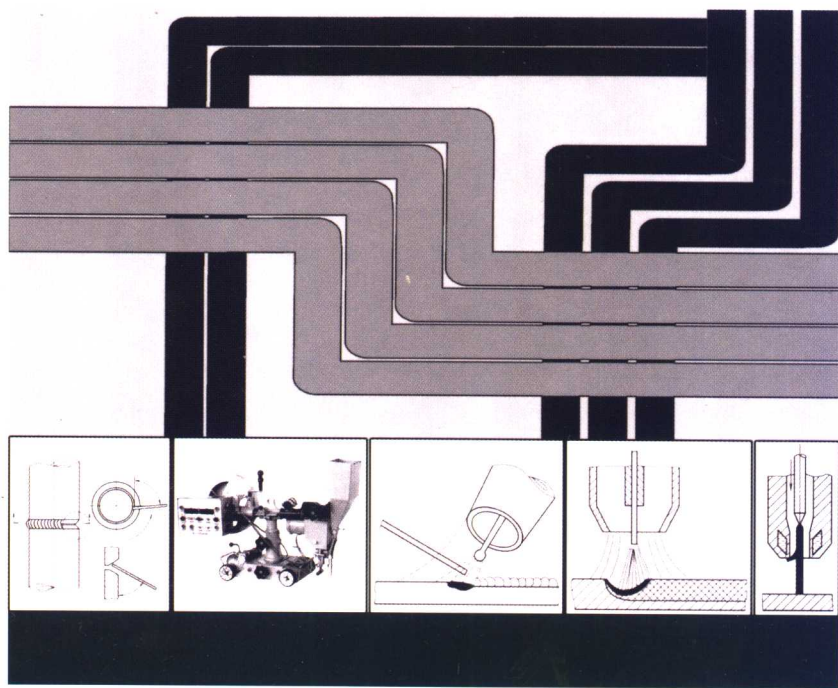


顾纪清 阳代军 等编著

管道焊接技术



Chemical Industry Press



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

管道焊接技术

顾纪清 阳代军 等编著



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

管道焊接技术/顾纪清, 阳代军等编著. —北京: 化学工业出版社, 2005. 6

ISBN 7-5025-7223-6

I. 管… II. ①顾…②阳… III. 管道-焊接工艺-基本知识 IV. TG457. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 063189 号

管道焊接技术

顾纪清 阳代军 等编著

责任编辑: 任文斗

文字编辑: 韩庆利

责任校对: 顾淑云 周梦华

封面设计: 尹琳琳

*

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 22 字数 542 千字

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7223-6

定 价: 48.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

管道管网纵横交叉，日夜输送着工业的“血液（油、汽、气、水）”，管道被誉为工业“动脉”。

长输管道是现代物业输送的重要手段，管道焊接是长输管道铺设的关键，是现代工业生产中不可缺少的生产技术。广泛用于石油、化工、电力、电站、锅炉、机械、船舶、冶金、压力容器、建筑、汽车等业以及军工领域。现代工程上天入海离不开管道焊接，工业生产离不开“动脉”。随着国民经济的快速发展，管道焊接质量越来越受到各行各业的关注。

半个世纪以来，出版管道焊接方面的书很少，至于全面系统讲述国内管道焊接技术的书几乎是空白。读者渴望有一本管道焊接技术的科技书籍在工作中使用。在世界工程师大会“积极承担社会责任，贴近实际”的感召下，作者把自己长期从事钢结构和管道制作的实践经验并吸收了同行的宝贵经验，编著了本书，奉献给广大读者，供焊管工作者在工作中参考，希望能对我国管道焊接技术进步起到推动作用。

本书共 11 章，第 1 章是基础知识，旨在讲述焊管工艺参数及内在质量，从理性上掌握提高管道内在质量的要领。接着介绍管道材料，管道焊接的规范规程和有关技术标准，焊接管道的设备以及焊前准备工作。

本书着重讲述钢质管道焊接 21 种常用方法，高频焊管、直缝埋弧焊管、螺旋缝焊管 3 种制管方法，长输管道现场焊管的 4 种方法以及国外长输管道的发展趋势及焊接工艺。

管道焊接涉及各行各业，量大面广。鉴于电站锅炉和机械行业有大批管道焊接，在第 7 章中介绍了不锈钢、耐热钢、低温钢、耐蚀钢管道焊接特点和技术。在第 10 章中介绍钛、镍、铝、铜管的焊接特点和技术。第 11 章讲述塑料管道的焊接机理和焊接技术。

本书第 2、3、8 章分别由强秀珍、李雪芳及钱芬撰写，第 11 章由阳代军博士撰写，其余各章由顾纪清撰写。

本书内容和实例大部分来自实践和第一线，比较实用，可作为从事管道设计、制造、焊接施工技术人员的参考书和工具书，也可供从事管道焊接工程的材料采购、监察、质量检测、检验管理人员参考。同时也可作为大专院校相关专业辅助教材以及电力、石油、化工、机械等行业职业学校相关专业的教材。

本书编著过程中得到同行们的帮助和悉心指导，特致谢意，向关心本书出版的焊接界朋友及所引用文献的作者表示诚挚的谢意，这些文献资料丰富了本书的内容。

由于涉及面广，水平有限，难免有不足之处，敬请广大读者批评指正。

编者

2005 年 5 月

内 容 提 要

本书以“压力管道及承重管道必须全熔透，关键在根焊”作为框架要求，从设计及施工技术人员角度出发，较为系统地讲述了管道焊接基础知识、管道材料、焊管规范规程标准、焊管设备及焊前准备，并且着重阐述了钢质管道焊接21法，制管的3种方法，长输管道现场焊管的4种方法，以及不锈钢、耐热钢、低温钢、耐蚀钢、钛、镍、铝、铜8种常用材料的特性、焊接特点和管道焊接技术。本书还讲述了塑料管道的焊接机理、方法和技术。本书内容贴近实际，实用性强。

本书可作为从事管道设计、制造、焊接施工工程技术人员和广大焊接技术工人的工具书，也可作为从事管道焊接的材料采购、监察、质量检测管理人员的参考书，以及大专院校相关专业的辅助教材。

目 录

第 1 章 基础知识	1
1.1 焊接管道受力及质量因素	1
1.1.1 焊接管道接头类别和受力基本概念	1
1.1.2 影响管道焊接的质量因素	1
1.2 钢材金相组织	2
1.3 影响焊缝金属的杂质和气体	3
1.3.1 硫	3
1.3.2 磷	3
1.3.3 焊接区内的气体	3
1.4 钢材的焊接性	4
1.5 焊缝余高与应力集中	5
1.5.1 对接焊缝余高	5
1.5.2 T 形接头焊缝余高	6
1.6 引弧板、引出板和包角焊	6
1.7 焊接热效率、热循环、线能量、预热温度和层间温度	7
1.7.1 焊接热效率	7
1.7.2 焊接热循环	8
1.7.3 焊接线能量	8
1.7.4 预热温度	9
1.7.5 层间温度	10
1.8 焊接接头剖析	10
1.8.1 熔合区	10
1.8.2 焊接热影响区的组织和性能	10
1.8.3 热应变脆化区	12
1.9 焊缝金属的结晶组织	12
1.9.1 特点	12
1.9.2 特征	12
1.9.3 焊缝金属二次结晶组织	13
1.10 焊接变形和焊接应力	13
1.10.1 焊接变形	14
1.10.2 影响焊接变形的因素	14
1.10.3 控制焊接变形的措施	15
1.10.4 焊接应力	15
1.11 焊接裂纹及其他缺陷的防止	16
1.11.1 热裂纹	16
1.11.2 冷裂纹和延迟裂纹	17

1.11.3	再热裂纹	18
1.11.4	层状撕裂	18
1.11.5	未焊透和未熔合	18
1.11.6	夹渣	19
1.11.7	气孔	19
1.11.8	咬边	19
1.11.9	一级、二级焊缝的质量等级及缺陷分级 (GB 50205—2001)	20
1.12	焊接接头的质量控制	20
1.12.1	材料匹配	20
1.12.2	焊接工艺方法	20
1.12.3	焊接线能量及焊接参数	21
1.12.4	加强焊前预热, 控制层间温度	21
1.12.5	焊接方法	22
1.12.6	尽量减少组装造成的焊缝残余应力	22
1.12.7	对焊缝余高和焊缝咬边不容忽视	22
第2章	管道金属材料	23
2.1	管道金属材料的选用	23
2.1.1	压力管道金属材料的特点	23
2.1.2	压力管道金属材料的选用	24
2.2	API标准和管线钢	27
2.3	钢管	29
2.3.1	低压和中压锅炉用无缝钢管 (GB 3087—1999)	29
2.3.2	低压和中压锅炉用电焊钢管 (YB 4102—2000)	30
2.3.3	低压液体输送用焊接钢管 (GB/T 3091—2001)	30
2.3.4	锅炉用无缝钢管	33
2.3.5	结构用无缝钢管	41
2.3.6	石油、天然气输送管道用直缝焊管 (GB/T 9711.1—1997)	54
2.3.7	石油、天然气输送管道用直缝焊管 (GB/T 9711.2—1999)	55
2.3.8	石油、天然气输送管线用直缝焊管 (API5L)	56
2.3.9	钢管力学性能和化学成分	57
2.4	钢板	57
2.4.1	压力容器用钢板	57
2.4.2	低温压力容器用低合金钢板 (GB 3531—1996)	59
第3章	管道焊接技术标准	62
3.1	压力管道分类	62
3.1.1	压力管道的定义	62
3.1.2	压力管道分类、分级	63
3.1.3	中石化集团公司压力管道分类	63
3.1.4	管子系列标准	63
3.2	管道焊接常用标准	64
3.2.1	管道焊接常用标准	64

3.2.2 国外常用标准体系	65
3.3 压力管道焊接规范规程标准摘录	66
3.3.1 国家质量技术监督局压力容器安全技术监察规程 [1999] 154 号 (摘录)	66
3.3.2 钢制压力容器 (GB 150—1998)	69
3.3.3 电力建设施工及验收技术规范 (管道篇) (DL 5031—1994)	69
3.3.4 船舶压力管系的焊接 (中国船级社《材料与焊接规范》1998)	70
3.3.5 工业金属管道工程施工及验收规范 (管道加工、管道焊接) (GB 5023—1997)	72
3.3.6 现场设备、工业管道焊接工程施工及验收规范 (管道焊接) (GB 50236)	76
3.3.7 输油输气管道线路工程施工及验收规范 (SY 0401—1998)	82
第 4 章 焊管设备	87
4.1 手工电弧焊	87
4.1.1 手工电弧焊技术	87
4.1.2 手工电弧焊设备	88
4.2 埋弧自动焊	92
4.2.1 工艺参数	92
4.2.2 埋弧自动焊设备	93
4.3 钨极氩弧焊 (TIG)	98
4.3.1 钨极氩弧焊电弧的特点	98
4.3.2 钨极氩弧焊的不足	98
4.3.3 氩弧焊分类	98
4.3.4 钨极氩弧焊的工艺参数	99
4.3.5 钨极氩弧焊引弧的三种方法	99
4.3.6 钨极端部形状和电源	99
4.3.7 氩弧焊的应用参数	100
4.3.8 手工钨极氩弧焊设备	100
4.4 MIG/MAG 熔化极气体保护焊技术及设备	106
4.4.1 特点	106
4.4.2 MIG/MAG 焊接工艺参数	107
4.4.3 MIG/MAG 设备	109
4.5 二氧化碳气体保护焊	110
4.5.1 CO ₂ 气体保护焊特点	110
4.5.2 CO ₂ 气体保护焊熔滴过渡种类及特点	111
4.5.3 设备及组成系统	111
4.6 等离子弧焊技术及设备	112
4.6.1 概述	112
4.6.2 等离子弧焊设备	113
4.6.3 设备品种	113
4.7 气焊方法及设备	114
4.7.1 气焊特点	114
4.7.2 气焊操作方法	116

4.8 热切割及设备	116
4.8.1 气体火焰热切割	116
4.8.2 等离子弧切割	121
第5章 焊前准备	126
5.1 原材料管理	126
5.1.1 钢材订货	126
5.1.2 检验	126
5.1.3 复验	126
5.1.4 堆放	126
5.1.5 钢材管理	126
5.1.6 钢材发放	127
5.2 金工展开	127
5.2.1 展开原理	127
5.2.2 三种基本展开方法	127
5.3 号料	133
5.3.1 管道的中性层和下料计算	133
5.3.2 符号	134
5.3.3 钢管最小弯曲半径及长度计算	134
5.4 切割	134
5.4.1 各种切割方法的原理和特点	135
5.4.2 剪切	135
5.4.3 锯割	135
5.4.4 气割	136
5.4.5 等离子弧切割	137
5.5 边缘加工	138
5.5.1 坡口三要素	138
5.5.2 坡口加工	139
5.6 成形加工	145
5.6.1 卷板(滚圆)	145
5.6.2 管子、管件及管道附件的配制(《电力建设施工及验收技术规范》 DL 5031—1994)	148
5.7 焊前技术准备	150
5.7.1 焊接工艺评定试验	150
5.7.2 对焊接技术人员的要求	150
5.7.3 对焊工的要求	150
第6章 钢质管道焊接 21 法	151
6.1 概论	151
6.2 焊接材料	153
6.2.1 电焊条	153
6.2.2 焊丝	160
6.2.3 焊剂	164

6.2.4 焊接材料选用	168
6.3 焊管技术	168
6.3.1 焊接操作基本技术	168
6.3.2 焊管方法与技术(21法)	170
6.3.3 钢管与法兰连接	189
6.4 焊接管道检验	190
6.4.1 焊缝外表质量检验	190
6.4.2 无损检测	191
6.4.3 工业金属管射线照相检验和超声波检验(GB 50235—1997)	191
第7章 不锈钢耐热低温耐蚀钢管道焊接	194
7.1 概述	194
7.2 不锈钢特性	194
7.2.1 分类和牌号	194
7.2.2 不锈钢的特性	195
7.3 不锈钢焊接特点	198
7.3.1 可焊性综述	198
7.3.2 焊缝腐蚀、脆化及防止措施	198
7.4 奥氏体不锈钢管焊接	199
7.4.1 手工电弧焊	199
7.4.2 埋弧焊	207
7.4.3 钨极氩弧焊	210
7.4.4 熔化极氩弧焊	212
7.4.5 等离子弧焊	213
7.4.6 气焊	214
7.5 马氏体不锈钢板和钢管焊接	214
7.5.1 分类及特性	214
7.5.2 焊接特点	214
7.5.3 焊接方法与焊接材料	214
7.5.4 焊接工艺	215
7.6 铁素体不锈钢板和管焊接	216
7.6.1 焊接特点	216
7.6.2 焊接工艺	216
7.7 铁素体-奥氏体双相不锈钢板及钢管的焊接	217
7.7.1 铁素体-奥氏体双相不锈钢的特性	217
7.7.2 典型的铁素体-奥氏体双相不锈钢	217
7.7.3 三种双相不锈钢的焊接特点	218
7.8 不锈钢管焊接工程实例	218
7.8.1 00Cr20Ni18Mo6CuN耐蚀不锈钢焊接	218
7.8.2 耐腐蚀性能	219
7.8.3 加工性	219
7.8.4 材料的焊接性	219

7.8.5	不锈钢厚壁容器用埋弧自动焊焊接	220
7.8.6	不锈钢中板炉体埋弧自动焊	221
7.8.7	不锈钢导管环缝焊接	222
7.8.8	二氧化碳药芯焊丝焊接不锈钢管	223
7.8.9	等离子弧焊焊接不锈钢容器“乳化缸”	223
7.8.10	手工电弧焊焊接 $\phi 900\text{mm} \times 8\text{mm}$ 不锈钢管道	224
7.8.11	TP321 管材的焊接	225
7.9	耐热钢、低温钢、耐蚀钢管焊接	226
7.9.1	耐热钢管焊接	226
7.9.2	珠光体耐热钢焊接特点及工艺要点	226
7.9.3	奥氏体型耐热钢焊接特点及工艺要点	232
7.9.4	马氏体型耐热钢焊接	233
7.9.5	铁素体耐热钢焊接	233
7.9.6	耐热钢管焊接实例	233
7.9.7	低温用钢的焊接	235
7.9.8	耐蚀钢焊接	240
7.9.9	工程实例——耐蚀合金钢管 MoNA1400 的焊接	241
第8章	焊接制管	243
8.1	概述	243
8.2	高频直缝电阻焊钢管	243
8.2.1	高频电阻焊	243
8.2.2	高频感应焊	243
8.2.3	高频焊特点	244
8.2.4	高频直缝电阻焊钢管生产	244
8.2.5	高频焊应用范围	244
8.2.6	高频电阻焊焊接速度	244
8.3	钢管生产工艺流程及主要特点	244
8.4	螺旋缝埋弧焊管	246
8.4.1	焊接材料	246
8.4.2	旋转口埋弧焊工艺参数	248
8.4.3	关于螺旋焊管生产标准 (GB/T 9711.1—1998 规定)	248
8.4.4	可能出现的质量问题分析	248
8.5	直缝埋弧焊钢管	250
8.5.1	国外制管工业发展	250
8.5.2	我国直缝埋弧钢管	250
8.5.3	大口径直缝埋弧钢管生产线 (巨龙直缝埋弧焊管生产线)	250
第9章	长输管道焊接技术	253
9.1	长输管道焊接技术发展概论	253
9.1.1	管材钢级现状与发展趋势	253
9.1.2	焊接制管工艺 (管型)	254
9.1.3	管道钢管规格 (管径和长度)	255

9.2	前苏联长输管道焊接	256
9.2.1	焊前准备及对接口组装	256
9.2.2	管子焊接站的焊接工作	258
9.2.3	双面埋弧自动焊工艺	261
9.2.4	在线路工地上管道手工电弧焊的设备及技术工艺	262
9.3	德国、加拿大天然气输送管道的施工技术	265
9.3.1	大口径钢管弯管的制作	265
9.3.2	X80 管道的试压	265
9.3.3	焊缝检测	266
9.4	我国长输管道焊接工程	266
9.4.1	西气东输工程	266
9.4.2	药芯焊丝半自动焊焊长输油管	271
9.4.3	上向与下向复合焊接工艺焊接长输大直径厚壁水管	272
第 10 章	钛镍铝铜管焊接	274
10.1	钛合金管焊接	274
10.1.1	钛及钛合金分类	274
10.1.2	钛材特点	274
10.1.3	钛制品的焊接特点	274
10.1.4	提高焊接质量的工艺措施	274
10.1.5	钛的焊接方法	275
10.1.6	钛及钛合金焊接工艺	276
10.1.7	钛及钛合金管道焊接工艺	277
10.1.8	焊接实例	278
10.2	镍管焊接	279
10.2.1	镍及镍合金的焊接性能	279
10.2.2	镍及镍合金手工焊接工艺	280
10.2.3	钨极氩弧焊	281
10.2.4	实例——Ni200 纯镍管道焊接	281
10.3	铝及铝合金管道的焊接	282
10.3.1	铝及铝合金焊接特点	282
10.3.2	焊接工艺	283
10.3.3	管道焊接	285
10.4	铜及铜合金管焊接	286
10.4.1	分类及牌号	286
10.4.2	焊接材料	287
10.4.3	铜及铜合金可焊性分析	288
10.4.4	焊管要领	291
第 11 章	塑料管道的焊接	292
11.1	概述	292
11.2	塑料管道的特点	293
11.3	塑料管道的规格尺寸	294

11.4	塑料管道的连接技术	297
11.4.1	热熔对接焊和电熔焊	297
11.4.2	热熔承插焊	297
11.4.3	机械连接	297
11.5	塑料管道焊接的机理	298
11.6	热熔对接焊	299
11.6.1	热熔对接焊的基本过程与参数	300
11.6.2	影响热熔对接焊接头性能的因素	302
11.6.3	热熔对接焊接头的焊接性能分析	303
11.6.4	热熔对接焊机的分类及其特点	304
11.6.5	热熔对接焊机的使用	307
11.6.6	热熔对接焊机的故障分析	308
11.6.7	焊接接头的基本要求	309
11.7	电熔焊	310
11.7.1	电熔焊的基本过程	310
11.7.2	电熔焊管件	310
11.7.3	电熔焊的控制方式	311
11.7.4	电熔焊接过程分析	312
11.7.5	影响电熔连接接口质量的几个因素	314
11.7.6	电熔焊机的特点及性能	315
11.7.7	电熔焊机的使用	316
11.8	施工辅助工具	316
附录 锅炉压力容器压力管道焊工考试与管理规则		318
参考文献		338

第1章 基础知识

1.1 焊接管道受力及质量因素

管道作为物料输送的一种特种设备，在石油化工生产装置中管道的安装工作量约占整个工作量的 1/2，占据着很重要的位置；管道在远距离输送和电站、锅炉、船舶等动力装置方面也是至关重要的。改革开放以来，随着钢结构工程的迅速发展，管道普遍用于建筑工程中，作为梁、柱、桁架、网架、塔架等承重构件，管道还作为支架，满足管道承重、限位、防振。管道几乎遍及国民经济建设的各行各业。下面介绍一些焊接管道受力及质量因素的基础知识。

1.1.1 焊接管道接头类别和受力基本概念

锅炉及压力容器的结构形式各种各样，有塔、换热器、储罐、管道和锅炉筒体等。大多数是各种圆锥形封头、接管和管接头等组成。也就是这些受压部件最基本的形状是圆柱体，其焊接接缝分成 A、B、C、D 四类，锅炉及压力容器焊接接头形式分类示意图 1.1。

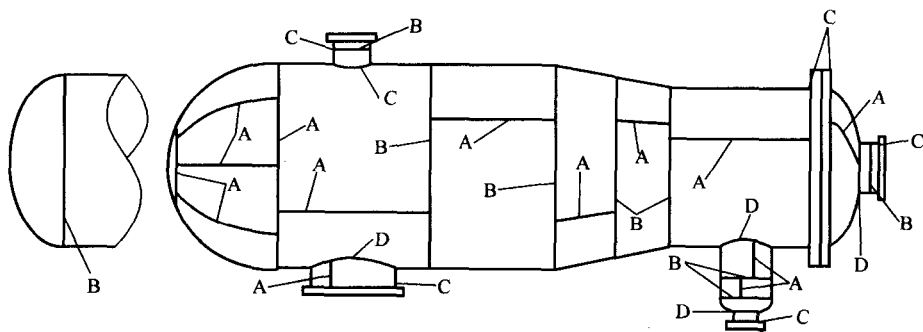


图 1.1 锅炉及压力容器焊接接头形式分类示意

① A 类接头 是筒体纵缝的对接接头。为什么把纵缝列为 A 类接头呢？因为其所受的工作应力比 B 类接头高一倍，也就是说筒体纵缝应力是环绕应力的一倍。

在压力容器爆破试验中，裂口一般均在纵缝上。有时听到媒体报道某水管爆裂、某油管爆裂，问题多半发生在纵缝。

② B 类接头 如筒体环缝等。A 类接头和 B 类接头都是锅炉、压力容器、压力管道中的重要焊道。

③ C 类接头 为角接头。如法兰与管道，管子与管板等角焊缝。对于高压容器焊缝要求全焊透。作为管道按图纸设计要求而定。

④ D 类接头 主管道与支管、与人孔管接的相贯焊缝，处于应力集中部位，弹性应力集中系数大致在 1.5~2.5 范围内，焊缝在较高应力状态下工作。同时，焊接时刚性拘束较大，容易产生缺陷。因此 D 类接头是锅炉、压力容器、压力管道中的重要焊缝。

1.1.2 影响管道焊接的质量因素

由国内外发生的管道破坏事故的分析结果可知，其破坏形式为脆性破裂（即破裂前一般

没有明显的塑性变形), 破裂通常由低周疲劳、应力腐蚀和蠕变等原因所引起。这些破坏事故与结构设计、焊接质量、探伤技术和操作有很大关系。

一般来说, 多数结构的破断, 往往集中于应力、局部应力和拉伸残余应力较高的焊接接头区的缺陷处, 其原因如下。

① 焊接缺陷, 特别是未焊透。例如某圆柱形管道钢梁, 现场装焊时人无法进去双面焊, 只得在管子内衬垫板单面焊。以下三种情况均无法全焊透: 不开坡口, 手工电弧焊缝无法达到要求; 虽然开了坡口, 但不到位, 角度太小、太浅, 无法熔透; 坡口符合要求, 但根部间隙太小, 无法熔透。表面质量很好, 实际上 50% 深度是虚焊。

② 责任性不强, 素质不高。工厂内有这么一条规章制度, 也是一条工艺纪律。即施工前对上道工序实行检验, 若不合格, 必须返修且合格后才能进行下道工序。如果发现坡口间隙不合格, 不能擅自焊接。若这样做, 可以避免事故。

③ 虽然最终焊接接头质量可以用射线探伤, 把住质量关, 探伤仪是科学的、不会作假, 可是探伤的部位是人选的, 值得指出的是: 往往因疏忽大意, 探伤时的误探和漏探是十分有害的, 误探导致不必要的返修, 影响焊接接头的性能; 漏检则意味着可能使超标缺陷留存于焊接接头中, 成为导致结构破坏的潜在危险因素。产品质量检验队伍中, 有一大批忠于职守、认真负责、大公无私的优秀人员, 在焊缝的重要部位划出要探测检查的标记, 严格把关。但也有个别的人事先摸透了检测人员的意图, 知道某部位要探测, 该部位焊接特别好, 一次拍片合格率很高。可是, 其他未探测部位是否有隐患呢? 所以, 除了对探伤设备及灵敏度和可靠性重视外, 还必须加强对检验探伤人员培训, 以便从探伤把关, 控制和确保压力管道的制造质量。

④ 把握住主体和附件的质量关系。压力容器(含压力管道)的焊缝固然重要, 可是附件的焊缝也不能疏忽, 有时往往从附件引发到主体的损坏。有一批液氮钢瓶, 主焊缝焊得很好, 全部达到要求。业主提出为了平时滚动方便, 要在筒体上焊两道扁钢, 以便套上橡胶圈。扁钢是附件, 可是由于扁铁箍的接头没有焊牢, 仅焊了一些点焊。在日常滚动运行时(由于充气时筒体膨胀, 无负载时筒体收缩), 该扁钢的裂缝引发到筒体上出现裂缝。联想到有些内部衬垫板的筒体, 垫板接头没焊牢, 也出现类似问题。可见附件的焊缝缺陷会引发到主体上去, 这是必须引起注意的。缺陷的存在、性能的下降、应力水平的提高是焊接接头区成为结构中薄弱环节的三大要素。因此从一条焊缝接头的质量反映了压力容器、压力管道的制造质量, 并直接影响到结构的使用安全性。影响管道焊接质量的因素很多, 将在以后有关章节介绍。

1.2 钢材金相组织

钢材性能取决于化学成分和钢材组织。焊缝同样如此, 焊缝质量可以外观检查, 用射线无损探测, 或用试样进行力学性能试验。但是要了解其内部组织, 只有经过取样、打磨、抛光、腐蚀显示之后, 在金相显微镜下观察到金相组织。

为什么要观察焊缝金相组织? 若要获得优良的焊缝, 首先要遵守工艺, 严格控制焊接参数, 控制输入的热量(俗称线能量)。线能量太高会使焊缝过热, 出现过热组织, 晶粒粗大, 对焊缝力学性能不利。所以要观察焊缝金相组织。主要有以下八种组织。

① 铁素体 用符号 F 表示, 其特点是强度和硬度低, 但塑性和韧性很好。含铁素体多

的钢（如低碳钢）就具有软而韧性好的特点。

② 渗碳体 是碳和铁的化合物（分子式 Fe_3C_2 ），其性能与铁素体相反，硬而脆。随着钢中含碳量增加，渗碳体含量也增加，硬度、强度增加，塑性、韧性下降。

③ 珠光体 是铁素体、渗碳体二者组成的机械混合物，用符号 P 表示，其性能介于铁素体和渗碳体之间，其硬度和强度比铁素体高。但是因为珠光体中的渗碳体要比铁素体少得多，所以珠光体脆性并不高。在高位显微镜下可以清楚地看到珠光体中的片状铁素体与渗碳体一层层地交替分布，随着片层密度增大、层间距减小，珠光体硬度和强度增高，但塑性和韧性下降，总的评价是，其力学性能介于铁素体和渗碳体之间，强度较高、硬度适中，有一定的塑性。

④ 奥氏体 用符号 A 表示，其强度和硬度比铁素体高，塑性和韧性良好，无磁性。

⑤ 马氏体 用符号 M 表示，有很高的强度和硬度，很脆，塑性很差，延展性很低，几乎不能承受冲击载荷。马氏体加热后容易分解为其他组织。

⑥ 贝氏体 是铁素体和渗碳体的机械混合物，介于珠光体和马氏体之间的一种组织，用符号 B 表示。根据形成温度不同分为：粒状贝氏体、上贝氏体（ $B_{\text{上}}$ ）和下贝氏体（ $B_{\text{下}}$ ）。粒状贝氏体强度较低，但具有较好的韧性； $B_{\text{上}}$ 韧性最差， $B_{\text{下}}$ 既具有较高的强度，又具有良好的韧性。

⑦ 魏氏组织 是一种过热组织，由彼此交叉约 60° 的铁素体针片嵌入钢的基体而成的显微组织。碳钢过热，晶粒长大后，高温下晶粒粗大的奥氏体以一定的速度冷却时很容易形成魏氏组织，粗大的魏氏组织使钢材（或焊缝）塑性、韧性下降，脆性增加。

⑧ 莱氏体 大于 727°C 的莱氏体称为高温莱氏体；小于 727°C 的莱氏体称为低温莱氏体，莱氏体性能与渗碳体相似，硬度很高，塑性很差。

1.3 影响焊缝金属的杂质和气体

1.3.1 硫

硫是焊缝中有害元素之一，它与铁生成低熔点的硫化铁（ FeS ）。焊接时 FeS 会导致焊缝热裂和在热影响区出现液化裂纹，使焊接性能变坏，降低冲击韧性和耐蚀性，促使产生偏析。同时，硫以薄膜形式存在于晶界，使钢的塑性和韧性下降。

熔液中的 Mn 、 MnO 、 CaO 具有一定的脱硫作用，与硫反应后，生成 MnS 、 CaS 都进入熔渣中。由于 MnO 、 CaO 均属碱性氧化物，在碱性熔渣中含量较多。所以碱性熔渣脱硫能力比酸性熔渣强。因此，焊接含硫偏高的钢材，采用碱性焊条具有抗裂作用。

1.3.2 磷

磷也是焊缝中尚存的有害元素之一，它会增加钢的冷脆性，恶化钢的焊接性能，大幅度降低焊缝金属的冲击韧性。焊接奥氏体类钢或焊缝中含碳量较高时，磷会促使焊缝金属产生热裂纹。由于碱性熔渣中含有 CaO ，所以脱磷效果比酸性熔渣好，当然最好的办法是在母材及焊接材料中限制硫、磷的含量。

1.3.3 焊接区内的气体

(1) 气体的来源

焊接过程中，焊接区内充满大量气体，主要有 CO 、 CO_2 、 H_2 等。由于焊条、焊丝、工件潮湿，有油污、铁锈，受热后产生气体以及空气侵入熔池。采用低氢型焊条施焊时，焊缝

含氢量比较低,用 CO_2 气体保护焊时,含氢量最低。氢使焊缝塑性严重下降,是产生气孔的根源,也会导致延迟裂纹的产生,还会在拉伸试样断面上出现白点。

减少焊缝金属中含氢量常用措施有:

- ① 消除焊件和焊丝表面上的铁锈、杂质和油污;
- ② 对焊丝、焊剂、焊条进行烘焙,保持干燥;
- ③ 在焊条药皮和焊剂中加入适量的氟石 (CaF_2)、硅砂 (SiO_2),具有较好的去氢效果;
- ④ 采用低氢型焊条、超低氢型焊条和碱性焊剂;
- ⑤ 在焊接低合金钢对接焊缝时,为防止焊接时吸入空气及潮湿,可在背面先用手工焊封底,正面用碳刨刨槽焊接,再反身将原先的封底焊刨去,正式封底焊,这样可防止底部吸入空气,效果很好。

(2) 氧气

氧气主要来源于空气、药皮和焊剂中的氧化物、水分及焊接材料表面的氧化物。焊缝金属中含氧量增加,焊缝强度、硬度和塑性会明显下降,出现热脆、冷脆和时效硬化,并在焊缝中形成气孔。

在焊接材料中加入脱氧剂,以铁合金的形式加入到药皮中去,如锰铁、硅铁等。埋弧焊常采用合金焊丝,如 H08MnA 、 H10MnSi 等,脱氧效果较好。所以用碱性焊条施焊,其含氧量较低,塑性、韧性相应提高。因此,碱性焊条常用来焊接低合金钢及重要结构。

(3) 氮气

氮气主要来自焊接区周围的空气。氮是提高焊缝金属强度、降低塑性和韧性的元素,也是导致焊缝中产生气孔的原因之一。

1.4 钢材的焊接性

碳钢的焊接性(又称可焊性)主要取决于含碳量,随着含碳量增加,焊接性逐渐变差。把钢中合金元素(包括碳)的含量按其作用换算成碳的相当含量,称为该钢材的碳当量。可作为评定钢材焊接性的一种参考指标。

碳钢中的元素除 C 外,主要是 Mn 和 Si,其含量增加,焊接性变差,但其作用不如碳强烈。国际焊接学会推荐的碳当量公式,适用于含碳量不小于 0.18% 的低合金高强度钢 ($\sigma_b=400\sim700\text{MPa}$),公式为

$$C_{eq}=C+\frac{\text{Mn}}{6}+\frac{\text{Cr}+\text{Mo}+\text{V}}{5}+\frac{\text{Ni}+\text{Cu}}{15}(\%)$$

碳当量值只能在一定范围内概括地、相对地评价钢材的焊接性。因为碳当量只表达了钢材的化学成分对焊接性的影响,其他如焊件的刚性、焊接时冷却速度、焊接热循环中的最高加热温度和高温停留时间等参数均会影响可焊性。例如同—化学成分的钢材,焊接过程中由于冷却速度不同,可以得到不同的焊缝组织。冷却速度快,易产生淬硬组织,焊接性就会变差,当钢材碳当量值相等时,不能看成焊接性完全相同。

必要时可按下列公式计算出冷裂纹敏感系数 P_{cm} 代替碳当量,来衡量钢材的可焊性。此公式适用于含 C 0.07%~0.22%、含 Mn 0.4%~1.4%、 $\sigma_b=400\sim900\text{MPa}$ 的低合金高强度钢,计算公式为

$$P_{cm}=C+\frac{\text{Si}}{30}+\frac{\text{Mn}+\text{Cu}+\text{Cr}}{20}+\frac{\text{Ni}}{60}+\frac{\text{Mo}}{15}+\frac{\text{V}}{10}+5B(\%)$$