

钢结构工程 先进焊接技术 应用指南

中建一局集团建设发展有限公司

廖文斌 主编

中国建筑工业出版社

钢结构工程先进焊接技术应用指南

中建一局集团建设发展有限公司

周文瑛 主编

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

钢结构工程先进焊接技术应用指南/周文瑛主编. —北京:
中国建筑业出版社, 2014. 3
ISBN 978-7-112-16389-2

I. ①钢… II. ①周… III. ①钢结构-焊接工艺-指南
IV. ①TG457.11-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 027053 号

本书内容广泛涉及钢结构工程行业如建筑钢结构、工程机械、桥梁、储罐、管线、船舶、炉窑等, 从新型高强钢材焊接性评定、先进高效焊接工艺应用、大型复杂钢结构工程结构形位及焊接质量控制实践、焊接钢结构疲劳失效和脆断控制等方面, 归纳、论述、呈现了钢结构工程焊接领域中的先进技术。

本文注重引用翔实的数据、图表资讯, 丰富的重大标志性工程实践经验和适度简要的基础知识阐述, 重点对从事钢结构工程的中、高级施工技术人员提供先进焊接技术应用指导。

* * *

责任编辑: 岳建光 王华月

责任设计: 董建平

责任校对: 李美娜 刘 钰

钢结构工程先进焊接技术应用指南

中建一局集团建设发展有限公司

周文瑛 主编

*

中国建筑业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京同文印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 21½ 字数: 530 千字

2014 年 5 月第一版 2014 年 5 月第一次印刷

定价: 52.00 元

ISBN 978-7-112-16389-2

(25116)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)



编 委 会

主 编：周文瑛

参编人员：葛冬云 王维迎 王 忠

路 兰 任常保 刘 强

前言

改革开放以来,随着科学技术的发展,我国各行业钢结构建筑物和机械产品得到快速发展。尤其进入 21 世纪的 10 余年来,发展势头更为迅猛。结构形式越来越新颖复杂、体量及规模越来越大,适合各类钢结构应用的钢材品种、规格越来越齐全,钢结构施工技术越来越发达,施工质量有了很大的提高。

以桥梁为例,已有百余座气势恢宏的钢桥飞架江河,以及十余座宏伟壮观的跨海大桥横跨海湾(如全长 36km 的杭州湾大桥),使天堑变通途。

在建筑钢结构方面,数十座高度四五百米的超高层钢结构如雨后春笋般拔地而起,上海中心大厦甚至高达 632m。跨度近百米甚至更大的体育场馆、航站楼、会展中心钢结构遍布华夏,成为各省市地标性建筑,而巧夺天工、美轮美奂的鸟巢和水立方不仅永载于奥运史册,而且已进入世界著名旅游观光景点之列。

在油气行业中,西气东输二线工程干线及支线,总长九千余公里的 X80 钢输气管线绵亘蜿蜒,横贯神州广袤原野,源源不断地输送天然气绿色能源,大动脉之称名副其实。数十余座容积大至 10 万 m^3 、15 万 m^3 的储油罐星罗棋布坐落于九州大地。

在工程机械领域,混凝土机械、桩工机械、履带起重机械、混凝土泵车等产销量已占世界三分之一。

造船业的造船完工量已位列世界第一,包括第一艘国内建造的液化天然气(LNG)船,当今世界最大的 30 万载重吨原油远洋运输轮,3000m 水深海上钻井平台,半潜式储油船等,正乘风破浪驶向蓝色海洋。

焊接连接是钢结构制作与安装中应用最广泛的连接形式,不仅要求密封连接的高压容器管道、槽罐、船舶等必须用焊接,不要求密封连接的桥梁、工程机械、建筑结构、塔架等,焊接连接也因其节约钢材和便于构建复杂造型的特点,因此更多地取代螺栓连接而得到了日益广泛的应用。可以认为焊接技术已成为现代钢结构发展中最为重要而且无可替代的关键技术之一。

正是钢结构日趋大型化和多样性的发展对焊接技术提出了更高、更严格的要求,促进了先进焊接技术在钢结构建造领域的引进应用和创新。如高强度结构钢的焊接性研究、匹配焊材、焊接工艺与接头性能优化试验研究,所涉及的钢材品种包括抗震建筑结构用钢、耐候耐腐蚀钢材、工程机械用高强钢、高强度管线钢、高性能桥梁用钢、大热输入焊接储罐用钢等。焊接工艺方面更需要适应时代对高效、优质、减少人工改善作业条件的特殊需求。此外对于大型、重型钢结构建造中特别突出的关键问题,如焊接应力、变形及接头脆化、断裂敏感性以及抗震性能等,均应对其自身规律重点深入探究、提出有效的改善方法,以满足设计要求、提高使用寿命和安全性。

在实现中华民族伟大复兴梦想的进程中,节能减排的任务迫在眉睫,基础建设规模宏大而持久,工业强国的建设十分艰巨。目前,西气东输三线工程管线建设已经开工,管道

压力 12MPa 的四线工程也已启动。工程机械、造船业产量占据世界的份额将更大。钢结构建筑由于其绿色环保的特点未来必将向中高层、住宅建筑发展。无论在研究开发或生产施工实践领域，为适应钢材品种和结构形式的发展，在焊接节点构造优化设计、在焊接接头的强韧性匹配和质量提升方面，特别是在焊接工艺技术的高效、智能化机器人领域，焊接技术工作者面临着严峻的挑战，在缩小与世界发达国家先进技术差距的道路上，任重而道远。

为此，编者归纳、介绍并总结了近 10 年来相关企业在上述各类重大钢结构工程建造中所应用、积累的先进焊接技术及成熟经验，以供钢结构同行们在今后的建设工程中，从相关研究方法、工艺技术到实际参数的应用上，得以借鉴和推广应用。

在此，编者对发表和提供了宝贵技术信息及文献的专家、学者、工程技术工作者们致以诚挚的谢意！

目 录

第 1 章 高强度结构钢的焊接性评定、焊接参数优选及接头性能	1
1.1 结构钢材的焊接性	1
1.1.1 常用的钢材焊接性评定方法	2
1.1.2 低合金高强度结构钢的应用	5
1.2 热轧及正火高强结构钢	7
1.2.1 高强度热轧耐候钢 BRA520C (宝钢) 焊接性及焊接接头性能 ^[7]	7
1.2.2 高强度热轧耐候钢 Q450NQR1 (宝钢) 焊接接头性能 ^[8]	11
1.2.3 Q460E-Z35 (舞钢) 正火钢焊接性及焊接接头性能 ^[9]	13
1.3 调质高强钢 (工程机械及储罐大线能量焊接用钢)	30
1.3.1 调质高强钢热模拟 HAZ 组织性能	30
1.3.2 调质高强钢焊接性——冷裂敏感性评定及最低预热温度	33
1.3.3 调质高强钢焊接工艺及接头性能	35
1.4 高强度管线钢	47
1.4.1 高强度管线钢 SH-CCT 曲线分析——热模拟不同冷却速度下的组织和性能	47
1.4.2 高强度管线钢热模拟 HAZ 组织、性能	58
1.4.3 高强度管线钢焊接工艺及接头性能	67
1.5 低碳及超低碳贝氏体桥梁用钢的焊接性与焊接接头性能	84
1.5.1 Q420qE、Q420qNH (鞍钢) 焊接性及焊接接头性能 ^[38]	84
1.5.2 600MPa 和 700MPa 级高性能桥梁用钢 (武钢) ^[39]	88
1.5.3 WDB620 (舞钢) 的焊接性与焊接接头性能 ^[40]	89
第 2 章 结构钢高效焊接技术	94
2.1 多丝电弧焊	94
2.1.1 多丝电弧焊特点	94
2.1.2 建筑钢构件的双/三丝埋弧焊接工艺	95
2.1.3 AMET 四丝埋弧焊接系统及焊接工艺 ^[5]	102
2.1.4 圆管环缝双丝埋弧自动焊 ^[6]	106
2.1.5 建筑钢构件大线能量双丝埋弧焊 ^[7]	109
2.1.6 双/多丝 MAG/MIG 电弧焊 ^[9]	110
2.1.7 双丝气电立焊 ^[13]	112
2.2 窄间隙焊接技术 ^{[14]、[15]}	114
2.2.1 窄间隙焊接技术特点	114

2.2.2	窄间隙焊接工艺特点	114
2.2.3	窄间隙焊接工艺要点	115
2.2.4	窄间隙埋弧焊设备组成	119
2.2.5	窄间隙焊接工件坡口尺寸实例	121
2.3	激光—电弧复合高效焊接技术 ^{[16],[17]}	122
2.3.1	激光—电弧复合高效焊接原理 ^[14]	122
2.3.2	激光—电弧复合高效焊接种类	122
2.3.3	激光—电弧复合高效焊接系统组成	123
2.3.4	激光—电弧复合高效焊接工艺特点	123
2.3.5	激光—电弧复合焊工艺参数对焊缝成形的影响	124
2.3.6	激光—电弧复合焊焊缝硬度	125
2.3.7	激光—电弧复合焊高效焊接技术应用实例	126
2.4	弧焊接机器人 ^[18]	126
2.4.1	弧焊机器人制造单元/系统组成	127
2.4.2	弧焊机器人关键技术	127
2.4.3	弧焊机器人的应用	128
2.4.4	建筑钢结构焊接机器人(神钢) ^{[24],[25]}	131
2.5	焊缝根部反面成形技术	137
2.5.1	表面张力过渡(STT—Surface Tension Transfer)焊接技术	137
2.5.2	熔敷金属控制技术(RMD—Regulated Metal Deposition)焊接技术 ^[29]	140
2.5.3	陶瓷衬垫单面焊背面成形技术 ^[30]	142
第3章	焊接变形及其控制	147
3.1	焊接变形的种类 ^[2]	147
3.2	焊接变形量的估算公式	148
3.3	焊接变形的控制方法 ^[2]	148
3.3.1	减少热输入总量	148
3.3.2	多层多道焊接	149
3.3.3	小坡口、窄间隙焊接	149
3.3.4	对称焊接顺序	149
3.3.5	分散焊接顺序	150
3.3.6	预制反变形 ^[4]	152
3.3.7	预留收缩量	153
3.3.8	外加刚性固定	153
3.3.9	分部组装焊接	154
3.3.10	补偿加热	156
3.3.11	振动焊接 ^[12]	157
3.3.12	非对称截面及异形复杂节点构件综合运用各种焊接变形控制方法实例	158
3.4	焊接变形焊后矫正方法	160

3.4.1	火工矫正法 ^[16]	160
3.4.2	机械矫正法	162
3.5	施工安装焊接时钢结构的形位控制	163
3.5.1	大跨度钢结构整体焊接变形控制实例	163
3.5.2	超高层钢结构工程施工焊接变形控制	174
3.5.3	大跨度钢桥焊接变形控制实例	192
3.5.4	大型储油罐焊接变形控制实例	197
第4章	钢结构焊接应力及其控制	203
4.1	焊接残余应力对结构的影响 ^[1]	203
4.1.1	对结构承载力的影响	203
4.1.2	对结构脆断的影响	203
4.1.3	对焊件加工精度和尺寸稳定性的影响	203
4.2	焊接残余应力的分布	203
4.3	焊接残余应力数值的影响因素及控制	205
4.3.1	钢材强度等级的影响 ^[2]	205
4.3.2	焊接工艺参数的影响 ^[7]	207
4.3.3	焊接顺序的影响	209
4.4	焊接残余应力的焊后消减处理方法及工程应用实例	210
4.4.1	焊接残余应力的焊后消减处理方法	210
4.4.2	焊后振动时效处理工程应用实例	214
4.4.3	焊后超声冲击处理工程应用实例	221
第5章	钢结构焊接裂纹及其防止	224
5.1	钢结构焊接常见裂纹种类、起因及防止	224
5.1.1	焊接裂纹主要种类	224
5.1.2	焊接热裂纹起因及其防止	224
5.1.3	焊接冷裂纹起因及其防止	225
5.1.4	层状撕裂起因及其防止 ^[1]	229
5.2	工程焊接裂纹实例分析	234
5.2.1	冷裂纹实例	234
5.2.2	热裂纹实例	241
5.2.3	层状撕裂工程实例及分析 ^[1]	243
第6章	焊接钢结构疲劳失效、脆性断裂及其控制	252
6.1	概述 ^[1]	252
6.1.1	钢结构疲劳	252
6.1.2	焊接接头疲劳性能的影响因素	253
6.1.3	钢结构疲劳性能改善措施	255

6.2	吊车梁变截面支座处疲劳裂缝实例及构造细节改善方案 ^[2]	255
6.2.1	概况	255
6.2.2	吊车梁疲劳破坏实例	255
6.3	桥梁钢结构关键焊接连接件的疲劳强度测评实例	257
6.3.1	某双索面斜拉桥正交异性桥面板与 U 形肋及其槽型闭口肋嵌补段对接焊缝的疲劳抗力测评 ^[4]	257
6.3.2	苏通大桥钢箱梁横隔板与顶板及 U 形肋焊接连接件疲劳强度测评 ^[5]	261
6.3.3	天兴洲长江大桥钢箱梁 U 形肋—桥面板及横肋焊接接头试样疲劳强度测评 ^[6]	264
6.3.4	上海长江大桥索梁锚固区足尺模型疲劳强度测评 ^[7]	267
6.3.5	湛江海湾大桥（钢箱梁斜拉桥）索梁锚固区足尺模型抗疲劳性能测评 ^{[8]、[9]}	269
6.4	海洋钢结构焊接接头脆性断裂及断裂韧性（CTOD）控制	273
6.4.1	概述 ^{[10]、[11]、[12]}	273
6.4.2	大厚度海洋工程结构钢（TMCP）单丝埋弧焊和 CO ₂ 气保护焊接接头断裂韧性（CTOD）评定 ^[15]	278
6.4.3	海洋平台用钢 D36 超大厚度各种焊接位置接头断裂韧性（CTOD）评定 ^[11]	280
6.4.4	海洋平台用钢 EQ70、EQ56 焊条电弧焊不同线能量焊接接头的断裂韧性（CTOD）评定 ^[16]	282
6.4.5	海洋平台导管架单、双丝埋弧焊及焊条电弧焊补焊接头断裂韧性（CTOD）评定 ^[17]	285
6.4.6	海上浮式生产储油船（FPSO）模块支墩焊接接头低温断裂韧性（CTOD）评定 ^[18]	287
6.4.7	香港后海湾大桥钢箱梁焊接接头的断裂韧性评定 ^[19]	289
6.5	建筑钢结构关键焊接节点抗震性能及其改善	291
6.5.1	概述 ^{[20]、[21]}	291
6.5.2	梁—柱连接节点抗震性能改善措施	297
6.5.3	改进节点构造设计实例及其抗震性能	306

第1章 高强度结构钢的焊接性评定、 焊接参数优选及接头性能

1.1 结构钢材的焊接性

钢材在经受焊接热循环作用后,近缝区约1~2mm处热影响区显微组织和力学性能发生了改变,不同种类的钢材焊接后变化有所不同,其变化取决于钢材的含碳量、微合金元素组配及焊接热输入。钢材的成分设计在考虑满足良好综合性能要求的同时,需采取适当技术措施避免焊接热影响区强韧性的下降,在焊接工艺技术上深入研究热输入对焊接热影响区组织、性能的影响规律并将其影响程度控制于适当的范围,是钢材焊接性研究的主要任务,焊接性研究有理论计算方法和试验评定方法,理论计算方法有20世纪50年代由日本、美国及国际焊接学会建立的碳当量计算公式,如CE(JIS)、CE(AWS)、CE(IIW)。还有1969年由日本学者建立的裂纹敏感性组分(P_{cm})计算公式。但这些碳当量算式建立的条件为 $C \geq 0.18\%$, P_{cm} 的限定为 $C = 0.07 \sim 0.22\%$ 。现代的低合金高强钢含碳量一般在0.1%以下,甚至低至0.06%以下(超低碳),均不在其限定范围内,但目前国内外冶金、焊接界仍然沿用其作为评价钢材焊接性的主要指标。一般在钢材含碳量0.12%以上时,各国目前普遍应用CE(IIW)评估钢材的焊接性。含碳量更低,微合金含量较高时,则应用 P_{cm} 。

日本学者建立了通过裂纹敏感性组分、扩散氢含量、焊接拘束度确定裂纹敏感性指数及最低预热温度的计算公式,以此确定影响焊接热输入量并对冷裂纹控制起重大作用的最低预热温度。该裂纹敏感性指数计算公式适用于板厚50mm以下。

德国、日本等国学者通过热输入量、800℃至500℃的冷却时间($t_{8/5}$),建立了特定钢种最低预热温度的曲线图表法与计算公式,但曲线图表的试验工作量较大,而公式计算结果与施工实测数据则有较大差距。

美国焊接规范应用硬度及氢控制法。硬度控制法根据T形接头角焊缝热影响区硬度达到350HV对应的冷却速度(540℃时)查图确定焊接线能量。氢控制法根据裂纹敏感性指数、板厚、拘束度范围及熔敷金属扩散氢含量等级查表确定最低预热温度^[1]。

欧洲标准EN1011-1:1998也建立了碳当量、板厚、焊缝含氢量、热输入各因素与预热温度的函数关系,以及各因素综合作用计算预热温度的公式,以指导控制焊接冷裂纹^[2]。

试验评定方法上,国外早期就有一整套评价钢材焊接性的试验方法,如热模拟试验绘制连续冷却组织状态曲线图、焊接热影响区最高硬度试验、插销法冷裂纹试验、斜Y形坡口裂纹试验等。国内也已在80年代形成了等效国家标准,目前这些标准虽已废止,但因未有新的适用方法,仍在工程界参照应用作为相对的比较方法。

由于各种焊接性试验方法各有特点,在应用时试验方法和相关试验条件的执行细节是

很关键的,否则评定结果会有较大差异。只有严谨、细致的试验,才能保证所得数据的可靠性、重复性和可比性。根据实践经验,总体上三种确定最低预热温度以控制冷裂纹的方法:热影响区最高硬度法、斜Y形坡口焊接试验法及插销实验法,其评定结果大致相似,可以作为工程焊接参数优化的指导。

1.1.1 常用的钢材焊接性评定方法

1. 碳当量(CE,%)、焊接裂纹敏感性组分(Pcm,%)评定法

碳元素对结构钢的淬硬性起决定作用,对焊接裂纹的发生影响最大,其他微合金元素则依据其对裂纹发生的贡献确定当量系数。普遍应用的公式如下:

$$CE(IIW) = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15$$

$$P_{cm} = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + V/10 + 5B$$

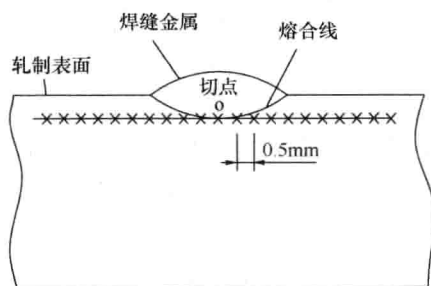


图 1.1-1 热影响区最高硬度
测试点布置示意图

注:图中“o”点是测定线与熔合线的切点

2. 焊接热影响区最高硬度评定法

焊接热影响区的淬硬组织是诱发焊接冷裂纹的主要因素之一,而硬度可以反映出组织的状态,所以通过测定焊接热影响区最高硬度可以用来评价母材的冷裂纹敏感性,焊接热影响区(HAZ)最高硬度试验方法主要以测定焊接热影响区的淬硬倾向来评定钢材的冷裂敏感性。试验按照《焊接热影响区最高硬度试验方法》GB 4675.5—84的规定进行,将钢板经机械加工成20mm厚的试件,并保留一个原轧制面进行试验,测试点布置见图1.1-1。

焊接参数:焊条直径4mm,电流(170±10)A,电压(24±2)V。

评定标准:按照AWS D1.1的规定,钢材抗拉强度不超过415MPa时控制热影响区最高硬度为225HV₁₀,钢材抗拉强度大于415MPa但不大于485MPa时,控制最高硬度为280HV₁₀。对于强度更高的钢材,一般控制最高硬度为350HV₁₀。

3. 斜Y形坡口焊接裂纹敏感性评定法

主要是评定焊接热影响区及焊缝金属产生冷裂纹的倾向性。试验参照《斜Y坡口焊接裂纹实验方法》GB 4975.1—84的规定进行。图1.1-2为试样形式及尺寸(板厚不限定,一般为9~38mm)。

焊接参数:焊条直径4mm,电流(170±10)A,电压(24±2)V,焊接速度(150±10)mm/min。

检查:试验焊缝施焊结束,经48小时后,进行表面裂纹检查,每块均经发蓝处理后解剖取五块横断面试样观察测量焊缝根部裂纹长度,并计算裂纹率。

评定标准:标准并无明确规定,通常认为裂纹率20%对于一般结构拘束度条件施工焊接时出现裂纹的可能性很小,钢材抗裂性合格。在结构拘束度大的条件下裂纹率为零时可认为抗裂性良好。

4. 插销试验焊接冷裂纹敏感性评定法

试样形式:插销试样采用环形缺口或螺形缺口,外形如图1.1-3、图1.1-4所示(直

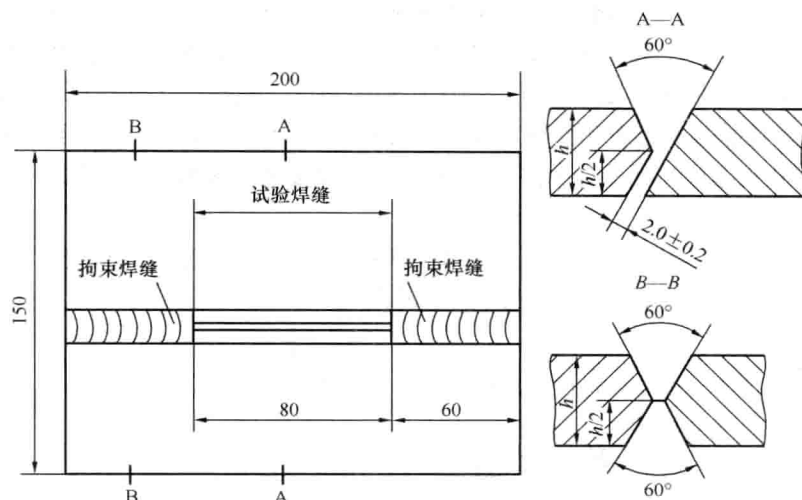


图 1.1-2 斜 Y 形坡口试验试样的形状及尺寸图

径 $\phi 6\text{mm}$ 或 $\phi 8\text{mm}$)。插销插入底板孔中, 底板采用与插销试样物理参数一致的钢材, 底板的尺寸为 $300\text{mm} \times 200\text{mm}$, 厚度为 20mm 。底板钻孔数小于等于 4, 位置处于底板纵向中心线上, 孔的间距为 33mm 。插销试样和底板的制备及试验参照《焊接用插销冷裂纹试验方法》GB 9446—88 的要求进行。

试验方法: 在底板上熔敷 $100 \sim 150\text{mm}$ 长的焊道, 焊道中心线通过插销端面中心。焊道的熔深适宜, 试样缺口位于该焊道热影响区的粗晶区中。焊后试样冷却至规定温度时对插销施加所需拉伸载荷并在 1min 内加载完毕。

评定标准: 评判准则为断裂准则, 即以试样拉伸断裂应力大于被测试钢材的屈服强度作为抗裂性合格标准。

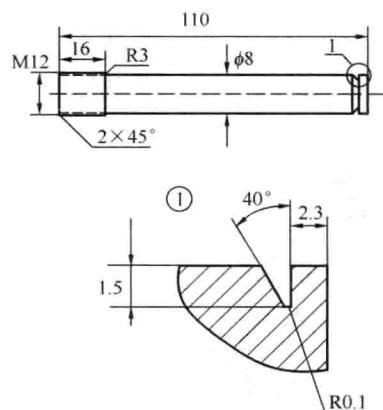


图 1.1-3 环形插销试样形状和尺寸

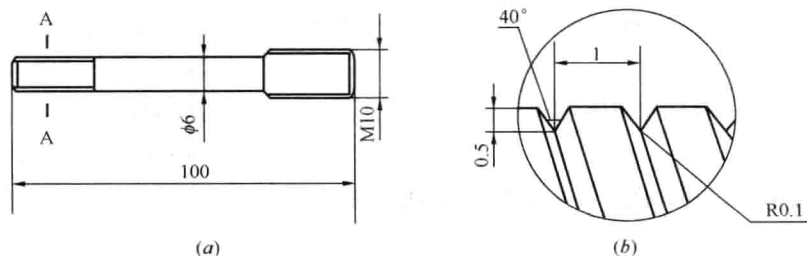


图 1.1-4 螺形插销试样形状和尺寸

5. 焊接热循环连续冷却曲线 (ST-CCT) 评定法

测定焊接热循环连续冷却曲线的目的是据以优化控制焊接热循环参数与接头性能。利用热模拟试验机以小试样模拟焊接热循环过程, 测得钢材的 A_{c3} 、 A_{c1} , 并获得钢材在不同冷

却速度下的硬度、韧性和金相组织。焊接热循环参数包括加热速度、峰值温度、高温停留时间、冷却速度。其中尤以峰值温度和冷却速度对组织和性能影响最大。通常模拟加热峰值温度 1350℃ 较符合一次加热焊接热影响粗晶区达到的温度,模拟二次加热则可取较低的峰值温度。通常以对焊接接头组织和性能影响最大的 800℃ (大体上相当 A_{c3}) 至 500℃ 或 300℃ (大体上相当 M_s 点温度) 的冷却时间 $t_{8/5}$ (s), 作为焊接热输入的指导参数。

6. $t_{8/5}$ 与焊接线能量 E 的关系计算公式^[3]

各国学者建立了多种计算公式,但计算结果与焊接接头实测值均有较大的差异,以下推介的公式与实测值较接近,但也有约 15% 的误差。

$$\text{二维热流 } t_{8/5} = \frac{K_0 \varphi_2}{4\pi\lambda c\rho} \left(\frac{E\eta}{\delta} \right)^2 \left[\frac{1}{(500-T_0)^2} - \frac{1}{(800-T_0)^2} \right]$$

$$\text{三维热流 } t_{8/5} = \frac{K_0 \varphi_3}{2\pi\lambda} (E\eta) \left[\frac{1}{(500-T_0)} - \frac{1}{(800-T_0)} \right]$$

$$\text{临界板厚 } \delta_{cr} = \sqrt{\frac{E\eta}{c\rho (600-T_0)}}$$

$\delta < 0.75\delta_{cr}$, 按二维热流计算;

$\delta \geq 0.75\delta_{cr}$, 按三维热流计算;

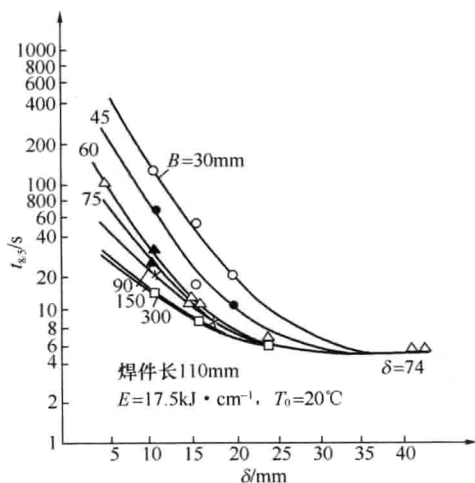


图 1.1-5 板厚对 $t_{8/5}$ 的影响

式中, K_0 为预热修正系数: $K_0 = 1.1 - 0.001T_0$;

φ_2 、 φ_3 为接头修正系数:

V 形 60° 坡口对接接头时, φ_2 取 1; φ_3 为根焊道时取 1.0~1.2, 为填充焊道时取 0.8~1.0, 为盖面焊道时取 0.9~1.0;

T 形接头时, $\varphi_2 = \varphi_3 = 2\delta / (2\delta + \delta_1)$;

δ ——T 形接头中翼板厚度 (cm);

δ_1 ——T 形接头中腹板厚度 (cm);

$\lambda = 0.28 \text{ J} \cdot (\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$, $c\rho = 6.7 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; E — $\text{J} \cdot \text{cm}^{-1}$;

η 为热效率, SMAW: $\eta = 0.75 \sim 0.85$;

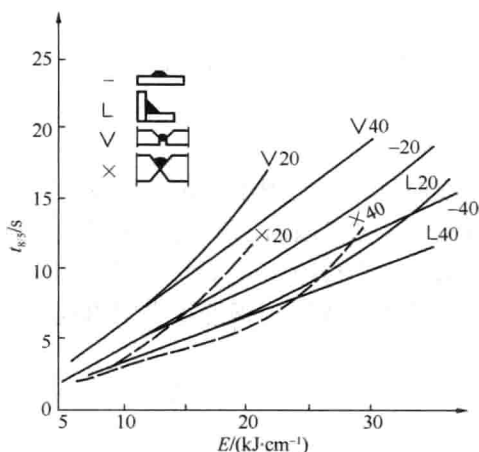
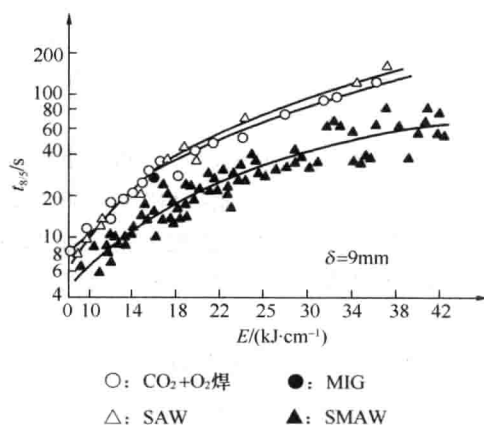
SAW: $\eta = 0.95 \sim 1.0$;

GMAW: $\eta = 0.8 \sim 0.9$;

GTAW: $\eta = 0.3 \sim 0.5$ 。

图 1.1-5、图 1.1-6、图 1.1-7 则更为直观地显示了公式中各因素对 $t_{8/5}$ 的影响。板厚和接头形式影响热传导过程,进而影响冷却速度,各种电弧焊接方法的能量密度不同,电弧区及熔池区保护方式也不同,影响其热效率,也进而影响冷却速度。

焊接线能量 E 作为可直接指导焊接施工的热输入参数,广泛应用于各钢种焊接参数优化的研究和工程实践。焊接热输入对钢材焊接热影响粗晶区性能的主要负面影响为强韧性下降,不同钢材依其化学成分、强化方式的区别,对焊接线能量的适应范围大小有所不同。

图 1.1-6 接头形式对 $t_{8/5}$ 的影响图 1.1-7 焊接方法对 E 与 $t_{8/5}$ 关系的影响

1.1.2 低合金高强度结构钢的应用

目前我国低合金高强度结构钢已得到广泛应用，按照强化方式主要有固溶强化、析出强化、形变强化^[23]，按照供货状态主要可分为热轧、正火、调质、热机械轧制（TMCP）等类别。

Q500 以下强度等级采用碳、锰及铌固溶强化，热轧或离线正火处理，显微组织为铁素体及珠光体。这类钢材含碳量较高，强度提高碳当量更高，在重型建筑结构中应用时由于板厚较大，结构节点复杂，拘束度大，焊接裂纹敏感性强是主要问题，要求较高的预热温度。其次，由于焊接热影响过热区的晶粒粗化，导致韧性下降。

Q500 以上强度等级一般采用碳、锰固溶强化及微合金元素铬、镍、钼、钛与碳（氮）形成化合物析出强化铁素体，应用离线淬火加回火调质处理，钢材显微组织为细密的贝氏体，强度及韧性均较高。这类钢材的含碳量一般低于 0.1%，裂纹敏感性组分 P_{cm} 一般在 0.15%~0.25% 范围内。如冷却速度过大，形成马氏体使强韧性下降。冷却速度过小则产生珠光体，并且第二相析出物尺寸长大，使韧性严重下降，此类钢材的线能量适应范围较窄。

采用低碳（超低碳）及多元微合金元素铬、镍、钼、钛、钒、硼，通过合金元素的氮化物（特别是钒、钛的氮化物）、氧化物、碳化物和碳氮化物，在先共析铁素体和珠光体中的铁素体中析出，产生钉扎作用达到强化效果，并抑制焊接高温时奥氏体的粗大化。不同合金元素第二相质点析出物的作用是不一样的，其中氮化物作用最大，其次为碳化物。在氮化物中，TiN 的熔点高，高温稳定性较好，在 1400℃ 以上只有 25% 质点溶解，可有效抑制晶粒长大，但是 Ti 与 N 的含量应有一定的比例，如果 Ti 多 N 少，大量 Ti 溶入基体，提高了强度而降低了韧性，反之则所形成的 TiN 质点数量及钉扎作用有限。TiN 细化奥氏体效果最佳的理想钛氮配比为 3.42，由于各微合金元素的叠加作用，最佳配比应稍低于 2.39^[13]。利用 Ti_2O_3 粒子作为针状铁素体的形核核心，以及 TiN-MnS 复合粒子对晶内形核的促进作用，在奥氏体晶内形成小的针状铁素体，抑制晶界形成多边形铁素体、准多变形铁素体和侧板条铁素体。而添加 B 元素可抑制晶界块状铁素体的形成，均可达

到 HAZ 韧化的目的。

在建筑钢结构用钢方面,国家体育场首先采用了舞阳钢厂生产的 Q460E-Z35 级正火超厚板^[9],随之中央电视台、凤凰传媒中心、上海中心等钢结构工程相继采用了强度更高的 Q460GJD 特厚板。

在工程机械用高强度钢方面,调质低合金高强度钢已广泛应用于煤矿液压支架、挖掘机、吊车、自卸载重车、港口机械等产品,20 世纪 90 年代国内已研发应用了抗拉强度 1000MPa 以下的低碳调质高强度钢,如 HQ70、HQ80、HQ100,其焊接性和焊接应用参数研究也已获得报道。对于高强度等级(HQ130)的工程机械用钢近年来国内也已研发应用。^[12]

在压力容器用调质钢方面,武钢首先研制了 WDL610D2 (12MnNiVR) 大线能量低焊接裂纹敏感性高强度钢^[4],通过添加适量 Ti,实现 Ti 和 N 的最佳配比,高温下形成的 TiN 粒子细小且弥散分布,有效抑制奥氏体长大,细化组织,在 $100\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 热输入条件下,粗晶区 -20°C 冲击韧性良好,板厚 50mm 以下焊接不需预热即可防止裂纹产生,已在 10 万 m^3 储罐的建造中大量应用。宝钢 B610CF 钢应用于重庆 5000 m^3 大型天然气球罐的建造,还将用于氧、氮、氩气等球罐的建造。B610CF-L2 (-50°C) 钢也已在 2000 m^3 大型乙烯、丙烯球罐的建造中得到应用。首钢、南钢也相继开发了 610 级大线能量焊接储罐用钢,如首钢采用适量的钼和低碳当量,可减少热影响区上贝氏体和 M-A 岛,610 级大线能量焊接储罐用钢已用于宁波大榭石化 10 万 m^3 储罐的建造^[13]。

在天然气输送的管线钢方面,我国不仅在西气东输一线工程中应用了控轧控冷工艺生产的贝氏体 X70 管线钢,在二线工程中应用了 X80 管线钢,更高强度的 X100、X120 管线钢在国内也在积极研发中^[6],采用低碳高锰微钛处理纯净化,通过铌、钼、硼、镍等合金元素的固溶强化、析出强化、结晶强化、形变强化作用,得到具有高强度、高韧性、良好焊接性的管线钢。X100 管线钢的显微组织主要为含有细化 M-A 组元的细小的贝氏体铁素体 BF 和下贝氏体。钢管焊缝组织为针状铁素体和贝氏体。已获得的初步成果必将在今后的管线工程建设中发挥作用。在国外,新日铁,加拿大管道公司(TCPL)进行了开发和应用研究,并已取得了满意的结果。对于 X100 管线钢已有相关的资讯与经验可供借鉴,但在推广应用之前仍需对其强韧性、止裂性及焊接性进行深入的研究。例如某钢厂研发的 X100 管线钢在热模拟峰值温度 750°C 时出现脆化现象^[5],有待进一步探讨。在 X120 管线钢的开发方面,新日铁、住友和欧洲钢管厂已有生产业绩,加拿大在 -30°C 的冻土地带应用新日铁生产的 X120 建设了世界上首条 X120 管线示范段。有研究者证明在较宽的线能量范围内 ($20\text{J} \cdot \text{cm}^{-1} \sim 40\text{J} \cdot \text{cm}^{-1}$) 形成低碳板条状马氏体和少量贝氏体混合组织是 X120 钢 HAZ 强韧性的保证,但是,当热循环峰值温度在奥氏体-铁素体两相区 (800°C) 时,由于晶界形成网状组织,以及在峰值温度略高于两相区 (1000°C) 时,由于冷却后获得含有粗大 M-A 岛状组织的粒状贝氏体,而使 HAZ 发生局部脆化。该现象对严寒等恶劣服役条件下管线 HAZ 止裂性的影响还有待深入研究。

应用控轧控冷工艺生产的 X70、X80、X100 系列管线钢,不仅要求焊接线能量严格控制,而且在较窄的范围,而且已有学者研究证明,即使是同一强度等级的管线钢,由于生产厂不同,采用微合金元素组成配比的不同,对焊接线能量的适应范围大小也有所不同^[6]。

出于降低成本的需要,首钢研发了高 Nb 管线钢 X80^[21],铌可以调节钢在冷却过程中

的相变特性,以得到一定数量的贝氏体和马氏体。铌还可以加强 Ti 的细化作用,与 N 也有强烈的亲和力,能取代部分 Ti,与 N 形成 (Ti, Nb) N 颗粒,其溶解温度在 1350℃ 以上,可以钉扎、拖拽高温奥氏体晶界的迁移,抑制晶粒长大粗化。但过量的 Nb 固溶或析出会影响焊后针状铁素体和粒状贝氏体的数量、形态和分布。高铌 X80 管线钢受焊接线能量的影响特点与其他 X80 系列钢材大致相同,但研究发现在热模拟峰值温度 800℃ 时出现脆化现象,尚有待深入研究。《石油天然气工业管线输送系统用钢管》GB/T 9711—2011 明确规定,“如果协议,制造商应提供相关钢级的焊接性数据,否则应进行焊接性试验。为此,订货合同应规定进行焊接性试验的细节和验收极限。”这对于优选施工焊接参数,以获得最佳或能满足规范和设计要求的接头强度和韧性,是非常必要的。

为满足国家经济建设加速发展的需要,各行业钢结构工程的规模或体量渐向大型化发展、服役参数更高,对钢材的强度要求也随之提高,如 20 万 m³ 的储油罐(需用 Q690 或 Q780),更高压的输气管线(需用 X100 或 X120),另外,恶劣气候及严苛服役条件下的大跨度铁路桥梁、油气平台管线等对钢材的断裂韧性提出了更高的要求。而减少建造成本,降低运输费用始终是急迫之需。

在国内外已有工程实践证明,低合金高强度钢在节约用钢量方面效果显著。如在重、大型建筑钢结构建设中,采用 Q460 代替 Q345 可节约钢材重量 36%。在高压输气管线的建设中,采用 X80 代替 X70 可降低成本 7%~10%。西气东输二线采用的 X80 管线钢,全长 4843km,与一线采用的 X70 相比,强度增加 14%,投资降低 10%,节约钢材 14%以上^[35]。

而采用 X100 代替 X70 则可降低成本 30%^[30],还可以提高输气效率,节省运行费用,符合节能减排的要求。

X80 管线钢为低碳微合金控轧控冷钢,具有高强度和良好的韧性。由于强度的提高,焊接接头易产生 HAZ 的脆化、软化问题,必须了解其变化规律及产生机理,由此优化焊接工艺参数,提高焊接接头强韧性,确保输气管线的安全运营。

高强度钢材焊缝的强度匹配在其接头性能研究中有重要地位,焊缝强度过高将使焊缝韧、塑性和抗裂性下降,从而降低了结构的使用安全性。实践证明低强匹配的焊缝往往能提高焊接结构的疲劳寿命。

随着高强度结构钢的广泛应用,相关焊接性研究评定试验必须深入、全面地进行,以保证施工及生产的安全性。

本章将着重介绍近年来各类低合金高强度钢材在国内也是世界性重大工程,如国家体育场钢结构,京、津、沪、深城市标志性钢结构建筑,西气东输管线,南京大胜关长江大桥等桥梁,10 万~15 万 m³ 石油天然气储罐,郑煤机、北煤机生产的煤矿高端液压支架等工程中,所应用的高强度钢材焊接性研究、焊缝强韧性匹配、焊接热输入参数的优化以及常用焊接方法的接头性能评定、研究成果和工程实践经验,以供相关工程界专业人士应用参照。

1.2 热轧及正火高强结构钢

1.2.1 高强度热轧耐候钢 BRA520C (宝钢) 焊接性及焊接接头性能^[7]

1. 钢材化学成分和力学性能