

HUODIANCHANG JINSHU CAILIAO
HANJIE JISHU YU GUANLI

火电厂金属材料

焊接 技术与管



杜文敏 编著

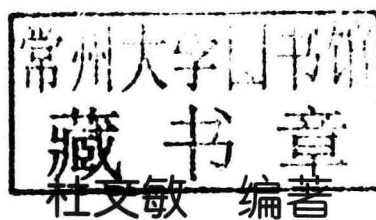


中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

HUODIANCHANG JINSHU CAILIAO
HANJIE JISHU YU GUANLI

火电厂金属材料

焊接 技术与管埋



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书扼要叙述了新型耐热钢金属材料 and 焊接材料在 320MW 亚临界、600MW 超临界、1000MW 超超临界机组中的应用。本书以焊接基本理论为基础，系统地阐述了火力发电厂亚临界、超临界、超超临界机组应用的耐热钢焊接要点，并详细介绍了新型耐热钢金属材料的应用、焊接工艺要求和焊接技术管理，以及金属材料早期失效产生的原因及案例分析。

本书可供各火力发电厂相关专业技术人员参考及应用，也可作为培训教材，是一部解决实际焊接问题必备的工具书。

图书在版编目 (CIP) 数据

火电厂金属材料焊接技术与管理/杜文敏编著. —北京:
中国电力出版社, 2012.8

ISBN 978-7-5123-3402-1

I. ①火… II. ①杜… III. ①火电厂—金属材料—焊接
IV. ①TM621.3②TG457.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 190507 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)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 11 月第一版 2012 年 11 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 23.25 印张 543 千字

印数 0001—3000 册 定价 68.00 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

随着我国电力建设的飞速发展，新建及在建高参数、大容量火力发电机组，如亚临界、超临界、超超临界机组已成为全国各大电网主力机组。亚临界、超临界、超超临界机组在应用中提高了蒸汽参数，遇到的主要技术难题是金属材料耐高温、高压，以及新型耐热钢金属材料的焊接、热处理等问题。亚临界、超临界、超超临界机组所应用的新型耐热钢金属材料，可使发电厂机组蒸汽温度参数达到 593℃ 和 610℃，是金属材料在应用上的巨大进步，也必然会促进火力发电机组金属材料及焊接技术的发展。

发电机组设备、检修、技术管理人员，应该尽快掌握最新的焊接技术管理技能。这就要求改变多年来形成的采用“大电流、断弧焊、大线能量、厚焊层、宽摆幅”的低合金耐热钢焊接操作手法，转而掌握和采用“小线能量、快速连弧、小摆幅、薄焊层、多层多道焊”的新型焊接操作方法。同时，对新型耐热钢的强化机理、金属性能、焊接性能、焊接工艺、热处理工艺方法和焊接技术管理等方面需要进行深入的研究和实践。各火力发电厂应加大对焊接技术的管理，并做好对新型金属材料掌握及应用的技术培训工作，进一步提高专业技术管理人员的素质，以保证发电机组长期安全稳定运行。

目前，全国多数电厂都采用外包队伍参与发电机组设备的检修工作。但外包队伍技术管理人员和焊工人员的技能素质参差不齐，对新型耐热钢金属材料的应用和焊接工艺技能也未能全面、系统地掌握，这样直接进入现场参与发电机组的检修和施焊工作，常会出现不按焊接工艺施焊、执行焊接工艺行为不规范及错用焊接材料等问题，以致埋下安全隐患，造成焊缝近表面微裂纹、延迟裂纹、焊缝根部过烧氧化，使金属材料出现焊接强度、韧性降低等焊接缺陷。然而，目前所采用的检测手段不易发现该类焊接缺陷，这为发电机组长期安全稳定运行埋下隐患，还会导致许多新问题的产生。因此，在焊接技术管理过程中必须实施技术指导，以纠正或处理不当工艺，改善焊接

环境。此外，有些建设单位业主方的焊接技术管理人员和金属技术监督管理人员，由于缺乏电力安装工程焊接质量程序控制管理经验，将安装工程焊接质量管理全权交给工程监理单位管理，这也不利于焊接工程主体责任和质量管理体系有效运转。

本书参考各火力发电厂发电机组检修、安装情况，撰写了检修焊接管理与安装焊接管理，能有效地指导和帮助发电机组检修、安装工程施工焊接技术管理工作严格执行国家和行业标准，以提高焊接质量，增强管理人员的技能素质，从而满足新型发电机组检修、安装工程焊接管理的需要。本书还探讨了建立焊接工程组织管理机构与焊接工程质量管理模式相适应管理体系的方法，能够帮助建设单位业主方的焊接技术管理人员和金属技术监督人员健全焊接质量管理体系并使其得到有效运转，达到焊接工程质量管理 and 质量控制要求，以确保焊接工程质量始终处于有效受控状态。

本书在编写过程中得到了具有丰富焊接工程施工经验的技术人员刘德伟、齐涛、曹起柱，以及焊接专业老专家牛明安等同志提供的技术资料 and 大力支持，在此表示诚挚感谢。

由于新型耐热钢在国内、国外使用时间尚短，能够参考的该类学术文献 and 资料较少，因此本书难免存在不足与疏漏之处，恳请广大读者指正。

另外，还需请读者注意，本书涉及的焊接及热处理工艺参数仅供参考，在进行发电机组设备检修 and 安装工程焊接时，应严格按照国家和行业最新版的规范、标准执行。

杜文敏

2012 年 7 月

目 录

前言

第一章 金属材料应用	1
第一节 碳素钢（碳钢）	1
第二节 合金钢	1
第三节 金属材料性能	3
第四节 锅炉管道及主要设备用钢分析	8
第五节 新型耐热钢的应用	9
第二章 焊接	14
第一节 焊接材料	14
第二节 焊接材料管理	20
第三节 焊接性能及操作方法	23
第四节 焊接热处理	28
第五节 碳素钢、低合金钢和奥氏体钢焊接方法及工艺案例	37
第六节 碳素钢、低合金钢、奥氏体钢焊接接头显微组织及力学性能	59
第三章 新型耐热钢焊接	65
第一节 新型耐热钢焊接特点	65
第二节 T/P23、T/P24 钢焊接	70
第三节 SA213-T23 钢焊接案例	75
第四节 T/P91 钢焊接	77
第五节 T/P92 钢焊接	86
第六节 T/P122 钢焊接	96
第七节 SA213-TP347H 钢焊接	102
第八节 Super304H 钢焊接	105
第九节 HR3C 钢焊接	109
第十节 WB36 钢焊接	111
第十一节 A691Cr21/4CrCL22 钢焊接	115
第十二节 双相不锈钢焊接	119
第四章 异种钢焊接	125
第一节 异种钢焊接类别及焊接特点	125
第二节 不同珠光体钢的焊接	128
第三节 不同奥氏体—马氏体钢的焊接	131
第四节 珠光体钢与马氏体钢、奥氏体钢焊接	139
第五节 异种钢焊接接头显微组织及力学性能	144

第五章 金属材料失效分析	156
第一节 金属材料的疲劳与腐蚀分析	156
第二节 金属材料性能及失效分析	160
第六章 常见金属材料失效案例分析	165
第一节 锅炉爆管失效原因分析	165
第二节 锅炉水冷壁高温硫腐蚀爆管失效原因分析（案例 1）	172
第三节 锅炉悬吊疏水管超温爆管失效原因分析（案例 2）	179
第四节 锅炉顶棚过热器管对接焊缝失效原因分析（案例 3）	187
第五节 TP347H 锅炉管氧化皮脱落失效分析（案例 4）	194
第六节 汽轮机叶片断裂失效原因分析	198
第七节 汽轮机低压转子叶片断裂失效分析（案例 5）	202
第八节 汽轮机高温紧固件断裂失效分析	205
第九节 汽轮机上汽缸导汽管法兰螺栓断裂失效分析（案例 6）	209
第七章 焊接接头质量分析	214
第一节 焊缝显微组织及性能分析	214
第二节 焊接缺陷分析	218
第八章 发电机组设备检修焊接技术管理	232
第一节 检修前焊接工作准备	232
第二节 检修施工焊接技术管理	235
第三节 检修现场监督检查和管理	237
第四节 焊接质量检查验收	240
第九章 安装工程焊接技术质量管理	248
第一节 安装工程开工前的施工准备	248
第二节 安装工程焊接质量管理	250
第三节 安装工程焊接质量控制程序	252
第四节 焊接质量验评	261
第十章 安装工程焊接技术监督管理	271
第一节 焊接质量监督检查	271
第二节 焊接质量监督检查细则	275
第三节 安装工程竣工验收管理	279
第四节 安装工程竣工焊接资料移交前审查与监督	280
第五节 冬季施工焊接质量控制措施	282
附录一 火力发电厂用钢主要金属材料化学成分表	287
附录二 火力发电厂用钢钢号对应焊接材料化学成分表	290
附录三 330MW 亚临界机组金属材料与焊接材料工艺对照表（锅炉系统）	293
附录四 330MW 亚临界机组金属材料与焊接材料工艺对照表（汽轮机系统）	297
附录五 600MW 亚临界机组金属材料与焊接材料工艺对照表（锅炉系统）	303

附录六	600MW 亚临界机组金属材料与焊接材料工艺对照表 (汽轮机系统)	306
附录七	320MW 超临界机组金属材料与焊接材料工艺对照表 (锅炉系统)	312
附录八	320MW 超临界机组金属材料与焊接材料工艺对照表 (汽轮机系统)	316
附录九	600MW 超临界机组金属材料与焊接材料工艺对照表 (锅炉系统)	325
附录十	600MW 超临界机组金属材料与焊接材料工艺对照表 (汽轮机系统)	328
附录十一	600MW 超超临界机组金属材料与焊接材料工艺对照表 (锅炉系统)	332
附录十二	600MW 超超临界机组金属材料与焊接材料工艺对照表 (汽轮机系统)	343
附录十三	1000MW 超超临界机组金属材料与焊材及焊接工艺对照表 (锅炉系统)	352
附录十四	1000MW 超超临界机组金属材料与焊材及焊接工艺对照表 (汽轮机系统)	357
附录十五	俄供设备超临界发电机、汽轮机主要金属材料的化学成分表	360
附录十六	超 (超) 临界发电机、汽轮机主要金属材料的化学成分表	361
附录十七	电力系统发电机组设备检修焊接管理常用规程标准	363
参考文献		364

第一章 金属材料应用

第一节 碳素钢（碳钢）

碳素钢通常按照钢的含碳量可作如下分类：

- (1) 低碳钢。含碳量小于或等于 0.25%。
- (2) 中碳钢。含碳量在 0.25%~0.6% 之间。
- (3) 高碳钢。含碳量大于 0.6%。

以下介绍几类典型的碳素钢。

(1) 碳素工具钢。用于制造各种工具、刀具、刃具、模具、轴承等，一般属于高碳钢。

(2) 碳素结构钢。该类钢材的牌号是按照力学性能强度划分的，包括抗拉强度、屈服强度、抗压强度、抗弯强度。屈服强度 σ_s 值越高，碳钢中的含碳量越高，塑性就越低。碳素结构钢用于制造螺栓、螺母、钢板、圆钢以及各类型钢材，广泛应用于机械制造及建筑等行业中。

(3) 优质碳素结构钢。通常以含锰量确定优质碳素结构钢等级，编号表示方法简单，用两位数字表示，数字表示含碳量的百分数。如 20 号钢、45 号钢即表示含碳量为 0.20%、0.45% 的优质碳素结构钢。

较高含锰量的优质碳素结构钢其含锰量在 0.7%~1.2%，编号表示方法是在正常含锰量优质碳素结构钢钢号后加写 Mn（或猛）表示，如 09MnV、15Mn 等。对于专门用途的优质碳素结构钢，其编号是在钢号前或后加一个表示用途的汉字或汉字拼音首字母。如发电厂锅炉使用的 20 号优质碳素结构钢可写作 20g（或 20G），20g 可用做锅炉钢板、钢管、压力容器和锅炉水冷壁管及省煤器等。

第二节 合金钢

合金钢是以铁和碳元素为基础，为改善和提高钢的某些性能要求（如综合力学性能及工艺性能），在冶炼过程中有目的添加一些其他元素从而获得某些特殊性能（如耐热、不锈钢和耐腐蚀等）。可添加的合金元素有锰、铬、硅、钼、钨、钒、钛、铌、硼、镍、钴、铝、铜、稀土、硫、磷、氮等。

合金钢的种类繁多，通常按钢的成分和用途来进行分类：按合金元素总含量的多少可分为低合金钢（合金元素含量小于 5%）、中合金钢（合金元素含量为 5%~10%）和高合金钢（合金元素大于 10%）；按加入的合金元素品种分为锰钢、铬钢、铬钼钢等。

以下按用途分类详细介绍。

一、合金结构钢

合金结构钢又分为两类：一类为建筑及工程结构用钢，即普通低合金钢；另一类为机器制造用钢，分为渗碳钢、调质钢、弹簧钢和滚动轴承钢等。

二、合金工具钢

合金工具钢又分为以下三类：

- (1) 刃具钢。包括低合金刃具钢及高速钢。
- (2) 模具钢。包括热模具钢和冷模具钢。
- (3) 量具钢。主要用于制造量规、尺具、千分尺等。

三、特殊性能钢

特殊性能钢又按所具有的特殊物理、化学和机械性能分为磁钢、不锈钢、耐热钢等，本节重点介绍耐热钢。

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。

1. 珠光体耐热钢

珠光体耐热钢中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加珠光体，正火处理时冷却速度较快。

碳原子溶入 α -Fe 中进行渗碳扩散形成的间隙固溶体称为铁素体，铁素体显微组织状态反映如图 1-1 所示，珠光体显微组织如图 1-2 所示。

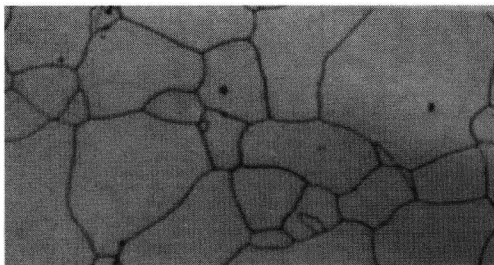


图 1-1 铁素体显微组织

注：白色粒状为铁素体、黑色曲折线为晶界、黑色点状为氧化物。

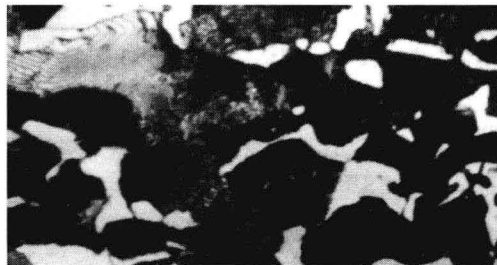


图 1-2 珠光体显微组织

注：黑色细片状珠光体、浅色粗片状珠光体、白色条块状铁素体混合分布。

Cr-Mo 系（铬钼钢）及 Cr-Mo-V 系（铬钼钒钢）珠光体耐热钢，在火电厂热力管道中广泛应用。最常应用的钢种有 15CrMoG、12Cr1MoV、12X1MΦ、15X1M1Φ、SA-335P12、SA-335P22（10CrMo910）、SA-182F22CL1、A691Cr2 1/4CrCL22。

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，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，高温氧化速度加快，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钽、硼等多种合金元素的方法，如 20Cr1MoVSiTIB（紧固件）、15Cr2Mo1（高中压外缸），其使用温度高达 600~620℃。

2. 马氏体耐热钢

钢中如加入含量较多能使等温变化曲线右移的合金元素，钢在空气冷却时就可转变为马氏体组织，这类钢称为马氏体钢，其显微组织见图 1-3。

应用最早的马氏体耐热钢为 1Cr13 型钢、12X13 型钢，该类钢不仅有热强性，还具有

较高的耐腐蚀性能。1Cr13、12X13（汽封圈）钢既可作为耐热钢，又可作为不锈钢使用。

为提高1Cr13型钢的热强性，可在该类钢的基础上添加钼、钨、钒、硼等合金元素，如9Cr-1Mo型马氏体型耐热钢、9Cr-2W钢。

目前，一些大型机组锅炉受热面管道均采用含铬量较高的耐热钢来制造，最常使用的是9Cr-1Mo型马氏体型耐热钢，引进的材料有T91、P91、T92、P92、T122、P122、F11、F12、26Cr2Ni4MoV（发电机转子）、30Cr2Ni4MoV（汽轮机转子）、ZG1Cr10MoVNbN（高中压内缸）。

3. 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。常用的铁素体耐热钢有1Cr25Si2、1Cr25Ti等，该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做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、脱硫装置等。

4. 奥氏体耐热钢

钢中加入某些合金元素，不仅等温变化曲线右移，而且MS线会降至室温以下，加入该类合金元素后，钢在空气冷却后的组织为奥氏体，这种钢称为奥氏体钢（显微组织见图1-4）。

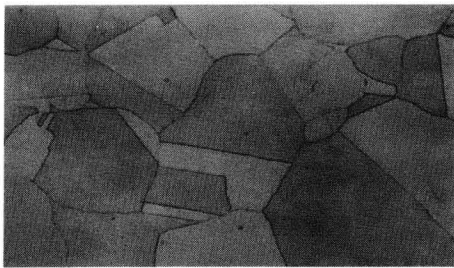


图1-4 奥氏体钢显微组织

注：晶粒较粗大的孪晶奥氏体钢。

奥氏体耐热钢不仅热强性很高，而且具有较高的塑性、韧性和良好的焊接性能，以及优良的耐腐蚀性能。奥氏体耐热钢是高合金多元素的钢种，在电厂热力设备中常用的有1Cr18Ni9Ti、0Cr18Ni9、12X18H12T、Super304H、HR3C、TP347H、316L等。奥氏体耐热钢的抗氧化工作温度可达700~900℃，在工作温度600℃左右时有足够的热强性，可用于600℃以下的锅炉过热器管、再热器管及汽轮机导管等。新型奥氏体耐热钢具有更高的热强性和组织稳定性，常用于620℃以下超高参数锅炉、过热器管、再热器管和其他重要部件。



图1-3 马氏体钢显微组织

注：马氏体和白色带状铁素体。

第三节 金属材料性能

金属材料的性能主要可分为物理性能、化学性能、力学（机械）性能。

一、金属材料的物理性能

金属材料的物理性能是指金属内部所固有的特性，以及承受热、电、磁等作用所表

现出的能力。金属材料的物理性能主要包括密度、熔点、热膨胀性、导热性、导电性、磁性等。

1. 密度

密度是指某种物质单位体积的质量，其数学表达式为

$$\rho = m/V(\text{kg}/\text{m}^3)$$

式中 ρ ——物质密度；

m ——物质质量，kg；

V ——物质质量所占有的体积， m^3 。

密度是金属材料的特性之一，在体积相同的情况下，金属材料的密度越大，其质量就越好。通常将密度大于 $4.5\text{g}/\text{cm}^3$ 的金属称为重金属，密度小于 $4.5\text{g}/\text{cm}^3$ 的金属称为轻金属。一般钢的密度约为 $7.8\text{g}/\text{cm}^3$ ，灰铸铁钢的密度约为 $7.15\text{g}/\text{cm}^3$ ，铝合金的密度约为 $2.79\text{g}/\text{cm}^3$ ，铜合金的密度约为 $8.8\text{g}/\text{cm}^3$ ，镁合金的密度约为 $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ 。在生产过程中，通常采用密度来测算金属部件毛坯的质量，因此密度是使用和选择金属材料的一项重要重要的判断标准。

2. 熔点

金属材料由固态转变为液态时的温度称为熔点。熔点是制定对金属材料的热加工（冶炼、铸造、焊接、配制等）工艺规范的重要依据。熔点的单位通常使用摄氏度（ $^{\circ}\text{C}$ ）或热力学温度（K）。摄氏温度 t 和热力学温度 T 的换算关系为

$$T = t + 273.15(\text{K})$$

3. 膨胀性

热膨胀性是指金属材料受热时体积增大、冷却时体积又收缩的一种性能。衡量热膨胀性的指标是线膨胀系数，其计算式为

$$\alpha = \frac{l_2 - l_1}{l_1 t} (^{\circ}\text{C}^{-1})$$

式中 l_1 ——膨胀前的长度，cm；

l_2 ——膨胀后的长度，cm；

t ——升高的温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

通过上述计算式可知线膨胀系数是随着温度的升高而增加的，钢的线膨胀系数一般在 $(10 \sim 20) \times 10^{-8} ^{\circ}\text{C}^{-1}$ 的范围内。线膨胀系数也是金属材料的一项重要重要的物理性能。

4. 导热性

导热性指金属材料在加热（或冷却）时所传导热能的性能，用热导率（或导热系数）来衡量金属导热性能的好坏。热导率越大，其导热性能就越好，热导率小则导热性差。国际计量单位标定，热导率（ λ ）单位是瓦 [特] 每米开 [尔文]，单位符号是 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

金属材料在加工、制造、焊接或热处理时，必须掌握其导热性。电厂锅炉、汽轮机启动时，也必须考虑所用钢材料的导热性。因为金属材料在加热或冷却过程中，由于导热性的缘故，会使工件产生内外温差，从而导致金属材料内外有不同的膨胀和收缩，此时金属材料内部就会产生内应力；如果内应力超过金属的屈服强度就会产生变形，使金属部件、管件破裂损坏。金属材料的导热性越差，相应的内应力越大，金属材料在加热或冷却时也就更容易破裂。因此，对导热性差的金属材料进行加热或冷却时，应采取事先预热或缓慢升温（冷却）等措施。

5. 导电性

导电性是指金属材料传导电流的性能，所有金属材料都具有导电性。导电性的性能指标用电导率来表示，电导率通常用 γ 或 σ 表示，国际计量单位标定为西门子每米，单位符号为 S/m。

6. 磁性

磁性是指金属被磁化或吸引的性能，是金属的基本属性之一，在外磁场作用下，各种金属材料都会呈现出不同磁性。

衡量磁性材料磁化难易程度（即导磁能力）的性能指标是磁导率，或称“导磁系数”，以符号 μ 表示。磁性材料中，磁感应强度（ B ）和磁场强度（ H ）的比值关系式为 $\mu = B/H$ 。

磁感应强度（ B ）的单位为特 [斯拉]，单位符号为 T；磁场强度（ H ）的单位为安 [培] 每米，单位符号为 A/m；磁导率的单位为亨 [利] 每米，单位符号为 H/m。磁导率 μ 并不固定，而是与材料的性质和饱和程度有关。

金属材料的物理性能不但与钢的化学成分有关，而且与钢的热处理状态有关，同时对热处理工艺也具有一定影响。如淬火钢的密度比退火钢的密度小，主要是淬火后得到了马氏体的比体积增大。热处理还可以加强或减弱钢的磁性，如将铁磁材料加热到一定温度，就会失去磁性，钢通过加热淬火得到马氏体，则带有磁性。另外，钢的物理性能也影响钢在热处理时的工艺操作。如采用导热性差的钢种进行热处理时会产生热应力，容易造成工件应力变形或产生裂纹。

二、金属材料的化学性能

金属材料的化学性能是指金属在常温条件下抵抗氧气和各种腐蚀介质侵蚀的能力。化学性能主要包括耐腐蚀性、抗氧化性。

1. 耐腐蚀性

金属材料抵抗空气、水蒸气及其他化学介质腐蚀破坏作用的能力，称为耐腐蚀性。金属材料生锈就是腐蚀现象。

耐腐蚀性是金属材料的重要性能。尤其在腐蚀性介质条件下工作的金属材料和设备，如电厂锅炉管道、汽轮机设备上的零部件、工作在蒸汽条件下的汽轮机叶片、工作在烟气条件下的空气预热器和省煤器、与海水接触的凝汽器等，既要考虑金属材料的机械性能，又要考虑材料的耐腐蚀性。

2. 抗氧化性

金属材料在室温或高温条件下，抵抗氧化作用的能力称为抗氧化性。在高温条件下或对其加热都会使金属材料加速氧化，如铸造、锻造、热处理、焊接等热加工时以及热力设备在高温条件工作等，都会发生氧化（脱碳）等使金属材料产生缺陷，因此热力设备零部件用钢应首选抗氧化性能好的金属材料。

三、金属材料的力学(机械)性能

力学（机械）性能是指金属材料在外力作用下，所表现出来的抵抗变形和破坏的能力以及接受变形的能力。

1. 强度

强度是衡量金属材料在外力作用下抵抗塑性变形或断裂的能力，由于外力作用的方

式不同，金属材料所表现的强度也不一样。主要有抗拉强度 σ_b 、屈服强度 σ_s 、抗压强度 σ_{bc} 、抗弯强度 σ_{bb} 。金属材料强度指标主要是“强度极限”和“屈服极限”。

(1) 抗拉强度是指试样拉断过程中最大承载力所对应的应力。抗拉强度计算式为

$$\sigma_b = P_{\max} / A_0 \text{ (MPa)}$$

式中 $P_{\max}$ ——拉断前的最大拉力，kN；

A_0 ——试样原横截面积， mm^2 。

(2) 屈服强度是指金属材料开始发生明显塑性变形时的应力。计算式为

$$\sigma_s = P_{\max} / A_0 \text{ (MPa)}$$

式中 $P_{\max}$ ——产生明显塑性变形时的载荷，kN；

A_0 ——试样原横截面积， mm^2 。

2. 拉伸试验

拉伸试验是测定强度和塑性最普遍的方法，该试验依据国家标准，将金属材料制作成标准试样或比例试样，在万能实验机上沿试样轴向缓慢施加拉力，试样随拉力的增加而变形，直至断裂。试验可测得材料的弹性极限、屈服极限、强度极限及塑性等主要力学性能指标。

3. 硬度

金属材料的硬度通常是指材料表面抵抗更硬物体压入时所引起局部塑性变形的能力。

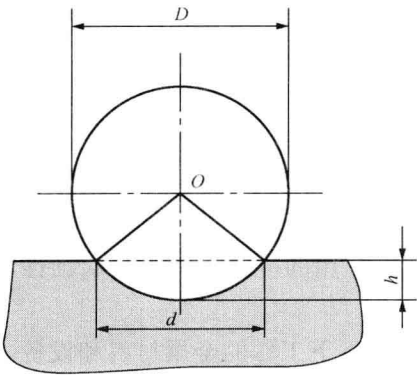


图 1-5 布氏硬度试验原理示意图

常见的硬度指标有布氏硬度 (HB)、洛氏硬度 (HR)、维氏硬度 (HV) 和里氏硬度 (HL)。

(1) 布氏硬度 (HB)。压头的材质有淬火钢球和硬质合金两种。当压头材质为淬火钢球时，布氏硬度用 HBS 表示，适用于测量布氏硬度小于或等于 450 的材料；当压头材质为硬质合金时，布氏硬度用 HBW 表示，适用于测量布氏硬度在 450~650 范围内的材料。布氏硬度试验原理见图 1-5。

(2) 洛氏硬度 (HR)。是用一定载荷将压头压入材料表面，根据压痕深度测量硬度值。根据压头和载荷的不同，洛氏硬度分 HRA、HRB 和 HRC，试验规范见表 1-1，试验示意图见图 1-6。

表 1-1 洛氏硬度试验规范

符号	压头类型	总载荷 (kgf, 1kgf=9.806 65N)	适用范围
HRC	120°金刚石圆锥	150	一般淬火钢等硬度较大的材料
HRB	φ1.588 钢球	100	退火钢和有色金属等软材料
HRA	120°金刚石圆锥	60	硬而薄的硬质合金或表面淬火钢

(3) 维氏硬度 (HV)。维氏硬度是用一定的载荷将锥面夹角为 136°的正四棱锥金刚石压头压入试样表面，保持一定时间后卸除载荷，试样表面就留下压痕，测量压痕对角线的长度，计算压痕表面积，载荷 F 除以压痕面积 A 所得值即为维氏硬度 (见图 1-7)。维氏硬度用符号 HV 表示，计算式为

$$HV = \frac{F}{A} = 1.8544 \frac{F}{d^2} (\text{kgf/mm}^2)$$

维氏硬度也可按对角线的 d 值从表中查出, d 值为两对角线的算术平均值。

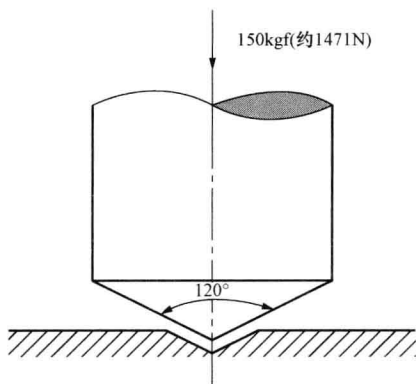


图 1-6 洛氏硬度试验示意图

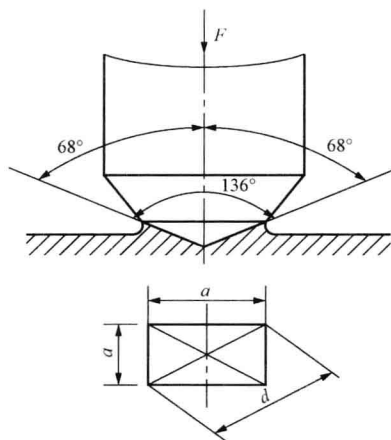


图 1-7 维氏硬度试验示意图

(4) 里氏硬度 (HL)。里氏硬度是用规定质量的冲击体在弹力作用下以一定的速度冲击试样表面, 用冲头在距试样表面 1mm 处的回弹速度与冲击速度的比值计算硬度值。计算式为

$$HL = 1000 \frac{v_R}{v_A}$$

式中 v_R ——冲击体回弹速度;

v_A ——冲击体冲击速度。

根据冲击体质量和冲击能量的不同, 里氏硬度分 HLD、HLDC、HLG 和 HLC。

布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度和里氏硬度各有优缺点: 布氏硬度由于压痕面积较大, 能反映较大范围内的平均硬度, 所以测量结果具有较高的精度和稳定性, 但操作费时, 对试样表面有一定破坏; 洛氏硬度操作简单, 可以直接读出硬度值, 且压痕小, 不伤工件, 缺点是所测硬度值的离散性较大; 维氏硬度的载荷小、压痕浅, 广泛用于测定薄工件表面硬化层; 里氏硬度操作简单, 便携性好, 广泛用于现场硬度测量。

4. 冲击韧性

冲击韧性是衡量材料抵抗冲击载荷能力大小的指标, 常用冲击实验测定。冲击韧性用 α_k 表示, 计算式为

$$\alpha_k = \frac{W_k}{A} (\text{J/cm}^2)$$

式中 W_k ——试样冲断时所消耗的冲击功, J;

A ——试样缺口处截面积, cm^2 。

影响冲击韧性值大小的因素有材料的化学成分、冶金质量、组织状态、表面质量和内部缺陷等。另外, 冲击韧性也随温度的降低而下降。

金属材料的强度、塑性、硬度、韧性中真正独立的是强度和塑性, 硬度与强度有极为密切的关系, 韧性则受强度和塑性的综合影响。因此, 在鉴别金属材料的力学性能时,

常常以强度和塑性为主要指标。

第四节 锅炉管道及主要设备用钢分析

一、对锅炉管道用钢的要求

锅炉管道包括受热面管子（过热器、再热器、水冷壁管、省煤器等）和蒸汽管道（主蒸汽管道、再热蒸汽管道、蒸汽导管、联箱、连接管等）。

电厂对锅炉管道用钢有下列要求：

- (1) 有足够高的蠕变强度、持久强度和良好的持久塑性。
- (2) 有较高的抗氧化性能和耐腐蚀性。
- (3) 有足够的组织稳定性。
- (4) 有良好的工艺性能，特别是焊接性能要好。

选择电厂锅炉管道用钢，其主要依据是其工作温度。进行强度计算时，必须确定在工作温度下的许用应力 $[\sigma]$ 。

二、电厂锅炉管道用钢介绍

1. 壁温小于或等于 500℃的过热器管子及壁温小于或等于 450℃的蒸汽管道

蒸汽温度在 450℃以下的低压锅炉管道主要使用 SA-210C、SA-106C、20G、20 号、Q235A 等优质碳素结构钢。中、高压机组除水冷壁和省煤器管用 20A 碳钢外，其他受热面管子和蒸汽管道均采用合金耐热钢管。

一般采用优质碳素结构钢，其含碳量为 0.1%~0.2%，组织为铁素体和珠光体。常用的是 20 号钢，该钢在 450℃以下具有足够的强度和抗氧化性能，而且工艺性能良好，价格低廉。碳钢钢管在高温长期运行过程中，会出现渗碳体球化和石墨化现象，出现了组织的异常情况，钢的蠕变极限和持久强度会降低。

2. 壁温小于或等于 550℃的过热器管子及壁温小于或等于 510℃的蒸汽管道

15CrMo、T22 (10CrMo910)、A691Cr2 1/4CrCL22、T12、SA-182F22CL1 耐热钢等是在该温度范围内应用较为广泛的钢种。

常用的铬钼钢经热处理后的组织一般是铁素体和珠光体，有些是贝氏体。该类钢在 500~550℃温度范围内有较高的热强性和抗氧化性能，工艺性能也很好。铬钼钢虽无石墨化倾向，但在高温下长期运行过程中会发生渗碳体的球化及固熔体中合金元素贫化的组织变化，从而使热强性降低。当温度超过 550℃时，持久强度显著下降。

3. 壁温小于或等于 580℃的过热器管子及壁温小于或等于 550℃的蒸汽管道

在该温度范围内应用最广泛的锅炉管道钢是 12Cr1MoV 钢及 12Cr1MoVG 钢，即在铬钼钢的基础上，加入 0.2%钒的低合金耐热钢。钒是强碳化物元素，VC 细碎而稳定，对钢的弥散硬化效果好。因而，12Cr1MoV 钢、苏联的 12X1MΦ、15X1M1Φ 钢，以及 P23、P24 钢的耐热性能比铬钼钢好，工艺性能也符合要求，在国内外均得到广泛应用。

12Cr1MoV 钢、12X1MΦ 钢、15X1M1Φ 钢、P23、P24 钢在高温下长期运行过程中，也会发生渗碳体球化及固熔体中合金元素贫化的现象，而使热强性降低。

4. 壁温小于或等于 600~620℃ 的过热器管子及壁温小于或等于 550~570℃ 的蒸汽管道

多年来国内外均致力于进一步提高合金耐热钢的使用温度,使之超过 600℃,甚至达到 620℃,日本 TP347H,德国 F12 钢,美国 316L、T/P91 等钢种目前多用于壁温 600~620℃ 的过热器和再热器管子,微量多元合金化是该类钢种的共同特点,铬含量约为 10%~20%,其他元素含量更少。多种元素的相互作用,使该类钢具有更高的化学稳定性和组织稳定性,因而耐热性能更好。

5. 壁温小于或等于 600~620℃ 的过热器管子及壁温小于或等于 600℃ 的蒸汽管道

当锅炉气温超过 570℃ 时,高温段过热器管子的壁温可达到 620℃。这时,珠光体型的低合金耐热钢已不能满足要求,需要采用高合金耐热钢。如日本的 Super304H、HR3C 奥氏体型耐热钢,美国和日本的 T/P92、T/P122 铁素体(马氏体)型耐热钢等。这些钢种目前多用于壁温 620℃ 以下的过热器和再热器管子、管道及联箱等。

第五节 新型耐热钢的应用

一、新型耐热钢的应用及焊接概况

近几年我国电厂发电机组正在向大容量、高参数、高效率、环保方向发展,需要采用耐高温、耐高压的新型耐热钢。目前亚临界、超临界、超超临界发电机组所采用的新型耐热钢主要有 WB36、T23、T/P91、T/P92、T/P122、Super304、HR3C 等。国内多家科研机构已对常用的新型耐热钢焊接材料的化学成分、机械性能和蠕变断裂强度进行了大量试验研究,主要研究了超(超)临界电厂锅炉管道用钢的焊接性能与使用安全性。

二、常用新型耐热钢的化学成分、机械性能及高温性能

电厂锅炉管道常用钢种有 T/P23、T/P24、T/P12、T/P22、G102、T9、T/P91、T/P92、T/P122、TP304H、TP347H、Super304、HR3C 等耐热钢。钢的化学成分见表 1-2,常温和高温机械性能、相关标准、使用温度见表 1-3~表 1-5。其中 T/P23 钢是在 T/P22 钢的基础上添加 1.6% 钨和微量钒、铌、氮、硼元素,以及控制钼 0.2%,控制碳 0.04%~0.10% 之后的改进型耐热钢。经过淬火+回火热处理,蠕变强度和许用应力有了显著提高。降低含碳量是为了改善焊接性,降低硬度,降低焊接预热温度和取消焊后热处理。采用先进的钢材精炼技术,通过严格控制微量有害元素含量,在制造和生产过程中获得稳定的机械性能和较好的蠕变性能。T24 钢是在 T22 (21/4Cr-1Mo) 钢的基础上添加钒、钛、硼元素来提高蠕变断裂强度的。在化学成分中通过降低碳含量来降低焊接热影响区硬度,改善焊接性。而 T/P91、T/P92、T/P122 钢是在 T9 钢的基础上添加强化合金元素改进而成的;Super304、HR3C 不锈钢是在 18-8、25-20 类型不锈钢的基础上添加强化合金元素改进而成的;WB36 钢是在 15Mo3 钢的基础上添加强化合金元素改进而成的。新型耐热钢的共同特点是提高了工作温度和蠕变断裂强度,改善了钢材的焊接性。其优点如下:

(1) 提高了电厂锅炉的工作温度和压力,可用于超(超)临界锅炉,能够提高效率,降低煤耗,减少污染。