

钢中常见元素快速分析

下 册

贵阳钢厂中心试验室

目 录

第一部分 钢铁基本知识概述

一、钢、铁及分类.....	(1)
二、国家标准“GB”的钢号表示法.....	(4)
三、各种合金元素在钢中的作用.....	(9)

第二部分 钢中常见元素的化学分析

第一章 碳的测定	(18)
气体容量法.....	(20)
第二章 硫的测定	(27)
燃烧—碘量法.....	(29)
第三章 硅的测定	(32)
重量法 (GB223—63)	(36)
钼蓝比色法.....	(40)
钢中硅的比色分析试验报告.....	(43)
第四章 磷的测定	(61)
酸碱容量法 (GB223—63)	(65)
钼蓝比色法.....	(74)
钢中磷的比色分析试验报告.....	(79)
第五章 锰的测定	(110)
过硫酸铵容量法.....	(114)

硫酸亚铁容量法·····	(118)
三价锰容量法·····	(119)
过硫酸铵比色法·····	(120)
钢中锰的比色分析试验报告·····	(124)
附：高锰钢中锰的测定方法·····	(132)
第六章 铬的测定 ·····	(133)
高锰酸钾氧化法·····	(136)
高氯酸氧化法·····	(141)
二苯偕肼比色法·····	(142)
钢中铬的比色分析试验报告·····	(144)
第七章 镍的测定 ·····	(160)
丁二肟比色法·····	(164)
钢中镍的比色分析试验报告·····	(168)
第八章 铜的测定 ·····	(196)
双环己酮草酰二脲 (BCO) 直接比色法·····	(200)
铜试剂比色法·····	(201)
铜试剂—三氯甲烷萃取比色法·····	(202)
第九章 钼的测定 ·····	(204)
硫氰酸盐直接比色法·····	(208)
钢中钼的比色分析试验报告·····	(214)
第十章 钨的测定 ·····	(232)
对苯二酚 (1,4-苯二酚) 比色法·····	(237)
钨蓝比色法·····	(238)
将钨还原为钨蓝的试验报告·····	(242)
高速工具钢中钨的比色分析法·····	(251)
钢中钨的硫氰酸盐比色法试验总结·····	(255)

第十一章	钒的测定	(267)
	硫酸亚铁容量法	(269)
	钼试剂—氯仿萃取比色法	(272)
第十二章	钛的测定	(275)
	过氧化氢比色法	(277)
	钢中钛的比色分析试验报告	(280)
第十三章	铌的测定	(287)
	二甲酚橙比色法	(290)
第十四章	铝的测定	(293)
	铬天青 S 直接比色法	(295)
附表 1	常见化合物在水中的溶解度	(299)
附表 2	常见的难溶化合物的溶度积和溶解度	(312)
附表 3	某些酸和碱的电离常数	(318)
附表 4	常用酸、碱的比重和浓度	(324)
附表 5	常用的缓冲溶液及其配制	(351)
附表 6	常用于酸—碱滴定的指示剂 及其变色范围	(354)
附表 7	某些氧化还原物质的标准 电极电位 E°	(359)
附表 8	应用于氧化还原滴定的某些指示剂	(365)
附表 9	某些物质的原子量、原子团量 和分子量	(370)
附表 10	温度 $t^\circ\text{C}$ 时水的蒸汽压力 $P_{\text{H}_2\text{O}}$ 及饱和的 NaCl 溶液的蒸汽压力 P_{NaCl}	(384)
附表 11	测碳用温度压力校正系数表	(385)
附表 12	化学元素周期表 (长式)	(395)

第一部分 钢铁基本知识概述

一、钢、铁及分类

钢和铁通常容易混为一谈。实际上，铁是一种化学元素，钢是铁和其它元素的合金。从生产工艺来说，也完全是两个不同的生产过程。

（一）钢、生铁与纯铁的区别：

1. 由杂质含量来看，生铁中杂质（如碳、硅、锰、磷、硫、氧、氮等）的总含量一般在7%以上，而钢中杂质的含量却只在1~3%之间。

2. 从碳的含量来看，钢的含碳量较低，生铁含碳量较高，但它们都是铁碳合金，严格区分是不容易的。一般来说，碳含量在0.05~1.7%者称为钢；碳含量在1.7~4.5%称为生铁；而碳含量在0.05%以下，杂质极低的钢称为工业纯铁。

（二）铁合金：

铁合金指铁与硅、锰、钛……等元素组成的合金的总称。如：铁与硅组成的合金叫硅铁，铁与锰组成的合金叫锰铁，……等。铁合金主要是供铸造或炼钢方面作还原剂或合金元素的添加剂使用，常见的铁合金成份规格可查部颁标准。其大致成份如表1所示。

表 1

常见铁合金成份

品 名	主 成 份		杂 质 不 大 于					其 它
	元素	含量 不小于 (%)	(%)					
			C	Si	Mn	P	S	
硅铁	Si	40~95			0.50~0.80	0.04~0.05	0.04	Cr 0.2~0.5
锰铁	Mn	65~80	0.50~7.00	2.0~4.0		0.30~0.45	0.03	
钛铁	Ti	20~25	0.1~0.2	0.18~0.30		0.05~0.15	0.05~0.10	Cu 3.0~4.0
钒铁	V	35	0.75~1.50	2.0~4.0		0.10~0.30	0.10~0.15	Al 1.0~2.5
钨铁	W	65~70	0.20~0.50	0.5~1.5	0.2~0.5	0.04~0.10	0.08~0.20	Cu 0.15~0.30
钼铁	Mo	55	0.2~0.3	1.2~2.0		0.10	0.1~0.2	Cu 0.8~2.0
铬铁	Cr	50	0.06~9.00	1.5~5.0		0.06~0.10	0.04~0.07	
硼铁	B	5~10	0.10	1.0~4.0			0.01	Al 0.7~1.0
金属铬	Cr	96~98	0.03~0.06	0.04~0.05		0.02~0.05	0.02~0.05	Al 1.0~1.5
金属锰	Mn	85~99	0.02~0.20	0.8~6.0		0.005~0.5	0.01	Fe 2.5~7.5
硅锰	Si	12~20	1.0~3.0			0.2~0.3		
	Mn	50~65						

(三) 钢的分类:

钢的分类方法很多,最常用和常见的有以下五种:按冶炼方法、化学成份、杂质含量、金相组织和用途等分类。现在着重介绍按冶炼方法及化学成份的分类方法。

1.按冶炼方法分类:

按照冶炼方法及设备不同,工业用钢可分为平炉钢,转炉钢和电炉钢三大类,每一大类还可按照炉衬材料的不同分为硷性或酸性两类。

按脱氧程度和浇注制度不同,碳素钢又可分为沸腾钢、镇静钢和半镇静钢三类。合金钢一般都是镇静钢。

2.按化学成份可分为碳素钢和合金钢两大类。

1)碳素钢:根据含碳量的不同,大致可分为:

低碳钢——含碳量小于0.25%。

中碳钢——含碳量在0.25~0.60%之间。

高碳钢——含碳量大于0.60%。

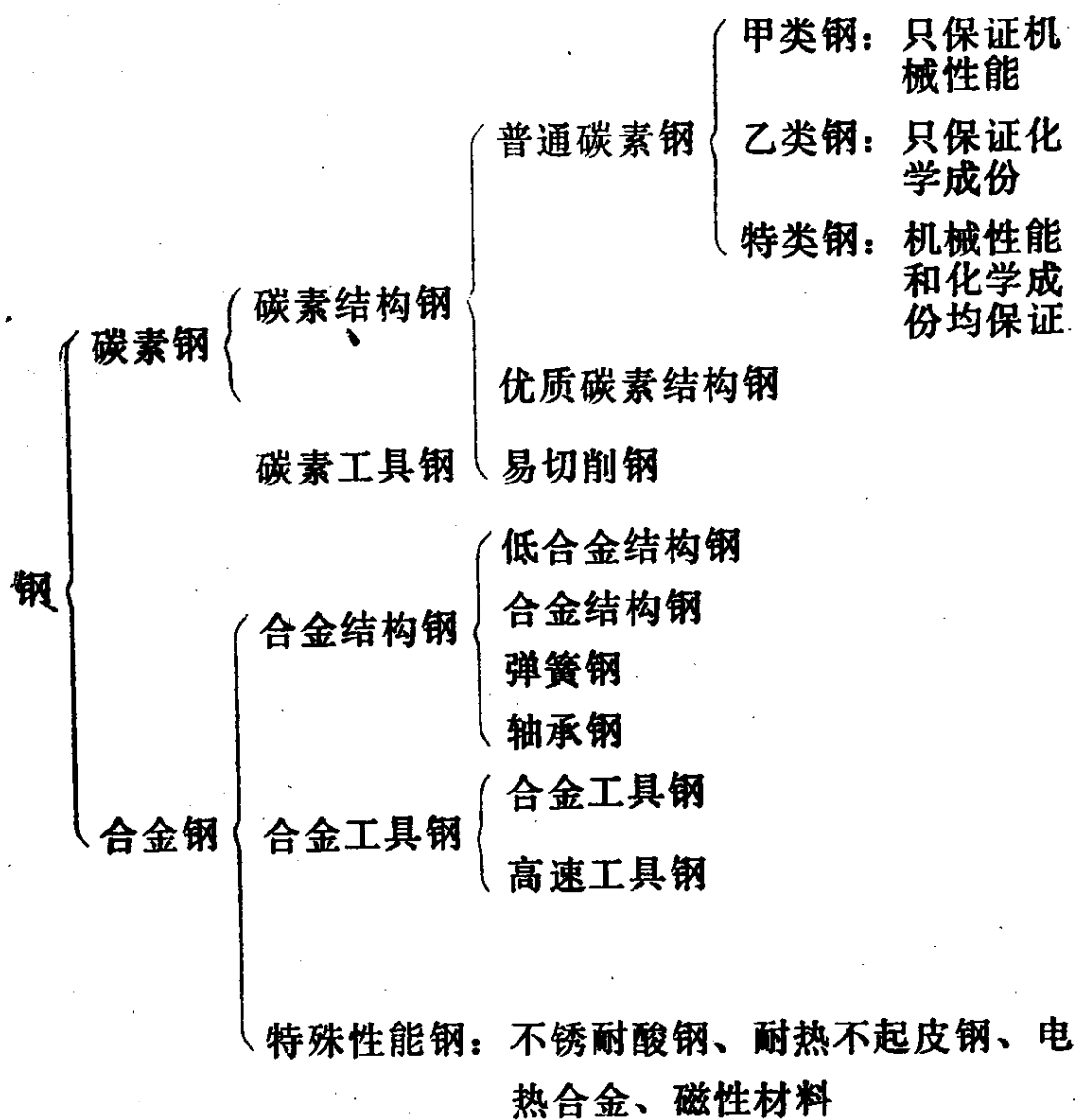
2)合金钢:根据钢中合金元素总含量的不同,大致又分为:

低合金钢——合金元素总含量小于5%。

中合金钢——合金元素总含量在5~10%的范围内。

高合金钢——合金元素总含量大于10%。

归纳起来,可将钢综合分类如下:



二、国家标准“GB”的钢号表示法

钢的分类方法只能把具有共同特征的钢种划分和归纳为同一类，而不能将每一种钢的特征全部反映出来，所以还必须采用钢号表示法。国际上每个国家都有自己的标准、命名和编号方法。GB是我国的“国家标准”的代号，它是汉语

拼音字Guojia Biao Zhun (国家标准) 的缩写。GB 的牌号表示方法其原则是:

(1) 牌号中化学元素采用汉字或国际化学元素符号来表示, 如“碳”或“C”; “锰”或“Mn”; ……等。

(2) 产品用途、冶炼和浇注方法, 其汉字牌号和汉语拼音字母牌号的表示方法一般采用缩写, 如表 2。

表中采用的缩写, 原则上只取一个汉字或字母, 而且尽可能取第一字或字母, 如果第一个字或字母与其它牌号有重复时, 才取第二个或第三个字或字母。

现将某些钢铁产品牌号的表示方法简介如下:

(一) 普通碳素钢

钢号的书写次序是: 在钢类和冶炼方法的缩写后面用阿拉伯数字顺序编号。

(1) 甲类钢: 平炉钢以“甲”或“A”和顺序号表示。如一号平炉钢的钢号“甲₁”或“A₁”; 转炉钢在钢类缩写和顺序号之间标以冶炼方法的缩写, 如二号碱性转炉钢的钢号为“甲碱₂”或“AJ₂”; 二号酸性转炉钢的钢号为“甲酸₂”或“AS₂”; 二号顶吹转炉钢的钢号为“甲顶₂”或“AD₂”。

(2) 乙类钢和特类钢: 除乙类钢钢号冠以“乙”或“B”, 特类钢钢号冠以“特”或“C”缩写外, 其余钢号表示方法均和甲类钢相同。

沸腾钢在钢号末尾加“沸”或“F”, 半镇静钢在钢号末尾加“半”或“b”。如“甲碱₃沸”或“AJ₃F”。镇静钢则不加任何字尾。

专门用途的碳素钢, 如桥梁钢、造船用钢等, 基本上采

表2 产品名称、用途、冶炼和浇注方法
采用的缩写符号表

名 称	采用字及拼音		采 用 符 号	字 体
	汉字	拼 音		
甲类钢	甲	—	A	大写
乙类钢	乙	—	B	”
特类钢	特	—	C	”
平 炉	平	Ping	P	”
碱性侧吹转炉	碱	Jian	J	”
酸性侧吹转炉	酸	Suan	S	”
顶吹转炉	顶	Ding	D	”
沸 腾 钢	沸	Fei	F	”
半镇静钢	半	Ban	b	小写
易切削钢	易	Yi	Y	大写
磁 钢	磁	Ci	C	”
碳素工具钢	碳	Tan	T	”
焊条用钢	焊	Han	H	”
滚动轴承钢	滚	Gun	G	”
高级优质钢	高	Gao	A	”
特 级	特	Te	E	”
船 用 钢	船	Chuan	C	大写
桥 梁 钢	桥	Qiao	q	小写
锅 炉 钢	锅	Guo	g	”
钢 轨 钢	轨	Gui	U	大写
铆 螺 钢	铆螺	Mao Luo	ML	”
电器工业用硅钢	电	Dian	D	”
电器工业用纯铁	电铁	Dian Tie	DT	”
高频率用电工硅钢	高	Gao	G	”
弱磁场用电工硅钢	弱	Ruo	R	”
中磁场用电工硅钢	中	Zhong	H	”
地质钻探钢管用钢	地质	Di Zhi	DZ	”
铸造生铁	铸	Zhu	Z	”
冷铸车轮生铁	冷	Leng	L	”

用普通碳素钢的表示方法，但在钢号末尾附加用途字或字母。如桥梁用甲类三号平炉钢，其相应钢号为“甲₃桥”或“A₃q”。

(二) 碳素结构钢

(1) 它的钢号的含碳量一律以平均含碳量的万分之几表示，如平均含碳量为0.1%、0.25%、0.45%的钢，其钢号就应为“10”、“25”、“45”。含锰量较高的钢，应将锰元素标出。例如平均含碳量为0.50%，含锰量为0.7~1.0%的钢，其相应钢号为“50锰”或“50Mn”。

(2) 沸腾钢、半镇静钢、镇静钢的表示方法和普通碳素钢相同。如平均含碳量为0.1%的沸腾钢和半镇静钢，其相应钢号分别为“10沸”或“10F”和“10半”或“10b”。

(3) 专用碳素结构钢，在钢号末尾另加代表用途的汉字或汉语拼音字母。如平均含碳量为0.20%的锅炉钢，其相应钢号为“20锅”或“20g”。

(三) 碳素工具钢

(1) 它的钢号的含碳量以平均含碳量的千分之几表示，并在数字前冠以“碳”或“T”字，以免同碳素结构钢相互混淆。例如平均含碳量为0.80%的碳素工具钢，其钢号为“碳₈”或“T₈”。含锰量较高者，并在其钢号后标出“锰”或“Mn”，如“碳₈锰”或“T₈Mn”。

(2) 高级优质碳素工具钢中，磷、硫含量比优质碳素工具钢低，为便于区别，在钢号后应加注“高”或“A”，例如“碳₈A”及“碳₈锰A”或“T₈A”及“T₈MnA”等。

(四) 普通低合金钢（即低合金高强度钢）和合金结构钢

(1) 这类钢号的含碳量一律以平均含碳量的万分之几表示。钢中主要合金元素含量，除个别情况外，一般以百分之几表示。当其平均含量小于1.5%时，钢号中只标明元素（汉字名称或元素符号）而不标明含量；当其平均含量等于或大于1.5%、2.5%、3.5%、……等时，在元素后面还要标出含量，可相应地写为2、3、4……等。例如平均含碳量为0.36%，含锰量为1.50~1.80%，含硅量为0.40~0.70%的合金结构钢，其钢号应表示为“36锰₂硅”或“36Mn₂Si”。

(2) 合金结构钢中，钼、钒、钛、硼……等元素，如系有意加入者，虽含量很低，仍应在钢号中标出。例如平均含碳量为0.20%，含锰量为1.00~1.30%，含钒量为0.07~0.12%，含硼量为0.001~0.005%的钢，其钢号应表示为“20锰钒硼”或“20MnVB”。

(3) 有时两个钢种的化学成份除其中一个主要合金元素外，都基本相同，而且这个主要元素的平均含量也都小于1.5%，这时应将含量较高者，在元素的后面加标“1”字加以区别。如“12CrMoV”和“12Cr₁MoV”钢的铬含量分别为0.40~0.60%和0.90~1.20%。

(4) 为区别高级优质钢和优质钢，应在高级优质钢的钢号末尾加注“高”或“A”。

(5) 普通低合金钢，如果是用碱性或酸性转炉吹炼的，则应在其钢号前分别冠以“碱”或“J”和“酸”或“S”，以区别于平炉钢。如“J16Mn”、“S16Mn”等。

(五) 合金工具钢和高速工具钢

(1) 合金工具钢的钢号，其平均含碳量 $\geq 1.00\%$ 时，就不必标出含碳量。例如含碳量为 $1.30\sim 1.50\%$ ，含锰量为 $0.45\sim 0.75\%$ ，含铬量为 $1.30\sim 1.60\%$ 的钢，其钢号应为“铬锰”或“CrMn”。当它的平均含碳量 $< 1.00\%$ 时，就以千分之几表示，例如9 Mn₂V钢的含碳量为 $0.85\sim 0.95\%$ 。

(2) 合金工具钢中合金元素的表示方法，基本上与合金结构钢相同，但对含铬量低的合金工具钢，其含铬量也以千分之几表示，并在含量前加一个“0”，以便将它和一般的表示元素含量百分值的标记区别开来，例如平均含铬量为 0.60% 的低合金工具钢，它的钢号应表示为“铬_{0.6}”或“Cr_{0.6}”。

(3) 高速工具钢的钢号中不必标出含碳量，一般只标出合金元素平均含量的千分之几。例如“—18—4—1”型高速工具钢的钢号为“钨₁₈铬₄钒”或“W₁₈Cr₄V”。

三、各种合金元素在钢中的作用

(一) 碳：碳主要以碳化物如Fe₃C、Mn₃C、VC、WC、W₂C等形式存在于钢中，这些统称为化合碳；在铁中大部分呈铁的固溶体如无定形碳、退火碳、石墨碳等存在，统称为游离碳。碳是决定钢的机械性能的主要元素，也是划分钢号的主要依据。钢中碳含量增加时，强度增高，塑性和韧性降低。

一般钢板含碳常在 0.1% 左右，质软而富有展性；结构钢含碳常不大于 0.3% ，强度较低，富有延性；钢轨、弹簧钢和工具钢等含碳较高，它们的强度和硬度增加，延性下降。

当钢中有形成稳定碳化物的元素铌、钛、钒、钼、钨等时，其屈服强度显著提高。此外，随着含碳量增加，焊接性能下降，钢的冷脆性和时效敏感性随含碳量增高而增加，抗大气腐蚀能力降低。

(二) 硅：硅在钢中主要以固溶体 FeSi 、 MnSi 、 FeMnSi 等形态存在，此外有少部分以非金属夹杂物存在，如 $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $2\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 等，高碳硅钢中也有部分生成 SiC 。

一般钢中含硅量为 $0.17 \sim 0.5\%$ ，合金钢中一般 $< 1.0\%$ ，电机工业用硅钢含硅量常在 1.5% 以上，高硅钢可达 $3.8 \sim 4.2\%$ 。

硅进入铁素体中起固溶强化作用。钢中含有一定量的硅能增加钢的强度、弹性、耐酸性、耐热性及电阻系数等，同时它又是一种有效的脱氧剂。

硅含量高时，会使冷脆性转变温度提高，同时也提高了钢的时效敏感性、抗腐蚀和抗高温氧化能力。

(三) 锰：锰常以硫化物、碳化物（如 MnS 、 MnC ）及 MnSi 、 FeMnSi 等形态存在于钢中。冶炼时，锰不仅可以脱氧，还能起脱硫作用。

锰在钢中一般含量为 $0.3 \sim 0.8\%$ ，当锰含量超过 0.8% 时，即为锰合金钢。生铁中一般含量为 $0.5 \sim 2\%$ ，高锰钢中可达 $13 \sim 14\%$ 。

锰大部分进入铁素体内，使铁素体强化，从而提高屈服点和抗拉性能，能增加钢的强度和硬度。但当锰量大于 1% 后，它在强化钢的同时，塑性和韧性下降，而锰在 $0.8 \sim 1.0\%$ 时，几乎不降低钢的塑性和韧性，对后者还会有所提高。高锰

钢，例如含锰量为12%者，则是最耐磨的钢种之一。锰在钢中使其抗腐蚀能力减弱。

(四) 硫：硫在钢中多半以 MnS 形态存在，部分与铁结合为 FeS 。它是钢中的有害元素，使钢具有热脆性，轧制时易产生裂纹，能减低钢的耐磨性和耐腐蚀性，不易焊接等，只有易切削钢才加入适量的硫，以改善加工性能。

通常钢中要求含硫量 $< 0.055\%$ ，优质结构钢和工具钢分别要求不超过 0.045% 和 0.030% ，高级优质钢中不超过 0.02% ，而锰钢中可达 0.15% ，生铁中含硫较高可达 0.35% 。

(五) 磷：在钢中主要以固溶体磷化铁(Fe_2P 、 Fe_3P)形态存在。一般钢中磷含量不大于 0.05% ，优质钢的含磷量在 0.04% 或 0.03% 以下。

磷是钢中的有害元素，能使钢冷脆。在某些特殊钢中，磷又作为有益元素以提高钢的耐腐蚀性，在铜、钛、稀土配合使用时效果更好。

磷的强化作用仅次于碳，它使屈服点和屈强化(σ_s/σ_b)都显著提高，当与其它元素合理配合时（如铜—磷—稀土、铜—磷—钛、铜—磷等）并在保证取得细晶粒组织的脱氧条件下，磷的有害作用得以抑制，在屈服点、抗拉强度升高的同时，低温韧性即使在含磷 0.1% 左右，仍保持比较好的水平，塑性仅稍有下降。

Fe_3P 是一种很硬的物质，使钢难以加工。磷剧烈地使塑性和韧性（特别是低温韧性）恶化，对焊接性能也有不良影响，含磷钢中如提高碳和硅的含量，会使它的冲击韧性显著恶化。

(六) 铜：铜在钢中多以固溶体或以极细微的金属夹杂

物形态存在。含量一般为0.2~0.5%。通常认为铜在钢中为有害元素，它能破坏钢的焊接性能，并使钢热脆。但在钢中加入少量铜可提高钢的抗腐蚀性和强度。

含铜在0.5%以下时，对强度提高不大，塑性、韧性有所改善。含铜在0.5%以上时，引起铜质点的沉淀强化，强度大大提高，但塑性、韧性显著恶化，发生鳞裂缺陷。

铜和磷、钛、稀土、铬等合理使用时，对抗腐蚀性能有良好的作用，含量<0.5%时对焊接性能影响不大。

(七) 铝：铝在钢中主要以固溶体形态存在，或者以氧化铝(Al_2O_3)、氮化铝(AlN)、硅酸铝($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 、 $3\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 、 $3\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)、铝尖晶石($\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)等夹杂物形态存在。

铝是钢中常用的脱氧剂，脱氧时一般加入0.01~0.1%的金属铝。加入少量铝可以细化晶粒，提高强度，改善低温韧性，减少时效敏感性。加入大量铝有一定的固溶强化作用，但塑性、韧性显著下降，冷加工工艺性和可焊性也变坏。铝可显著提高钢的抗腐蚀性，特别是与钼、铜、铬等元素配合使用时效果更好，目前发展的耐腐蚀钢，多数都有不同含量的铝。含铝较高时，使钢的浇注困难，表面不良，但它可提高钢的高温抗氧化能力。

(八) 钛：在钢中以固溶体、碳化物、氮化物和氧化物形态存在。一般含量在1%以下，合金钢、镍铬钢、不锈钢等一般含量为0.1~1%，部分耐热合金和低合金钢含钛量有的高达2%以上，或低于0.1%以下，但为数不多。

钛是强脱氧剂，用钛脱氧的钢，非金属夹杂物比用铝脱

氧的少。钢中加入少量钛可细化晶粒，提高强度、耐热性和耐腐蚀性，使屈服点和抗拉强度显著提高，塑性稍有下降。此外还可减少钢的时效敏感性。

加入大量的钛，特别是当钢中含碳量提高以及有其它强化元素存在时，强度迅速上升，塑性和韧性则急剧下降。钛是最强的碳化物形成元素，因而钛可显著提高晶粒长大温度，可改善钢的焊接性能及减弱焊接过程中的淬硬倾向，对抗腐蚀性有良好的影响。

(九) 钒：钒是钢中常见的合金元素之一，它是钢的碳化物和氮化物形成元素，此外还以复杂碳化物及固溶体存在。一般普通低合金钢中含钒为0.2~0.3%，某些高速切削工具钢中可达0.5~2.5%。

形成的碳氮化钒 $V_4(C \cdot N)_3$ 沉淀，强化了铁素体和阻碍晶粒长大，因而细化晶粒，很有效地提高钢的强度、硬度、弹性、冲击韧性、屈服点和抗拉强度。钒对中温性能有良好的影响。在适当的轧制工艺或热处理条件下，它可提高钢的韧性和降低脆性转变温度。此外，它还可减少钢的时效敏感性，增加焊接后的淬硬倾向，也可作细化晶粒的脱氧剂。

(十) 铌：铌与铁形成固溶体和金属化合物(Fe_3Nb_2)，在钢中大部分以碳化物(NbC)形态存在。

通常钢中含铌量为0.1~1%左右，普通低合金钢中铌含量低于0.05%，在高温用结构钢中含量可达3%。

铌作为合金元素加入钢中，是强烈的碳化物形成元素，碳化铌强化了铁素体，细化了晶粒，对屈服点和抗拉强度及抗腐蚀性的提高效果很好，并能改善钢的焊接性能，但塑性和韧性有所下降。在控制适当的轧制工艺和热处理时，对韧