

超(超)临界机组 焊接技术与工艺评定

张磊 陈媛 韩旻 单志栩 王德坚 张雪然 等 合编
王秀军 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

要 要 容 内

超(超)临界机组 焊接技术与工艺评定

张磊 陈媛 韩旻 单志栩 王德坚 张雪然 等 合编
王秀军 主审

ISBN 978-7-5121-0213-3
I. ①超... II. 张... III. 超(超)临界机组-焊接技术 IV. TM621.3
中国电力出版社 2014.3
北京

ISBN 978-7-5121-0213-3
I. ①超... II. 张... III. 超(超)临界机组-焊接技术 IV. TM621.3
中国电力出版社 2014.3
北京

ISBN 978-7-5121-0213-3
I. ①超... II. 张... III. 超(超)临界机组-焊接技术 IV. TM621.3
中国电力出版社 2014.3
北京

ISBN 978-7-5121-0213-3
I. ①超... II. 张... III. 超(超)临界机组-焊接技术 IV. TM621.3
中国电力出版社 2014.3
北京

TM621.3

39



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

014032282

内 容 提 要

本书主要围绕大型火电机组金属材料及相应焊接知识展开介绍, 主要内容包括电厂合金材料和热处理的基础知识、电厂压力容器焊接知识、超(超)临界机组承压部件新型耐热钢、超(超)临界机组锅炉新型耐热钢的焊接、电厂主要承压部件的失效分析、焊接工艺评定、焊接缺陷与检验。

本书可以作为超(超)临界机组耐热材料焊接技术培训辅助教材使用, 也可以作为从事超(超)临界机组设计、制造、监督管理、安装、检修管理及相关技术人员学习的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

超(超)临界机组焊接技术与工艺评定/张磊等编. —北京:
中国电力出版社, 2014. 3

ISBN 978-7-5123-5379-4

I. ①超… II. ①张… III. ①火力发电-发电机-机组-焊接
工艺 IV. ①TM621. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 309921 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 3 月第一版 2014 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14 印张 332 千字

印数 0001—3000 册 定价 40.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

超(超)临界发电机组与亚临界发电机组从技术上相比最重要的就是使用了先进的耐热性能更强的金属材料。设备焊口质量的优劣,直接影响机组安装质量,甚至能影响机组的运行效果。提高现场焊接质量,加强焊接人员培训、焊接工艺实施、焊接工艺纪律、焊接材料的管理、焊接设备和跟踪检验等环节的质量控制,是提高机组安装单位现场管理能力与质量控制能力的关键,是确保机组现场焊接质量的重要环节。

本书主要围绕大型火电机组金属材料及相应焊接知识展开介绍,立足于实用性,前四章主要介绍了电厂中常用的金属材料相关知识及其焊接技术,以及目前正在快速发展的超(超)临界机组中所涉及的金属材料及其焊接;第五章有针对性地介绍了电厂主要承压部件常见的失效形式,分析失效产生的原因;第六章、第七章则系统地介绍了焊接技术,包括焊接前工艺评定的制作、焊接常见的缺陷及焊接终端焊接缺陷的检验。

本书由国网技术学院张磊、陈媛、韩旸、王德坚、张雪然、廉根宽、侯钦鹏、夏洪亮,北京京能国际能源股份有限公司单志翔,天津电力建设公司赵中正,国家电网公司刘华东合编。

全书由国网技术学院王秀军担任主审。

限于编者知识水平,书中不妥与疏漏之处在所难免,望读者给予批评指正。

编者

2013年12月

目 录

前言	1
第一章 电厂合金材料和热处理的基础知识	1
第一节 耐热钢	1
第二节 热处理	11
第二章 电厂压力容器焊接知识	22
第一节 电厂锅炉压力容器焊接材料及其选用	22
第二节 焊接接头的组织和性能	34
第三节 焊接应力与变形	40
第四节 电厂锅炉常用钢材的焊接	46
第三章 超(超)临界机组承压部件新型耐热钢	57
第一节 超(超)临界机组承压部件材料的发展	58
第二节 超(超)临界机组承压部件材料性能及应用	68
第三节 超(超)临界机组关键承压部件材料分析选用	81
第四章 超(超)临界机组锅炉新型耐热钢的焊接	104
第一节 新型马氏体耐热钢的焊接	104
第二节 新型奥氏体耐热钢的焊接	108
第三节 新型铁素体耐热钢的焊接	123
第四节 我国火力发电厂焊接技术发展中需要研究的若干问题	141
第五章 电厂主要承压部件的失效分析	146
第一节 锅炉运行基本工况	146
第二节 失效分析的意义和作用	147
第三节 电厂主要部件的失效类型	150
第四节 火电机组主要部件失效案例分析	160
第六章 焊接工艺评定	180
第七章 焊接缺陷与检验	193
第一节 焊接缺陷处理	193
第二节 焊接检验	199
参考文献	217

第一章

电厂合金材料和热处理的基础知识

第一节 耐热钢

钢在高温下能够保持化学稳定性(耐腐蚀、不起皮)的品质,叫做钢的热稳定性;钢在高温下具有足够强度的品质,叫做钢的热强性,具有热稳定性和热强性的钢,称为耐热钢。

火力发电厂热力设备中很多零部件是在高温、高压和腐蚀介质中长期工作的。因此,这些零部件需用耐热钢制造。此外,耐热钢还用来制造汽车和飞机发动机的排气阀、化学热处理设备中的耐热构件等。

一、耐热钢的高温性能

(一) 高温对钢材强度的影响

钢材的工作温度超过某一温度后,钢的抗拉强度 R_m 要降低;钢材在高温下使用的时间越长,其强度极限也会越低。

铁及其合金在 $200\sim 300^\circ\text{C}$ 时的强度比室温时高,其脆性也比室温时大,这种现象称为蓝脆。

从图 1-1 中还可以看出, 350°C 以上时抗拉强度逐渐下降,强度曲线分为两根,上面的一根为快速试验时的强度曲线,下面的一根为缓慢试验时的强度曲线。

应力超过上面的曲线时,试样就断裂;应力低于下面的曲线时,一般认为试样不会发生断裂;应力位于两根曲线之间时,试样断裂需经过一定的时间。应力越接近上面的曲线,试样断裂所经历的时间越短。

金属的强度是由晶内强度(晶粒内原子的引力)和晶界强度(晶界的结合力)两部分组成。

常温下晶界强度大于晶内强度,这是因为晶界的原子排列不规则,而且晶体缺陷又较多,从而具有较大的抗变形能力,金属的破坏总是带有金属内破坏(穿晶破坏)的特点。

随着温度的升高,晶内强度和晶界强度都将下降。但晶界的原子比晶内的原子更不稳定,晶界的缺点又比晶内的多,在较高温度下原子的扩散速度就大,因此晶界强度的下降速度就快。到达某一温度后,晶界强度就低于晶内强度,如图 1-2 所示。

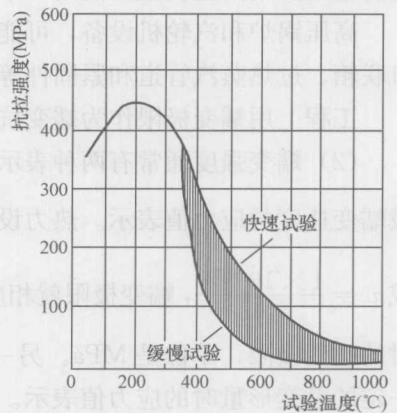


图 1-1 工业纯铁的强度极限与试验温度的关系

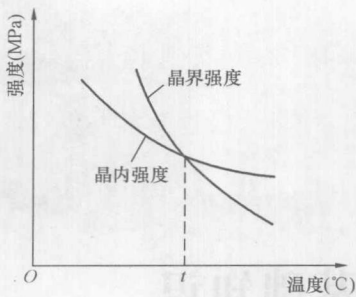


图 1-2 温度对晶内强度及晶界强度的影响

晶内强度与晶界强度相等的温度，称为等强度温度（等强度）。如果工作温度超过等强度温度，钢材的破坏形式就开始转为晶粒之间的破坏（沿晶破坏），即在晶界处因晶粒之间的相对滑移而产生裂纹，然后裂纹沿晶界扩展，导致脆性断裂。

等强度温度与载荷速度（形变速度）等因素有关。等强度温度随着载荷速度的降低而下降。在热力设备中，有些零部件是在高温和应力的长期作用下（相当于载荷速度很小的情况下）工作的，钢材的破坏往往属于晶粒间的脆性断裂。在高速载荷下，如短期超温爆管（相当于冲击或

短时拉伸），等强度温度就比较高，又会产生晶内（穿晶）塑性断裂的形式。

钢在常温下和高温下的断裂形式不同，说明温度对晶内强度和晶界强度的影响不同，这也意味着晶粒的大小对钢材强度的影响与温度密切相关。在常温下细晶粒对强度有利，而高温时（超过等强度温度）晶粒粗一些对强度有利。

（二）常见金属材料的高温性能指标

1. 蠕变强度

（1）蠕变的概念。金属在一定的温度和应力的作用下，随着时间的增加，缓慢地发生塑性变形的现象，称为蠕变。某些低熔点的金属（如铅、锡等）在室温下也会发生蠕变。碳钢当温度超过 350°C 时、低合金钢当温度超过 350~400°C 时，在应力的长期作用下都有蠕变现象。

温度越高，应力越大，蠕变的速度也就越快。蠕变的形变量，叫做蠕胀。

蠕变现象严重会造成管壁减薄，甚至引起爆管，因此，抗蠕变能力的大小（蠕变极限）是衡量耐热钢高温机械性能的一个重要技术指标。

高压锅炉和汽轮机设备，可能引起蠕变的零部件很多，例如蒸汽过热器的蛇形管及其出口联箱、过热蒸汽管道和紧固件等。

工程上用蠕变极限作为蠕变抗力的技术指标。

（2）蠕变强度通常有两种表示方法。一种方法是用一定的工作温度下引起规定的第二阶段蠕变速度的应力值表示。热力设备零部件用钢中规定的蠕变速度，一种是 $v = \frac{1 \times 10^{-4} \%}{h}$

或 $v = \frac{1 \times 10^{-5} \%}{h}$ ，蠕变极限就相应写成 $\sigma_{1 \times 10^{-5}}$ 或 $\sigma_{1 \times 10^{-4}}$ ，有时也用 $\sigma_{10^{-5}}^t$ 或 $\sigma_{10^{-4}}^t$ 表示在温度 t

时的蠕变极限，单位是 MPa。另一种是用一定工作温度，在规定的工作时间内，钢材发生一定的总变形量时的应力值表示。热力设备零部件用钢中规定的工作时间约为 12 年，总变形量 1% 蠕变极限就写成 $\sigma_{1/10^5}^t$ 。有时也用 $\sigma_{1 \times 10^{-5}}^t$ 表示在温度 t 时的蠕变极限。

2. 持久强度

在高温下对钢材进行长时间的拉伸试验，其断裂时的应力值，叫做持久强度。锅炉管子材料是以 10^5 h 断裂的应力值作为持久强度，单位是 MPa。

持久强度表示钢材在高温和应力长期作用下抵抗断裂的能力，其数值越大，说明使之断裂所需的外力越大，即钢材在高温时能够承受外力的能力越大。持久强度是耐热钢高温强度

计算的依据，也是选用锅炉和汽轮机零部件用钢的重要技术指标。

由于 10^5 h 是个相当长的时间，钢材的高温持久试验一般不可能真正进行到 10^5 h，通常只试验到 5000~10 000h，再外推到 10^5 h 的断裂应力值，如图 1-3 所示。

3. 应力松弛

零件在高温和应力作用下，随着时间的增长，总的变形量不变，应力值却在缓慢地降低，这种现象称为应力松弛，简称松弛。

在应力松弛的过程中，应力是逐渐下降的变量，总变形量虽然没有变化，但是其弹性变形量却在逐渐地向塑性变形量转化。

应力松弛现象可用应力松弛曲线进行分析，如图 1-4 所示。

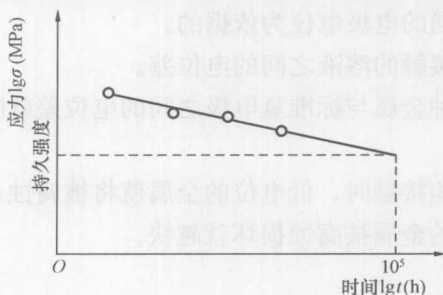


图 1-3 持久强度曲线图

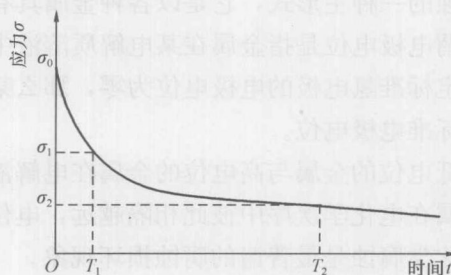


图 1-4 应力松弛曲线图

锅炉、汽轮机和燃汽轮机中的许多零件，如紧固件、弹簧、汽封、弹簧片等，会产生应力松弛现象，当这些零件应力松弛到一定程度后，就会影响设备的安全可靠性。

在相同的温度和初应力的条件下，钢材的剩余应力值越高，表明该钢材的抗松弛稳定性越好。剩余应力的大小与温度或初应力关系很大，温度越高或初应力越大，剩余应力就越小。钢材的抗松弛稳定性是选用高温状态下的弹簧及紧固件等零部件材料的技术指标之一，金属材料的高温性能还有热疲劳和热脆性。

二、耐热钢的化学稳定性

火力发电厂热力设备用钢不仅要满足热强性的要求，还需要具有较高的化学稳定性，即腐蚀性能。

锅炉设备中过热器管和水冷壁管等受热面管子，在运行过程中其外壁直接与高温火焰和具有腐蚀性的烟气相接触，其内壁与汽、水相接触，因而受热面管子会产生腐蚀现象。

汽轮机中的许多零部件也是在与腐蚀性介质相接触的条件下长期运行的，也有一个腐蚀的问题。特别是汽轮机叶片，工作时转速很高，又与蒸汽介质直接接触，不仅要受到蒸汽的锈蚀和冲蚀，还可能产生应力腐蚀和腐蚀疲劳，引起损坏。在设计选用热力设备零部件用钢时，除要考虑钢材高温强度外，还必须考虑钢材的耐腐蚀性能。

根据大量的实践规定：在大气及弱腐蚀性介质中，腐蚀速度小于 0.1mm/a 为“耐蚀”，小于 0.01mm/a 为“完全耐蚀”；在强腐蚀性介质中，腐蚀速度小于 1mm/a 为“耐蚀”，小于 0.1mm/a 为“完全耐蚀”。

(一) 腐蚀的原理

按照腐蚀的原理，金属的腐蚀可以分为化学腐蚀和电化学腐蚀。

1. 化学腐蚀

金属直接与介质发生氧化或还原反应而引起的腐蚀损坏,称为化学腐蚀。过程中不产生电流,而单纯起化学作用。

例如,锅炉受热面管子在与高温烟气、水、蒸汽接触的过程中,对金属表面产生强烈的氧化作用。腐蚀结果使铁变成铁的氧化物或氢氧化物,从而失去金属性质。

有些腐蚀产物能起保护作用,可以减缓化学腐蚀的速度,阻止继续产生化学腐蚀。这是化学腐蚀的极其重要的特征。

2. 电化学腐蚀

金属与电解质相接触时,有电流出现的腐蚀损坏过程,称为电化学腐蚀。电化学腐蚀是金属腐蚀的一种主形式,它是各种金属具有不同的电极电位为依据的。

所谓电极电位是指金属在某电解质溶液中与接触的溶液之间的电位差。

假定标准氢电极的电极电位为零,那么某一种金属与标准氢电极之间的电位差就叫做该金属的标准电极电位。

当低电位的金属与高电位的金属在电解液中相接触时,低电位的金属就将被腐蚀,而且这些金属在电化学次序中彼此相隔越远,电位低的金属被腐蚀损坏就越快。

电化学腐蚀是最普遍的腐蚀损坏现象。

(二) 腐蚀损坏的形式

腐蚀损坏的形式一般可分均匀腐蚀和局部腐蚀。图 1-5 为几种腐蚀形式的示意图。

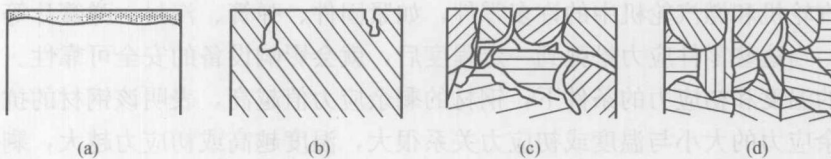


图 1-5 腐蚀形式示意图

(a) 均匀腐蚀; (b) 点腐蚀; (c) 晶间腐蚀; (d) 穿晶腐蚀

点腐蚀的产生是由于金属的表面缺陷(裂纹、折叠)及疏松、夹杂等引起的。点腐蚀一般是在不同的区域内产生的,往往迅速向深处发展,致使穿透金属,形成腐蚀坑。

(三) 电厂常见的腐蚀损坏类型

1. 蒸汽腐蚀

锅炉受热面管子,特别是锅炉的过热器管易产生蒸汽腐蚀,其化学反应见式(1-1),即



产生蒸汽腐蚀后所生成的氢气,如果不能较快地被蒸汽流带走,还将与钢材作用,钢材表面脱碳而使钢材变脆。因此,有时也把蒸汽腐蚀叫做“氢腐蚀”或“氢脆”。

蒸汽腐蚀实质上是个氧化过程,一旦生成了氧化铁之后,这种氧化物没有金属的特性,很容易脱落,俗称“铁锈”。

严重的氢脆将会引起锅炉管壁的爆破。图 1-6 即为 20 号钢水冷壁管因氢脆爆管的实物照片。对破口附近内壁表面进行检查时,发现有许多裂纹。对破口附近的组织进行分析时,

可以看出这些裂纹均是沿晶产生并扩展的，在氢脆裂纹所经过的珠光体边缘，可见到有脱碳现象存在，如图 1-7 所示。

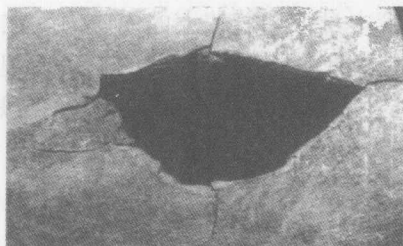


图 1-6 20 号钢水冷壁管因氢脆爆管的实物照片



图 1-7 珠光体边缘脱碳现象存在

2. 烟气腐蚀

燃烧含硫高的燃料时，在烟气中生成较多的 SO_2 ，当烟气在锅炉的尾部受热面（省煤器空气预热器）冷却到一定温度（通常称“露点”）时，烟气中的水蒸气开始凝结并与 SO_2 结合成硫酸溶液，将使受热面管子受到严重的腐蚀损坏。烟气腐蚀又称为“硫腐蚀”。

3. 垢下腐蚀

在锅炉受热面管子中有时沉淀含有氧化铁及氧化铜的水垢。

垢下的腐蚀介质浓度很高，处于静止状态，水垢与管壁金属相互之间产生电化学腐蚀。氧化铁与氧化铜为阴极，而受热面的钢管内壁为阳极，因而钢管内壁就不断地被腐蚀而减薄。

水垢导热性差，容易造成管子的堵塞，使管子局部过热，严重时会引起受热面管子鼓包或爆破。

垢下腐蚀一般均发生于受热面管子的向火侧内壁，尤其以过热管和管子水冷壁为最常见。

4. 苛性脆化

锅炉汽包等设备的铆接（或胀接）缝隙处，由于介质的不断浓缩，产生高浓度的碱性溶液，在钢材处于一定内应力状态下（铆接或胀接的残余应力、蒸汽压力等）时即导致碱性腐蚀脆化，如图 1-8 及图 1-9 所示。

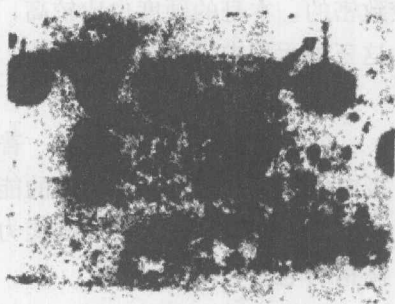


图 1-8 苛性脆化开裂的实物照片

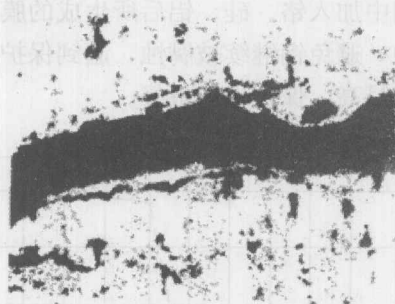


图 1-9 苛性脆化裂纹的显微组织 (150×)

5. 应力腐蚀

应力腐蚀是介质与应力同时作用下引起的一种腐蚀。

锅炉管道中的应力腐蚀往往发生在蠕变过程中，由于金属表面氧化膜破裂，导致部分裸出的金属承受更大的应力，又在腐蚀性介质（蒸汽或烟气）渗入下，因电化学作用而迅速被

腐蚀。汽轮机的叶片、叶轮和螺栓等也会有这种损坏现象。

应力腐蚀的裂纹常常诱发疲劳或脆性破坏，因此是腐蚀中破坏性最大的一种。

图 1-10 为应力腐蚀损坏的实物照片。由于钢管本身存在着较大的内应力，在与腐蚀介质的接触中，由于应力与腐蚀的共同作用而开裂了。图 1-11 是开裂处的显微形貌，从图中可以看出应力腐蚀的裂纹，一根主裂纹的边缘往往还有许多小裂纹。裂纹大多数是沿晶的，裂纹中也会有腐蚀产物。

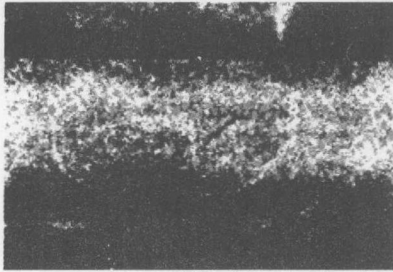


图 1-10 应力腐蚀的实物照片

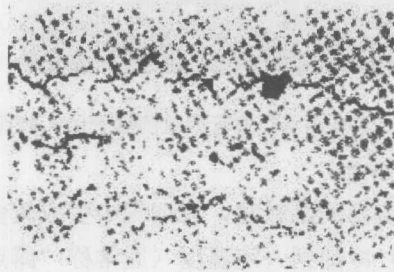


图 1-11 应力腐蚀裂纹的显微形貌(未侵蚀, 50×)

6. 腐蚀疲劳

在交变应力作用下，钢在腐蚀性介质（蒸汽或烟气）中的腐蚀破坏称为腐蚀疲劳。汽轮机的叶片、轴类、弹簧等零部件常因腐蚀疲劳而破坏。

对产生腐蚀疲劳的零部件进行分析时，发现其裂纹多为穿晶性的，端部圆钝内有灰色腐蚀产物，断口为带有疲劳特征的脆性断面。

(四) 提高钢耐腐蚀性能的方法

提高钢耐腐蚀性能的方法有保护层防腐、阴极保护、降低腐蚀介质的浓度等。这些方法的实质是在钢中加入合金元素以提高钢的抗氧化性能和抗电化学腐蚀的能力。

加入合金元素后，提高钢的耐腐蚀性能的途径主要有三个方面：

(1) 使钢的表面生成一层致密的氧化膜。钢的抗氧化能力决定于氧化膜的致密程度。实践证明，钢中加入铬、硅、铝后所生成的膜是比较致密的，本身的硬度也比较高，能隔绝金属与氧接触，避免钢继续被腐蚀，起到保护作用。这三种元素中以铬的影响最大，铬的氧化膜致密程度最高，保护作用最好。

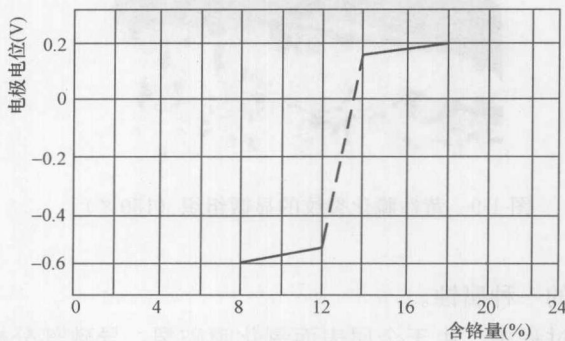


图 1-12 钢的含铬量对电极电位的影响

(2) 提高钢的电极电位。普通的钢电极电位很低，抗电化学腐蚀的能力差，为了提高钢的抗电化学腐蚀的能力，必须提高钢的电极电位。

实践证明：铬溶于钢中形成固溶体时，钢耐腐蚀性能可以大大提高。当含铬量超过 11.7% 时，钢的电极电位产生突变，即由负变正，达到较好的抗电化学腐蚀的能力。钢的含铬量对电极电位的影响如图 1-12 所示。

(3) 使钢的组织形成单相固溶体, 如单相的铁素体或奥氏体, 能进一步提高抗电化学腐蚀的能力。

1) 为了形成单相的铁素体, 一般加入缩小奥氏体区域的元素, 如铬、硅、钼、钛、铌等。

2) 为了形成单相的奥氏体, 一般加入扩大奥氏体区域的元素, 如镍、锰、氮、铜等。奥氏体钢比铁素体钢具有更高的韧性、较好的塑性及冷变形能力, 加热时晶粒长大倾向较小。

3) 合金化是提高钢材的耐腐蚀性能最根本的方法, 常用的合金元素有铬、镍、锰、氮、硅、钼、钛、铌、铜、钴等。

三、耐热钢的组织稳定性

钢材在高温下长期工作时, 由于原子的扩散, 其组织结构也要发生变化。温度越高, 高温下运行的时间越长, 原子扩散能力就越强, 钢的组织结构变化也就越大。组织发生变化, 必然引起机械性能的改变。

(一) 碳化物的球化

1. 球化的概念及危害

(1) 碳化物的球化是指珠光体中的碳化物由片状逐渐转变成球状, 因此也常称为珠光体的球化。

球化过程包括碳化物从片状转化成球状和球状粒子长大两个过程。

(2) 球化的危害。钢中的碳化合物球化后, 钢的蠕变极限和持久强度会下降。球化现象越严重, 高温性能就越差。

试验证明, 12Cr1MoV 钢全球化后, 持久强度降低约 1/3。钢的持久强度下降后, 其承载能力就相应的减小。在火力发电厂中, 因锅炉钢管严重球化所引起的爆管事故时有发生。

2. 球化的原因

珠光体中片状渗碳体表面积较大, 具有较大的表面能量, 存在着从较高的能量状态向较低的能量状态转化的趋势。在常温或温度较低时, 原子的活动能力较弱, 一般不能完成上述的转变, 所以这时的片状碳化合物还是比较稳定的。但是, 在高温和应力的长期作用下, 原子的活动能力增强, 扩散速度也增大, 碳化物从片状向球状的转化便具备了条件。由于球的表面积最小, 因而它的表面能量也最小, 所以片状碳化物就向球状转变。

电厂用钢引起球化的原因, 一是高温, 二是高温下工作的时间长。尤其是当超温运行或工作温度经常上、下波动时, 会促进球化的产生和发展。

3. 球化的监督

在火力发电厂中对锅炉管子用钢的球化情况进行监督, 特别是我国部分电厂高温高压蒸汽管道的运行时间已经达到或超过了设计的使用年限, 珠光体类耐热钢球化现象已较为普遍, 对这些管道更要密切注意, 定期检查球化的发展情况。为了加强金属监督, 已经编制了球化级别标准, 可作为各电厂进行金属监督、评定球化时的参考。

(二) 石墨化

在高温和应力长期作用下, 碳钢和含钼的低合金耐热钢组织中的渗碳体易分解为铁和石

墨, 这个过程称为石墨化, 见式 (1-2)



C 呈游离状态聚集于钢中, 由于石墨的强度和塑性几乎等于零, 故游离状态的石墨被析出后, 钢中便出现了孔洞和裂缝, 造成钢材内部应力集中, 使钢材的硬度和塑性明显下降, 脆性增加。

国内外均发生过因石墨化而引起的爆管事故。

钢材的化学成分对石墨化的影响最大, 铝和硅是促进石墨化的元素; 铬、钛、铌、钒等碳化物形成元素, 可以有效地阻止产生石墨化, 其中铬元素的效果最好。

(三) 固溶体中合金元素的贫化

在高温和应力的长期作用下, 耐热钢由于原子扩散能力增加, 将导致合金元素在固溶体和碳化物之间重新分配。

合金元素重新分配的特点是固溶体中合金元素的含量逐渐减少, 而碳化物中合金元素的含量逐渐增加, 于是出现固溶体中合金元素逐渐贫化的现象。固溶体中合金元素贫化后, 钢的蠕变极限和持久强度将降低。

固溶体中合金元素的贫化与原子的扩散过程有关。钢中若加入能延缓扩散过程的合金元素, 就能提高固溶体的稳定性, 从而减少固溶体中合金元素贫化的程度; 钢中若加入强碳化物形成元素钨、钒、铌、钛等, 就能起到稳定固溶体, 阻碍钼和铬元素从固溶体中向碳化物迁移。

四、耐热钢中的合金元素及其作用

钢材的耐热性能主要是通过合金化来达到的。

所谓合金化, 就是在碳钢的基础上加入可以提高热稳定性和热强性的合金元素。

最常用的合金元素是铬、钼、钒、钨、钛、铌、硼、硅、稀土元素等。加入的合金元素种类和含量不同, 钢的组织 and 耐热性能就不一样, 使用时的工作参数也就不同。

(一) 耐热钢的强化原理

耐热钢的高温强度主要取决于固溶体的强度、晶界强度和碳化物的强度。钢中加入合金元素就是为了使这三者强化。

1. 固溶体强化

固溶体强化是耐热钢高温强化的重要方法之一。低合金耐热钢管的组织是以固溶体为基体的。提高固溶体的强度, 增加固溶体的组织稳定性, 能有效地提高耐热钢的高温性能。

加入合金元素, 以增加原子之间的结合力, 可使固溶体强化。

外来原子溶入固溶体使晶格畸变, 也能提高强度。

有些元素能提高再结晶温度, 延缓再结晶过程的进行, 从而提高组织的稳定性, 也同樣能提高强度。

通常用于强化固溶体的合金元素有铬、钼、钨、锰、铌等。

2. 晶界强化

增加晶界强度, 是提高耐热钢高温强度需要研究的重要课题之一。晶界强度在高温时降低的速度较快。晶界强度降低后, 晶界易产生裂纹以致断裂破坏。

耐热钢中加入微量的硼或锆及稀土元素后, 可以提高晶界强度。目前, 主要用硼元素来

强化晶界。实践证明,如果硼和钛或铌一起加入钢中,则强化晶界的效果更为显著。

3. 碳化物的弥散硬化

从位错的观点来看,碳化物的弥散硬化强化效果比上述两种方法更为显著。碳化物沉淀在位错上,能锁固位错的滑移。而且稳定的碳化物若以稳定的状态分布在固溶体内,就能显著地提高钢的强度和硬度。

碳化物的弥散硬化主要取决于碳化物的硬度、稳定性、形状、颗粒大小和分布状况等因素,钒、铌、钛元素的碳化物在钢中呈小颗粒状的弥散分布,这些碳化物硬度很高,稳定性好,高温时又不易产生聚集长大,所以其弥散硬化的效果最好。

(二) 合金元素的作用

1. 碳的作用

随着碳含量的增加,钢的室温强度提高,塑性下降,碳对钢的高温性能影响就比较复杂。

随着含碳量的增加,钢的抗蠕变性能会降低,而且,在高温下长期使用时,其蠕变速度要增快。

因为含碳量多,在高温时从固溶体中析出的碳化物必然增多,会使固溶体中合金元素贫化,从而降低热强性,但含碳量也不宜过低,否则强度就太低。

2. 铬的作用

铬能使钢的性能在很多方面得到改善和提高。

铬的主要作用如下:

(1) 提高钢的耐腐蚀性能。铬的氧化物 Cr_2O_3 比较致密,钢的表面生成了 Cr_2O_3 ,能起保护膜作用,可有效地阻止钢被继续氧化。钢中含铬量越高,钢的抗氧化性能就越好。含铬量超过 12% 以后,还能提高钢的电极电位,从而增加抗电化学腐蚀的能力。

(2) 增加铁素体的强度,提高组织稳定性。

3. 钼的作用

(1) 钼是耐热钢中强化固溶体的主要元素。钼溶入铁素体可使原子之间的结合力增大,会使晶格发生畸变,因而提高钢的强度。

(2) 钼对钢的抗蠕变能力的影响。含钼量越高,钢的蠕变极限值也就越高。

4. 钒的作用

钒是强的碳化物形成元素,在钢中能够形成细小、均匀、高度弥散分布的碳化物和氮化物微粒。这些化合物在 $550\sim 600^\circ\text{C}$ 范围内比较稳定,因而能有效地提高钢的持久强度和抗蠕变能力。

钒和碳的亲合力比钼和铬大,能阻碍钼和铬元素由固溶体向碳化物中迁移,避免和减少固溶体中钼和铬的贫化。

耐热钢中含钒量一般均小于 0.4%,含钒量过高的碳化物组织会发生粗化现象,这对热强性反而不利。

5. 硼和稀土元素

硼和稀土都是提高晶界强度的合金元素。但是,这些元素的加入量如果过多,将会严重地降低钢的热加工工艺性能,在耐热钢中均属微量加入元素。

(三) 其他元素的作用

1. 钛和铌

钛和铌也是强碳化物形成元素, 钢中形成 TiC 和 NbC 后, 在高温时其强度和稳定性均比普通元素的碳化物强度及稳定性高。

常用钛和铌来防止或减少固溶体中钼和铬的贫化。

钛和铌与钒一样还能有效地防止不锈钢的晶间腐蚀。钛和铌常常与钼和铬等元素一起复合加入到钢中, 加入量通常也比较少。

2. 铝和硅

铝和硅在钢中能显著地提高钢的抗氧化性, 加入到钢中主要是为了提高耐腐蚀性能。但是, 铝和硅均能促进石墨化, 所以其加入量需要予以控制。

3. 镍

镍能增加钢的淬透性, 因而能提高钢的强度。镍还是扩大奥氏体的元素, 在奥氏体类耐热钢中用得较多。加入镍使钢变成单相的奥氏体组织后, 钢就具备了较高的抗蠕变能力和耐腐蚀性能。

由于镍价格较贵, 所以可用猛代替镍, 使钢变成单相的奥氏体组织。

五、耐热钢的分类

根据小截面正火后的金相组织分析可知, 耐热钢可以分为珠光体耐热钢、马氏体耐热钢、铁素体耐热钢和奥氏体耐热钢四大类。

(一) 珠光体耐热钢

珠光体耐热钢中所加入的合金元素主要为铬、钼、钒, 而且其总含量一般在 5% 以下, 也称为低合金耐热钢, 这类钢的组织为铁素体和珠光体; 若正火时冷却速度较快或合金元素含量较高、元素的种类较多, 其组织则为铁素体和贝氏体。

Cr—Mo 系及 Cr—Mo—V 系珠光体耐热钢, 在火力发电厂热力设备中应用得很广泛。

最常用的钢种有 12CrMo, 15CrMo、13CrMo44、10CrMo910、12CrMoV、12Cr1MoV 等。

合金元素含量较低的铬钼钢主要用于 500~510℃ 以下的蒸汽管道、联箱等零部件及 540~550℃ 以下的锅炉受热面管子; 合金元素含量较高的低碳铬钢和铬钼钒钢, 则主要用于 550℃ 以下的汽轮机主轴、叶轮、汽缸、隔板及高温紧固件等。

铬钼钢及铬钼钒钢在使用温度分别超过 550℃ 和 580℃ 后, 其组织不稳定性加剧, 高温氧化速度增加, 持久强度显著下降。为适应 580℃ 以上温度的需要, 多采用提高含铬量并添加钛、硼等多种合金元素的方法。如 12Cr3MoVSiTiB (II 11)、12Cr2MoWVB (钢 102), 其使用温度高达 600~620℃。

(二) 马氏体耐热钢

钢中如加入含量较多的能使等温转变曲线右移的合金元素, 钢在空冷时就可转变为马氏体组织, 这类钢称为马氏体耐热钢。

应用得最早的马氏体耐热钢为 Cr13 型钢, 这类钢不仅有热强性, 还具有较高的耐腐蚀性能。1Cr13 和 2Cr13 钢既可作为耐热钢, 又可作为不锈钢使用。

为提高 Cr13 型钢热强性, 在这类钢的基础上添加钼、钨、钒、硼等合金元素。如

1Cr11MoV、1Cr12MoWV 和 1Cr12WMoNbVB 钢，这类钢使用温度可提高。由于热强性能好，可用作汽轮机的末级叶片。

(三) 铁素体耐热钢

钢中加入相当多的铬、铝、硅等缩小奥氏体区域的合金元素，使钢具有单相的铁素体组织，称为铁素体耐热钢。

常用的有 1Cr25Si2、1Cr25Ti 等，这类钢抗高温氧化和耐腐蚀性能好，但热强性较差、脆性大。

铁素体耐热钢不宜用作受冲击载荷的零部件，而只宜用于受力不大的构件，如锅炉吹灰器、过热器吊架、热交换器等。

(四) 奥氏体耐热钢

钢中加入的合金元素，不仅使等温转变曲线右移，而且使 MS 线降低至室温以下，钢在空冷后的组织则仍然是奥氏体，这种钢称为奥氏体钢。

奥氏体耐热钢不仅热强性很高，而且还有较高的塑性、韧性和良好的焊接性能。加之是单相的奥氏体组织，因而又有优良的耐腐蚀性能。

奥氏体耐热钢是高合金多组元的钢种，在火力发电厂热力设备中常用的有 1Cr18Ni9Ti、1Cr18Ni9Mo、4Cr14Ni14W2Mo、1Cr15Ni36W3Ti；此外尚有以锰代镍的奥氏体耐热钢种，如 2Cr20MnSi2N、Mn17Cr7MoVNbBZr、Mn18Cr10MoVB、Cr18Mn11SiN 等。

1Cr18Ni9Ti 是一种应用最为广泛的奥氏体耐热钢，其抗氧化工作温度可达 700~900℃，在 600℃ 左右有足够的热强性，可用于 610℃ 以下的锅炉过热器管、主蒸汽管，以及汽轮机导管、阀体等。

4Cr14Ni14W2Mo 钢具有更高的热强性和组织稳定性，常用于 650℃ 以下超高参数锅炉、汽轮机的过热器管、主蒸汽管及其他重要零件。

1Cr15Ni36W3Ti 钢主要用于高压汽轮机汽封弹簧和 650℃ 以下燃气轮机叶片及紧固件。

2Cr20Mn9Ni2Si2N 钢抗氧化性能优良，可用于 900~1000℃ 过热器吊架及管夹等。

奥氏体耐热钢也可作不锈钢用。

第二节 热 处 理

通过加热、保温和冷却来改变钢的组织，从而改变钢的机械性能的工艺，称为热处理。热处理的这三个阶段，可以用工艺过程曲线来表示，如图 1-13 所示。

热处理区别于其他加工工艺，如铸造、压力加工等特点是只通过改变工件的组织来改变性能，而不改变其形状。热处理只适用于固态下发生相变的材料，不发生固态相变的材料不能用热处理来强化。

根据加热、冷却方式及钢组织性能变化特点不同，将热处理工艺分类如下：

(1) 普通热处理：退火、正火、淬火和回火。

(2) 表面热处理：表面淬火、化学热处理。

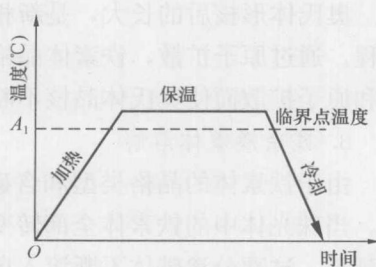


图 1-13 热处理工艺过程示意图

(3) 其他热处理：真空热处理、形变热处理、控制气氛热处理、激光热处理等。

由于实际加热或冷却时，有过冷或过热现象，因此，将钢在加热时的实际转变温度分别用 Ac_1 、 Ac_3 、 Ac_{cm} 表示，冷却时的实际转变温度分别用 Ar_1 、 Ar_3 、 Ar_{cm} 表示，如图 1-14 所示。

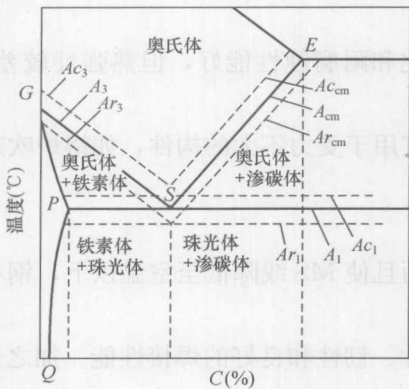


图 1-14 加热和冷却对临界转变温度的影响

一、钢在加热时的转变

(一) 加热温度的确定

热处理的第一道工序就是加热。铁碳合金相图是确定加热温度的理论基础。

共析钢在 A_1 临界温度下是珠光体组织，当加热温度超过临界点后珠光体就转变为奥氏体。

亚共析钢在 A_1 临界点温度下是铁素体和珠光体，当温度超过 A_1 后，珠光体转变为奥氏体；如果继续加热，当温度达到 A_3 时铁素体也可转化为奥氏体。

过共析钢在 A_1 临界点温度下是渗碳体和珠光体，当加热温度超过 A_1 后，珠光体转变为奥氏体；如果继续加热至 Ac_{cm} 以上，渗碳体将全部溶入奥氏体。

钢的加热程度就是奥氏体的形成过程，这种组织转变可以称为奥氏体化。

注意：加热时，钢的组织实际转变温度往往高于相图中的理论相变温度；冷却时，也往往低于相图中的理论相变温度。

(二) 奥氏体化过程

珠光体转变为奥氏体是一个重新结晶的过程。由于珠光体是铁素体和渗碳体的机械混合物，铁素体与渗碳体的晶包类型不同，含碳量差别很大，转变为奥氏体必须进行晶包的改组和铁碳原子的扩散。

奥氏体化大致可分为以下四个过程：

1. 奥氏体形核

奥氏体的晶核首先在铁素体和渗碳体的相界面上形成。由于界面上的碳浓度处于中间值，原子排列也不规则，原子由于偏离平衡位置处于畸变状态而具有较高的能量，同时位错和空间密度较高。铁素体和渗碳体的交接处在浓度结构和能量上为奥氏体形核提供了有利条件。

2. 奥氏体长大

奥氏体形核后的长大，是新相奥氏体的相界面向着铁素体和渗碳体两个方向同时推移的过程。通过原子扩散，铁素体晶格先逐渐改组为奥氏体晶格，随后通过渗碳体的连续不断分解和原子扩散而使奥氏体晶核不断长大。

3. 残余渗碳体溶解

由于铁素体的晶格类型和含碳量的差别都不大，因而铁素体向奥氏体的转变总是先完成。当珠光体中的铁素体全部转变为奥氏体后，仍有少量的渗碳体尚未溶解。随着保温时间的延长，这部分渗碳体不断溶入奥氏体，直至完全消失。