

第一章 化工容器用碳钢及普通 低合金钢

大型氮肥厂从原料到成品，需要经过很多工序。以油田气为原料的工厂为例。为了最后生产出尿素，中间先要将油田气脱硫净制、转化、变换、脱碳、甲烷化、氨的合成，然后再将合成氨和二氧化碳送到尿素车间进行尿素合成。在尿素合成中还要在尿素熔融物中回收未反应的氨和二氧化碳，尿素溶液再经蒸发、结晶与造粒工序，最后得到颗粒状的尿素成品。

为了适应上述生产过程的各种需要，整个大型氮肥厂所需要的各种化工机械有很多，这通常是指两大类即化工用机器和化工设备。化工机器一般都有一个传动系统，在大型氮肥厂中如离心压缩机、蒸汽透平、各种泵类等。化工设备主要是指静置的如容器、塔、热交换器、反应器等。据统计，在一个大型氮肥厂中所有机器和设备中静置的化工设备约占总数的 60~70%，化工机器约占 30% 左右。

由此可见，一个大型氮肥厂中各种容器、塔、反应器、热交换器等设备都是常用的基本设备，它们绝大多数是由各种钢材制成的。根据要求不同 分别用碳钢、普通低合金钢（简称普低钢）和不锈钢制成。为了节省贵重的不锈钢，在设备中尽量采用碳钢和普通低合金钢，就是在非用不锈钢不可的地方，也尽量利用衬里、复合钢板的办法，发挥碳钢、普低钢强度高、刚性好的优点，同时也节约贵重的不锈钢材

料。因此，在大型氮肥厂的常用基本设备中，大多数化工设备是由碳钢和普低钢制造的，尤其是各种受压容器和塔的外壳（见表 1-1，1-2）。为了适应大型氮肥厂的要求，有的设备高达 50 米以上，重量达 300~400 吨左右，为了解决设备在运输和吊装中的困难，就要求钢材提高强度，因此近十年来在设计中愈来愈多的选用高强度的普通低合金钢。这里，我们主要分析各种化工容器和塔类外壳选用的碳钢、普低钢以及影响碳钢、普低钢性能的各种因素。

表 1-1 我国自行设计大型合成氨厂
部分设备使用碳钢和普低钢情况

设备名称	部位	选用材料牌号	钢种
钴钼加氢转化炉	筒体、封头	外壳 18 MnMo Nb, 内衬 18-8 不锈钢	50公斤级普低钢
	裙座	A3F	普通碳素钢（沸腾钢）
二段转化炉	筒体、上下锥体	16 MnR	35公斤级普低钢
	筒、水夹套	A3F	普通碳素钢（沸腾钢）
低变炉	筒体、封头	16 MnR	
甲烷化炉	筒体、封头	18 MnMoNb	
贫液锅炉给水换热器	筒体、封头	A3	
CO ₂ 吸收塔	外壳	16 MnR	
	液体出口管法兰	20	
氨合成塔	大筒体、上下封头	15 MnV	40公斤级普低钢

表 1-2 国外设计大型合成氨厂部分
设备使用碳钢及普低钢情况

设 备 名 称	部 位	选用材料牌号 ASTM	钢 种
低变炉	筒体、封头	A 516-70	30公斤级普低钢
	裙座	A 285-C	碳钢
甲烷化炉 CO ₂ 吸收塔	筒体、封头	A 240-B	C- $\frac{1}{2}$ Mo 钢
	壳体、封头	A 516-70	30公斤级普低钢
	裙座	A 283-C	碳钢
二段转化炉	壳体、锥体	A 516-70	
	水夹套	A 283-C	
氨合成塔	大筒体	K-Ten62M	
	上下封头	A 516-70	

(一) 压力容器用碳钢

碳钢是较便宜的结构材料。在大型氮肥厂中使用很广泛，这不仅是由于碳钢的良好性能，能满足工程上很多场合的需要，而且是因大量生产、供应方便。

碳钢是含碳量小于 2.0% 的铁碳合金。碳是碳钢中影响钢材性能的重要元素。除碳以外，还含有少量的锰、硅、硫、磷、氧、氢、氮等元素。这些元素往往并非为了改善钢材质量而有意加入的，而是在原矿石中就含有或在冶炼过程中进入钢中的，所以称为杂质元素。当然，它们对钢的性能是有一定影响的。因此，为了控制钢材的质量，必须对这些杂质元素的影响，也要有一定的了解。

一、化学成分对钢性能的影响

1. 碳的影响

无碳纯铁在常温下是体心立方晶格的所谓 α -Fe，在 α -Fe 中能溶解的碳量很少，在 723°C 时为最多也仅为 0.02% C，在 α -Fe 中溶解少量碳的固溶体就是铁素体，铁素体的显微组织如图 1-1 所示。铁素体固溶碳甚少，其机械性能与纯铁差不多大致如表 1-3。

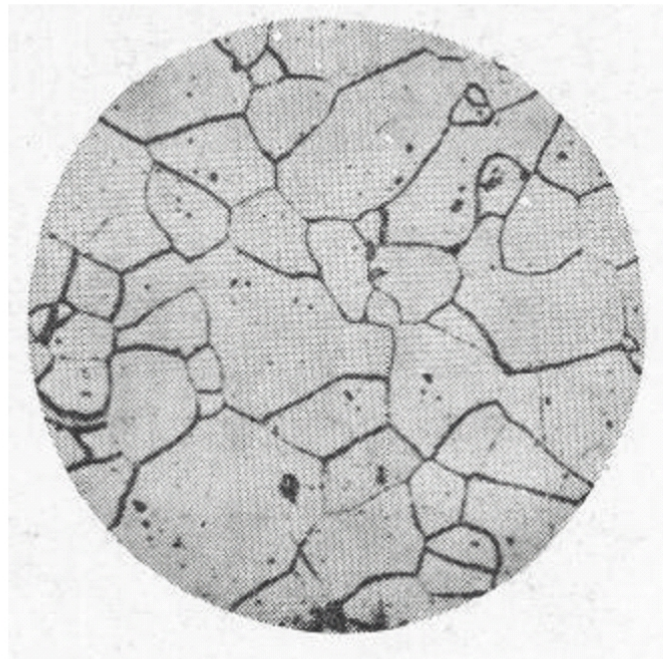


图 1-1 铁素体的显微组织

表1-3 铁素体的机械性能

σ_s 公斤/毫米 ²	σ_b 公斤/毫米 ²	δ %	ψ %	α_k 公斤·米/厘米 ²	HB
25	12	50	85	30	80

由此可见，无碳的或含碳极低的铁素体的强度，硬度很低，但塑性和韧性都很好。

钢中含碳量增加如 08 及 10 钢，其金相组织如图 1-2 所示，图中可以看出：组织中除了有铁素体组织外，还有少量的珠光体组织^①。含碳量再增加如 20 及 30 钢，其金相组织如图 1-3 及 1-4 所示。图中可以看出，随着含碳量的增加，钢中珠光体的量也增加。随之钢的强度、硬度增加，塑性和韧性下降。退火钢碳含量对机械性能的影响见图 1-5 所示。

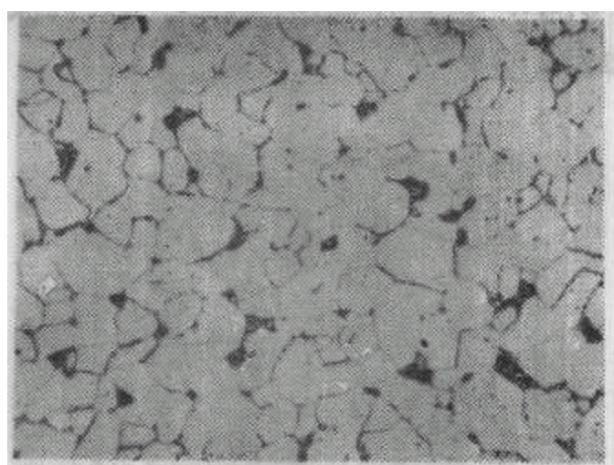


图 1-2 10 钢的显微组织

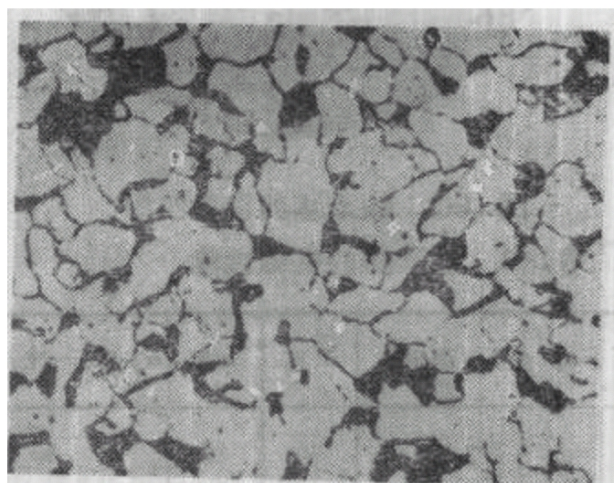


图 1-3 20 钢的显微组织

^① 铁素体片和渗碳体片交替排列的层状显微组织，是过冷奥氏体进行共析反应的直接产物。

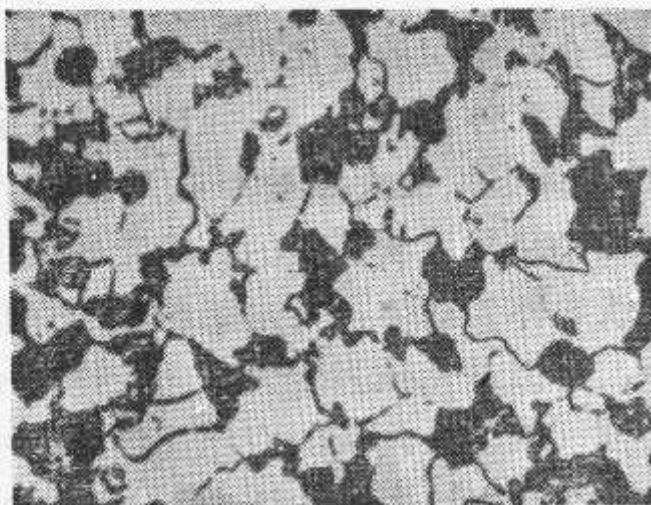


图 1-4 30 钢的显微组织

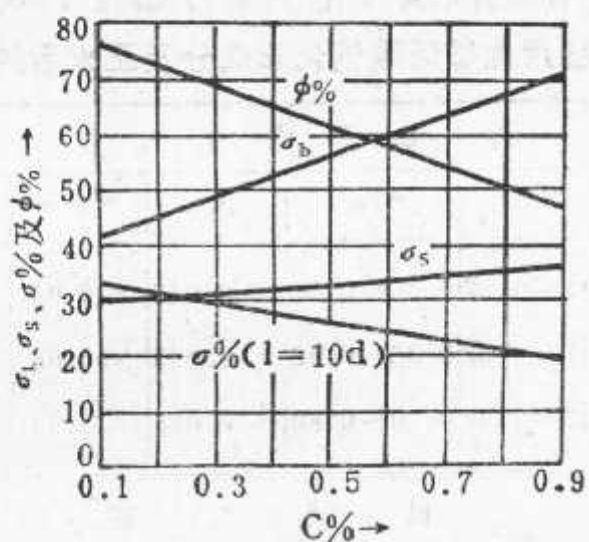


图 1-5 钢中含碳量与机械性能的关系

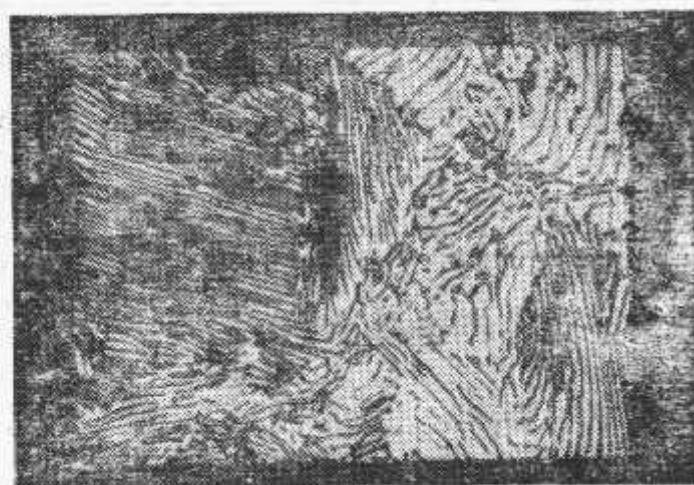


图 1-6 珠光体的显微组织

从退火钢中金相组织的变化可以看出, 钢中强化组织是珠光体, 组织中珠光体愈多, 钢的强度、硬度愈高, 塑性和韧性愈低。将珠光体组织放大如图 1-6 所示, 珠光体是由铁素体和渗碳体^① 二相呈片层状组成的。珠光体组织由于是以塑性好且量多的铁素体为基体, 其中硬而脆的片状渗碳体呈规则的相间其中, 所以珠光体强度大, 而脆性却不高。在工程上使用的低碳钢, 钢中含碳量的变化使钢的机械性能也随之变化, 都是通过金相组织中珠光体量的变化来实现的。工程用优质低碳钢的机械性能与化学成分如表 1-4。

表 1-4 工程用优质低碳钢化学成分及正火后的机械性能

钢 号	化 学 成 分 %						
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni
15	0.12~0.18	0.17~0.37	0.35~0.65	≤0.045	≤0.04	≤0.25	≤0.25
20	0.17~0.24	0.17~0.37	0.35~0.65	≤0.045	≤0.04	≤0.25	≤0.25
25	0.22~0.29	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.045	≤0.04	≤0.25	≤0.23

钢 号	机 械 性 能				
	σ_b 公斤/毫米 ²	σ_s 公斤/毫米 ²	δ_5 %	ψ %	HB
15	≥38	≥23	≥28	≥55	≤143
20	≥42	≥25	≥25	≥50	≤156
25	≥46	≥28	≥24	≥50	≤170

2. 杂质元素对碳钢性能的影响

(1) 锰(Mn)的影响: 锰的含量在 0.8% 以下时, 一般

^① 钢中的碳化铁(Fe_3C)相, 其中的 Fe 原子有时部分的为锰、铬等碳化物形成元素的原子所代替。

认为是常存的杂质元素，在 0.8% 以上就可以认为是合金元素。锰是在炼钢过程中引入钢中的，它可以起到脱氧作用和减轻硫的有害影响，所以认为是一个有益元素。当含锰量较高时，锰能溶入于铁素体内，对铁素体有一定的强化作用。

(2) 硅(Si)的影响：硅的含量少于 0.5% 认为是常存的杂质。硅也是在炼钢过程中由于脱氧而引入钢中的。硅或者溶于铁素体而强化铁素体、或者以脱氧生成物二氧化硅(SiO_2)的形式残存于钢内。

(3) 硫(S)的影响：硫以硫化铁(FeS)的形态存在于钢中。硫化铁(FeS)与铁(Fe)能形成低熔点的共晶体(熔点为 985°C)，它低于钢材的热加工开始温度($1150\sim 1250^\circ\text{C}$)。在热加工时，由于分布在晶界上的共晶体已经熔化，而导致加工时开裂，这种现象称为“热脆性”。含硫量愈高这种“热脆性”就愈严重。所以容器用钢中含硫量控制在 0.045% 以下。炼钢中加锰，就有消除“热脆性”的作用，这是由于锰能和硫形成硫化锰： $\text{FeS} + \text{Mn} \longrightarrow \text{MnS} + \text{Fe}$ 硫化锰(MnS)熔点很高，在热加工时不会熔化，故锰能消除钢的“热脆性”。

钢中留下的硫化锰(MnS)，在热加工过程中，能沿着轧钢方向伸长，形成所谓纤维组织。这种纤维组织将影响钢材机械性能的方向性，就是在平行于纤维组织方向截取的试样和垂直于纤维组织方向的试样相比较，将表现出不同的机械性能。纤维组织还将影响钢材轧制后的金相组织。一般组织中铁素体易沿着纤维方向分布，形成所谓带状组织如图 1-7 所示。出现带状组织后，将更严重的影响机械性能的方向性。

(4) 磷(P)的影响：磷是由矿石带到钢中来的。磷在钢中能全部溶于铁素体内，而使铁素体在室温下的强度提高，

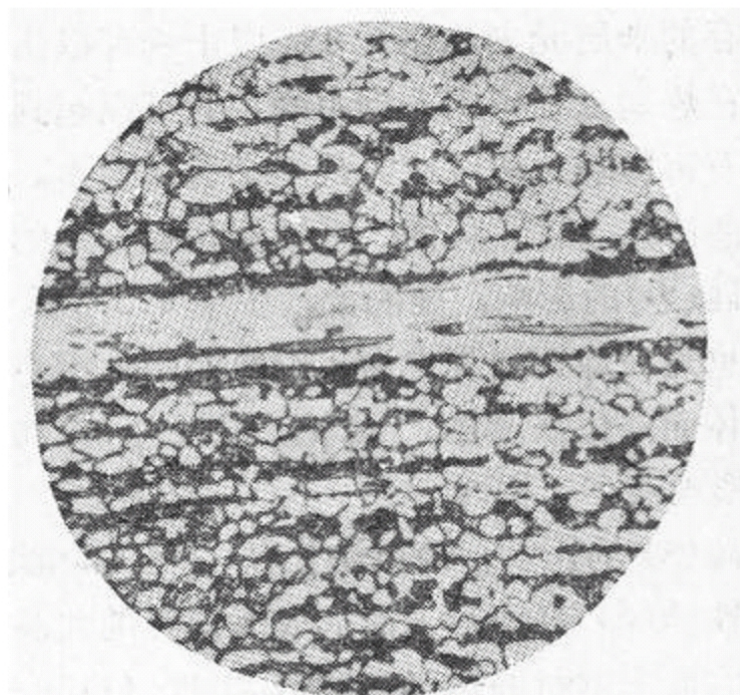


图 1-7 低碳钢的带状组织

而塑性和韧性下降，即产生所谓“冷脆性”。使钢的冷加工性能及焊接性变坏。当钢中的含碳量愈高时，这种脆化作用就愈大。因此容器用钢中磷含量控制比较严格，一般小于 0.04%。

(5) 氧(O)的影响：炼钢以后，氧在钢中常以 MnO 、 SiO_2 、 FeO 、 Al_2O_3 等夹杂物的形式存在，这些夹杂物的存在破坏了钢基体的连续性，从而剧烈的降低了钢的机械性能，如冲击韧性、疲劳强度等。因此，为了保证钢的机械性能必须严格控制这些夹杂物的数量、形状大小与分布。

(6) 氮(N)的影响：铁素体中溶氮的能力很低。当钢中溶入过量的氮，在 $200\sim 250^{\circ}C$ 加热时，会发生氮化物的析出，使钢的硬度，强度上升，塑性下降，这就是所谓的时效现象。

钢液中加铝、钛进行固定氮处理，使氮固定在氮化铝(AlN)及氮化钛(TiN)中，就可以消除钢的时效倾向。

(7) 氢(H)的影响: 钢在液态下不仅吸收氮, 还吸收相当量的氢, 氢在液态钢及固态钢中的溶解量相差悬殊, 而且钢在奥氏体^①状态和铁素体状态下溶氢量也不同。当钢在冷却过程中发生相变时, 其溶解度突然变化, 如果冷却速度缓慢, 或者钢在转变温度下作长期保温, 则氢将逐渐扩散至金属外而逸去, 如果冷速较大, 则氢原子来不及扩散至金属外部, 而聚集在晶体缺陷及晶界处形成分子氢 ($2\text{H} \rightarrow \text{H}_2$), 产生很大的内应力, 使钢材出现裂纹, 此即所谓产生了“白点”。所以对大截面钢件特别是合金钢件, 锻造后必须缓冷, 以便使氢原子从容的排出钢外。

二、镇静钢和沸腾钢

受压容器用钢一般都要求是含硫、磷等杂质较少的镇静钢, 一般不用沸腾钢。那末镇静钢与沸腾钢对钢的性能有什么影响呢?

钢液在熔炼末期, 需要脱氧, 如果钢液仅用弱脱氧剂如锰(Mn)脱氧, 那末钢液中保留相当数量的氧化铁(FeO), 在浇注与凝固时, 由于钢锭模壁上涂的碳粉与氧化铁(FeO)发生反应, 钢液中不断产生和析出一氧化碳(CO)气体, 因此出现了沸腾现象, 故称这种钢为沸腾钢。这种钢成材率高, 成本较低。但锭内分布有许多小气泡, 钢中含气体较多, 虽然这些小气泡在热加工时可以焊合, 但时效倾向较重, 时效后冲击值低, 同时钢中偏析也较严重, 也会影响钢的性能。

镇静钢是钢液在浇注前经过完全脱氧, 钢锭中凝固时不沸腾, 故称镇静钢, 这种钢因为缩孔集中, 轧钢时必须将集

① 铁和其他元素形成的面心立方结构的固溶体, 一般指碳和其他元素在 $\gamma\text{-Fe}$ 中的间隙固溶体。

中缩孔割去，故成材率较低，成本高。但是钢中含气体少，时效倾向低，质量较高。半镇静钢则介于两者之间。

完全脱氧的镇静钢一般都是用硅(Si)和铝(Al)作为脱氧剂的。由于铝(Al)与钢中的氧(O)有比较强烈的亲和力，所以是一个强脱氧剂。目前国内外为了防止焊接结构和受压容器在使用过程中发生的脆性断裂，引起了对焊接结构和受压容器用钢缺口韧性和冷脆转变温度的注意。同时也考虑到钢板要经过冷加工变形，或在 $200\sim 250^{\circ}\text{C}$ 温度下使用，这种情况也会引起应变时效脆裂。这些因素都促使设计人员选用完全脱氧的镇静钢。

用铝脱氧的钢，是由于在钢中形成三氧化二铝(Al_2O_3)及氮化铝(AlN)，这些化合物在钢中呈弥散状分布，可以细化钢的晶粒，这种钢也叫细晶粒钢。晶粒细化以后，将大大提高钢的强度和韧性，还可以降低钢的冷脆转变温度。同时由于铝能固定钢中的氮而形成氮化铝(AlN)，这也将大大降低钢的时效倾向，避免应变时效脆裂的发生。

三、碳钢的低温脆性倾向

由于在第二次世界大战前后，发生了一些焊接桥梁在严寒的冬天突然断裂事故，以及焊接海船大批发生脆性断裂，引起了人们对焊接结构和受压容器用钢脆性断裂问题进行了大量的研究。并且对船舶、桥梁、压力容器等大型结构，为了防止产生脆性断裂事故，人们从设计、焊接、材料各方面都进行了仔细的分析。一般认为，发生脆性断裂的原因往往不是钢材强度或塑性不足，而常常是由于钢材冲击韧性不良，不能抵抗缺口应力集中所造成的。

钢材的冲击韧性，一般是用带有缺口的试样进行冲击试

验，试样单位截面积所吸收的能量大小作为比较冲击韧性好坏的尺度。钢材的冲击韧性值的大小，均随试验温度的降低而减小，这也就是钢材的低温脆性。就是这个钢材的低温脆性往往是焊接结构与压力容器发生脆性破坏的重要原因。

当温度低于某一临界值时，钢材的冲击韧性显著降低。这个使冲击韧性急剧降低的温度范围，就是钢材的冷脆临界温度 T_k 如图 1-8 所示。钢材的冷脆临界温度愈低，表明钢材的韧性愈好。反之， T_k 数值愈大，则表明钢材抵抗脆断能力愈差。

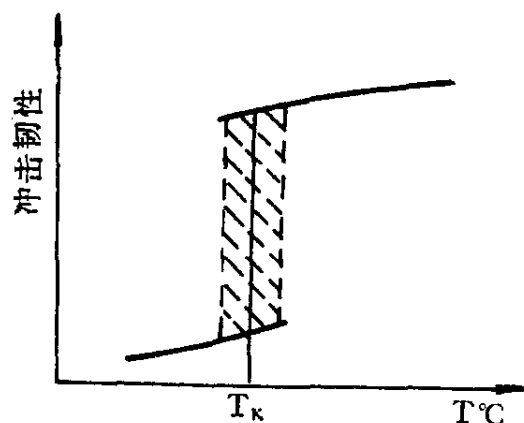


图 1-8 钢材的冷脆临界温度

当钢材的工作温度低于冷脆临界温度时，在承受冲击载荷或在缺口处应力集中情况下，钢材就会发生突然断裂，其断裂时都是没有塑性变形或变形很小，这就是所谓钢材的脆性断裂。由于脆性断裂的传播速度极快，并且没有前期效应，破坏都是突然发生的，所以危险性极大。

因此，对作为焊接结构和压力容器的钢材就要求有良好的低温冲击韧性，一般要求常温时冲击韧性不低于 5~6 公斤-米/厘米²。而在低温时（-40°C）要求为 3.5 公斤-米/厘米²（梅氏试样）和 2.6 公斤-米/厘米²（却贝 V 型试样）。

几种典型钢种对低温冷脆的敏感性如图 1-9 所示。由图可见，不同成分的钢材在低温时的冲击韧性差别很大，其中以普低钢为最好，沸腾钢最差。同样成分的普低钢，经过正火处理后，韧性可以大为增加。

在碳钢中影响钢材的低温冲击韧性的最重要因素是钢中的含碳量，含碳量增加，将大大降低冲击韧性值和提高冷脆的临界温度。如图 1-10 所示。因此，为了保证钢材冲击韧性，防止脆性断裂，焊接结构和压力容器均选用低碳钢。

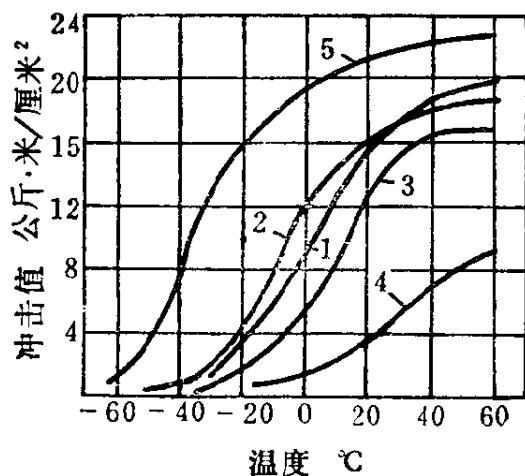


图 1-9 几种典型钢对低温冷脆的敏感性

1—普低钢(C 0.15%、Mn 0.95%、Si 0.22%、Ti 0.01%、V 0.02%); 2—镇静钢 (C 0.18%、Mn 0.54%、Si 0.25%); 3—半镇静钢(C 0.15%、Mn 0.73%、Si 0.04%); 4—沸腾钢(C 0.19%、Mn 0.54%、Si 0.01%); 5—正火普低钢

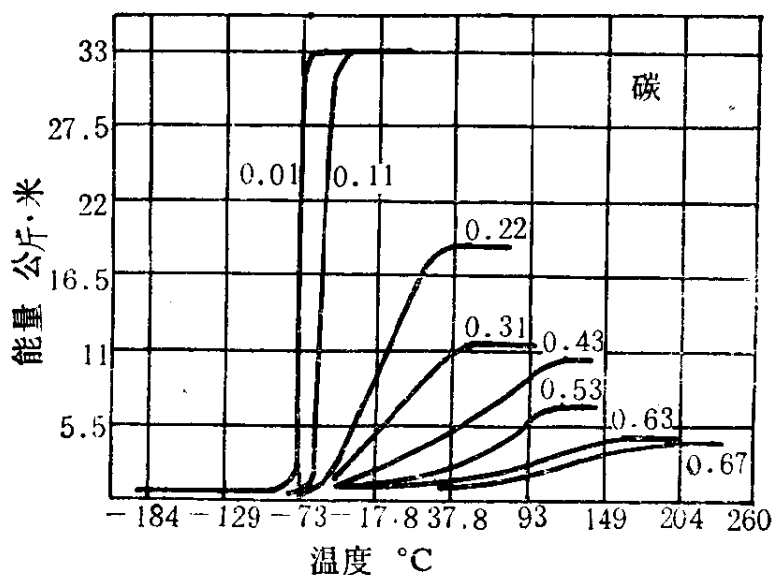


图 1-10 碳对低温冷脆敏感性的影响

含铝、钛、钒等元素的钢材或用这些元素脱氧的钢，均是细晶粒钢，对提高钢材的冲击韧性及降低冷脆临界温度均有良好的作用。

合金元素中锰、镍对降低冷脆临界温度有好的作用，而硅、钼却有不良的效果。

奥氏体钢或具有面心立方晶格的有色金属均有良好的低温冲击韧性。

四、压力容器用碳钢的典型钢种

大型氮肥厂中，压力容器及各种塔的壳体选用了很多碳钢作为结构材料，典型的钢种如表 1-5 所示。

从表中可以看出，制造容器和塔体的钢材含碳量均在 0.1~0.3% 之间，抗拉强度是在 34~50 公斤/毫米²，屈服限是在 21~30 公斤/毫米²之间。

A3 及 A3F 是普通碳素结构钢，这类钢是按机械性能供应的，是最便宜的碳钢，焊接性能好，一般用于低压贮槽，容器，热交换器的壳体，各种塔体的裙部等。

优质碳素结构钢中，最常选用的是 20 钢，国内设计大型合成氨设备中的各种容器，管件，法兰等，除了选用普低钢外，大量选用 20 钢。20 钢含碳量较低，钢材具有较高的塑性，焊接性能良好，低温冷脆倾向小，缺口韧性较高，钢中又具有一定量的硅，锰元素，所以还保持较高的强度级别，是碳钢中使用最多的钢种。

在国外，如美国在容器制造中，使用碳钢的强度级别与我国相差不多，但化学成分有较大差别，在国外设计中常用的碳钢有 A 515 的全部，A 516 的 55 级和 60 级，其含碳量均较高，如 A 515-70 级含碳量为 0.31~0.35%，A 516-60

表 1-5 容器及塔的壳体选用的碳钢

钢 种	化 学 成 分 %				使 用 状 态	机 械 性 能				相应美国标准 (ASTM)
	C	Mn	Si	P		σ_b 公斤/毫米 ²	σ_s 公斤/毫米 ²	δ %	ψ %	
A 3					热轧	38	24	25		A 36
A 3 F ①					热轧	38	24	25		
10	0.07~0.14	0.35~0.65	0.17~0.37	≤ 0.035	≤ 0.045 正火	34	21	31	55	A 515 Gr 55 A 516 Gr 55 A 285 Gr C
15	0.12~0.18	0.35~0.65	0.17~0.37	≤ 0.04	≤ 0.045 正火	38	23	28	55	A 515 Gr 60 A 516 Gr 60
20	0.17~0.24	0.35~0.65	0.17~0.37	≤ 0.04	≤ 0.045 正火	42	25	25	50	A 515 Gr 65
25	0.22~0.29	0.50~0.80	0.17~0.37	≤ 0.04	≤ 0.045 正火	46	28	24	50	A 515 Gr 70

① F—表示沸腾钢。

级为 0.21~0.27 % C，均较我国相应强度级别的钢要高，A285-C 级含碳也为 0.28%，提高含碳量主要是为了保证强度，但是对钢的焊接性能和缺口韧性，低温冷脆倾向等均是不利的。

压力容器用钢国内对冶炼方法有严格的限制，一般容器用碳钢均要求为含硫、磷杂质少的，塑性好，焊接性好，具有较好的抗冷脆性能，时效倾向小的镇静钢。西欧一些国家如西德、法国等也规定容器用钢必须是镇静钢，但对负荷轻的容器中也容许用半镇静钢。美国对碳钢脱氧并无规定，如 A 285-C 级钢可以是沸腾钢，半镇静钢或镇静钢。实际供应的往往是半镇静钢。

(二) 压力容器用普通低合金钢

普通低合金钢（普低钢）是在碳素钢的基础上加入少量的合金元素而制成的，是近年来大力发展起来的新钢种，代替碳素钢制造压力容器，各种塔体的外壳以及其他钢铁结构。尤其对高压容器，使用普低钢以后与原来相比设备的壁厚可以减薄，容器的重量可以减轻，节约了大量钢材，提高了产品的安全和可靠性。例如 A 3 钢的抗拉强度为 38 公斤/毫米²，屈服限为 24 公斤/毫米²，而常用的普低钢 16 Mn 的抗拉强度为 50~52 公斤/毫米²，屈服限则为 34~35 公斤/毫米²，如果设备用 16 Mn 钢来代替 A 3 钢，一般可节约钢材 20~30%。如果考虑到工厂大型化以后，给设备的运输和安装带来的困难，那使用普低钢的意义就更大了。

一、对压力容器用普通低合金钢的要求

各种压力容器、塔的外壳等工程用普低钢，一般都要承

受较大的载荷，尤其是高压容器，承受大于 100 公斤/厘米² 的压力。因此，要求钢有尽可能高的强度。考虑到化工设备是按屈服强度和抗拉强度（并考虑适当的安全系数）来设计的，因此，对普低钢要求有较高的屈服强度(σ_s)和抗拉强度(σ_b)。

但是，化工设备中各种容器，塔体等结构绝大多数又都是用焊接方法加工的，只有具备良好焊接性能的普低钢才有实用价值，因此，普低钢又必须具有一定的塑性，才能保证有良好的焊接性，实际使用中普低钢的延伸率一般要求不低于 14~20%。

对于大型氮肥厂的大部分设备均经常暴露在室外，有的地区冬天常在低温（-30~20℃）情况下工作。为了保证低温下不发生脆断，钢材就必须有更低的冷脆临界温度。同时普低钢设备在制造过程中经常采用冷变形（冷弯、冷卷），而冷变形不仅要求钢有好的塑性，而且还要求钢经过冷变形后在较长时间内不发生所谓“时效脆化”现象。因此，为了保证钢有较低的冷脆临界温度和低的时效倾向，就必须保证钢有较好的韧性，一般和碳钢一样要求常温冲击韧性不低于 5~6 公斤·米/厘米²。

化工设备一般还暴露在空气中，因此，还都要求能抗大气腐蚀。

二、压力容器用普低钢合金化特点

压力容器用的普低钢中主要合金元素是锰。锰资源丰富，对铁素体强化作用又较好，能够有效的提高强度。含锰量一般是在 0.7~1.8% 之间，强化铁素体的效果很好，同时，锰又能降低冷脆临界温度，对韧性有好的影响。最典型的钢种