 $< 0.04\%$ 。含氮及含氢量均低于平炉及电炉钢, 含氧量与平炉钢近似 ($0.04 \sim 0.06\%$), 非金属夹杂物也少。由于以上特点, 钢的冷脆倾向及时效敏感性小, 加之此种转炉的脱炭速度大, 而且低碳钢的吹炼终点也易于控制, 生产率高, 因之氧气顶吹转炉宜于生产低碳钢, (尤其适于

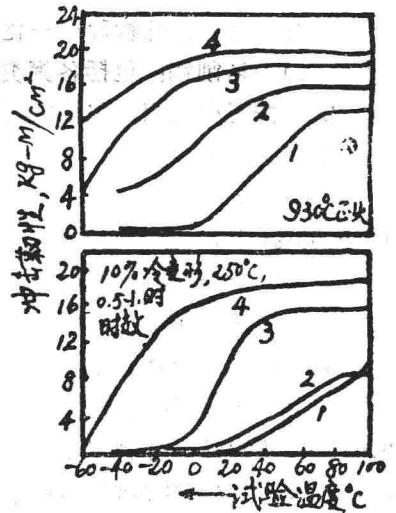


图 I-1 几种钢的 a_k-T °C 曲线 (曲线表示的成份见下表)

做深冲薄板，深冲后不易在表面出现滑移线)。同时也可以生产低合金结构硅钢及多种合金钢。由于氧气顶吹转炉生产的钢质量好，设备简单，投资少，生产率高，已逐渐取代平炉，我国新建大、中型钢铁企业中都采用了氧气顶吹转炉，目前世界钢产量的一半以上是此种转炉钢。

对应图 I—1 曲线的成份

对应图 I—1 曲线的钢		%C	%P	%S	%N ₂	%Al
1	侧吹碱性转炉钢	0.13	0.10	0.032	0.016	0.003
2	侧吹酸性转炉钢	0.13	0.066	0.037	0.013	0.003
3	平炉钢	0.13	0.016	0.019	0.004	0.008
4	以 Al 脱氧的平炉镇静钢	0.14	0.015	0.017	0.005	0.05

不同方法冶炼的钢中的含气量

表 I—1

冶炼方法	N, %	H ₂ , ml/100g
碱性平炉	0.002~0.006	5.0~8.5
酸性平炉	0.005~0.006	3.0~4.5
碱性电炉	0.005~0.010	4.5~8.5
纯氧顶吹转炉	0.002~0.004	3.0~6.0

电炉钢除电弧炉钢外尚有电渣炉钢、感应炉钢、真空感应炉钢、真空自耗炉钢及相应双联法炼制的钢，它主要是冶炼要求高的高合金钢、高温合金及精密合金等。

按钢的脱氧程度及浇注方法有沸腾钢、镇静钢及半镇静钢。沸腾钢钢锭缩孔小，切除量少，故成材率高。正常的沸腾钢锭表层是一紧密不含气泡的铁素体外壳层(~20mm)，故轧制后表面缺陷少。另一方面，由于沸腾钢的偏析严重，钢锭中心区域富集 S、P、C，钢中气体含量较多，故冲击韧性低，冷脆倾向及时效敏感性较大，焊接性能也较差，钢材不适于高冲击负荷及低温条件下工作，尤其当钢材厚度较大时，心部不良性能的影响更大。但因沸腾钢成品率高，价廉，故应在满足使用要求条件下尽量采用。

镇静钢钢锭端部有缩孔，切除量约占锭重的 15~20%，成本较高。但钢的偏析程度小，含气体少，质量较高。合金钢一般均为镇静钢。

半镇静钢的质量介于上述二者之间，成材率可达 90%，甚有发展前途。

§ 2. 钢的编号

我国编号中规定汉字和拉丁字母牌号并用，各符号规定见表 I—2，应用拉丁字母牌号时，元素以国际化学符号表示。现分述各类钢种编号方法并举例如下：

表 I—2

中文名称	采用汉字	采用符号	中文名称	采用汉字	采用符号
平炉	平	P	炭素工具钢	炭	T
酸性侧吹转炉	酸	S	滚珠轴承钢	滚	G
酸性侧吹转炉	碱	J	易切削钢	易	Y
顶吹转炉	顶	D	高级优质钢	高	A
沸腾钢	沸	F	船用钢	船	C
半镇静钢	半	b	桥樑钢	桥	q
甲类钢	甲	A	钢轨钢	轨	U
乙类钢	乙	B	锅炉钢	锅	g
特类钢	特	C	焊条用钢	焊	H
磁钢	磁	C	电器工业用硅钢	电	D

1. 普通炭素钢：

钢号 = 类别 (甲、乙、特或 A、B、C) + 炉种 (仅转炉钢需注明酸、碱、顶或 S、J、D) + 序号 (1、2、……) + 浇注方法 (仅沸腾钢及半镇静钢需注明沸、半或 F、b) + 有专门用途时需注明符号 (如桥或 q、船或 C)

例：甲 3 或 A3——即甲类 3 号碱性平炉镇静钢。

特碱 4 沸或 CJ4F——即特类 4 号侧吹碱性转炉沸腾钢。

甲 3 桥或 A3q——即桥樑工程用的甲类 3 号碱性平炉镇静钢。

2. 优质炭素结构钢：

钢号 = 平均含炭量 (以万分之几表示) + 浇注方法 (仅沸腾钢及半镇静钢需注明沸、半或 F、b) + 含 Mn 较高时需注明锰或 Mn (规定钢中 $<0.6\%C$ 时，Mn— $0.7\sim 1.0\%$ ； $0.65\sim 0.7\%C$ 时，Mn— $0.90\sim 1.20\%$) + 作专门用途时需注明符号

例：40——平均含炭量为 0.4% 的優質鎮靜鋼。

65 錳或 65 Mn——平均含炭量为 0.65%、含 0.9~1.20% Mn 優質鎮靜鋼。

20 鍋或 20g——制造鍋爐用的平均含炭量为 0.2% 優質鎮靜鋼。

3. 炭素工具鋼：

鋼号 = 炭或 T + 平均炭量(为便于与優質結構鋼区别以千分之几表示) + 含 Mn 较高时需注明(規定 Mn 量为 0.35~0.60%) + 高級優質鋼时需注明高或 A

例：炭 8 或 T8——平均炭量为 0.8% 的優質炭素工具鋼。

炭 8 錳高或 T8 MnA——平均炭量为 0.8% 的含 Mn 0.35~0.60% 的高級優質炭素工具鋼。

4. 合金鋼：

1) 合金結構鋼：鋼号 = 平均炭量(万分之几表示) + 元素名称及含量(百分之几表示) + 元素名称及含量 + …… + 高級優質鋼时需注明高或 A

鋼号表示方法中合金元素量为 1.50~2.49% 应写为 2, 2.50~3.49% 时应写为 3, 以此类推。当平均含量 <1.50% 时, 仅注明合金元素名称。

例：20Cr3MoWVA——平均炭量 0.2%、含~3%Cr、含 Mo、W、V 均 <1.50% 的高級優質鋼。

2) 合金工具鋼：平均炭量 $\geq 1.00\%$ 时, 炭量不予标明, <1.00% C 时, 用千分之几表示, 其它均与合金結構鋼同。如 5CrMnMo 含 0.50~0.60% C; Cr12MoV 含 1.40~1.70% C。

3) 不銹耐酸鋼、耐热鋼、高电阻合金、磁鋼等高合金鋼的含炭量不予标出, 其表示方法与合金結構鋼同。若合金元素量相同炭量不同时, 炭量可用千分之几表示, 并注在鋼号前面, 如 1Cr13、2Cr13 等。磁鋼需在鋼号前冠以符号, 如磁銘 5 或 CCr5。

为避免含銘滾珠鋼与低銘工具鋼混淆, 滾珠鋼在鋼号前冠以符号 G 或滾。銘含量用千分之几表示, 如滾銘 15 或 GCr15。低銘工具鋼的銘量也用千分之几表示, 但在含量前加“0”, 如銘 09 或 Cr09。

我国鋼号及其技术条件可参冶金部頒标准(72、71 及 64 年)。苏、美、日等国鋼号编号方法可参閱本教材附录 3。

思 考 題

1. 不同冶炼方法(转炉、平炉、电弧炉)、不同浇注方法(沸騰鋼、鎮靜鋼、半鎮靜鋼)对鋼的性能有何影响? 为什么有这些影响?
2. 何謂低炭鋼时效敏感性? 它对力学性能有何影响? 如何减少时效倾向?
3. 说明下列鋼号含意: 20CrMnMoVB, 3Cr2W8, 42SiMn, 08F, P74, J68?

第二章 合金强化的基本因素

研究材料的最终目的就是要使材料能满足不同用途下相应的性能，总括这些性能不外乎有四个方面：力学性能；化学性能（抗腐蚀、抗氧化等）；物理性能（电、磁、热）；工艺性能（冷热加工性能等）。这些性能实际上是材料内部成份及组织在一定外界（使用）条件下的反映。碳钢在一定条件下，其成份及组织不能满足所要求的性能时，可通过加入合金元素以改变其成份及组织。所以研究合金元素作用就是要围绕性能来了解合金成份、组织及性能的变化规律。（本篇中仅涉及常温力学性能。）

常温力学性能指标主要包括：强度（ σ_s 、 σ_b 、 σ_{-1} 等）；塑性（ ψ 、 δ ）；韧性（ a_k ）；硬度（ H_B 、 H_R 、 H_V ）等。而压入硬度（ H_B 、 H_R 、 H_V ）也是表征着材料的塑变抗力，它实质上是反映材料强度的一种指标。要求力学性能的各种材料中，强度指标是前提，而根据不同特定的用途，强度需要不同的其它性能指标相配合，例如在冲击载荷下工作，就要求有相应的 a_k 值，为使机械另件和工程结构在过负荷下不致突然破断，就要求有一定的塑性和韧性，为使材料有一定的冷变形工艺性能，就要求有一定的塑性等。

合金强化的途径有很多，下面讨论一下它的本质因素并以碳钢为例。

§ 1. 固溶强化

金属及合金的塑性变形主要以滑移方式进行、在这种变形机构下，几乎所有的可溶性元素（包括间隙式及置换式）都提高溶剂金属的强度（个别例外，如 Cd 溶于 Zn 后使 Zn 的强度下降），固溶体中含溶质元素量愈多，强度愈高（图 I—2）。固溶体过饱和程度愈大、强度也愈高。

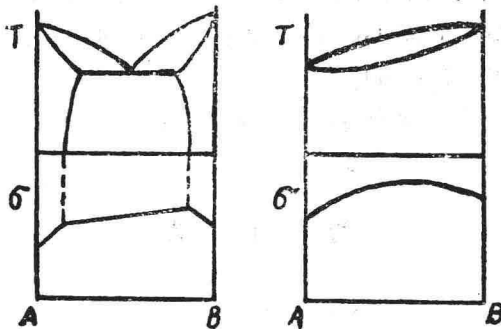


图 I—2

固溶强化的程度取决于溶质元素的本质。试验结果表明：溶质与溶剂的原子半径差 Δa （或溶质加入溶剂后所引起的晶格常数变化 Δa ）及电子浓度差 ΔV （或原子价

差)是强化的主要因素, Δa 影响点阵畸变, ΔV 影响原子间的键合作用。一般若 Δa 及 ΔV 愈大则强化程度愈大。通常由于 Δa 及 ΔV 愈大, 溶介度也愈小。

例如铁素体是 C 溶于 Fe_α 的间隙式固溶体, 在室温下溶介 $C < 0.0001\%$, $H_B \doteq 100$, $\sigma_s \doteq 20kg/mm^2$, $\sigma_b \doteq 35kg/mm^2$ 。马氏体 (M) 是 C 在 $\alpha-Fe$ 中的过饱和固溶体, 过饱和程度愈大, 也即溶有 C 愈多, 硬度愈高 (图 I-3)。含 0.4%C 的 M 硬度达 $H_B \doteq 600$ 。M 的高硬度主要由碳过饱和和固溶造成, 也包含了 M 在室温以上形成后在冷却过程中 C 原子于位错周围析聚和析出碳化物的第二相强化、以及因相变导致的形变强化。

组成固溶体的合金的加工硬化能力, 也随溶质浓度的增加而增加 (图 I-4)。

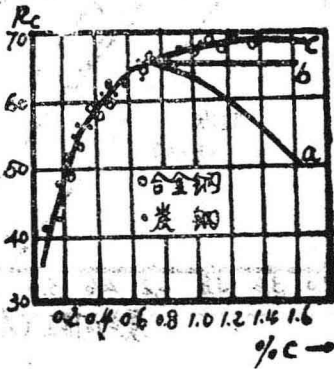


图 I-3 炭对淬火钢硬度的影响

a—— $>A_{Cem}$ 淬火 b——过共析钢 $<A_{Cem}$
亚共析钢 $>A_{C1}$ 淬火 c——马氏体硬度

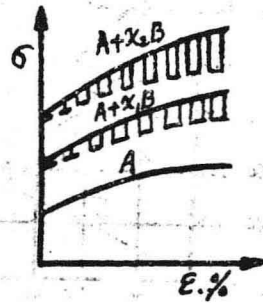


图 I-4 固溶元素对加工强化的影响

A——溶剂 B——溶质
 $X_2 > X_1$

§ 2. 第二相强化

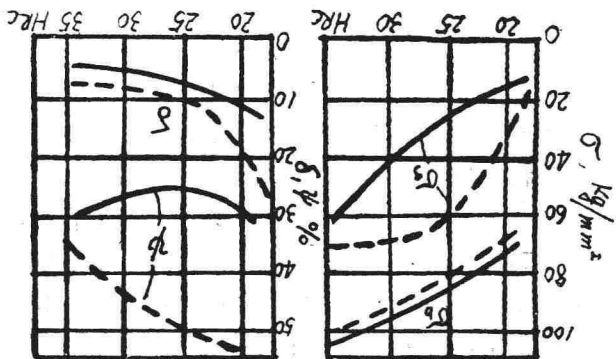
实际使用的合金多数是在固溶体基体上分布有较基体为硬的第二相质点, 质点周围形成了应力场或点阵畸变, 阻碍了滑移, 因而提高了强度, 降低了塑性和韧性。强化效果主要决定于第二相的数量、大小、分布及形状。一般若第二相数量愈多, 质点愈小 (即愈弥散), 强化效果愈大。在第二相数量、大小相近时, 片状质点较粒状质点具有较高的强度 (前者相界面较多); 当强度极限 σ_b 相近时, 呈粒状质点的 σ_s 、 ψ 高于片状质点者。基体上分布有第二相的组织一般是通过过饱和固溶体分解或共析分解得到, 也可通过外加质点得到 (如粉末冶金)。从炭钢中可看到:

1. 炭化物数量: 例如正火及调质的钢, 随炭量增高, 由于炭化物质点数量增多, 强度增高, 塑性及韧性降低。

2. 炭化物弥散度——质点大小:

例如当钢中炭量相同, 在淬火后经不同温度回火 (或奥氏体等温分解时), 随温度

图 I—7 0.84% C 碳钢片状及粒状组织力学性能对比 (——片状组织,粒状组织)



3. 炭化物形状:
 鋼中炭化物质点的数量及大小相近时, 片状组织的强度较粒状组织为高 (图 I—7)。片状珠光体硬度 $H_B \approx 190 \sim 230$, 粒状珠光体 $H_B \approx 160 \sim 190$ 。当二者硬度相等

性能的关系

图 I—5 40# 钢回火温度与机械

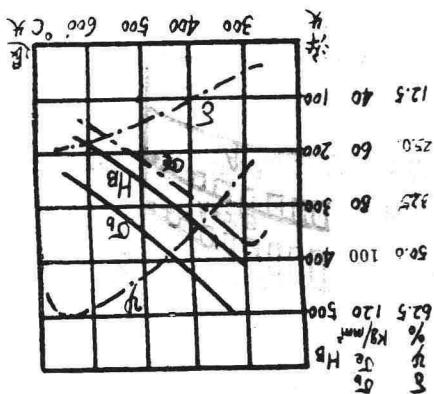
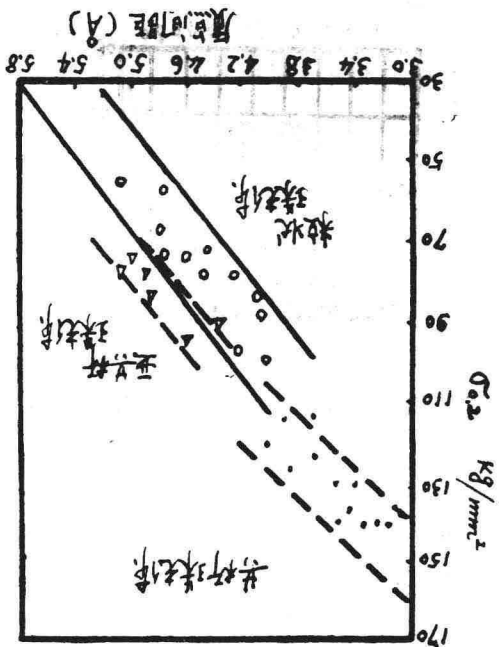


图 I—6 炭化物质点平均间距与 $\sigma_{0.2}$ 的关系



(图 I—5, 6)。
 降低, 则炭化物点愈小、数量愈多, 即弥散度愈大, 硬度及强度增加, 塑性及韧性降低

时, σ_b 及 δ 近似相同, 但粒状组织的 σ_s 及 ψ 较片状组织为高, 这就是调质工艺优于正火的主要点。

§ 3. 结构因素——晶粒度及亚结构

1. 晶粒度:

晶粒尺寸对以铁素体为基体的工程用钢来说, 是指铁素体晶粒, 对淬火回火钢是指马氏体的尺寸, 也即淬火前的奥氏体尺寸。

晶粒小, 晶界就多, 不同位向的晶粒数目也多, 这对滑移有阻碍, 同时也易使应力分布均匀, 因之能明显改善塑性和韧性, 对强度也略有好处。例如以碳化物强化的中碳钢, 试验中得到下述结果:

	热 处 理 工 艺	σ_b kg/mm ²	σ_s kg/mm ²	δ %	ψ %	a_k kg-M/cm ²
45号钢	1280°C加热, 予冷 870°C30分, 水淬, 400°C回火1.5小时	117/127	104/114	4.3/7.0	27/30	4.25/4.7
	850°C加热30分, 水 淬, 400°C回火1.5小时	126/130	115/117	8.7/11.7	44/52	7.5/8.0

根据实验结果, 屈服强度与晶粒直径的关系为: $\sigma_s = \sigma_{s0} + kd^{-\frac{1}{2}}$, 其中 σ_{s0} 表示单晶时的 σ_s 值, k 为常数, d 为晶粒直径。上例中晶粒大小对 σ_s 值影响不甚显著是因为 σ_{s0} 值较大。(第二相弥散硬化的合金通常如此。) 对于单相合金来说控制晶粒大小是改善 σ_s 的重要途径。在工程用钢中, 人们利用 NbC, VC, AlN 等弥散质点阻止铁素体晶粒长大, 使铁素体晶粒达到 10~11 级, 从而提高钢的屈服强度的方法已在生产中应用。

体心立方晶系的金属和合金, 随温度降低, a_k 值到某一温度区有突然下降的现象, 这种现象称为冷脆性, 在面心立方系合金中无此现象。晶粒细小, 则脆性转变温度低。一般认为这与合金中存在的 P, O, N 等杂质有关, 因为在体心立方晶型中, 这些杂质的溶解度有限, 随温度下降, 会在晶界析出这些杂质的脆性化合物, 由此导致了 a_k 值下降, 出现冷脆。晶粒细, 晶界多, 要更多的析出物才能把晶粒隔开, 因之冷脆温度下降。如图 I-8 所示。利用细化晶粒的方法、在提高塑性、韧性、强度的同时, 进一步改善

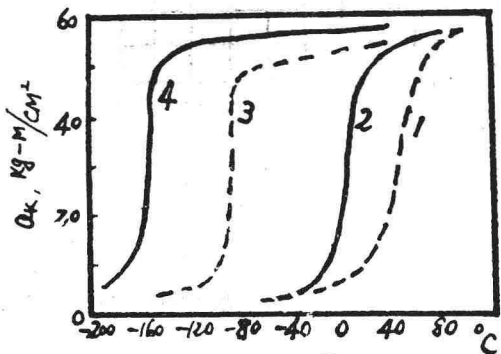


图 I-8 晶粒度对中碳钢冷脆倾向的影响
1,2——冲击弯曲, 3,4——冲击拉伸,
1,3——粗晶粒钢, 2,4——细晶粒钢。

低温韧性，这是细化晶粒方法的突出优点。

2. 亚结构：实际金属每个晶粒内原子排列的位向也非完全一致，往往有许多位向不同的小区域（大于约 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ cm，位向差一般小于 1° ）。这些小区域称亚结构（或嵌镶块或亚晶粒），亚结构尺寸愈小，亚晶界愈多，强度越高（ σ_s 较 σ_b 提高更显著），而塑性及韧性则降低。

金属和合金在形变后发生强化现象，是因为晶体点阵畸变，这现象也可看成是亚结构细化了，图 I-9 是 0.3% C 碳钢冷轧变形对力学性能的影响。图 I-10 表示不同炭量碳钢的冷拔形变强化效果，由此可看到，形变强化是一种很重要的强化手段，尤其是单相合金。

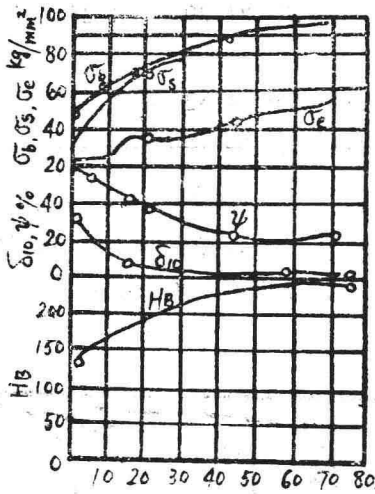


图 I-9 0.3% C 钢冷轧后形变与力学性能的关系

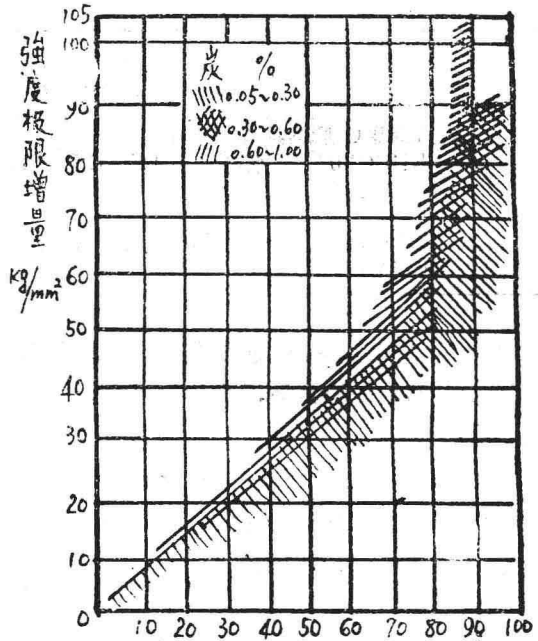


图 I-10 不同炭量的碳钢形变度与强度极限的关系

在相变的过程中，例如马氏体转变或时效时第二相析出过程中，也会使周围基体发生塑性变形，导致亚结构细化而发生强化现象。

思考题

1. 强度指标 σ_s , σ_b , σ_{-1} 代表的意义是什么？硬度和强度有什么关系？
2. 试举例子说明为什么对一个工程结构材料要有强度和塑性，韧性的综合指标？