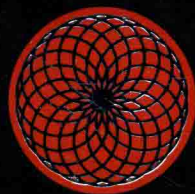


“十二五”
国家重点图书

MODERN
WELDING
ENGINEERING
HANDBOOK



现代 焊接工程手册

容器锅炉卷

李涛 主编
周武强 副主编

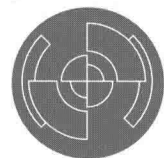


化学工业出版社

“十二五”
国家重点图书

MODERN
WELDING
ENGINEERING
HANDBOOK

现代 焊接工程手册



容器锅炉卷

李涛 主编
周武强 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

《现代焊接工程手册 容器锅炉卷》主要涉及的工程产品为容器和锅炉，各部分均包含产品结构特点、原材料焊接性、焊接工艺技术、焊接接头质量检验方法及要求、焊接接头热处理工艺技术等，考虑了容器锅炉常见的对接接头、角接接头和搭接接头等焊接接头形式，及其对接焊缝、角焊缝和组合焊缝等焊缝形式；分析了不同产品形式和同产品不同零部件使用的各种原材料焊接工艺等；给出了相匹配的焊工资格、焊接材料、焊接工艺技术参数、技术措施等。各章还列举了典型产品焊接案例，附录列出了本卷所引用的国内外现行标准规范。

本卷以最新国家和行业标准为编写依据，结合目前我国工厂制造和工程建设焊接领域、检测方法的最新成果，在广泛调研的基础上，根据工厂制造和现场组焊存在焊接环境的巨大差异为编排界限，将容器工厂制造按产品不同材质分类进行编写，容器现场组焊按产品种类进行编写；而锅炉则不分种类和级别，仅区分工厂制造和现场安装。

本卷介绍的锅炉压力容器均为特种设备，其生产、经营、使用、检验、检测、监督管理、事故应急救援与调查处理、法律责任均符合《中华人民共和国特种设备安全法》。

本书贴近容器锅炉焊接工程实践适合从事容器锅炉焊接的工程技术人员、焊接检验人员、工程施工管理人员和焊接作业人员查阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代焊接工程手册·容器锅炉卷/李涛主编. —北京:
化学工业出版社, 2015.4

“十二五”国家重点图书

ISBN 978-7-122-22899-4

I. ①现… II. ①李… III. ①压力容器-焊接-技术手册
②锅炉-焊接-技术手册 IV. ①TG44-62②TK226-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 020034 号

责任编辑: 周红 周国庆

文字编辑: 项激

责任校对: 边涛

装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装订: 三河市胜利装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 36 $\frac{1}{2}$ 字数 977 千字 2016 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686)

售后服务: 010-64518899

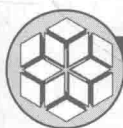
网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 150.00 元

版权所有 违者必究

《现代焊接工程手册》卷目



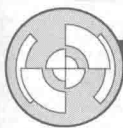
基础卷

- 第 1 篇 焊接理论基础知识
- 第 2 篇 钢材焊接性和常用钢材的焊接要点
- 第 3 篇 焊接材料
- 第 4 篇 焊接方法及设备
- 第 5 篇 焊接生产管理及质量控制



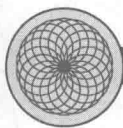
结构卷

- 第 1 篇 钢结构焊接工程概论
- 第 2 篇 建筑、桥梁钢结构焊接
- 第 3 篇 冶金钢结构焊接
- 第 4 篇 回转窑和船体结构焊接



管道卷

- 第 1 篇 管子管件
- 第 2 篇 长输管道
- 第 3 篇 电站管道
- 第 4 篇 化工管道
- 第 5 篇 油气田集输管道
- 第 6 篇 海洋管道
- 第 7 篇 公用管道
- 第 8 篇 管道的其他焊接方法
- 第 9 篇 在役管道抢维修
- 第 10 篇 管道检验与焊接缺陷



容器锅炉卷

- 第 1 篇 容器工作制造
- 第 2 篇 容器现场组焊
- 第 3 篇 锅炉

《现代焊接工程手册》编委会、审委会、秘书组

顾 问 潘际棻

编写委员会

主 任 刘景凤

委 员 戴为志 段 斌 唐伯钢 马德志 张建勋 陈裕川 殷树言
李颂宏 李建军 李文华 张英奎 李 涛 周武强 张亚军
董安霞 郁东健 任永宁 汤志强 张友权

审稿委员会

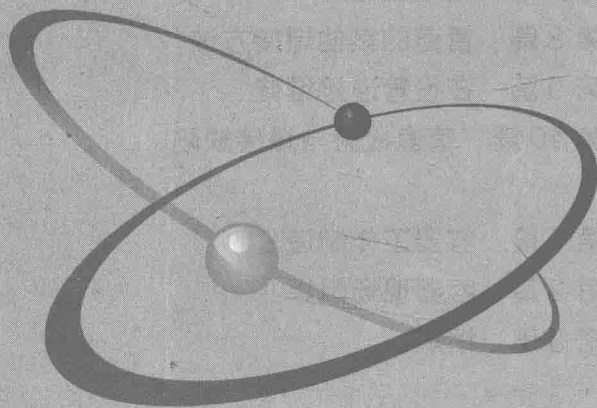
主 任 陈裕川

委 员 唐伯钢 杜则裕 赵 军 胡富申 朱清梅 王茂威
王香云 袁 飞 李颂宏 李建军 王阿鬲

秘书组

秘书长 王阿鬲

秘 书 谢 琦 范绍林 刘 春 赵 驰 王慧智 侯 敏 周云芳



鸣 谢

在编写过程中，得到以下单位的支持和协作，使《现代焊接工程手册》得以顺利编撰完成。在此，《现代焊接工程手册》编委会代表全体编审人员表示衷心感谢！

中国工程建设焊接协会

中冶建筑研究总院有限公司

天津大学

西安交通大学

北京石油化工学院

中国石油管道学院

中冶天工集团有限公司

宝山钢铁股份有限公司

上海宝冶集团有限公司

五冶集团上海有限公司

浙江精工钢结构（集团）有限公司

安徽鸿路钢结构（集团）股份有限公司

珠海瑞凌焊接自动化有限公司

发思特软件（上海）有限公司

中铁山桥集团有限公司

沪东中华（造船）集团有限公司

水利部水工金属结构质量检验检测中心

中国葛洲坝集团股份有限公司

中国水利水电第七工程局有限公司

中国水利电力对外公司

中化二建集团有限公司

中国化学工程重型机械化公司

中国化学工程第三建设有限公司
中国化学工程第七建设有限公司
中国化学工程第十一建设有限公司
中国石化集团南京化学工业有限公司化工机械厂
中石化第四建设有限公司
南京南化建设有限公司
中国能源建设集团
中国能源建设集团北京电力建设公司
中国能源建设集团浙江火电建设公司
中国能源建设集团安徽电力建设第二工程公司
中油吉林化建工程有限公司
中国石油天然气管道局机械厂
中国石油天然气管道第二工程公司
四川石油天然气建设工程有限责任公司
北京城建安装工程有限责任公司

以上为作者供职单位及施工案例提供单位，排名不分先后。



《现代焊接工程手册 容器锅炉卷》

撰稿和审稿人员

主 编 李 涛

副主编 周武强

篇名	篇主编		撰稿	审稿
	姓名	单位		
第 1 篇 容器工厂制造	李 涛	中国化学工程重型 机械化公司	李 涛 董安霞 黄有仁 关一卓 王茂威 胡富申 王慧智 车乐廷 彭建良	陈裕川
	董安霞	中国石化集团南京化学工 业有限公司化工机械厂		
第 2 篇 容器现场组焊	周武强	中化二建集团 有限公司	周武强 郁东健 夏节文 汤志强 赵 杰 李显峰 朱清梅 李青文 任鹏举 张兴华 苏传才 陈长芝 翟东清 朱鸿宾 范绍林 韩丽娟 税小勇 李少宁 黄可中	陈裕川
	郁东健	中石化第四建设 有限公司		
第 3 篇 锅炉	任永宁	北京电力建设公司	任永宁 刘速志 王香云 高文华 程东林 袁 飞	赵 军

FOREWORD 序

工程建设中的焊接，通常是指将同种或异种材料永久地连接在一起的工艺方法，是影响工程建设质量、施工周期和成本的重要工序。在当前生产的各种钢材中，大约有一半以上需要通过焊接方能制造成可资应用的各种设施、设备和产品。今天的焊接，已经发展成为既是一门融合了物理、化学、冶金、材料、电力电子、计算机和自动控制等多种学科的复合学科，同时又是一类关乎国民经济健康发展和社会生产、生活安全运行的十分重要的制造技术。

在我国，各类焊接结构产品得到了日益广泛的使用，尤其是改革开放以来，油气长输管线及储运装置，超大型桥梁，超高压压力容器，超大型远洋运输船舶和港口设备，各类装载运输装备，以及如雨后春笋般矗立在祖国各地形态各异的大型、超大型公共建筑，无一不是通过焊接工艺方法制作与构建。如今，我国钢铁年产量已达到 8 亿吨左右，毫无悬念地成为全世界最大的产钢国、用钢国和焊接制造生产国。

在如火如荼的工程建设实践中，来自各行业的广大焊接工作者攻关夺隘、建树颇丰，很多应用成果达到国际先进甚至领先水平。但从总体上看，我国尚有很多以焊接为主要加工制造手段的企业在其施工过程中，焊接技术的正确应用和严谨的过程控制仍然是制约性的瓶颈。而这在焊接生产活动中又恰恰是最为重要的。作为焊接学科，我们鼓励并关注创新；作为制造工艺，我们则更为主张“遵规守矩，熔接永固”。

因此，编写并出版一部以工程建设焊接技术为主要内容，以国内外相关标准和技术要求为主线，能够以典型的工程应用案例来指导焊接生产实践的专业手册，已经成为广大焊接工作者的迫切愿望。中国工程建设焊接协会顺应这一要求，组织本协会十余个行业分会中的焊接专家，共同编写了这部《现代焊接工程手册》。

本手册以突出实用性为编写宗旨，在内容上力求理论与实践结合，先进性与实用性兼顾。手册以焊接工程实践为对象，精简了相关的理论阐述，增加了国内外焊接标准要求，汇集了国内工程建设焊接领域的成功实践和技术，使读者能从中得到启发，甚至稍做调整即可拿来直接应用。因此，本手册以其新颖性和实用性有别于当前国内其他的相关工具书。

《现代焊接工程手册》共四卷，包括基础卷、结构卷、管道卷和容器锅炉卷。每卷各自成书，读者可按需要选用。

《现代焊接工程手册 基础卷》根据新一代钢材的发展变化，以金属焊接性试验研究数据为第一手资料，结合焊接工程实际，详细地阐述了焊接的基础理论，补充了新的焊接理论和知识，内容涵盖焊接冶金理论、常用钢铁材料及其焊接性、焊接方法以及焊接全过程质量管理等方面。

《现代焊接工程手册 结构卷》主要是以焊接工艺为核心，结合工程应用实践，介绍了各种典型钢结构焊接工程的具体施工技术。包括钢结构焊接技术现状，建筑

钢结构单层门式刚架、框-排架结构焊接技术，建筑钢结构多层、高层钢结构焊接技术，空间管桁架焊接技术，空间网架结构焊接技术，张弦梁结构焊接技术，弦支穹顶结构焊接技术，箱型（BOX）桁架钢结构焊接技术，桥梁结构焊接技术，高炉、热风炉炉壳焊接技术，炼钢转炉焊接技术，熔融还原炉炉壳焊接技术，干熄焦工程焊接技术，回转窑现场组焊技术，船体结构焊接技术等内容。各部分均提供了典型工程案例，对相关领域的焊接技术人员具有很高的参考价值。

《现代焊接工程手册 管道卷》主要介绍了管子和管件的制造工艺，长输管道、电站管道、化工管道、油气田集输管道、海洋管道和公用管道的特点、施工工艺、焊接方法、焊接设备、焊接材料、焊接管理、焊接工艺评定等，一些先进的焊接方法包括激光焊接、等离子弧焊、电阻焊和摩擦焊等在管道焊接中的应用，在役管道的抢维修，管道检验与焊接缺陷，管道工程常用施工标准等内容，第一次将不同领域的管道工程焊接技术、工程焊接要求、施焊经验综合在一起，是管道工程施工焊接方面的综合性工具书。

《现代焊接工程手册 容器锅炉卷》主要涉及的工程产品为容器和锅炉，各部分均包含产品结构特点、原材料焊接性、焊接工艺技术、焊接接头质量检验方法及要求、焊接接头热处理工艺技术等，考虑了容器锅炉常见的对接接头、角接接头和搭接接头等焊接接头形式，及其对接焊缝、角焊缝和组合焊缝等焊缝形式，并分析了不同产品形式和同产品不同零部件使用的各种原材料焊接工艺等，给出了相匹配的焊工资格、焊接材料、焊接工艺技术参数、技术措施等。各章还列举了典型产品焊接案例，并在附录中列出了本卷所引用的国内外现行标准规范。

《现代焊接工程手册》是由中国工程建设焊接协会组织编写的一部大型工具书，参加组织、编写和审核的人员多达上百人。他们都是在各自专业领域具有丰富学识和实践经验的专家，他们认真负责的态度、严谨科学的作风以及忘我的工作精神，正是高质量地完成这部手册编审工作的坚实基础。在本手册的编写过程中，我们也得到了国内众多工程建设领域和高校院所的专家、学者以及相关单位的大力支持，在此谨向所有参与支持者表示衷心的感谢！

由于本手册涉及内容广泛复杂，参加编审工作的人员众多，编制时间短促，以及必然受到的学识与经验限制，因此难免存有不足之处，敬请广大读者批评指正！

希望本手册的问世能够为广大工程建设焊接工作者提供一定指导和参考，这也是本手册编写委员会和所有编审人员的最大心愿！

《现代焊接工程手册》编委会主任
中国工程建设焊接协会 副理事长兼秘书长



2016年1月

FOREWORD 前言

《现代焊接工程手册 容器锅炉卷》概括了国内石油化工、电力、核电、冶金等行业广泛采用的常压容器、压力容器、锅炉制造安装焊接过程较先进较成熟的工艺技术,可为广大科技工程技术人员尽快掌握容器、锅炉焊接工艺技术提供重要的参考依据,可作为焊接工程技术施工人员人手必备的工具书,希望能为保证焊接产品的质量起到一定的促进作用。

本卷共3篇16章1个附录,主要涉及的工程产品为容器和锅炉,各部分均包含产品结构特点、原材料焊接性、焊接工艺技术、焊接接头质量检验方法及要求、焊接接头热处理工艺技术等,考虑了容器锅炉常见的对接接头、角接头和搭接接头等焊接接头形式,及其对接焊缝、角焊缝和组合焊缝等焊缝形式;分析了不同产品形式和同产品不同零部件使用的各种原材料焊接工艺等;给出了相匹配的焊工资格、焊接材料、焊接工艺技术参数、技术措施等。各章还列举了典型产品焊接案例,附录列出了本卷所引用的国内外现行标准规范。

《现代焊接工程手册 容器锅炉卷》以最新国家和行业标准为编写依据,结合目前我国工厂制造和工程建设焊接领域、检测方法的最新成果,在广泛调研的基础上,根据工厂制造和现场组焊存在焊接环境的巨大差异为编排界限,将容器工厂制造按产品不同材质分类进行编写,容器现场组焊按产品种类进行编写,而锅炉则不分种类和级别,仅区分工厂制造和现场安装。

本卷介绍的锅炉压力容器均为特种设备,其生产、经营、使用、检验、检测、监督管理、事故应急救援与调查处理、法律责任均符合《中华人民共和国特种设备安全法》。

本卷由李涛担任主编,周武强担任副主编。参加编写的人员还有董安霞、郁东健、任永宁等。

本卷在编写过程中得到了中国化学工程集团、中石化第四建设有限公司、中油吉林化纤工程有限公司、中冶天工集团有限公司、中国能源建设集团安徽电力建设第二工程公司、北京燕华工程建设有限公司、南京南化建设有限公司、太原锅炉集团有限公司、河南锅炉压力容器安全检验研究院三门峡分院等单位的领导及专家的大力支持和帮助,特在此致谢!

由于锅炉、容器工程焊接涉及行业多、范围广,加之编写时间短促、编写水平有限,手册中难免存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

编者

CONTENTS 目录

第1篇 容器工厂制造

第1章 钢制容器焊接	2	4.4 典型钛制容器的焊接	96
1.1 容器用钢及焊接特点	2	第5章 锆制容器焊接	106
1.2 钢制容器焊接结构及特点	10	5.1 锆制容器材料及焊接特点	106
1.3 钢制容器焊接	13	5.2 锆容器焊接结构及特点	106
1.4 钢制容器焊后热处理	18	5.3 锆制容器焊接	106
1.5 典型容器的焊接	21	5.4 案例	109
第2章 铝制容器焊接	47	第6章 容器焊接检验与质量管理	111
2.1 铝制容器材料及焊接特点	47	6.1 容器焊接前检验	111
2.2 铝制容器焊接结构及特点	53	6.2 容器焊接中间检验	113
2.3 铝制容器焊接	53	6.3 容器焊后检验	114
2.4 案例	61	第7章 超大超重设备现场制造工厂建设和焊接	121
第3章 镍制容器焊接	67	7.1 项目背景	121
3.1 镍制容器材料及焊接特点	67	7.2 现场厂房及露天作业场基本情况	121
3.2 镍制容器焊接结构及特点	74	7.3 资源需求	121
3.3 镍制容器焊接	74	7.4 容器制造及组织方案	123
3.4 典型镍制容器的焊接	77	7.5 案例：费托合成反应器制造焊接工艺	125
第4章 钛制容器焊接	84		
4.1 钛制容器材料及焊接特点	84		
4.2 钛制容器焊接结构及特点	88		
4.3 钛制容器焊接	88		

第2篇 容器现场组焊

第1章 现场容器组焊	132	第3章 球罐现场组焊	328
1.1 概述	132	3.1 球罐概述	328
1.2 现场钢制容器组焊	138	3.2 球罐焊接特点	329
1.3 现场铝制容器组焊	156	3.3 球罐现场组装与焊接工艺	333
1.4 容器现场热处理	178	3.4 球罐的现场焊接	341
1.5 现场容器焊接检验	200	3.5 球罐的焊后热处理	349
1.6 典型现场容器组焊案例	213	3.6 球罐的焊接检验	363
第2章 立式圆筒形储罐现场组焊	244	3.7 2000m ³ 球罐现场组焊	366
2.1 立式圆筒形储罐结构	244	第4章 低压湿式气柜现场组焊	387
2.2 适用范围	246	4.1 低压湿式气柜的结构及特点	387
2.3 储罐常用钢材	249	4.2 气柜组装工艺	388
2.4 储罐的预制	249	4.3 焊接	389
2.5 储罐的组装	258	4.4 焊接检验	392
2.6 储罐内浮盘的加工和安装	267	4.5 50000m ³ 湿式储气柜制作安装工程	395
2.7 立式圆筒形储罐的焊接	277	第5章 大型干式气柜现场组焊	408
2.8 立式圆筒形储罐的检验	293	5.1 干式气柜的结构及特点	408
2.9 4500m ³ 储罐焊接	301		

5.2	干式气柜组装	409
5.3	干式气柜的焊接	410
5.4	干式气柜的焊接检验	413
5.5	100000m ³ 稀油密封煤气柜现场组焊	416
第6章 大型低温双层储罐现场组焊		
6.1	大型低温储罐结构形式及焊接特点	429
6.2	低温储罐组焊	434

6.3	焊接检验	448
6.4	160000m ³ LNG 储罐现场组焊	449
第7章 大型原油储罐现场组焊		
7.1	大型原油储罐结构形式及焊接特点	455
7.2	大型原油储罐组焊	456
7.3	焊接检验	464
7.4	10×10 ⁴ m ³ 浮顶式油罐大型储罐焊接	465

第 3 篇 锅 炉

第1章 锅炉制造焊接		
1.1	锅炉及其用钢概述	474
1.2	锅炉各部件用钢特点	475
1.3	锅炉主要部件工厂制造	479
1.4	锅炉构架的焊接	496
1.5	锅炉部件热处理	499
1.6	锅炉焊接检验	502

第2章 锅炉现场组焊		
2.1	锅炉现场组焊特点	504
2.2	锅炉现场组焊焊接施工特点	504
2.3	锅炉焊接施工准备	504
2.4	焊接工艺	514
2.5	案例：P92 的焊接术	530

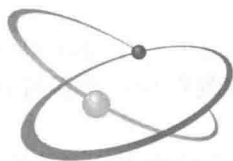
附录	引用标准	559
索引		563
参考文献		567



第 1 篇

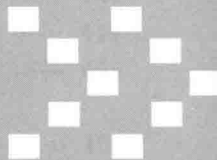
容器工厂制造

篇主编 李 涛 董安霞
撰 稿 李 涛 董安霞 黄有仁 关一卓 王茂威
胡富申 王慧智 车乐廷 彭建良
审 稿 陈裕川



第 1 章

钢制容器焊接



1.1 容器用钢及焊接特点

1.1.1 材料选用原则

选用压力容器受压元件用钢时应考虑容器的使用条件（如设计温度、设计压力、介质特性和操作特点等）、材料的性能（力学性能、工艺性能、化学性能和物理性能）、容器的制造工艺以及经济合理性。

压力容器的安全可靠与其所选用的材料密切相关，要求材料具有一定的力学性能、可加工性和使用性能。承受载荷的设备应有足够的稳定性，也就是说所有材料有足够的强度、塑性和韧性。压力容器作为一种焊接结构，制作时要经过各种成形工艺，因此材料还应具有良好的热加工、冷加工、焊接和热处理等性能。

对于在腐蚀介质下工作的压力容器，应能耐蚀。在高温高压下工作的加氢装置设备，所用的材料应具有较高的低温性能、高韧性、良好的耐氢性能以及低的回火脆性。对于低温压力容器，材料应具有优良的低温韧性。

(1) 材料标准 GB 713—2008《锅炉和压力容器用钢板》中的 C 含量有不同的限制，详见表 1-1-1；S、P 含量的规定见表 1-1-2。

表 1-1-1 几种常用钢板标准中的 C 含量的规定

%

牌号	Q245R	Q345R	Q370R	18MnMoNbR	13MnNiMoR	15CrMoR	14Cr1MoR	12Cr2Mo1R
C 含量	≤0.20	≤0.20	≤0.18	≤0.22	≤0.15	0.12~0.18	0.05~0.17	0.08~0.15

表 1-1-2 几种常用钢板标准中的 S、P 含量的规定

%

牌号	Q245R	Q345R	Q370R	18MnMoNbR	13MnNiMoR	15CrMoR	14Cr1MoR	12Cr2Mo1R
S 含量	≤0.015	≤0.015	≤0.015	≤0.010	≤0.010	≤0.010	≤0.010	≤0.010
P 含量	≤0.025	≤0.025	≤0.025	≤0.020	≤0.020	≤0.025	≤0.020	≤0.020

(2) 压力容器用钢分类分组 详见 NB/T 47014—2011《承压设备焊接工艺评定》。

1.1.2 焊接特点

1.1.2.1 低碳钢的焊接性分析

压力容器受压元件所使用的低碳钢主要有 Q245R 等，这些钢的含碳量较低，一般不大于 0.25%，因此焊接性能良好，无淬硬倾向，不需特殊工艺措施即可焊接，几乎所有的焊接方法都能适用。

但对厚度大的低碳钢结构，随板厚的增大，焊件刚度增大，焊缝的裂纹倾向也增大，因此焊接宜选用低氢型焊条，焊前预热，焊后消除应力处理。当碳和杂质含量偏于上限时，如

焊接热输入较大,由于近缝区在高温下停留时间长,可能在熔合线附近出现液化裂纹,因此应控制焊接热输入、调整熔合比,防止裂纹的产生。

1.1.2.2 低合金高强度钢的焊接性分析

压力容器常用的低合金高强度钢有 Q345R、16Mn、Q370R、13MnNiMoR、18MnMoNbR、20MnMo、20MnMoNb 等。这些钢种大多是热轧及正火钢。

由于加入了合金元素,低合金高强度钢的淬硬倾向有所增大,焊缝尤其热影响区会出现各种不好的组织。在扩散氢与应力的共同作用下会产生裂纹。

(1) 热裂纹 热轧及正火钢,一般含碳量都较低,而含锰量都较高,它们的 Mn/S 比都可达到要求,具有较好的抗热裂纹性能,正常情况下焊缝不会出现热裂纹。但当材料含碳量超过 0.12%,S、P 含量较高或因偏析使局部 C、S 含量偏高时,Mn/S 就可能低于要求而出现热裂纹。在这种情况下,就要从工艺上设法减小熔合比,在焊接材料上采用低碳、低硫或高锰焊接材料,以降低焊缝中的含碳量、含硫量,防止热裂纹。

(2) 冷裂纹 从材料本身考虑,淬硬组织是引起冷裂纹的决定因素。随着钢强度级别的提高、合金元素的增加,其淬硬倾向逐渐增大。在冷却速度较大时,热影响区会出现贝氏体和大量马氏体组织。尤其当形成粗大的孪晶马氏体时其缺口敏感性增加,脆化严重,在焊接应力的作用下产生冷裂纹。此外由于扩散氢的富集在淬硬脆化区引起显微裂纹,裂纹尖端形成的三向应力区再形成诱导氢扩散富集,使显微裂纹扩展成为宏观裂纹,这就是延迟裂纹。

(3) 再热裂纹 某些含有较多碳化物形成元素(如 Cr、Mo、V)的沉淀强化型低合金高强钢和热强钢厚板接头中,往往会在焊后消除应力热处理过程中沿热影响区产生再热裂纹;一些在高温下长期运行的压力容器也会在接头中出现再热裂纹。为了防止再热裂纹,除了注意选择合适的热处理温度外,还应从材料方面考虑选用化学成分适合的钢种,再就是降低焊缝金属强度使之低于母材;制定正确合理的焊接工艺,控制焊接热输入量,防止粗晶脆化,采取焊前预热、焊后消除应力处理等措施。对于再热裂纹敏感性较高的钢种,可在坡口侧预堆焊低强度焊缝,以松弛应力。

1.1.2.3 耐热钢的焊接性分析

压力容器常用的耐热钢有 15CrMoR、14Cr1MoR、12Cr2Mo1R、12Cr1MoR。

耐热钢焊接的主要问题是冷裂纹、再热裂纹和回火脆性。

(1) 冷裂纹 材料中的主要合金元素铬和钼都能显著提高钢的淬硬性,它们和碳共同作用,使钢的临界冷却速度降低,奥氏体稳定性增大,冷却到较低温度时才发生马氏体转变,产生淬硬组织,使接头变脆。合金元素和碳的含量越高,淬硬倾向就越大。当焊接拘束度大的厚板结构时,若又有氢的有害作用,就会导致冷裂纹。

(2) 再热裂纹 耐热钢属于再热裂纹敏感的钢种,这与钢中含的合金元素铬、钼、钒有关,其敏感温度区间为 500~700℃,在焊后热处理或长期高温工作中,在热影响区熔合线附近的粗晶区内有时会发生这种裂纹。

(3) 回火脆性 耐热钢焊接接头长期在 371~593℃ 范围内工作,会发生脆化并导致焊接构件破坏,这与钢中的 P、Sb、Sn、As 等杂质和合金元素含量有关。由于这些杂质在晶界上偏聚,而降低晶界的断裂强度。Cr-Mo 钢中 Cr 促进这些杂质的偏聚,而自身也发生偏聚。防止脆化的主要措施是控制钢的 Mn、Si 元素和杂质的含量。当钢中成分能满足 X、J 系数时,一般不会有回火脆性发生。

综上所述对耐热钢接头性能的基本要求应从以下几个方面考虑。

(1) 焊接材料的选择 为保证焊接接头具有与母材相当的性能,焊接材料的熔敷金属成分和性能应与母材相匹配,具有与母材相当的抗氧化性和热强性;为防止焊缝产生冷裂纹,要求焊缝的含碳量适当低于母材但不能过低,以防碳化物过少而降低材料的热强性;尽可能

降低 Mn、Si 含量,严格控制 S、P、Sn 等杂质元素含量,有效保证焊缝的塑性和韧性;选用低氢型焊接材料,以提高焊接接头的抗热裂纹和抗冷裂纹的能力。

(2) 焊接热输入的控制 从避免热影响区金属淬硬,减慢焊后冷却速度,防止冷裂纹产生来看,适当增大焊接热输入是有利的。但是,过大的焊接热输入,会增加焊接应力和变形,热影响区过热程度大,晶粒粗化,晶界的结合能力降低,产生再热裂纹的可能性增加,而且接头韧性也下降。因此,焊接宜用较小的焊接热输入。采用多层多道焊,减小每层焊缝金属厚度,利用后焊道对前焊道的退火热处理作用,以进一步改善接头的塑韧性。

焊前预热和焊后热处理:预热是防止耐热钢焊接冷裂纹和再热裂纹的有效措施之一。由于这种材料制造的设备厚度较大,焊接接头具有很大拘束力,焊接必须预热。预热、层间温度过大或过小,均对接头强度和韧性不利,考虑焊工的工作环境和过大预热、层间温度对接头性能的不利影响,采用焊前预热 $150 \sim 200^{\circ}\text{C}$,焊后立即采用中间热处理和焊后热处理,防止冷裂纹和再热裂纹。焊后热处理,不仅是为了消除焊接残余应力,更重要的是为了改善接头的组织,提高其综合力学性能,包括提高接头的高温蠕变强度和组织的稳定性。

1.1.2.4 奥氏体不锈钢的焊接特点

压力容器受压件常用奥氏体不锈钢主要牌号有 0Cr18Ni9 (06Cr19Ni10), 00Cr19Ni10 (022Cr19Ni10), 0Cr17Ni12Mo2 (06Cr17Ni12Mo2), 00Cr17Ni14Mo2 (022Cr17Ni12Mo2), 0Cr18Ni12Mo2Ti (06Cr17Ni12Mo2Ti)。

奥氏体不锈钢焊接性的主要问题是:焊接接头的晶间腐蚀、应力腐蚀开裂、焊缝热裂纹、液化裂纹及接头的脆化等。

焊缝的晶间腐蚀与填充金属成分有关,如焊缝金属含碳量越高,晶间腐蚀倾向也越大。当焊缝含有一定量的稳定化元素(如含 Ti、Nb,且 $\text{Ti}/\text{C} \geq 8$ 、 $\text{Nb}/\text{C} \geq 12$)时,可有效防止晶间腐蚀。焊缝呈现奥氏体加少量铁素体的双相组织时,可降低晶间腐蚀的倾向。

奥氏体不锈钢的电阻系数远大于低碳钢,而热导率又小于低碳钢,焊接时母材易熔化和过热,因此,宜采用偏小的焊接电流和较快的焊接速度。奥氏体不锈钢的线胀系数约为铁素体钢的 1.35 倍,焊接过程中膨胀和收缩较大,易造成工件变形或易引发热裂纹。

1.1.2.5 低温钢的焊接特点

在合成氨和乙烯装置的低温甲醇洗工艺中使用较多的是 09MnNiDR 和 3.5Ni 低温钢,在液化天然气大型储罐中多采用 9Ni 钢,在低温储罐中使用较多的是 16MnDR。

低温钢由于母材中碳含量和杂质元素含量均较低,且有良好的塑性和韧性,所以焊接时一般不易产生淬硬脆化,产生延迟裂纹和结晶裂纹的敏感性也较低。焊接性的主要问题是焊缝和熔合区的晶粒粗大或产生过热组织引起韧性下降,而热影响区其余部位的韧性有可能高于母材。为此必须合理选择焊接材料和工艺,改善焊缝和熔合区的韧性。

选择焊接材料的原则是保证焊缝含有足够量的 Mn、Cu 元素,同时渗入 Mo、W、Nb、V、Ti 等元素,使先共析铁素体和珠光体转变动力学曲线右移,通过控制连续冷却过程中的固态相变使组织细化。

1.1.2.6 双相不锈钢的焊接特点

双相钢是基体兼有奥氏体和铁素体两相组织,有磁性,可通过冷加工使其强化的不锈钢,也叫奥氏体-铁素体型双相不锈钢,最常用的有 ASME SAF2205 (S31803)、SAF2507 (S32750)、ASME A790 (32205) 等。奥氏体-铁素体型双相不锈钢要求奥氏体相和铁素体相有一定的比例。总体而言,这类钢的晶间腐蚀倾向较小。

该钢焊接接头的力学性能和耐蚀性取决于接头能否保持适当的双相比例,因此,焊接工艺就是围绕如何保证各母材和焊缝的双相组织。钢材经焊接热循环会造成焊接接头热影响区的晶粒长大及铁素体相比例增大,若焊材与母材化学成分相同,焊缝金属迅速冷却过程中,