

〔苏〕И. К. 尼基季娜

李广泽 梁光华 等译 程忠智 校

火力发电厂 管道手册

СПРАВОЧНИК

ПО

ТРУБОПРОВОДАМ

ТЕПЛОВЫХ

ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

水利电力出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了苏联火力发电厂热力管道设计、施工和运行经验,并提出了保证热力管道安全运行的一系列措施,对热力管道的强度计算作了系统的介绍,同时还介绍了管道选择、施工方法等,本书可供从事热力管道设计、施工、运行的工程技术人员以及大中专院校有关师生参考。

И.К.Никитина
Справочник по трубопроводам
тепловых электростанций
М.: Энергоатомиздат, 1983.

火力发电厂管道手册
〔苏〕И. К. 尼基季娜
李广泽 梁光华 等译 程忠智 校

*

水利电力出版社出版
(北京三里河路六号)
陕西省军区机关印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 13.25印张 309千字
1987年11月第一版 1987年11月西安第一次印刷
印数 0001—4000册

ISBN 7-120-00258-9/TB·2
15143·6590 定价: 3.65元



译 者 的 话

本书根据苏联《火力发电厂管道手册》(Справочник по трубопроводам тепловых электростанций) 1983年版翻译。该书是专门介绍火力发电厂管道设备和管道新技术的书籍。它是在总结实践经验的基础上,根据苏联现行标准、规程及有关规定编写而成的。

书中系统地介绍了热力管道的选择、计算、施工和运行方法,特别是为了保证管道的安全运行提出了许多措施。这些经验,对我国从事大、中型火力发电厂管道设计、施工及运行的工程技术人员有一定的参考价值。

本书可供热力管道设计、施工、运行人员,化学水处理和采暖设计、施工、运行人员,冶金、化工、城市供热等专业工程技术人员,以及大专院校热能动力专业师生参考。

本手册由水利电力部西北电力设计院技术处组织翻译。第一、二章由李广泽翻译;第三、四章由陈巧义翻译;前言、第五章由冯金耀翻译;第六、七章由李学纪翻译;第八章由郝忠义翻译;第九、十章由梁光华翻译;第十一、十二章由王鑫建翻译。全书由冯金耀、李广泽统稿整理,程忠智校订,李学纪审核。对本书中错误或欠妥之处,欢迎读者批评指正。

译 者

1987年3月

前 言 (摘译)

在苏联第十一和十二个五年计划中, 根据苏共第二十六大的决议, 除了依靠核燃料和水电发展电力生产外, 要求利用埃基巴斯图兹和康斯科—阿钦斯克煤田的煤以及西伯利亚产地的天然气及石油伴生气来建设大型火力发电厂。

当火力发电厂中装有大型动力机组时, 应提高对其运行可靠性的要求, 其中包括提高管道运行可靠性的要求, 因为管道发生故障时, 即使锅炉和汽轮机能够维持本身的运行能力, 也会导致整个机组的停机。

厂用管道的无事故运行取决于许多条件, 其中包括: 正确选择钢材品种、管子质量和管壁厚度, 合理解决热伸长的补偿措施、辅助设备(疏水管、排气管等)的安装, 以及在管道设计、安装、检修、运行中对所有规程及管道各种要求的遵守情况等。

本手册可为设计、安装和检修单位的工程技术人员以及运行人员, 提供解决与火力发电厂管道有关问题所必需的资料。

该手册是在过去所积累的厂用管道设计经验和现行标准文件要求的基础上编写的, 它反映了解决厂用管道一系列问题的现代化水平。

在参考文献目录中指出了资料来源, 当需要进一步深入地研究有关材料时, 读者务必查阅有关文献。

应当指出, 遗憾的是在本手册出版之时, 在汽水管方面还没有正式批准的新版苏联国家技术监察规程。因此, 在该手册中没有列入这些规程的具体要求。

由于篇幅有限, 手册中没有列入关于管道阀门的资料, 因为关于这个问题已经出版了很多书籍。基于同样的原因, 在本手册中也没有列入某些管道标准化零件的基本特性数据。

本手册的编制采用了米·千克(力)·秒(MKpCC)单位制的物理量单位和非本单位制的其它单位, 因为目前在制定监察仪表刻度和编制火力发电厂管道技术文件时均采用这些单位。

作 者

1983年

目 录

译者的话

前 言 (摘译)

第 一 章	厂用管道及其荷载与变形	1
1.1	概 述	1
1.2	管道荷载与变形	2
第 二 章	管道用钢	3
2.1	金属学概述	3
2.2	合金钢	6
2.2.1	概 述	6
2.2.2	合金元素对钢性能的影响及钢中的有害成分	6
2.3	钢的热处理	9
2.3.1	概 述	9
2.3.2	热处理的种类	10
2.4	管道用钢的强度特性	13
2.4.1	概 述	13
2.4.2	在冷态情况下管道用钢的强度特性和工艺试验	13
2.4.3	在高温或较高温度条件下管道用钢的强度特性	16
2.5	钢种的标称符号	19
2.6	电厂管道用钢	20
2.6.1	概 述	20
2.6.2	碳钢和低合金管道用钢	21
2.6.3	珠光体合金管道用钢、奥氏体及高铬合金钢	30
第 三 章	厂用管道的管子及附件	37
3.1	概 述	37
3.2	管子的标称通径、标称压力、工作压力及试验压力	39
3.3	管道的管子	43
3.4	管道零件	57
3.4.1	概 述	57
3.4.2	弯 管	57
3.4.3	支 管(三通管)	58
3.4.4	异 径 管	58
3.4.5	堵 头	58
第 四 章	电厂管道的管子与零件的连接	60

4.1	概 述	60
4.2	法兰连接	60
4.2.1	概 述	60
4.2.2	法 兰	61
4.2.3	法兰连接的垫片	64
4.2.4	固定零件	65
4.3	管道及其零件的焊接	66
4.3.1	概 述	66
4.3.2	管道的焊接方法、焊条及坡口加工	69
4.3.3	焊接热处理	71
4.3.4	焊接质量的检验	71
第 五 章	厂用管道的热伸长、补偿能力及补偿装置	72
5.1	概 述	72
5.2	估算管道补偿能力的近似法	75
5.3	填料式补偿器与波形补偿器	79
5.4	管道的冷态拉伸	91
第 六 章	厂用管道的固定	93
6.1	概 述	93
6.2	支吊架的型式及其布置	95
6.3	管道支架及其固定件的荷载	98
6.4	管道支架工作荷载的确定	102
6.5	选择弹簧支吊架弹簧的规定	104
第 七 章	厂用管道的保温	109
7.1	概 述	109
7.2	管道的保温结构	111
第 八 章	厂用管道各部件的设计、供货及安装	125
8.1	概 述	125
8.2	管道用管子内径及种类的选择	129
8.3	管道的疏水、排水、排气和坡度	130
8.3.1	蒸汽管道疏水系统	130
8.3.2	水和凝结水管道的排水和排气系统	131
8.3.3	管道坡度	131
8.4	水和蒸汽流量的测量装置	132
8.4.1	概 述	132
8.4.2	测量装置的特性数据、供货与选择	133
8.4.3	对测量装置的安装要求	134
8.5	管道金属及其热位移的检测和监督	138
8.5.1	概 述	138

8.5.2	对蒸汽管道金属残余变形增长、金属组织及机械性能变化和零部件石墨化的检测	139
8.5.3	蒸汽管道热位移的监督	141
8.6	管道布置和定线的基本原则	142
8.7	管道及其部件的水压试验	145
第九章	厂用管道的流体动力计算	147
9.1	概 述	147
9.2	介质比容变化不大的管道流体动力计算	147
9.3	介质流速和压降均较大的管道流体动力计算	149
9.4	饱和蒸汽和沸腾水管道的流体动力计算	154
9.5	管子和管道零件的阻力系数	156
9.5.1	概 述	156
9.5.2	管道零部件和阀门的局部阻力系数	159
第十章	厂用管道某些零件的强度计算	173
10.1	概 述	173
10.2	管壁厚度、管道允许工作压力和水压试验时最大压力的计算	173
10.2.1	管壁厚度计算	173
10.2.2	管子的允许工作压力和在水压试验时的最大试验压力	176
10.3	圆锥形异径管的壁厚、允许工作压力和水压试验时最大试验压力的计算	177
10.3.1	圆锥形异径管的壁厚计算	177
10.3.2	圆锥形异径管的允许工作压力和水压试验时的最大试验压力	177
10.4	冲压弯头、冲压焊接弯头和焊接弯头的壁厚计算	178
10.5	支管和三通的计算	178
10.5.1	管子上未补强孔洞的最大允许直径	178
10.5.2	管子上开孔的补强措施	179
10.6	堵头计算	182
10.6.1	无加强筋的平焊堵头计算	182
10.6.2	具有加强筋的平焊堵头计算	184
10.6.3	法兰式堵头的计算	185
第十一章	火力发电厂的聚乙烯管道	186
11.1	概 述	186
11.2	聚乙烯管子及其种类	188
11.3	聚乙烯管子的连接方法	191
11.4	聚乙烯管子的选择及其额定工作压力的确定	191
11.5	聚乙烯管道的水力计算	192
11.6	聚乙烯管道的固定及其热伸长的补偿	193
11.7	聚乙烯管道的敷设	195

11.8	聚乙烯管道的水压试验.....	196
11.9	聚乙烯管道的设计要求.....	196
第十二章	厂用管道阀门的传动装置.....	197
12.1	概 述.....	197
12.2	阀门的远方手动控制.....	197
12.3	嵌入式和立柱式阀门电气传动装置.....	200
	参考文献.....	203

第一章 厂用管道及其荷载与变形

1.1 概 述

火力发电厂的管道系作为热力系统中各个设备（锅炉、汽轮机和辅助设备 etc）之间的联络管路。这些管道主要是用来输送蒸汽和水，但部分管道的工作介质是油、重油、压缩空气和氢气。

现代大型火力发电厂中的管道结构相当复杂，由以下主要元件和设备组成：管子本身（直管和弯管）和管子之间的连接方式（法兰连接、焊接），异形管件（三通管、弯管、异径管等），管道阀门（关断阀、调节阀、自动阀门等），检测仪表用的管道附件（测量喷嘴和流量孔板、压力表的连接管等），保护装置（安全阀、疏水门、空气门），支承管道用的支吊架。此外，介质温度为300℃及以上的管道还有管道热位移指示器，研究管子材料组织用的监测段，测量蠕变用的测点等。在某些情况下还应当设置运行维护和检修管道个别设备（监测段、附件等）用的平台及扶梯，当这些设备无法从其它构筑物的平台上进行维护时；安装管道外部保温层；管道内、外表面应采取防腐措施（例如，对于某些化学水处理管道、热网管道等）；配置与发电厂热力过程自动化有关的专用设备（自动阀门、远距离操纵杆，传感器等）。

根据输送介质的不同参数（压力和温度），厂用管道可分为两大类：高压管道和低压管道。火力发电厂的大多数管道属于苏联国家采矿技术监察委员会（Госгортехнадзор）管辖，其中某些管道必须在其地方机构中注册（见第八章）；部分管道虽然不属于苏联国家采矿技术监察委员会管辖，但同样要采用它的规程。为了使厂用管道的某些零部件统一化，并保证由它们的专业化工厂制造和供货，对于管道的主要零部件编制了各种专业标准：全苏标准（ОСТ）^①，部际标准（МБН）和专业标准（ОН），考虑到高压和低压管道的运行及供货条件不同，故分别为其制订和出版了专业标准。

所有厂用管道均应满足有关规程和标准（见参考文献）的要求，以及各种规定、技术条件、反事故通报及其标准化文件的要求。在管道中，应该根据厂用管道运行条件所允许的专业标准及苏联国家标准（ГОСТ）^②，最大限度地采用标准化零部件。

标准化文件、规程、ОСТ标准，ГОСТ标准和部际标准（МБН）都要进行定期检查、修订和再版。所以，在使用上述规程、标准时，应注意其批准年份，而不是出版年份（目的是检验这些文献的使用效果）。因此，从开始编制设计文件时起，就应该考虑对这些文件的要求。

① ОСТ标准，即全苏标准（旧标准），亦称苏联通用标准。——译注

② ГОСТ标准，即苏联国家标准（新标准）。——译注

1.2 管道荷载与变形

厂用管道本身要承受各种机械荷载和热荷载，既有流过管道介质的荷载，又有管道设备本身的各种荷载。管道应承受上述荷载，並保证能在其整个运行期间不致产生危险变形及损坏。此外，在某些情况下还会有动荷载（地震或振动荷载）作用到管道上；因为这些荷载非常特殊，所以关于动荷载对管道的影响，在本手册中不再讨论。

在管道整个运行时间中，有以下固定荷载作用到管道上：由输送介质的压力产生的荷载，此荷载沿管道长度分布并会引起管材产生拉伸变形；由管子输送介质及管道保温层（当有保温层时）的重量产生的荷载，此荷载同样是沿管道长度分布的；由管道阀门重量、支架反力、分支管等产生的荷载，这些荷载集中在它们的作用点上。上述荷载会引起管道材料产生

弯曲变形，而有时（取决于管道的形状）还会产生扭曲变形。图1-1示有管道及其支管示意图。

在闸阀和支管重量作用下，管道会产生弯曲。如图1-1所示，如果分支管道的方向不是向下，而是水平的（与图平面相垂直），则在其重量的作用下，支架B和B之间的主管道将会发生扭曲变形。

此外，还可能因管道热伸长，补偿器伸缩推力，支架摩擦力等所产生的补偿荷载。这些荷载会引起管道材料产生弯曲变形，而有时（取决于管道的形状）也会产生扭曲变形。扭曲变形通常发生在立体管道上。图1-2中以II型补偿器的工作为例列出了补偿荷载示意图。在管道热伸长情况下，补偿器的臂a和b相互弯曲。此外，在臂a上会产生由补偿器刚度引起的挤压力

$P_{\text{ж}}$ ，在支架A和B上还作用有由摩擦力 N_{TP} 引起的荷载，重量荷载 P_{a} 以及补偿器工作时产生的其它应力。由热伸长产生的荷载总是具有集中在端部某一点上的特性，并且还常作用在管道各个支管的“固定”支架上。

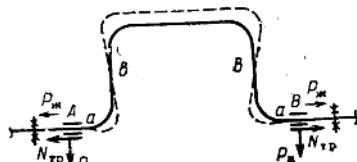


图 1-2 II型补偿器的补偿荷载示意图

某些管道可能只承受在安装或检修期间产生的临时荷载。属于这类荷载的有：例如，

管道水压试验时的荷载（如果没有设置承受这些荷载的专门设备时）。当管道投入运行时，由于受热不均匀支架卡得太紧或支架上摩擦力过大，也可能产生临时荷载。

由管道输送介质的压力产生的荷载属于内部荷载，所有其它荷载都是外部荷载。

因此，管道是在作用于不同方向并使管材产生复杂应力的一系列荷载作用下运行的。而在另外一些情况下，上述应力在输送介质的高温影响下，由于管材强度降低会变得更加严重。

管道长期承受上述荷载作用而不产生危险变形的能力，通常称为管道的强度。管道强度取决于各种因素，其中包括制造管子和管道零部件用的材料强度。

第二章 管道用钢

2.1 金属学概述

正如金属学所述,铁属于具有多种晶体形式的金属。一种金属(物质)以多种晶体形式存在,所以叫做**多晶结构**,或者叫做**同素异构**。一种物质的各种不同晶体形式叫做**多晶形态**,或者叫做**同素异构形态**。

在合金凝固之后,在完全确定的温度下,从一种形态转变为另一种形态(即所谓**同素异构变化**),这时的温度称为**临界点**。

金属具有晶体组织,其中原子分布在空间晶体的结点上。

金属晶格的特性取决于其温度。图2-1示出了纯铁的冷却曲线,其中指出了铁在不同温

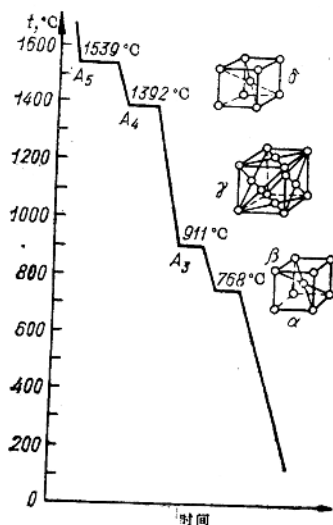


图 2-1 纯铁的冷却曲线

度下晶格的固有型式。在温度为 1539°C 情况下,在点 A_5 纯铁开始第一次结晶,结晶后纯铁凝固,形成体心立方晶格,除了在立方体结点的基本离子外,在其内部对角线交叉点上具有附加离子。在固态铁温度为 1392°C 情况下,在点 A_4 进行同素异构再结晶,同时它的晶格转变为面心立方晶格,并且在每个立方体的侧面对角线交叉点上具有附加离子(但没有内部离子)。在温度为 911°C 情况下,这种铁的晶格在点 A_3 重新转变为体心立方晶格,这种晶格结构将一直保持到冷却达最低温度情况下。在铁的温度为 768°C 情况下,其中只是磁的性能发生变化,而不改变晶格的型式(当温度 $t > 768^\circ\text{C}$ 时铁不带磁性,当 $t < 768^\circ\text{C}$ 时则具有磁性)。

金属的组织结构温度在 $0 \sim 768^\circ\text{C}$ 之间时,称为 α 铁,在 $768 \sim 911^\circ\text{C}$ 之间时称为 β 铁,在 $911 \sim 1392^\circ\text{C}$ 之间时称为 γ 铁,在 $1392 \sim 1539^\circ\text{C}$ 之间时称为 δ 铁。

因为 α 、 β 及 δ 铁具有相同的晶体结构,所以在金属学里通常只研究两种主要的结晶形式(或相),这就是 α 铁和 γ 铁。

除了在晶体结构上的差别外, α 铁与 γ 铁的区别在于 α 铁本身几乎不能溶解碳,而 γ 铁能溶解大量的碳。但是,无论 α 铁或 γ 铁,本身都能溶解其它元素。在铁同碳熔合时所获得的合金,可形成化学化合物、固溶体及机械混合物。在铁碳合金中临界点的位置随碳的含量而变化。此外,合金的凝固(或熔合)和由一种形式到另一种形式的同素异构转变,不是在一个

给定的温度点，象纯铁一样，而是在某一温度区间内进行。

由于铁碳合金结晶，在冷却后所形成的固态金属中，可能产生以下碳铁结合特性互不相同并具有不同微观组织的金相：

渗碳体（铁的碳化物） 碳同铁的化合物；

铁素体 碳（少量）和其它元素在 α 铁中的固溶体；

奥氏体 碳和其它元素在 γ 型铁中的固溶体；

珠光体 渗碳体同铁素体的共晶混合物（两种形式或两种以上由液体同时结晶而成的晶体机械混合物，称为共晶混合物）；

莱氏体 奥氏体和渗碳体的共晶混合物。

制造管道用的最好结构材料是钢合金——机械混合物，因为钢合金的内部结晶结合水平相当高，所以这些材料具有足够的强度，便于铸造、焊接及机械加工；价格不贵，并且在长时间高温作用下机械性能有足够的稳定性。

对于厂用管道，采用最广泛的是碳钢和低合金钢——珠光体级机械混合物。此外，还应用高合金的单相钢——奥氏体级固溶体。

图 2-2 为含碳量从 0 ~ 2.14% 的铁碳合金状态图，图中指出了在不同温度区域上述金相的特征曲线。在 ABC 线（液相线）以上，金属属于液体状态，而在 AHJEC 线（固相线）

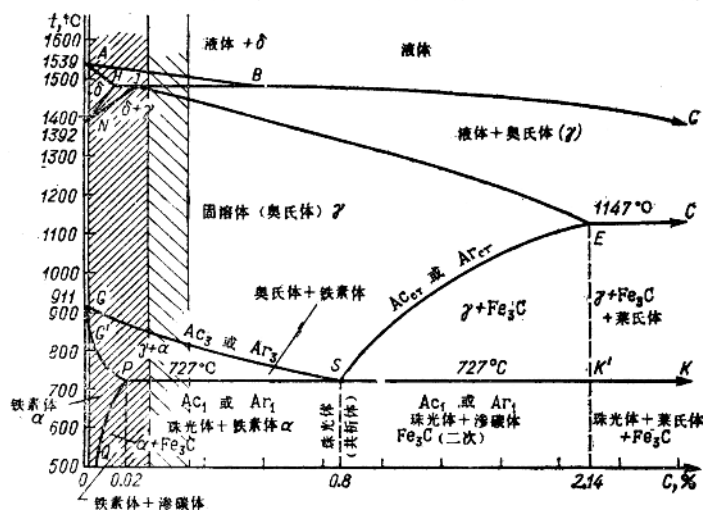


图 2-2 含碳量从 0 ~ 2% 的铁碳合金状态图

以下，金属处于固态。CBAHJEC 所围成的区域是在冷却条件下在液态金属中沉淀出固相晶粒的一次结晶区。当钢中含碳量从 0 ~ 2.14% 时，在 NJE 线以下金属具有纯奥氏体组织。在 GS 线上，钢中含碳量 $C > 0.8\%$ 时，奥氏体开始向渗碳体进行多晶结构（同素异构）转变。在 $G'PSK'$ 线上所指出的奥氏体分解现象结束，含碳量 $C = 0 \sim 0.01\%$ 的钢变为纯铁素体；而

含碳量 $C=0.02\% \sim 0.8\%$ 的钢则转变为铁素体和珠光体的机械混合物。当含碳量 $C=0.8\%$ 时, 钢的奥氏体转变为纯珠光体, 而当含碳量 $C>0.8\%$ 时, 钢转变为珠光体和渗碳体的机械混合物。如进一步冷却时, 钢中纯铁素体的边界迁移到含碳量 $C=0.01\%$ 的区域(Q 点)。

当 $t=727^{\circ}\text{C}$ 时, 含碳量 $C=0.8\%$ 的钢转变为纯珠光体, 又称为共析钢; 含碳量低的钢, 在图中 $GSPG'$ 范围内变为珠光体和铁素体的混合物, 又称为亚共析钢。含碳量 $C>0.8\%$ 的钢, 在 ESK' 范围内转变为珠光体和铁素体的混合物, 则称为过共析钢。

由于许多原因, 管道用钢的含碳量限制在 $0.2\% \sim 0.27\%$ 范围内, 因此在图2-2中, 按含碳量不同, 将管道用钢的范围用阴影线分出, 并且以较少的阴影线将制造管子的用钢范围划出。

在图2-2中还标出了钢的相转变温度的临界点, 其符号如下: Ac_1 或者 Ar_1 , 即 PSK' 线, 此线相应为奥氏体钢冷却时结束分解成机械混合物的时间, 或钢加热时在奥氏体中开始熔解混合物的时间。 Ac_{cT} 或者 Ar_{cT} , 即 SE 线, 此线相应为过共析钢冷却时奥氏体钢向渗碳体进行同素异构转变的开始时间, 或者为这些钢加热时奥氏体钢中渗碳体熔解的结束时间。 Ac_3 或者 Ar_3 , 即 GS 线, 此线为亚共析钢冷却时奥氏体向铁素体进行多晶结构(同素异构)分解开始的时间, 或者加热时奥氏体钢中 α 相熔解结束的时间。

无论哪一种合金, 根据加热或冷却的不同, 其临界点中的每一个点都在 $30 \sim 60^{\circ}\text{C}$ 之间移动。这种现象称为钢的热滞。为了按照不同热力过程区分临界点, 其符号用补充的字母表示, c ——用于钢加热时, r ——用于钢冷却时。

关于金相转变问题, 在铁碳钢中还应指出一种现象, 即在上述转变过程中所产生的晶粒大小的变化。例如, 在临界点以上的亚共析钢加热时, 铁素体和珠光体会转变为奥氏体的固熔体, 同时, α 铁与 γ 铁产生原子晶格的再结晶。这时, 随着经过临界点 Ac_1 和 Ac_3 的转变过程, 会形成新的很小的奥氏体晶粒, 与处于原始状态的铁素体和珠光体晶粒大小无关。因此, 当加热到临界点 Ac_3 时, 钢可得到同质微晶组织。随着温度的进一步升高, 奥氏体晶粒便开始增长, 温度愈高或者在给定温度下持续时间愈长, 晶粒增长愈快。当钢冷却到室温时, 晶粒的大小实际上不再发生变化, 因为奥氏体分解时所形成的铁素体和珠光体保持着原来奥氏体晶粒的形状和大小。

晶粒的大小是关于钢的质量和性能的很重要的特性。

因此, 铁中存在同素异构转变和铁碳合金组织对于冷却速度具有很大的灵敏度, 这些是基本因素。由于这些基本因素, 在适当的(热处理)温度下, 通过相应改变冷却(加热)温度以及加热和均热(保温)速度的方法, 可以得到各种不同的钢组织, 因此能够给钢增添所要求的性能。

按照钢本身的组织结构可分为:

珠光体钢 在一般缓慢冷却情况下, 根据含碳量的多少, 其组织结构系由铁素体同珠光体, 一种珠光体, 或者珠光体同渗碳体所组成。

奥氏体钢 即便在室温条件下也能够保持奥氏体的稳定组织。

铁素体钢 其组织结构由铁素体和在钢凝固情况下所形成的一次碳化物组成。

马氏体钢 具有特别明显的马氏体组织。马氏体钢通常不应用于管道。

2.2 合金钢

2.2.1 概述

钢的元素组成中除了铁和碳以外,还含有专门加入的其它元素时,这种钢称为合金钢。所加入的这些合金元素可使钢增添所要求的性能。合金中所有合金成份的总含量,称为合金度。

根据配制合金钢的不同合金度,合金钢可分为以下几种:低合金钢——合金成分的总含量在2.5%以下;中合金钢——合金成分的总含量为2.5%~10%;高合金钢——合金成分的总含量在10%以上。

加入合金的优点是:可以不采用热处理,而采用加入合金元素来增强铁素体,以提高钢的强度;用增加奥氏体稳定性的方法来提高钢的硬度、强度及冲击韧性;给钢增添特殊的性能,对于管道用钢来说,可增加耐热强度和热稳定性。这些性能可通过正确选择和钢中同时加入多种合金元素来达到。因此,耐热强度最大的钢合金都是由多种成分或是复杂成分组成的,这些合金的耐热性能靠加入钢中所有元素的共同作用来保证。

珠光体钢加合金元素的目的,是为了通过加入钼来增强 α 固溶体的基本相,钼在铁中形成置换固溶体,在最高温度范围内可提高晶质的结合能力,从而提高钢的热强性。必须指出,在长期高温作用下,钢中的钼以及碳会从固溶体中分离出来。为了消除这种现象,在钢中加入一些补充的合金元素,如钒、硼、铌、钨等。为了增强热稳定性,在这些钢中增添铬,即使加入数量不多也能在一定程度上稳定锰的作用,同时可提高热强效应。

12X1MΦ、15X1M1Φ、12X2MΦCP等型号的铬钼钒钢,可作为多种合金的珠光体管道用钢的例子。

奥氏体钢加合金元素的目的,是为了从开始分解至冷却到最低温度都能保持 γ 固溶体的组织。保证在管道用钢中维持奥氏体组织的主要元素是镍,镍在高温下产生的氧化作用,可被抗氧化的铬所中和。必须指出,这种效果只能在上述元素含量非常大的情况下才能达到。因此,奥氏体级管道钢的主要类型是高合金铬镍钢,其合金元素的总含量达30%及以上。

为了预防晶间腐蚀和由铬镍奥氏体钢制作的管道上发生裂纹,对这些钢,要补充加入钛、钨、铌等合金元素。

同珠光体比较,奥氏体钢的优点是:可以提高热强性,热稳定性较高,对于过热的敏感性低,焊接性能比较理想。但是这种钢还有一些不利的性能,如稀缺元素(特别是镍)的含量很高,价格也很贵;在热传导性较低的情况下,线膨胀温度系数高,加热时会引起内应力,并且在室温情况下塑性较低;由于在加热时没有相转变,所以不可能用热处理的方法提高钢的强度(离散硬钢除外);某些型号的铬镍奥氏体钢,在工作过程中容易产生裂纹。此外,由于韧性较高,所以奥氏体钢的机械加工比较困难。

2.2.2 合金元素对钢性能的影响及钢中的有害成分

钼(Mo)能使钢中 γ 相区缩小,促使奥氏体分解。在钢熔化过程中,钼进入固溶体,加强了晶内的结合能量(即亲和力)。钼具有很高的再结晶温度,并能提高整个合金的温

度。钼是管道用钢最有效的强化剂，能提高钢的热强性。在长时间加热情况下，可提高钢的塑性，并具有降低其热脆性的倾向。在钢加热情况下，钼由固溶体扩散出来，在固溶体外形成价值不大的碳化钼 (Mo_2C) 组织，因而在长时间加热时会使钢强度降低。然后，这些碳化物凝聚成较大的生成物，这些生成物最后可分解为各种组成部分(其中包括石墨)。根据分解后的情况，可以认为，纯钼就是钢的石墨剂。为了不让固溶体外形成钼的碳化物，除了钼之外可在合金中加入其它活性更强的碳化物生成剂(钨、硼、铌等)。这些活性很强的碳化物生成剂，可同钢中的游离碳相结合生成各自的碳化物，从而耗尽了生成碳化钼所必需的游离碳迫使游离碳进入固溶体中。在含钼量为0.5%~1%时，可保证钢具有最好的性能，但是当钢中同时加入其它合金元素时，其强化作用还可以增大。当含钼量达0.5%时，钢的焊接性能会有某些提高，而当含量为0.5%~1%情况下，在进行钢的焊接时，必须采用同时加热(或预热)的方法。钼是不抗氧化的。

钒(V) 能使钢中 γ 相区缩小，促使在冷却条件下钢中奥氏体的分解。当钒进入固溶体时，会减弱晶内的结合能力，因而可使钢的强度减弱。但是，钒是活性很强的碳化物生成剂，它在钢中实际上能同全部游离碳相结合，从而使活性较弱的其他碳化物生成剂不再生成碳化物相。热处理可使钒钢中析出钒的碳化物微粒，这些碳化物微粒作为补充强化相，在500~600℃及更高的温度和长时间工作情况下，会造成分散凝固的条件。钒作为钢的热强性能有效的稳定剂，可限制钢的石墨化。在含钒量为0.25%~0.35%时，可保证钢具有较高的机械性能；在此含量下，钒还可提高钢的焊接性。纯钒的抗氧化性很低。

铬(Cr) 铬使钢中 γ 相区缩小，促使其中的奥氏体分解。由于铬具有很高的再结晶温度，所以可提高整个合金的温度。此外，当铬含量达1.5%时，还可提高一些钢的热强性。铬可构成许多种碳化物，但是这些碳化物倾向于在铁素体中溶解，溶解后上述铬的碳化物的强化作用不复存在了。铬是特别有效的脱氧剂，它实际上能把所有游离氧都结合成氧化物，无论在低温或是高温情况下，均可保证钢具有较高的抗腐蚀性能和热稳定性(抗氧化性)。当钢的含铬量为 $\text{Cr} \geq 5\% \sim 8\%$ 时，即变为不锈钢。铬在金属表面上形成坚固的氧化薄膜，可防止钢进一步氧化(腐蚀)，但会使钢的焊接困难，所以必须对焊接接头采用预先和同时加热，并需要对焊缝进行特别仔细的热处理。铬含量较大时(当有钼存在时)，铬还是防石墨化的合金元素。

镍(Ni) 镍是钢中 γ 相的强烈扩张剂。它还是奥氏体钢有效的稳定剂(它作为合金元素的主要用途就在于此)，在钢中可维持奥氏体相到最低温度。通过合金化处理，在含镍量为25%情况下，可保证钢中的奥氏体组织；同时加入其它合金元素(例如，铬)时，镍的消耗量可减少一半。镍对奥氏体组织热强性的影响只是间接的，在钢中可以建立热强性最高的奥氏体组织。镍还是一种石墨化剂，可提高钢的韧性并改善其焊接性能；镍倾向于氧化，当同铬同时存在时可促使产生热脆性。

钛(Ti) 这是钢中 γ 相的强烈限制剂和强有力的碳化剂，可构成高稳定性的碳化物——碳化钛(TiC)，实际上在管道所有工作温度下均能保证其稳定性。钛在钢中还会形成一系列微粒金属化合物(钛合金)，钛在珠光体钢中可建立分散凝固条件。在奥氏体钢中，钛在碳化物中可将合金的游离碳结合起来，大大降低钢晶间腐蚀的倾向。钛在增加铬镍钼的稳定性以消除上述缺点的同时，还可以稍许提高各种钢的热强性。钛能改善钢的焊接性。

钴 (Co) 钴对于钢中 γ 相无关紧要, 不形成碳化物。在钢中钴同铁熔合时可形成固溶体, 但是这时对于珠光体钢, 可提高碳的扩散速度, 而对于奥氏体钢其速度会下降, 因此, 奥氏体钢晶内结合能量(亲和力)会增加。钴是奥氏体钢的有效强化剂, 特别是在奥氏体钢中存在其它能引起分散凝固的合金元素的情况下。钴对于珠光体钢的热强性(当没有其它元素共同作用的条件下)没有影响。对于珠光体钢的石墨化关系极小。钴可提高钢的抗氧化性, 但使焊接工艺过程变得困难些, 并且在热影响区内会引起钢的强度降低。在管道用钢合金化处理中, 钴是最少采用的合金元素。

硼 (B) 硼使钢中 γ 相区扩大, 预防奥氏体分解。硼同其它元素一起在钢中形成固溶体, 而在奥氏体钢中还有许多可促使奥氏体钢中产生分散凝固作用的金属化合物(硼化物)。硼具有很高的再结晶温度; 在钢中加入其它元素情况下, 硼还是各种钢的强化剂。此外, 硼会使钢在焊接上产生困难; 而加入硼的数量在0.006%~0.1%以上时, 在其焊接时会形成易熔的共晶体, 使得这种钢难于利用压力进行热加工。在管道用钢中, 硼的最大极限含量通常不超过0.005%。

钨 (W) 钨使钢中 γ 相区缩小, 促使奥氏体分解。它是有效的碳化物生成剂, 在钢中形成难熔化的碳化物 W_2C 以及金属化合物(铁的钨化物 Fe_3W_2 , Fe_3W 等), 从而促使在钨钢中产生分散凝固过程。钨能促使钼从碳化物相中排出; 例如, 在由钼和钨炼制的合金钢中, 在有钨存在的情况下, 大部分钼在铁中转变为固溶体。钨的再结晶温度很高, 它在高温下是钢的有效强化剂。由于对钢的上述作用, 钨可大大提高珠光体钢的热强性。在以铬镍合金为基础的奥氏体合金中, 钨可通过稳定金相组织和提高对产生晶间腐蚀阻力的方法, 提高奥氏体合金的热强性。钨是不抗氧化的, 由于它容易氧化, 所以在焊接时对金属熔合区应加以保护, 防止同空气中的氧接触(例如, 在保护性气体介质中进行焊接)。

铌 (Nb) 铌使钢中 γ 相区大大缩小, 并促使奥氏体分解。铌可形成难熔的碳化物和金属化合物, 使含铌的合金钢能通过碳化物和金属化合物的分散凝固来提高热强性。但是含铌钢的这种强化特性会使金属在焊接时在热影响区产生脆性, 从而使焊接变得复杂化, 并对焊接点的热处理提出更高的要求。在热处理以后, 铌可提高钢的塑性, 但是会使钢的强度有所降低。铌是铬镍奥氏体钢和复杂珠光体合金钢的有效稳定剂。由于铌的再结晶温度高, 所以它又是钢在高温情况下的有效强化剂。

硅 (Si) 硅使钢中 γ 相区缩小, 促使奥氏体分解。它不形成碳化物, 也不提高钢的热强性, 但是对抗氧化性具有良好的影响, 在这方面不次于铬和钼的影响。硅是钢在冶炼中非常有效的脱氧剂, 并能防止氧化腐蚀, 是钢性能的有效稳定剂。硅的含量在0.3%以下时, 不影响钢的焊接质量; 含硅量过大时, 会在焊接接头形成难熔化的脆性氧化物, 由于非金属夹杂物使焊缝金属变脆, 从而会降低焊接强度。

锰 (Mn) 特别是当有铬的情况下, 锰可使钢中 γ 相区扩大(在低温情况下含有15%的锰和15%的铬时, 可保证钢的奥氏体组织)。当钢熔化时, 锰进入固溶体, 可加强晶内的结合能量, 但是由于再结晶温度不高, 所以对钢的热强性几乎没有影响。在温度较低(约300℃)的情况下, 锰对钢的影响更有价值, 这时锰可大大提高钢的强度和屈服极限。但是, 锰可促使钢产生热脆性, 因此, 对于在高温情况下工作的珠光体钢和奥氏体管道钢, 均不应用锰元素进行合金化处理。锰是钢的有效脱氧剂, 并且由于锰具有把从钢中容易分离出来

的化合物同硫结合的能力，所以锰也是脱硫剂。锰的抗氧化性能也不高。

氧 (O_2)、氢 (H_2)、一氧化碳 (CO)、二氧化碳 (CO_2)、甲烷 (CH_4) 及其它气体 在熔炼时由空气或者水蒸汽中进入钢中的这些气体是最有害的杂质，可以引起一系列的缺陷（气泡，氧化薄膜，白点等），会使钢中产生各种腐蚀作用。

氮 (N_2) 在熔炼时氮由吹入炉中的空气进入钢中，使钢中 γ 相区扩大，因而在熔炼奥氏体钢时，可置换少量的镍。在钢中由氮所产生的强化相，即是少量分散的氮化物。由于氮在钢中具有产生表面硬化的倾向，所以对于管道用钢的合金化，不予采用，并且是一种有害的杂质。

硫 (S)、磷 (P) 这两种元素由矿石进入钢中，并且对于管道用钢来说，是非常有害的杂质；磷会产生冷脆性，硫会产生热脆性。硫和磷会给钢的铸造和机械加工造成困难。

2.3 钢的热处理

2.3.1 概述

大多数现代复杂合金的管道用钢都属于所谓热优质合金，即属于用专门热处理方法使其具有比由化学成分决定的热强性更高水平的金属。钢的热处理是基于利用金属组织的同素异构转变，在固态钢中通过加热或冷却来进行。

珠光体管道用钢热处理的主要方法，是通过加热将钢的珠光体组织全部或部分地转变为奥氏体组织。这时，碳由钢的铁素体中出来进入金属的 γ 晶格，并在适当的温度下，在晶格中可维持钢的整个使用过程。在奥氏体钢冷却情况下，由于 γ 铁中碳的溶解性比在 α 铁中大（超过 α 晶格中的溶解极限），所以部分碳重新从 γ 固溶体中分解出来，然后转化为铁素体。在钢缓慢冷却情况下，这种碳还可以从奥氏体中出来，从而在钢中进行了所谓奥氏体的珠光体（铁素体）转变。在金属快速冷却情况下，碳从 γ 相中出来的扩散速度，对于其中分离出过剩的碳是不够的，结果，钢的奥氏体转变为铁素体时含有过剩的碳（同自然溶解极限相比）。在 α 铁中碳的过饱和固溶体，称为马氏体钢。这样，对加热到奥氏体状态的钢，通过快速冷却，在其中便发生了奥氏体的马氏体转变。

在钢中马氏体的转变只发生在一定温度范围 M_s-M_f 内（这里 M 和 M_s 分别代表形成马氏体的开始温度和结束温度），并且通常有包括合金中奥氏体的全部质量；因此，在马氏体化的钢中，除了马氏体以外，还可能包含不同数量剩余的奥氏体、铁素体、珠光体等。这样，在加热的珠光体钢缓慢冷却情况下，可均衡并改善钢的成分和组织，提高晶体的均质性，细化晶粒，使合金元素的分配稳定。钢在快速冷却情况下，会产生马氏体的不稳定组织，对钢的组织成分并不进行均质处理。

奥氏体钢进行热处理时，热影响在不会引起基本相 γ 组织发生变化的范围内进行。但是，在这些钢加热和在加热温度下维持均热过程中，钢的组织结构可达到平衡，并使合金中补充强化相的分配达到稳定。

进行钢的热处理的目的是，为了减少金属在用压力方法加工过程中所产生的应力；消除钢在冷加工过程中产生的硬化作用；建立钢的均质组织，以保证钢具有较高的机械性能和较