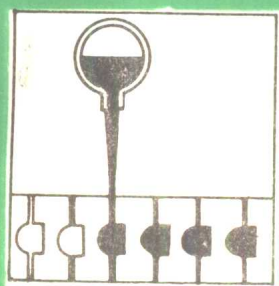
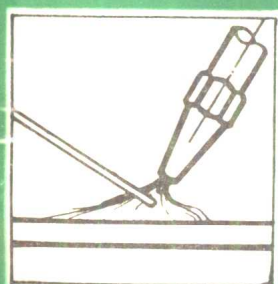
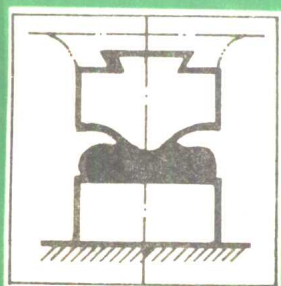
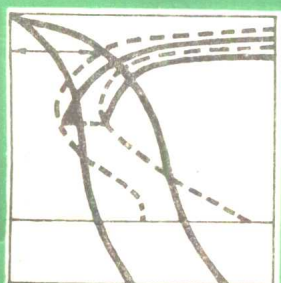


高等学校试用教材



钢铁材料及 有色金属材料

华中工学院崔 崑 主编



机械工业出版社

高等学校试用教材

钢铁材料及有色金属材料

华中工学院崔崑 主编



机械工业出版社

钢铁材料及有色金属材料

华中工学院崔 崑 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16·印张 28·字数 690 千字

1981年8月重庆第一版·1981年8月重庆第一次印刷

印数 00,001—13,500·定价 2.85 元

*

统一书号: 15033·5079

前 言

本书是根据 1978 年 4 月召开的《高等学校一机部对口专业座谈会纪要》的精神和同年 6 月召开的金属材料与热处理专业教材编审会议所确定的教学大纲编写的。本书包括金属材料中的合金钢、铸铁和有色金属三部分内容，可以作为金属材料学课程的试用教材，也可供工程技术人员参考。

本书从合金化原理出发，着重阐明金属材料的成分与其热处理特点、组织、性能之间的关系，从而使学生了解材料成分设计的依据。书中对我国常用的钢铁和有色金属材料作了较全面和系统的介绍，使学生了解如何依据服役条件合理选用材料。对各类材料的发展方向和可供借鉴的国外较成熟的牌号亦做了适当的介绍。讲课时可根据实际情况重点讲授，一部分内容可以留给学生自学。

本书第一篇中第一章、第二章第九节由东北重型机械学院沈焕祥编写，第一篇其余部分由华中工学院崔崑编写，第二篇和第三篇由合肥工业大学游兴河编写，全书由崔崑主编。哈尔滨工业大学雷廷权教授主审。

第一章 § 1-4 钢的冶金质量一节所用金相图片，除图 1-24、1-25 外，均系齐齐哈尔钢厂提供，特此致谢。

由于编者学识水平有限，书中一定有不少缺点和错误，希望广大读者批评指正。

一九八〇年四月

目 录

第一篇 合金钢

第一章 钢的合金化概论	1	八、铬硅钢及铬锰硅钢	78
§ 1-1 引 言	1	九、硅锰及硅锰钼钒钢	82
一、钢中的合金元素	1	十、硼钢及含稀土元素的钢	83
二、钢的分类	2	十一、低碳马氏体钢	87
三、钢的编号方法	3	十二、低淬透性钢	90
§ 1-2 合金元素与铁和碳的相互作用	4	§ 2-4 易切钢、冷冲压用钢和冷敏用钢	91
一、合金元素与铁的相互作用	4	一、易切钢	91
二、合金元素与碳的相互作用	6	二、冷冲压用钢	93
三、合金元素对铁碳状态图的影响	12	三、冷敏用钢	96
§ 1-3 合金钢中的相组成及元素		§ 2-5 弹簧钢	97
在钢中的分布	14	一、弹簧的工作条件与性能要求	97
一、合金钢中的相组成	14	二、弹簧钢的成分、性能特点和	
二、元素在晶粒中的不均匀分布	16	应用范围	98
§ 1-4 钢的冶金质量	18	三、经过强化的弹簧钢丝	101
一、钢的低倍缺陷	18	§ 2-6 轴承钢	103
二、钢的高倍缺陷	24	一、滚动轴承用钢的工作条件及	
三、合金钢断口	26	性能要求	103
第二章 结构钢	31	二、铬轴承钢的成分与原始组织	104
§ 2-1 普通碳素钢	31	三、铬轴承钢的热处理	109
一、普通碳素钢的分类和性能	31	四、渗碳轴承钢	113
二、低碳钢的时效	33	五、特殊用途的轴承钢	114
三、专业用普通碳素钢	36	§ 2-7 低温用钢	116
§ 2-2 普通低合金结构钢	36	一、对低温用钢的性能要求	116
一、对普通低合金结构钢的性能要求	37	二、奥氏体型低温用钢	116
二、合金元素在普通低合金结构		三、低碳马氏型低温用钢	116
钢中的作用	38	四、铁素体型低温用钢	119
三、普通低合金结构钢的应用	44	§ 2-8 耐磨钢	119
§ 2-3 优质碳素结构钢与合金结构钢	48	一、高锰钢	119
一、对一般机械制造用钢的性能要求		二、耐磨用普通低合金钢	121
及合金元素的影响	49	§ 2-9 大锻件用钢	122
二、合金结构钢的回火脆性	59	一、大锻件生产的工艺特点	122
三、优质碳素结构钢	62	二、大锻件用钢的选用	123
四、锰钢、锰钒钢及锰钼钨钢	65	三、大锻件用钢的锻后热处理	126
五、铬钢、铬钒钢、铬钼钢及铬钼铝钢	66	四、大锻件的最终热处理	129
六、铬镍钢及铬镍钼(钨)钢	71	第三章 工具钢	132
七、铬锰钢、铬锰钛钢及铬锰钼钢	75	§ 3-1 工具钢的分类和工具钢的基本	

性能	132
§ 3-2 刀具用碳素工具钢及合金工具钢	137
一、碳素工具钢的成分、组织与性能	137
二、合金工具钢的成分、组织与性能	141
§ 3-3 高速钢	147
一、高速钢的成分和组织	147
二、高速钢的热压力加工、碳化物不均匀性和退火	152
三、高速钢的淬火加热	155
四、高速钢的淬火冷却	160
五、高速钢的回火	165
六、碳及合金元素对高速钢的组织性能的影响	168
七、高速钢的表面强化	176
§ 3-4 冷模具钢	177
一、碳素钢及低合金工具钢	178
二、高铬工具钢和中铬工具钢	183
三、含锰较高的空冷微变形钢	190
四、高速钢	192
五、基体钢	194
§ 3-5 热模具钢	196
一、锤锻模用钢	196
二、热挤压、热锻及精锻模用钢	201
三、压铸模用钢	207
§ 3-6 其他类型工具用钢	209
一、量具用钢	209
二、冷轧辊用钢	210
三、耐冲击工具用钢	212
四、塑料模用钢	213
第四章 不锈钢耐酸钢	215
§ 4-1 金属腐蚀的基本概念	215
一、金属的电化学腐蚀	215
二、金属的腐蚀类型	217
§ 4-2 对不锈钢耐酸钢的性能要求及影响其腐蚀性的因素	219
一、合金元素及碳对不锈钢组织和性能的影响	219
二、介质的影响	222

§ 4-3 不锈钢耐酸钢的分类	223
一、马氏体不锈钢、铁素体不锈钢	223
二、奥氏体钢和奥氏体-铁素体复相不锈钢	233
第五章 耐热钢	243
§ 5-1 对耐热钢的要求	243
一、金属的抗氧化性	243
二、金属的高温机械性能	248
三、耐热钢的强化	253
§ 5-2 热强钢	255
一、珠光体热强钢	255
二、12% Cr 型马氏体热强钢	263
三、奥氏体热强钢及高温合金	267
§ 5-3 抗氧化钢	273
一、铁素体抗氧化钢	273
二、铬-镍系抗氧化用钢	275
三、铬-锰-氮及铬-锰-镍-氮系抗氧化钢	275
四、铁-铝-锰系抗氧化钢	275
§ 5-4 气阀钢	277
一、气阀的工作条件和性能要求	277
二、马氏体气阀钢	277
三、奥氏体气阀钢	279
第六章 超高强度钢	280
§ 6-1 低合金超高强度钢	280
一、碳及合金元素在低合金超高强度钢中的作用	280
二、低合金超高强度钢对性能的要求	281
三、低合金超高强度钢钢号	283
§ 6-2 马氏体时效钢	284
一、马氏体时效钢的化学成分	284
二、马氏体时效钢的热处理和性能	285
§ 6-3 中合金超高强度钢	287
一、热作模具钢型	287
二、基体钢	288
§ 6-4 沉淀硬化超高强度不锈钢	288
一、奥氏体-马氏体沉淀硬化不锈钢	288
二、马氏体沉淀硬化不锈钢	292

第二篇 铸 铁

第七章 概论	295
§ 7-1 铸铁的特点与分类	295
一、铸铁的特点	295

二、铸铁的分类	296
§ 7-2 铸铁的石墨化	297
一、铁-碳合金稳定系状态图	297

二、铸铁的石墨化过程	297	二、球墨铸铁化学成分的选择	323
三、影响铸铁石墨化的因素	299	§ 10-2 球墨铸铁的牌号、性能及用途	325
第八章 灰铸铁	303	一、球墨铸铁件的牌号及其机械性能指标	325
§ 8-1 灰铸铁的组织	303	二、球墨铸铁的性能及用途	325
§ 8-2 灰铸铁的牌号、性能及用途	306	§ 10-3 球墨铸铁的热处理	328
一、灰铸铁的牌号与机械性能指标	306	一、退火	330
二、灰铸铁的性能	306	二、正火	331
§ 8-3 孕育铸铁	311	三、等温淬火	334
§ 8-4 灰铸铁的热处理	311	四、调质处理	337
一、消除内应力退火	311	五、感应加热表面淬火	338
二、石墨化退火	312	六、化学热处理	339
三、正火	313	§ 10-4 球墨铸铁的金相组织体级	340
四、表面淬火	313	第十一章 特殊性能铸铁	341
§ 8-5 激冷铸铁	313	§ 11-1 耐热铸铁	341
第九章 可锻铸铁	315	一、铸铁在高温下的损坏形式	341
§ 9-1 可锻铸铁的组织	315	二、提高铸铁耐热性的途径	341
一、化学成分对可锻铸铁组织的影响	315	三、耐热合金铸铁	342
二、石墨化退火工艺特性对组织的影响	315	§ 11-2 耐蚀铸铁	343
§ 9-2 可锻铸铁的牌号、性能及用途	316	一、铸铁的腐蚀与提高耐蚀性的途径	343
一、可锻铸铁的牌号及其机械性能指标	316	二、耐蚀合金铸铁	344
二、可锻铸铁的性能特点及用途	317	§ 11-3 耐磨铸铁	345
§ 9-3 可锻铸铁的退火	317	一、高磷合金铸铁	346
第十章 球墨铸铁	319	二、稀土-镁-钒-钛球墨铸铁	346
§ 10-1 球墨铸铁的组织与化学成分的选择	319	三、稀土-镁-中锰球墨铸铁	347
一、球墨铸铁的组织	319		

第三篇 有色金属及其合金

第十二章 铝及其合金	349	二、硬铝合金	362
§ 12-1 工业纯铝	349	三、超硬铝合金	364
§ 12-2 铝合金的组织特点及分类	350	四、锻铝合金	365
§ 12-3 铝的合金化	351	§ 12-6 铸造铝合金	369
一、固溶强化	351	一、铝-硅铸造合金	370
二、时效强化	352	二、铝-铜铸造合金	373
三、过剩相强化	353	三、铝-镁铸造合金	374
四、细化组织强化	353	四、铝-锌铸造合金	374
§ 12-4 铝合金的时效	353	五、铸造铝合金的热处理特点及代号	374
一、铝合金热处理强化的特点	353	§ 12-7 耐热铝合金	377
二、铝合金时效的基本过程	354	一、耐热铝合金的合金化	377
三、影响时效强化的因素	356	二、耐热铝合金	378
§ 12-5 变形铝合金	358	§ 12-8 低温用铝合金	381
一、防锈铝合金	359	第十三章 镁及其合金	384

§ 13-1 纯镁的特性	384	三、工业纯铜的牌号及用途	416
一、纯镁的特性	384	§ 15-2 黄铜	416
二、纯镁的牌号及用途	384	一、普通黄铜	416
§ 13-2 镁的合金化及其热处理	385	二、特殊黄铜	418
一、镁的合金化	385	三、黄铜的热处理	419
二、镁合金的热处理	387	四、黄铜的牌号、成分与用途	420
§ 13-3 常用镁合金	388	§ 15-3 青铜	422
一、镁合金的分类及牌号	388	一、锡青铜	423
二、常用镁合金	388	二、铝青铜	425
第十四章 钛及其合金	397	三、铍青铜	429
§ 14-1 高纯度钛与工业纯钛的性能	397	§ 15-4 白铜	431
一、高纯度钛的性能	397	一、耐蚀结构用白铜	431
二、工业纯钛的性能	398	二、电工用白铜	433
三、杂质对工业纯钛机械性能的影响	399	第十六章 滑动轴承合金	434
§ 14-2 钛的合金化与热处理原理	402	§ 16-1 滑动轴承的工作条件及性能要求	434
一、钛的合金化	402	§ 16-2 铝基轴承合金	435
二、钛合金的分类及牌号	404	一、铝基轴承合金的基本性能特点	435
三、钛合金的热处理原理	405	二、高锡铝基轴承合金	435
§ 14-3 α 型钛合金	408	三、铝-铈-镁轴承合金	437
§ 14-4 $\alpha+\beta$ 型钛合金	409	§ 16-3 锡基轴承合金	438
§ 14-5 β 型钛合金	410	§ 16-4 铅基轴承合金	439
§ 14-6 低温用钛合金	411	§ 16-5 以其他金属为基的轴承合金	440
第十五章 铜及其合金	414	一、铜基轴承合金	440
§ 15-1 工业纯铜的性质与用途	414	二、铁基轴承合金	441
一、纯铜的结构与性能	414	三、锌基轴承合金	442
二、杂质对纯铜性能的影响	415		

第一篇 合金钢

第一章 钢的合金化概论

§ 1-1 引言

一、钢中的合金元素

可以把钢看作是以铁为基的合金，其点阵结构是由铁决定的。钢中常常含有其他元素，即使比较纯净的钢，例如纯铁，也会发现其中含有十多种或更多的元素。由于冶炼时所用原材料以及冶炼方法和工艺操作等的影响，钢中除碳以外含有的少量的其他元素可能有硅、锰、硫、磷、铜、铬、镍等，它们一般作为杂质或残余元素对待，而不认为是合金元素。

锰可由生铁带入钢中，锰与硅还可以脱氧剂形式加入。硫、磷均由原料带入，并由于炼钢时除不净而被保留下来。在冶炼过程中由于采用某些矿区的矿石和原料，因而把某些元素带入钢中，例如我国大冶铁矿中含有铜，用它炼成的钢便含有铜。炼钢时也可能由废钢带入一些意外的元素，例如过去许多国家曾大量使用过铬镍钢，因此经常有大量含有铬、镍的废钢回炉，所以钢中常常含有一定量的铬、镍元素。残余元素的存在有时可起到一些有益的作用（如残余的镍、铬可以提高钢的淬透性），但在大多数情况下会产生不利的影响。例如残余元素镍、铬、铜等的存在会对钢的焊接性和冷变形加工性产生不利的影响，所以对优质碳素钢都规定了残余元素的最高许可含量。

在冶炼过程中，钢液不可避免地隐含微量的气体——氧、氮、氢。这些元素在钢中的含量虽然很少，但在一定条件下或超过一定含量后，都会对钢的性能显示重要影响，因而不能不加以考虑。

碳素钢冶炼、压力加工比较方便，价格低廉，其机械性能可以满足多方面的要求，尤其经过热处理以后，性能有很大改善，因此碳素钢的产量要占世界钢的总产量的90%以上，被广泛应用于机械制造工业和各种建筑构件上。

科学技术的发展对钢材的性能提出越来越高的要求，碳素钢在不锈耐酸、耐热、耐磨以及某些物理和工艺性能等方面有时不能满足使用要求，在制造大尺寸、高强度的机件时，其综合机械性能亦常不能满足各方面日益发展的需要。因此，为了提高钢的某些性能，以满足使用上的需要，必须在钢中加入一定量的某一种或几种元素。这种为了合金化目的而加入并且其含量有一定范围的元素，称为合金元素，这种钢称为合金钢。工业发展对钢材提出的性能要求与钢材本身所能提供的性能之间的矛盾，不断推动着合金钢的发展。

目前钢中常用的合金元素有：硅、锰、铬、镍、钨、钼、钒、钛、铌、锆、铝、铜、钴、氮、硼、稀土元素等。不同国家常使用的合金元素与各国的资源条件有很大的关系。有的元素如硫，因它在钢中形成夹杂物，降低钢的韧性，一般认为是有害的而加以严格限制，但为了提高钢的被切削加工性，在易切钢中又特意把硫的含量提高。在这种指定条件下，也

可以认为硫是合金元素。

当钢中的合金元素总含量小于或等于 5 % 时,叫做低合金钢。合金元素总含量在 5 ~ 10 % 范围内的叫做中合金钢。合金元素总含量超过 10 % 时叫做高合金钢, 不过这种区别并没有严格的规定。

二、钢的分类

钢的种类很多, 为了便于管理、熟悉、选用和比较, 根据某些特性, 从不同角度出发, 可以把它们分成若干具有共同特点的类别。这些分类方法主要是为了方便和实际需要, 因此同一种钢, 可以根据其不同特点划为不同类型。

(一) 按冶炼方法分类

按冶炼方法和设备的不同, 工业用钢可分为平炉钢、转炉钢和电炉钢三大类, 每一类还可以根据炉衬材料的不同, 分为碱性和酸性两类。电炉钢还可以分为电弧炉钢、感应炉钢、真空感应炉钢和电渣炉钢等。

按钢液脱氧程度和铸锭制度的不同, 碳素钢又可分为沸腾钢、镇静钢和半镇静钢三类。一般合金钢都是镇静钢。

(二) 按用途分类

钢可以按用途分为以下各类。

1. 结构钢 结构钢可分为:

(1) 建筑及工程用钢或构件用钢。用做钢架、桥梁、钢轨、车辆、船舶等, 属于这类钢的有普通碳素钢和部分普通低合金钢。这类钢很大一部分做成钢板和型钢。

(2) 机器制造用钢, 用做各种机器零件, 包括轴承、弹簧等。

2. 工具钢 工具钢可分为:

(1) 量具刀具钢。

(2) 冷模具钢。

(3) 热模具钢。

(4) 耐冲击工具用钢。

3. 特殊性能钢 特殊性能钢可分为:

(1) 耐热钢, 包括抗氧化钢和热强钢。

(2) 不锈钢耐酸钢。

(3) 电工用钢等。

(三) 按金相组织分类

1. 按平衡状态或退火状态的组织分类, 可以分为亚共析钢、共析钢、过共析钢和莱氏体钢。

2. 按正火组织分类, 可以分为珠光体钢、贝氏体钢、马氏体钢和奥氏体钢。但由于正火空冷的冷却速度随钢材尺寸不同而不同, 所以这种分类方法不是绝对的。

3. 按加热冷却时有无相变和室温时的金相组织分类, 可分为:

(1) 铁素体钢, 加热和冷却时, 始终保持铁素体组织。

(2) 奥氏体钢, 加热和冷却时, 始终保持奥氏体组织。

(3) 复相钢, 如半铁素体或半奥氏体钢。

除了以上的分类方法以外, 我们还可以按化学成分分为碳素钢和合金钢 (又可以按合金

元素分为铬钢、锰钢等)；可以按工艺特点分为铸钢、渗碳钢、易切钢等；还可以按质量分为普通质量钢、优质钢和高级优质钢，它们的区别在于钢中所含的有害杂质(硫、磷)的多少和含碳量宽窄范围不同等。

在实际工作中，上述各种钢的分类方法差不多都能碰到，并且常常几种方法重叠使用。

三、钢的编号方法

钢的种类很多，需要进行编号。编号的原则是：简短醒目；便于书写、打印和识别而不易混淆；要能表示其主要成分、用途以及主要性能和相应的状态。

我国现行的钢铁材料表示方法，根据国家标准(GB221-63)的规定，采用汉字牌号和汉语拼音字母、牌号同时并用，并与国际化学符号、阿拉伯数字相结合的编号方法。用汉字牌号容易记忆与识别，用汉语拼音字母容易书写和标记。表1-1为钢铁材料的用途、冶炼和浇注方法的汉字和汉语拼音字母代号。

表 1-1 名称、用途、冶炼方法及浇注方法代号

名 称	牌 号 表 示		名 称	牌 号 表 示		名 称	牌 号 表 示	
	汉 字	汉语拼音字母		汉 字	汉语拼音字母		汉 字	汉语拼音字母
平 炉	平	P	易 切 钢	易	Y	高 温 合 金	高温	GH
酸 性 转 炉	酸	S	碳 素 工 具 钢	碳	T	铸 钢		ZG
碱 性 侧 吹 转 炉	碱	J	滚 动 轴 承 钢	滚	G	磁 钢	磁	C
顶 吹 转 炉	顶	D	高 级 优 质 钢	高	A	铆 螺 钢	铆螺	ML
沸 腾 钢	沸	F	船 用 钢	船	C	容 器 用 钢	容	R
半 镇 静 钢	半	b	桥 梁 钢	桥	q			
甲 类 钢	甲	A	锅 炉 钢	锅	g			
乙 类 钢	乙	B	钢 轨 钢	轨	U			
特 类 钢	特	C	焊 条 用 钢	焊	H			

(一) 普通碳素钢

普通碳素钢分为三类，分别用表1-1的汉字甲、乙、特或字母A、B、C表示。钢号的书写顺序为：钢类，炉种的汉字或字母；顺序号；沸腾钢或半镇静钢的汉字或字母。平炉钢及镇静钢在钢号中不注出。

1. 甲类钢 这类钢是保证一定的机械性能而不保证化学成分的。平炉钢以“甲”字或字母“A”和顺号来表示，例如：“甲0”或“A0”，“甲1”或“A1”……，转炉钢并附以冶炼方法符号，例如“甲碱0”或“AJ0”，“甲碱1”或“AJ1”……。

2. 乙类钢 这类钢是按化学成分供应的。除冠以“乙”或“B”外，其余钢号表示方法同甲类钢。

3. 特类钢 这类钢保证一定的化学成分，同时保证供应状态的机械性能。除冠以“特”或“C”外，其余钢号表示方法同甲类钢。

专门用途的碳素钢，例如：桥梁钢、造船钢等，可按普通碳素钢的表示方法，但在钢号之尾附以用途字母。例如：桥梁用甲类3号钢写为“甲3桥”或“A3q”。

(二) 优质碳素结构钢

优质碳素结构钢以平均含碳量的万分之几表示，沸腾钢及半镇静钢应特别标明。例如：平均碳含量为0.1、0.2、0.3……的钢表示为“10”、“20”、“30”……。平均碳含量为0.1%

的沸腾钢表示为“10 沸”或“10F”。

锰含量较高的优质碳素钢，应将锰元素标出。例如，平均碳含量为 0.5%，锰含量为 0.7~1.0% 的镇静钢其牌号为“50 锰”或“50Mn”。专门用途的优质碳素钢，在钢号之尾附加用途符号，例如锅炉钢的牌号为“20 钢”或“20g”。

(三) 碳素工具钢

为了避免同优质碳素结构钢牌号重复，以“碳”字或字母“T”代表碳素工具钢，含量以千分之几表示。含锰较高的碳素工具钢，应将锰元素标出，例如平均碳含量为 0.85%、锰含量为 0.35~0.60% 的碳素工具钢，其牌号为“碳 8 锰”或“T 8 Mn”。

(四) 合金钢

化学元素采用元素中文名或国际化学符号。化学成分（即含量）表示方法如下：

1. 碳含量 一般以平均碳含量的万分之几表示之。例如平均碳含量 0.05%、0.10%、0.50%……写为 5、10、50……等。不锈钢耐热钢、高电阻合金、高速钢、磁钢等高合金钢，碳含量一般不予标出，但如果几个钢的合金元素含量相同，仅碳含量不同，此时，碳含量用千分之几表示。合金工具钢平均碳含量大于或等于 1.00% 时，碳含量不予标出，碳含量小于 1.00% 时，以千分之几表示。

2. 合金元素含量 除铬轴承和低铬工具钢外，合金元素一律按以下原则表示其含量（以平均含量计）：

(1) 平均含量小于 1.50% 时，钢号中仅标明元素，一般不标明含量。

(2) 平均含量在 1.50~2.49%、2.50~3.49%、……22.50~23.49%……等时，应相应地写为 2、3、……23、……等。

(3) 为了避免铬轴承钢与其他合金钢号相重复，其碳含量不予标出，铬含量以千分之几表示，并冠以用途名称，例如平均铬含量为 0.90% 的铬轴承钢，其牌号写为“滚铬 9”或“GCr9”，低铬合金工具钢的铬含量亦以千分之几表示，但在含量之前加个“0”，例如平均铬含量为 0.60% 的合金工具钢，其牌号写为“铬 06”或“Cr06”。

易切削钢在钢号之前冠以汉字“易”或符号“Y”。各种高级优质钢则在钢号之后加“高”字或符号“A”。

§ 1-2 合金元素与铁和碳的相互作用

合金元素加入钢中之后，对钢的转变、组织和性能的影响一般取决于合金元素与铁和碳的相互作用。

一、合金元素与铁的相互作用

在纯铁中， $\alpha\text{-Fe} \rightleftharpoons \gamma\text{-Fe}$ 和 $\gamma\text{-Fe} \rightleftharpoons \delta\text{-Fe}$ 是在恒定的温度下 (A_3 和 A_4) 进行的。加入合金元素后，这个转变就展宽成在一个温度范围内进行。在这个温度范围内， α (δ) 相和 γ 相可以在平衡状态下同时存在。按合金元素与铁所组成的状态图类型可将合金元素分为两大类，每类又分为两组。

第一类合金元素能扩大与铁生成的合金的 γ 相区域。合金元素含量越多， A_3 和 A_4 的距离越大。也就是说， A_4 点上升而 A_3 点下降（但有例外，钴含量增加时， A_3 点不断上升，至大约超过 45% 后开始下降）。还可以进一步按照它们扩大 γ 区的情况分为两组：

1. 能与铁生成无限互溶的 γ 相区域 (图 1-1a), 属于这类的合金元素有镍、锰、钴、铂、铌等。

2. 与铁生成有限溶解的 γ 相区域 (图 1-1b), 属于这类的合金元素有碳、氮、铜、锌、金、氢等。

第二类合金元素能缩小与铁生成的合金的 γ 相区域。随着合金元素加入量的增加, A_3 点将上升而 A_4 点将下降 (但有例外, 铬含量 $< 7\%$ 时, A_3 点下降, $> 7\%$ 后 A_3 点上升)。按照它们是否能使 γ 区封闭又可以分为二组:

1. 能完全封闭 γ 区 (图 1-1c), 此时 γ 区被一个半月形的 $\gamma + \alpha(\delta)$ 两相区所封闭。属于这一类元素的铬、钒可以与 α -Fe 无限互溶, 而另外一些元素如钼、钨、钛、硅、铝、磷等则与 α -Fe 部分互溶。

2. 随合金元素含量的增加, γ 区缩小, 但不能完全被 $\alpha + \gamma$ 区封闭, 而出现 γ 和新相的两相区域 (图 1-1d)。属于这一类的合金元素有铌、锆、铈等。

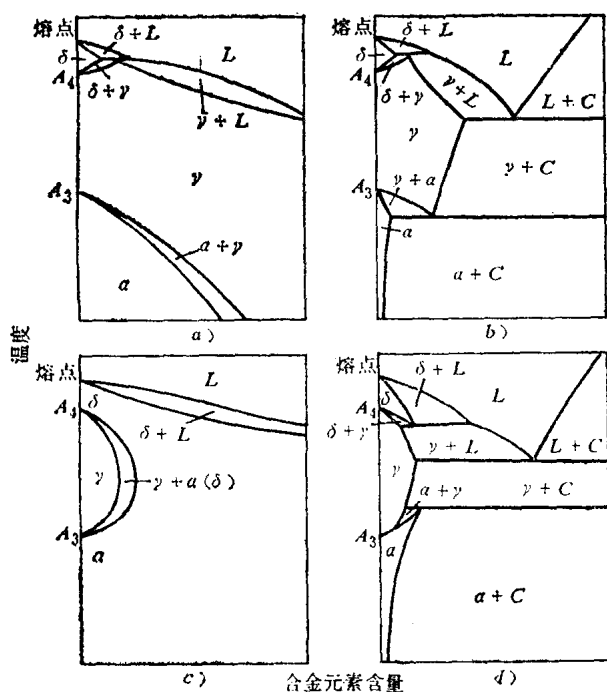


图 1-1 铁及其他元素平衡相图类型

L—液相 α 、 γ —固溶体相 C—化合物

溶解度大于在 α -Fe 中的溶解度, 故它们起着扩大 γ 区的作用。

铜与 γ -Fe 的晶体点阵相同, 原子半径相近, 在周期表中处于相邻位置, 这一切似乎决定了铜应该在 γ -Fe 中无限互溶, 然而实际上铜虽然扩大 γ 区, 但溶解度却很小, 这说明有些影响因素人们还尚未了解。

对于那些在 γ -Fe 中有较大溶解度并稳定 γ 固溶体的合金元素, 常称为奥氏体形成元素; 对那些在 α -Fe 中有较大溶解度并使 γ 固溶体不稳定的合金元素, 常称为铁素体形成元素。利用合金元素具有缩小或扩大 γ 区的作用, 可以设法获得铁素体钢或奥氏体钢。这些钢因具有各种特殊性能, 故在工业和技术上得到广泛的应用。在复杂合金中, 往往也可以根据

对于合金元素与铁相互作用所产生的各种影响, 还没有比较完满的理论解释。一般认为是下面几种因素共同作用的结果, 即合金元素的点阵类型、尺寸因素 (合金元素与铁的原子半径之比) 和原子的电子结构及其相互作用 (电化学作用)。

镍、钴、锰的原子半径与 γ -Fe 相差很小, 同时化学性质很接近 (在周期表上位置很靠近), 并且晶体点阵相同, 因此它们与 γ -Fe 可以形成无限固溶体, 具有扩大 γ 区的作用。在缩小 γ 区的元素中, 除铝和硅外均为体心立方点阵, 与 α -Fe 相同, 但由于大多数原子直径与铁原子的直径差别较大, 故多形成有限固溶体。只有铬和钒不但与 α -Fe 的点阵相同, 而且原子半径也很接近, 故与 α -Fe 形成无限固溶体。碳、氮的原子直径比较小, 能与铁形成间隙固溶体。由于 γ -Fe 的间隙尺寸比 α -Fe 大, 碳、氮元素在 γ -Fe 中的

钢中的合金元素一部分能与碳结合，形成碳化物，一部分不能形成碳化物。

合金元素在钢中能否形成碳化物与其原子的电子结构有关。在钢中能形成碳化物的元素都属于过渡族金属，并且其 d 层电子的未填满程度比铁为高，在周期表中它们都位于铁的左边。图 1-2 为按周期表位置排列的过渡族金属的二元碳化物，其中钴和镍虽然能形成独立的碳化物，但其稳定性很差，在钢中不会出现，所以它们仍属于不形成碳化物的元素。

在钢中不能与碳结合的合金元素有铜、硅、铝、镍、钴等。它们几乎完全溶于固溶体中。硅和铝的石墨化作用最强，铜、镍、钴也有促进石墨化的作用。钢在石墨化时首先有石墨化核心形成，石墨化的核心可能是由碳化物分解而得到的，也可能是由碳直接从固溶体析聚在已有的其他核心上而形成的，但是石墨化核心形成的机理目前还不完全清楚，因此，对于合金元素的影响也常常有不同的解释。还应当指出，形成碳化物的元素也可能有促进石墨化的作用，如钨和钼使钢略有石墨化倾向，可能是由于这些元素的原子半径与铁的原子半径相差太大（ r_W 比 r_{Fe} 大 12%），所以当其溶入 Fe_3C 中时，使 Fe_3C 变得不稳定。

由图 1-2 可以看出碳化物的结构与金属元素在周期表中的位置有密切的联系。表 1-2 列出了在合金钢中常见的碳化物和与碳化物的结构和性能有关的一些数据。可以看出, 合金元素中 d 层未填满的电子数目越多, 其形成碳化物的倾向越强, 而形成的碳化物越稳定。这在第四周期内看得很明显。碳化物的稳定性按以下的顺序增加: 铁、锰、铬、钒、钛。在第五和第六周期内也同样存在这种情况, 例如自钼至锆, 自钨至铪。在同一族中这种稳定性的变化不甚明显。

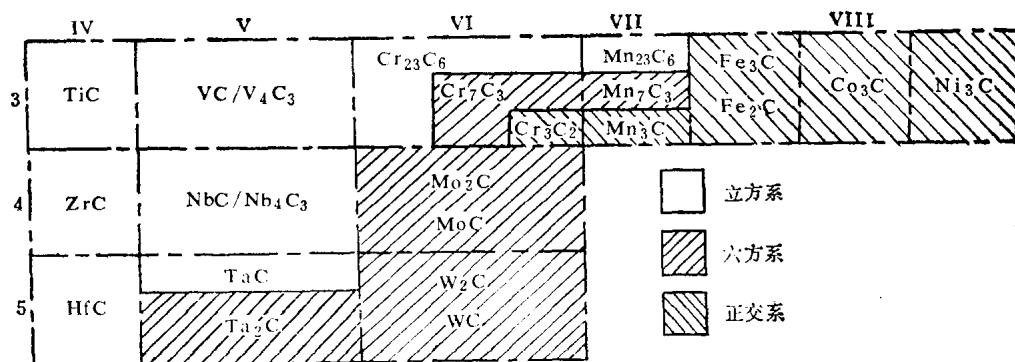


图 1-2 过渡族金属的二元碳化物

可以按合金元素形成碳化物稳定性程度，把它们大致排成下列顺序（自弱到强）：铁、锰、铬、钼、钨、钒、铌、钽、铪、锆、钛。碳化物的稳定性取决于其原子键力，在形成碳化物时，碳原子的价电子填入金属未填满的 d 层，形成强的金属键，有些情况下也可能由碳和金属的部分电子生成共价键。可以近似地根据熔点的高低比较它们的相对稳定性。合金元素形成的碳化物的稳定性有重要的实际意义，它影响着这些碳化物加热时在钢中开始分解的温度和速度，回火时碳化物析出聚集的条件等。分析二元碳化物的点阵结构可以看出下述规

表 1-2 钢中常见的碳化物的结构与性能

金 属	原子半径 比 r_C/r_M	碳 化 物	点阵类型	点 阵 常 数 $\text{\AA}$	单位晶胞中含有的 原 子 数	熔 点 $^{\circ}\text{C}$	显微硬度 (50g)
Fe	0.61	Fe_3C	正交晶系	$a=4.518$ $b=5.069$ $c=6.736$	16(12M+4C)	1650	~860(HB)
Mn	0.6	Mn_3C	正交晶系	$a=4.519$ $b=5.08$ $c=6.734$	16(12M+4C)	1520	—
Cr	0.6	Cr_7C_3	复杂六方	$a=13.98$ $c=4.532$	80(56M+42C)	1665	2100
V	0.57	Cr_{23}C_6	复杂立方	$a=10.6$	116(92M+24C)	1550(分解)	1650
		VC	面心立方	$a=4.13$	8(4M+4C)	2830	2100
Mo	0.56	Mo_2C	密集六方	$a=3.0$ $c=4.72$	3(2M+1C)	2700	1600
		MoC	简单六方	$a=2.898$ $c=2.809$	2(1M+1C)	2700	~1500(100g)
W	0.55	$\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{C}$	复杂立方	$a=11.05$	112(96M+16C)	—	—
		W_2C	密集六方	$a=2.98$ $c=4.71$	3(2M+1C)	2750	3000
		WC	简单六方	$a=2.90$ $c=2.831$	2(1M+1C)	2600(分解)	1730
Ti	0.53	$\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$	复杂立方	$a=11.04$	112(96M+16C)	—	~1000
		TiC	面心立方	$a=4.32$	8(4M+4C)	3200	3200
Nb	0.53	NbC	面心立方	$a=4.461$	8(4M+4C)	3500	2055
Ta	0.52	TaC	面心立方	$a=4.445$	8(4M+4C)	3875	1800
Zr	0.48	ZrC	面心立方	$a=4.687$	8(4M+4C)	3550	2700

律 (并以此把它们分为二类)。

1. 碳原子半径 (r_C) 与金属原子半径 (r_M) 之比等于或小于 0.59 时, 这些元素形成间隙相, 例如 TiC 、 Mo_2C 、 WC 。在间隙相中金属的原子形成与纯金属不同的点阵, 但一般都是简单的致密的点阵结构, 其间隙大于碳原子直径, 故可以容纳碳原子。这些碳化物熔点都比较高, 稳定性也高, 不易在加热时溶解于奥氏体中。

2. 当 r_C/r_M 大于 0.59 时, 则不能形成间隙相, 而形成具有复杂点阵结构的碳化物, 例如铬、锰、铁形成的碳化物 Cr_{23}C_6 (复杂立方)、 Cr_7C_3 (复杂六方)、 Fe_3C (正交晶系), 它们的熔点较低, 稳定性较差, 在加热时较易溶解于奥氏体中。

钨和钼在钢中可以形成复杂的三元碳化物 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 、 $\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{C}$ 、 $\text{Fe}_{21}\text{W}_2\text{C}_6$ 、 $\text{Fe}_{21}\text{Mo}_2\text{C}_6$ 。 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 和 $\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{C}$ 具有复杂的立方点阵结构。 $\text{Fe}_{21}\text{W}_2\text{C}_6$ 和 $\text{Fe}_{21}\text{Mo}_2\text{C}_6$ 与 Cr_{23}C_6 有相同的点阵结构。

碳化物常常具有一定范围的溶解度或者可以溶入其他的合金元素。 Fe_3C 和 Mn_3C 可以无限互溶, 室温下, Fe_3C 可以溶入 18~20%Cr、1~2%Mo 或 W、0.4~0.5%V、0.15~0.25%Ti, 碳原子还可以被氮、氧等原子置换, 所以当渗碳体中溶有其他元素时可以写成 $(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Cr} \cdots \cdots)_3(\text{C}, \text{N}, \text{O} \cdots \cdots)$ 。许多有相同点阵的间隙相可以形成无限固溶体, 例如 TiC-VC 、 TiC-ZrC 等。VC 和 NbC 中碳原子常常缺位, 故有时以其近似的实际成分 V_4C_3 、 Nb_4C_3 表示。TiC 的成分可以在 $\text{TiC}_{0.3} \sim \text{TiC}$ 范围内变动。 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 只是代表平均成

份, 实际成分可以在 $\text{Fe}_2\text{W}_4\text{C} \sim \text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$ 范围内变动, 并且可以溶入其他元素, 因此文献中常用 M 代表金属原子, 写成 $M_6\text{C}$ 。 $\text{Fe}_{21}\text{W}_2\text{C}_6$ 可以 $M_{23}\text{C}_6$ 表示, 其中钨、钼可以互相代替, 含钨量为 5~15% 时, 能溶解 60% Cr。在有限溶解时, 溶解度随温度变化。 Cr_7C_3 室温时可以溶入 38% Fe, 而在 1300℃ 时可以溶入 60% Fe。溶入的合金元素对碳化物的稳定性有很大影响。一般说来, 当溶入碳化物的元素能形成更为稳定的碳化物时, 将提高前者的稳定性; 而当溶入的合金元素不能形成碳化物或碳化物稳定性较弱时, 将降低其稳定性。例如合金钢中渗碳体中常常溶入一些强的碳化物形成元素, 故在热处理时其分解温度比在碳钢中要高。在碳钢中加入钛、钒、锆、铌等元素, 所形成的碳化物很稳定, 加热至 900~1000℃ 时完全不溶解于奥氏体, 因而它们加速奥氏体的分解。但当钢中加入 1.5~2.5% Mn 时, 由于锰部分地溶于这些碳化物中, 降低了它们的原子键力, 因此加热至 900~1000℃ 时, 这些碳化物将部分地溶解于奥氏体中, 此时将增加奥氏体的稳定性, 铬也有此作用, 但影响程度不如锰。

当加入的一种合金元素 (如铬、钨、钼等) 能在钢中形成几种碳化物时, 则在钢中出现的碳化物类型取决于合金元素与碳的原子数量比值 (平衡条件下), 而在介稳定状态时还与热处理的规范有关。

图 1-3 为铁-铬-碳三元素在 700℃ 时的平衡图, 由图可以看出, 当原子比值 ($N_{\text{Cr}}/N_{\text{C}}$) 增加时, 钢中先后生成 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ 、 $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ 和 $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$ 。在一些中间成分时将生成有两种碳化物的混合组织。以含 1% C 的钢为例说明当铬含量变化时对钢中形成碳化物的影响, 当铬含量不超过 3% 时, 钢中的相组成不变, 为铁素体 (铬溶解量低于 1%) 和合金渗碳体 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$, 在合金渗碳体中最多可以溶解约 18% Cr; 铬含量超过 3% 后将出现合金碳化物, 例如含铬为 4% 时, 钢中除了合金渗碳体外还含有 $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$; 铬含量超过 5% 时, $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ 变得不稳定了, 因此只有一种碳化物 $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ 存在; 在铬含量自 5% 增至 11% 时, 钢中仍只含有一种碳化物 $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$, 而铁素体中溶解的铬从约 1% 增至 5%; 在钢中含铬更高时, 将出现含铬更高的碳化物相 $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$ 。

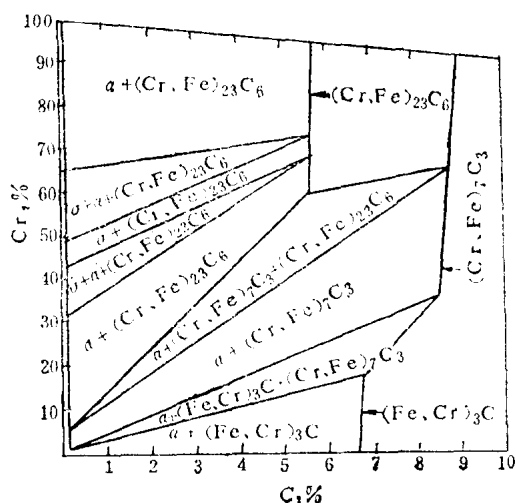


图 1-3 铁-铬-碳三元系在 700℃ 的等温截面平衡图

铁-钨-碳三元系中的稳定碳化物有 Fe_3C 、 WC 和 $M_6\text{C}$, 这须要在 700℃ 长期保温后才可以达到。由表 1-3 可以看出, 当原子比值 ($N_{\text{W}}/N_{\text{C}}$) 增加时, 钢在长期保温后生成的稳定碳化物类型依次为 Fe_3C 、 WC 、 $M_6\text{C}$ 。 $M_{23}\text{C}_6$ ($\text{Fe}_{21}\text{W}_2\text{C}_6$) 是一个介稳定碳化物, 它常常在奥氏体恒温转变情况下暂时出现。图 1-4 是铁-钨-碳三元系在 700℃ 时的介稳定平衡图, 由图中可以看出, 当钢中钨和碳的原子比值增加时, 恒温转变中生成的碳化物中的钨和碳原子比值也随之增加, 碳化物出现的次序是 $(\text{Fe}, \text{W})_3\text{C}$ 、 $M_{23}\text{C}_6$ 、 $M_6\text{C}$ 。可以根据图 1-4 判断钨钢在退火状态下的碳化物类型。铁-钼-碳三元系中碳化物的形成规律与铁-钨-碳三元系很相似。

图 1-5 为铁-钒-碳三元系的等温截面 (20℃) 平衡图。可以看出, 钒在 $(\text{Fe}, \text{V})_3\text{C}$ 中

表 1-3 钨、碳原子比值不同的钢在 700°C 恒温保持后析出的介稳定和稳定碳化物的相成分(预先在 1300°C 奥氏体化 10 分钟, 使碳化物全部溶入)

序 号	C, %	W, %	原子比值 N_W/N_C	析出的碳化物相 (X 射线分析)	
				700°C 等温保持 10 小时 (介稳定)	700°C 等温 2000 小时 (稳定)
1	0.98	0.49	0.033	Fe_3C	$Fe_3C + WC$
2	1.16	1.16	0.065	Fe_3C	$Fe_3C + WC$
3	0.65	1.50	0.15	$M_{23}C_6$	$Fe_3C + WC$
4	0.89	2.62	0.19	$M_{23}C_6$	$Fe_3C + WC$
5	0.55	1.96	0.23	$M_{23}C_6 + M_6C$	$Fe_3C + WC$
6	0.59	3.62	0.40	$M_{23}C_6 + M_6C$	$WC + Fe_3C$
7	0.60	6.12	0.67	$M_{23}C_6 + M_6C$	$WC + Fe_3C$
8	0.27	5.45	1.32	$M_6C + M_{23}C_6$	$WC + M_6C$
9	0.34	8.15	1.57	$M_6C + M_{23}C_6$	$WC + M_6C$
10	0.32	9.56	1.96	M_6C	$M_6C + WC$

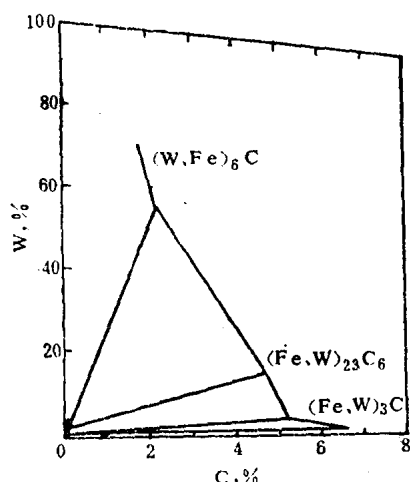


图 1-4 铁-钨-碳三元系在 700°C 时的介稳定平衡图

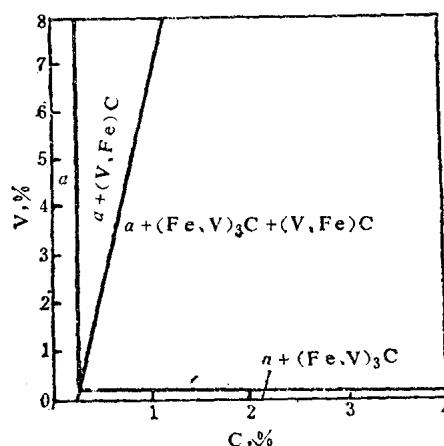


图 1-5 铁-钒-碳三元系在 20°C 时的等温截面平衡图

的溶解度很小, 钒含量不多时便可以在钢中生成碳化物 VC, 使钢中出现 VC 的钒含量界限可能在 0.1% 以下。铁-钛-碳, 铁-铌-碳等三元系的等温截面与铁-钒-碳三元系相似。

当钢中同时含有几种能形成碳化物的合金元素时, 其形成的规律如下: 当碳含量比较低时, 强的碳化物形成元素将优先与碳结合; 而当碳含量逐渐增加时, 弱的碳化物形成元素也将生成碳化物。例如当钢中有钼、钨和铬时, 随碳含量的增加将依次形成 M_6C 、 Cr_7C_3 、 Cr_3C 、 Fe_3C 。如果钢中已经含有几种碳化物, 当加入更强的碳化物形成元素的时候, 它将首先自弱碳化物形成元素生成的碳化物中夺取碳, 例如钢中含有 M_6C 和 Cr_7C_3 时, 若加入钒之后, 钒将首先自 Cr_7C_3 中, 然后自 M_6C 中夺取碳。此时驱使铬然后是钨或钼进入固溶体中。

在回火过程中, 碳化物的形成规律与在平衡条件下不同。钢中含有强碳化物形成元素铬、钼、钨、钒、钛、铌等时, 若回火温度在 400°C 以下, 则对回火时碳化物的形成没有什么影响, 渗碳体总是在 ϵ 相析出以后首先生成的碳化物; 在 400°C 以上, 这些碳化物形成元