

# 现代高效

## 焊接方法及其应用

XIANDAI GAOXIAO  
HANJIE FANGFA JIQI YINGYONG

◎ 陈裕川 李少农 宋刚 刘黎明 编著



# 现代高效焊接方法 及其应用

陈裕川 李少农 编著  
宋 刚 刘黎明



机 械 工 业 出 版 社

本书从焊接方法、焊接设备、焊接材料和焊接工艺等几方面，系统、全面地讲述了在现代焊接工程中应用最广的高效焊接方法——高效埋弧焊和高效熔化极气体保护焊，并通过工程应用实例，提供了可参考的翔实资料。此外还详细地介绍了一种新型高效焊接法——激光-GMAW 复合高效焊接法的工作原理、各种金属材料的焊接工艺及应用实例。

本书可供从事焊接生产的工程技术人员、技师和中高级焊工使用，也可供大中专院校相关专业的师生参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

现代高效焊接方法及其应用/陈裕川等编著.

—北京: 机械工业出版社, 2015. 7

ISBN 978 - 7 - 111 - 50568 - 6

I. ①现… II. ①陈… III. ①焊接工艺 - 研究

IV. ①TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 133803 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 侯宪国 余逢英 责任编辑: 余逢英

版式设计: 霍永明 封面设计: 张 静

责任印制: 乔 宇

北京京丰印刷厂印刷

2015 年 11 月第 1 版 · 第 1 次印刷

169mm × 239mm · 16.25 印张 · 334 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 50568 - 6

定价: 35.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066 机 工 官 网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线: 010-68326294 机 工 官 博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

010-88379203 金 书 网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

# 前 言

近 20 年来，随着我国现代工业规模的迅速扩大，各类焊接结构不断向大型化、超大型化和重型化发展。2012 年，钢材总消耗量达 7 亿 t，其中焊接结构用钢消耗量为 3.5 亿 t 以上。焊接材料的消耗量已达到 400 万 t。一跃成为世界第一焊接大国。但从各类焊接材料使用比例统计数字中可以看到，我国焊条电弧焊用焊条的使用量仍高居 50% 左右。这就说明落后的、低效率的焊条电弧焊接方法仍占领着半壁江山，直接影响我国焊接结构制造业的经济效益。

近年来，为适应焊接结构制造业的高速发展，各种高效焊接方法应运而生，并在工业生产中得到实际的应用。其中应用最广的首推高效埋弧焊和高效 GMAW。鉴于此，特编写了《现代高效焊接方法及其应用》一书。

本书以先进、实用为出发点，从焊接方法原理、焊接设备、焊接材料和焊接工艺等方面全面、系统、详细地讲述了上述两种最常用的高效焊接技术，并提供了大量可资参考的翔实资料。以期对读者有所启发和帮助。

本书共分 3 章。第 1 章由陈裕川高级工程师编写，第 2 章由李少农高级工程师编写，其中部分小节由陈裕川编写。第 3 章由宋刚教授和刘黎明教授编写。全书由廖奎光高级工程师审定。

本书所介绍的内容，虽然引自国内外最新的技术资料和标准，但这些高效焊接技术还在不断的改进和完善之中，所以内容难免存在不足和谬误之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 前言

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 第 1 章 高效埋弧焊技术及其应用 .....         | 1   |
| 1.1 概述 .....                    | 1   |
| 1.2 高效埋弧焊工艺方法 .....             | 3   |
| 1.2.1 双丝埋弧焊接法 .....             | 3   |
| 1.2.2 多丝埋弧焊接法 .....             | 7   |
| 1.2.3 热丝埋弧焊接法 .....             | 9   |
| 1.2.4 添加冷丝埋弧焊接法 .....           | 9   |
| 1.2.5 添加金属粉末埋弧焊接法 .....         | 11  |
| 1.2.6 药芯焊丝埋弧焊接法 .....           | 12  |
| 1.2.7 单面焊双面成形埋弧焊接法 .....        | 14  |
| 1.2.8 窄间隙埋弧焊接法 .....            | 15  |
| 1.2.9 带极埋弧焊接法 .....             | 19  |
| 1.3 高效埋弧焊设备及工艺装备 .....          | 24  |
| 1.3.1 高效埋弧焊焊接电源 .....           | 25  |
| 1.3.2 高效埋弧焊焊接机头及焊接小车 .....      | 38  |
| 1.3.3 高效埋弧焊设备自动控制系统 .....       | 55  |
| 1.3.4 高效埋弧焊工艺装备 .....           | 92  |
| 1.4 高效埋弧焊焊接材料 .....             | 116 |
| 1.4.1 埋弧焊用药芯焊丝和金属粉芯焊丝 .....     | 116 |
| 1.4.2 高速、高效埋弧焊焊剂 .....          | 122 |
| 1.4.3 埋弧焊用带极 .....              | 125 |
| 1.5 高效埋弧焊应用实例 .....             | 132 |
| 1.5.1 厚壁构件对接双丝并联埋弧焊 .....       | 132 |
| 1.5.2 船体钢板拼接双丝串列埋弧焊 .....       | 134 |
| 1.5.3 厚钢板拼接单面焊双面成形三丝串列埋弧焊 ..... | 136 |
| 1.5.4 风塔筒体纵、环缝双/双丝串列埋弧焊 .....   | 138 |
| 1.5.5 双相不锈钢添加冷丝埋弧焊 .....        | 140 |
| 1.5.6 海洋工程结构件药芯焊丝埋弧焊 .....      | 142 |
| 1.5.7 海洋工程钢结构添加金属粉末埋弧焊 .....    | 144 |
| 1.5.8 厚壁高压锅炉部件环缝窄间隙埋弧焊 .....    | 145 |
| 第 2 章 高效熔化极气体保护焊及其应用 .....      | 149 |
| 2.1 概述 .....                    | 149 |
| 2.2 提高 GMAW 效率的工艺方法 .....       | 149 |

---

|        |                                  |     |
|--------|----------------------------------|-----|
| 2.2.1  | 加大焊丝伸出长度提高熔敷速度 .....             | 150 |
| 2.2.2  | 提高电弧热功率增加熔敷速度 .....              | 150 |
| 2.2.3  | 优化焊丝/保护气体组合提高熔敷速度 .....          | 152 |
| 2.2.4  | 高效 T. I. M. E 焊接法 .....          | 153 |
| 2.2.5  | 带极 GMAW .....                    | 155 |
| 2.2.6  | 多丝 GMAW .....                    | 156 |
| 2.3    | 双丝并联高效 GMAW .....                | 157 |
| 2.3.1  | 双丝并联 GMAW 工作原理 .....             | 157 |
| 2.3.2  | 双丝并联 GMAW 的优点 .....              | 159 |
| 2.3.3  | 双丝并联 GMAW 焊接设备的构成 .....          | 161 |
| 2.3.4  | 双丝并联 GMAW 法的工业性应用 .....          | 163 |
| 2.4    | 双丝串列 GMAW .....                  | 163 |
| 2.4.1  | 双丝串列 GMAW 工艺 .....               | 164 |
| 2.4.2  | Tandem 高效 GMAW 的发展过程和工作原理 .....  | 166 |
| 2.4.3  | Tandem GMAW 的工作模式 .....          | 174 |
| 2.4.4  | Tandem GMAW 的优点 .....            | 176 |
| 2.5    | Tandem GMAW 设备 .....             | 176 |
| 2.5.1  | Tandem GMAW 焊接设备的构成 .....        | 177 |
| 2.5.2  | Tandem GMAW 焊接电源 .....           | 178 |
| 2.5.3  | Tandem GMAW 送丝机 .....            | 200 |
| 2.5.4  | Tandem GMAW 焊枪 .....             | 203 |
| 2.5.5  | 清枪机 .....                        | 205 |
| 2.6    | 高效 GMAW 焊接工艺 .....               | 206 |
| 2.6.1  | 高效 T. I. M. E GMAW 的焊接参数 .....   | 208 |
| 2.6.2  | 双丝并联 GMAW 的焊接参数 .....            | 209 |
| 2.6.3  | Tandem GMAW 的焊接参数 .....          | 209 |
| 2.7    | 典型生产应用实例 .....                   | 213 |
| 2.7.1  | 大型挖掘机转盘环缝的高效 GMAW .....          | 213 |
| 2.7.2  | 船体平面构架角接缝的 Tandem GMAW .....     | 213 |
| 2.7.3  | 机车车箱铝合金外壳纵缝 Tandem GMAW .....    | 213 |
| 2.7.4  | 汽车后桥箱接缝的 Tandem GMAW .....       | 214 |
| 2.7.5  | 大直径输油管线环缝全位置 Tandem GMAW .....   | 215 |
| 2.7.6  | 大型不锈钢容器外壁冷却水套的 Tandem GMAW ..... | 215 |
| 2.7.7  | 履带式吊车吊臂的 Tandem GMAW .....       | 216 |
| 2.7.8  | 煤矿刮板输送机中部槽纵缝 Tandem GMAW .....   | 217 |
| 2.7.9  | 大型铝合金箱体 Tandem GMAW .....        | 218 |
| 2.7.10 | 铝合金车箱侧壁拼板接缝 Tandem GMAW 工艺 ..... | 218 |
| 2.7.11 | 制管生产线板材拼接 Tandem GMAW 工艺 .....   | 220 |
| 2.8    | 双丝旁路 (Bypass) 气电立焊 .....         | 221 |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| 2.8.1 双丝旁路气电立焊工作原理 .....            | 221        |
| 2.8.2 双丝旁路气电立焊发展现状 .....            | 222        |
| 2.8.3 双丝旁路气电立焊设备 .....              | 222        |
| 2.8.4 双丝旁路气电立焊焊接工艺 .....            | 223        |
| 2.8.5 双丝旁路气电立焊用焊接材料 .....           | 224        |
| 2.8.6 双丝旁路气电立焊典型应用实例 .....          | 224        |
| <b>第3章 激光-电弧复合高效焊接技术及其应用 .....</b>  | <b>226</b> |
| 3.1 概述 .....                        | 226        |
| 3.2 激光-电弧复合热源焊接技术的分类 .....          | 228        |
| 3.2.1 激光-GTAW 电弧复合焊接 .....          | 229        |
| 3.2.2 激光-GMAW 电弧复合焊接 .....          | 230        |
| 3.2.3 激光-等离子弧复合焊接 .....             | 231        |
| 3.2.4 激光-双电弧复合焊接 .....              | 232        |
| 3.2.5 激光-埋弧复合焊接 .....               | 232        |
| 3.3 激光-电弧复合焊接工艺 .....               | 233        |
| 3.3.1 碳钢的激光-电弧复合焊工艺 .....           | 233        |
| 3.3.2 不锈钢的激光-电弧复合焊工艺 .....          | 235        |
| 3.3.3 铝合金的激光-电弧复合焊工艺 .....          | 236        |
| 3.3.4 钛合金的激光-电弧复合焊工艺 .....          | 238        |
| 3.3.5 镁合金及镁合金与异质材料的激光-电弧复合焊工艺 ..... | 239        |
| 3.3.6 激光-电弧复合热源焊接数值模拟 .....         | 240        |
| 3.4 激光与电弧相互作用与机制 .....              | 245        |
| 3.4.1 电弧提高激光能量的利用率 .....            | 245        |
| 3.4.2 激光吸引、压缩电弧 .....               | 245        |
| 3.4.3 等离子体吸收、屏蔽激光 .....             | 246        |
| 3.4.4 等离子体密度的稀释 .....               | 247        |
| 3.5 激光-电弧复合焊接技术在工业中的应用 .....        | 247        |
| 3.5.1 在汽车制造业中的应用 .....              | 249        |
| 3.5.2 在船舶制造业中的应用 .....              | 249        |
| 3.5.3 在管道及压力容器制造业中的应用 .....         | 250        |
| 3.5.4 在飞机和车辆制造业中的应用 .....           | 251        |
| 3.5.5 在轻型钢结构制造业中的应用 .....           | 251        |
| <b>参考文献 .....</b>                   | <b>253</b> |

# 第 1 章 高效埋弧焊技术及其应用

## 1.1 概述

埋弧焊是一种在焊剂层下进行的电弧焊方法，英文为 Submerged arc welding。出现于 1930 年。自 1940 年开始在全世界工业生产中逐步推广应用。1956 年我国从原苏联引进了埋弧焊技术及设备，并在电站锅炉、压力容器、船舶、机车车辆和矿山机械生产中得到了实际的应用。

埋弧焊从其发明之初就是一种机械化焊接方法。焊接过程中，焊丝由专门设计的送丝机连续向焊接熔池送给。埋弧焊过程原理图如图 1-1 所示。

由图 1-1 可见，埋弧焊是利用在焊剂层下于焊丝与焊件之间燃烧的电弧热量来熔化焊丝、焊剂和母材金属形成焊缝，连接被焊工件。其中颗粒状焊剂对电弧和焊缝起保护作用，焊丝既作为焊接电流的载体，又作为填充金属。在埋弧焊过程中，熔融的焊剂与熔化的金属之间可产生各种冶金反应。正确地控制这些冶金反应的进程，可以获得化学成分和力学性能完全符合预定技术要求的焊缝金属。同时所形成的熔渣严密覆盖住熔池金属和正在凝固的焊缝金属，使其免受空气的氧化，并改善焊缝成形，形成表面光滑美观的焊缝，如图 1-2 所示。

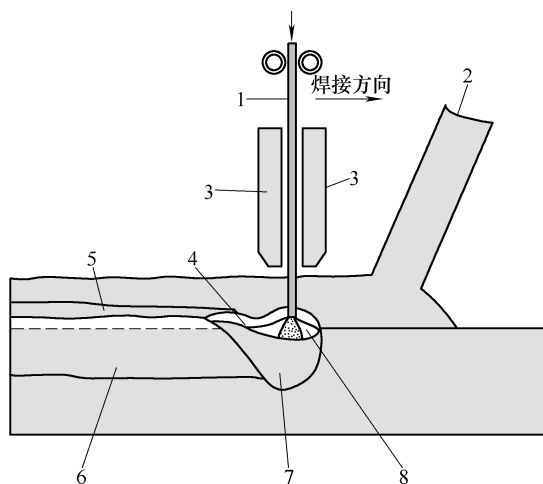


图 1-1 埋弧焊过程原理图

1—焊丝 2—焊剂 3—导电嘴 4—熔化的熔渣 5—已凝固的熔渣 6—已凝固的焊缝金属 7—熔池金属 8—电弧腔

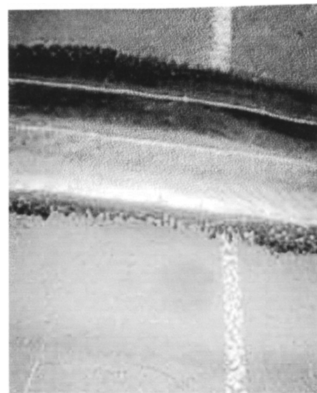


图 1-2 埋弧焊焊缝外观

埋弧焊时，可以采用较短的焊丝伸出长度，并以较高的速度自动给送，因此可以高达 2000A 的大电流进行焊接，从而达到相当高的熔敷速度。图 1-3 曲线示出了各种埋弧焊方法与焊条电弧焊熔敷速度对比的数据。从图 1-3 中可见，埋弧焊的熔敷速度比焊条电弧焊熔敷速度最多可高出 10 倍。其次，埋弧焊又是一种高电流密度的焊接法，具有深熔的特点，一次熔透深度可达 20mm 以上。因此，埋弧焊是所有弧焊方法中效率最高的焊接方法。

虽然传统的埋弧焊方法已经达到较高的效率，但近 20 年来，由于大型、重型和厚壁焊接结构的快速发展，迫切要求进一步提高埋弧焊的效率，从而研制开发出了多种高效埋弧焊工艺方法（详见图 1-4）。这些高效埋弧焊方法已在不同的工业领域中得到了实际的应用。

现代埋弧焊设备按操作程序的自动化程度，基本上可分为机械化和全自动化两大类。机械化埋弧焊设备，除了焊丝的送给、焊接小车的移动或焊件的旋转由相应的传动机构自动执行外，焊接过程的启动、停止，焊丝对中，焊接参数的调整，以及焊接程序的设置仍需靠焊工手动操作，图 1-5 示出了一种典型的机械化埋弧焊小车全貌。在我国目前市售埋弧焊设备都为机械化埋弧焊设备。

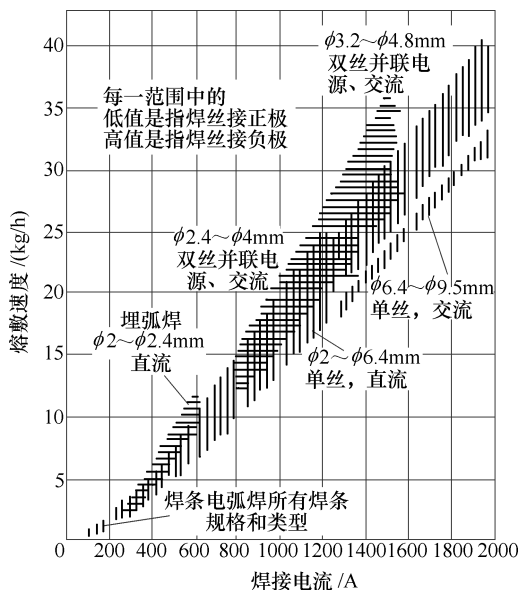


图 1-3 各种埋弧焊方法与焊条电弧焊熔敷速度的对比

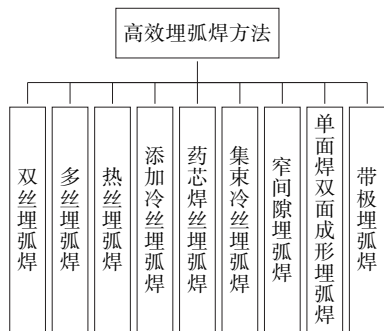


图 1-4 各种高效埋弧焊方法



图 1-5 小车式机械化埋弧焊设备全貌

全自动埋弧焊设备是一种焊接全过程由其相应的控制系统和执行机构自动完成的装置。包括焊接机头的自动跟踪、焊接参数的预置和反馈控制以及焊接程序的自行生成等。焊工在焊前只需作必要的调整工作，按下起动按钮后无需对设备进行其他操作。全自动埋弧焊设备通常是一种大型焊接装备或焊接中心。图 1-6 示出了一台压力容器全自动埋弧焊装备的全貌。这种埋弧焊装备由于自动化程度相当高，大大地提高了厚壁容器的焊接效率。



图 1-6 压力容器全自动埋弧焊装备的全貌

## 1.2 高效埋弧焊工艺方法

高效埋弧焊工艺方法是指那些熔敷速度高于传统单丝埋弧焊的工艺方法。所谓传统单丝埋弧焊，通常定义为使用直径 6mm 以下的焊丝，焊接电流不超过 1000A 的埋弧焊方法。目前已在现代焊接生产中得到实际应用的高效埋弧焊方法主要有双丝埋弧焊、多丝埋弧焊、带极埋弧焊、热丝埋弧焊、添加冷丝埋弧焊以及特种高效埋弧焊，包括窄间隙埋弧焊、药芯焊丝埋弧焊、集束冷丝埋弧焊和焊剂-铜衬垫埋弧焊等。

### 1.2.1 双丝埋弧焊接法

双丝埋弧焊按焊丝与焊接电源的连接方式不同，可以分为双丝并联埋弧焊和双丝串列埋弧焊。双丝并联埋弧焊通常只配用单台焊接电源，同时向两根焊丝供电。双丝串列埋弧焊则由两台焊接电源分别向两根焊丝供电，其原理图分别如图 1-7 和图 1-8 所示。

#### 1. 双丝并联埋弧焊接法

双丝并联埋弧焊的焊接机头与焊接电源及控制器的连接方式如图 1-9 所示。为

提高熔敷速度多采用直径为 1.0~2.0mm 的细丝, 故也称细丝双弧焊接法。焊接电源可以是直流电源, 也可以是交流电源。采用直流电源时, 两根焊丝的电弧会相互吸引而形成一个焊接熔池, 由于熔池长度较大, 可以在较高的焊接速度下形成外观良好的焊缝。直流反接法可获得较大的熔深, 而正接法的熔深较浅。采用交流电源时, 电弧分散, 可以获得中等的熔深。

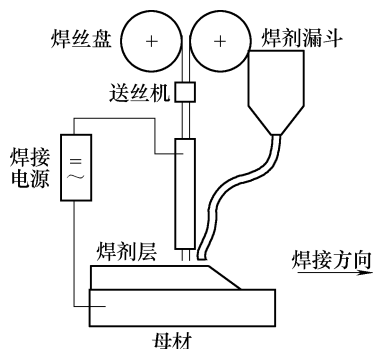


图 1-7 双丝并联埋弧焊方法原理图

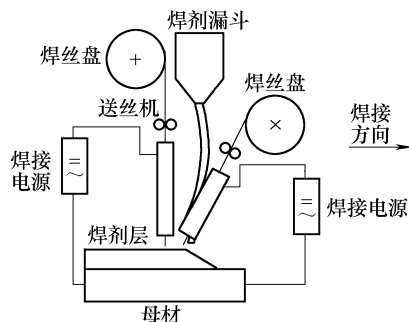


图 1-8 双丝串联埋弧焊方法原理图

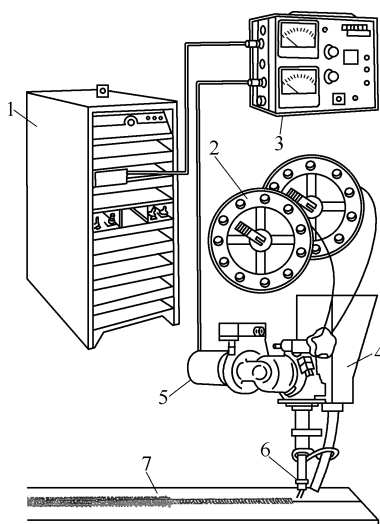


图 1-9 双丝并联埋弧焊焊机与焊接电源及控制器的连接方式

- 1—直流焊接电源 2—焊丝盘  
3—控制器 4—焊剂漏斗  
5—送丝机 6—导电嘴  
7—焊件

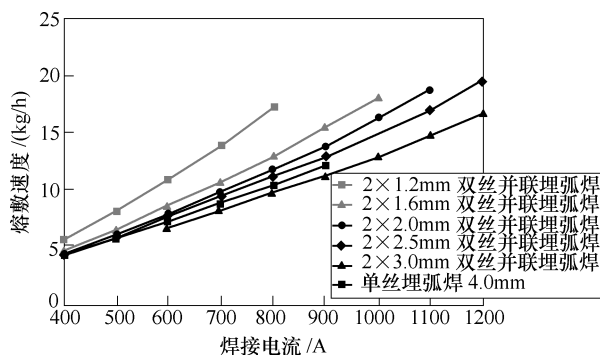


图 1-10 双丝并联埋弧焊与单丝埋弧焊熔敷速度的对比

双丝并联埋弧焊与单丝埋弧焊相比具有以下一系列的优点：

1) 双丝并联埋弧焊熔敷速度比单丝埋弧焊高 40% 以上；如图 1-10 所示的对比数据。

双丝并联埋弧焊高的熔敷速度归因于细丝的电流密度大，并产生较高的电阻加热。

2) 薄板双丝并联埋弧焊焊接时，焊接速度可提高 25% 以上。焊接厚板时，可提高 50% ~ 75%。图 1-11 ~ 图 1-13 分别示出了对接接头、角接接头和搭接接头采用两种埋弧焊方法焊接时焊接速度的对比。从中可见，双丝并联埋弧焊的焊接速度大大高于单丝埋弧焊。

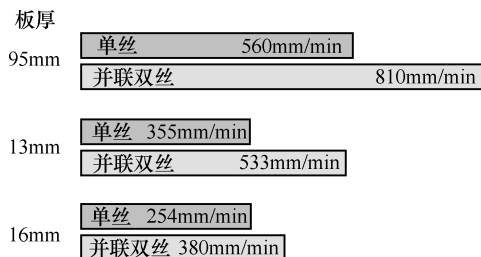


图 1-12 角接接头焊接速度对比

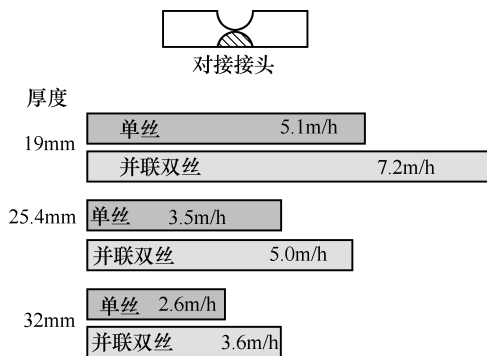


图 1-11 对接接头焊接速度对比

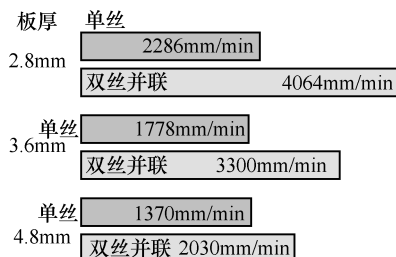


图 1-13 搭接接头焊接速度对比

3) 焊接热输入较低，焊接变形量可降低 5% ~ 50%。并有利于对焊接热输入较敏感的钢材。

4) 单位熔敷金属消耗的能量较低，降低了生产成本。

5) 通过改变焊丝相对于焊缝轴线的排列方式，以控制焊缝的成形。若焊丝横向于焊缝轴线排列，可以获得宽的焊缝和浅的熔深，如焊丝纵向于焊缝轴线排列，则可形成窄而深的焊道，如图 1-14 所示。

## 2. 双丝串列埋弧焊接法

双丝串列埋弧焊与双丝并联埋弧焊的区别，在于其每根焊丝由单独的送丝机构送进，并分别由各自的焊接电源供电（见图 1-8）。为避免两根焊丝的电弧相互干扰，通常将前

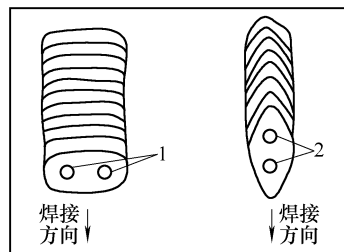
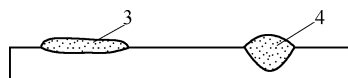


图 1-14 焊丝相对于焊缝轴线

排列方式对焊缝成形的影响

1—并列焊丝 2—串列焊丝 3—并列焊丝焊缝截面形状 4—串列焊丝焊缝截面形状

置焊丝接直流电源，尾随焊丝接交流电源。双丝串联埋弧焊机头与焊接电源和控制器之间的连接方式，如图 1-15 所示。

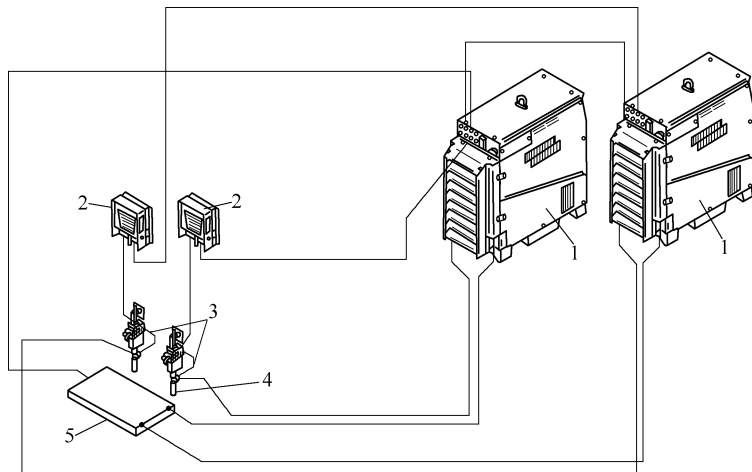


图 1-15 双丝串联埋弧焊机头与焊接电源及控制器之间的连接方式

1—焊接电源 2—控制器 3—送丝机构 4—导电嘴 5—焊件

双丝串联埋弧焊与单丝埋弧焊相比，最主要的优点是熔敷速度和焊接速度可提高 25% ~ 100%，图 1-16 所示为双丝串联埋弧焊与单丝埋弧焊熔敷速度的对比数据。从图中可见，采用相同直径的焊丝，在相同的焊接电流下，双丝串联埋弧焊的熔敷速度比单丝埋弧焊高出 1 倍以上，这归因于双弧的能量大大高于单弧。

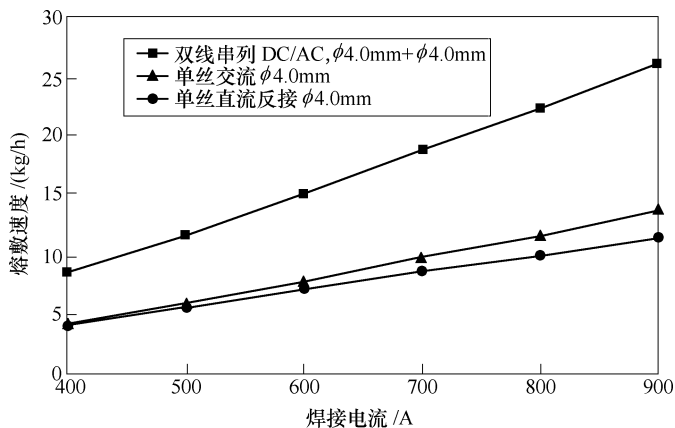


图 1-16 双丝串联埋弧焊与单丝埋弧焊熔敷速度对比

其次，双丝串联埋弧焊的焊丝间距和尾随焊丝的倾角可在一定范围内进行调节，以控制焊缝的成形，增强了工艺适应性。

第三，中、薄板接头焊接时，由于焊接速度成倍提高而减少了焊接变形。

第四,双丝串列埋弧焊的前置焊丝和尾随焊丝可以选用不同的焊接电流进行焊接。通常前置焊丝选用较大的焊接电流,以达到深熔;尾随焊丝则可选用较低的焊接电流,以使填充层焊道成形良好,消除咬边。

双丝串列埋弧焊由于具有上述一系列的优点,目前已在船舶、管道、锅炉、压力容器和钢结构等制造行业中得到了较广泛的实际应用。某些世界著名的焊接设备制造厂商已定型批量生产双丝串列自动埋弧焊机。

### 1.2.2 多丝埋弧焊接法

使用两根以上焊丝的埋弧焊统称为多丝埋弧焊。在制管工业生产中,已采用6丝高效埋弧焊,其熔敷速度可高达90kg/h,最高焊接速度为2.5m/min。

图1-17为三丝埋弧焊原理图,通常前置焊丝接直流电源,中间焊丝和尾随焊丝接交流电源。三丝埋弧焊的熔敷速度最高可达40kg/h。在不同的焊接电流下,与其他各种埋弧焊熔敷速度的对比如图1-18所示。从中可见,三丝埋弧焊的熔敷速度明显地高于其余各种高效埋弧焊。

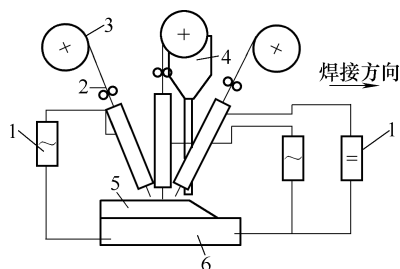


图 1-17 三丝埋弧焊工作原理

1—焊接电源 2—送丝机 3—焊丝盘  
4—焊剂漏斗 5—焊剂层 6—焊件

三丝埋弧焊时,每根焊丝可起到不同的作用。前置焊丝通常选用大电流和低电压,以达到深熔的目的;中间焊丝选用比前置焊丝较低的电流,使熔深略有增加并改善焊道的成形;尾随焊丝选用更低的电流和较高的电压,以形成平整的焊道外形,如图1-19所示。

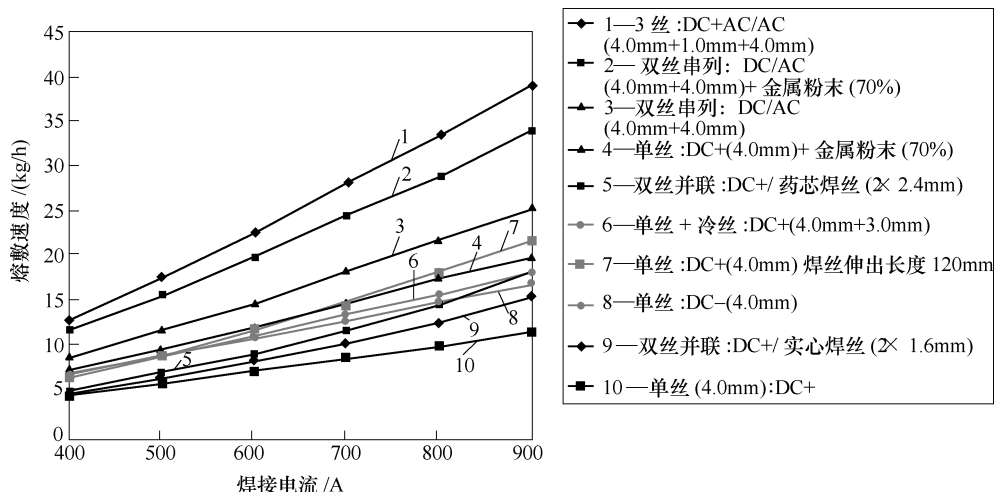


图 1-18 三丝埋弧焊与其他各种埋弧焊熔敷速度的对比

4mm、2.4mm、3mm、1.6mm—焊丝直径 DC—直流(电) AC—交流(电)

三丝埋弧焊还可调整焊丝的间距和焊丝与焊件表面的夹角，以控制焊缝的成形，其调节范围如图 1-20 所示。前置焊丝通常垂直于焊件表面，或稍作后拖，以获得最大的熔深，中间焊丝可垂直于焊件或向前倾斜，这样可减少对接焊接熔池的搅动；尾随焊丝一般向前倾斜，以获得平滑的焊道表面。

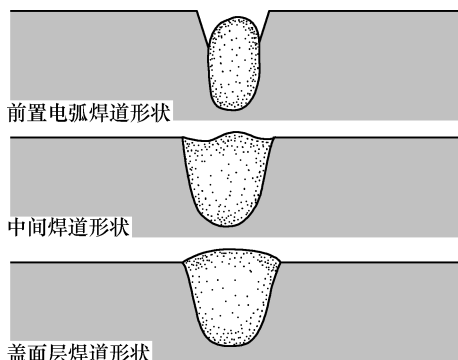


图 1-19 三丝埋弧焊时  
焊道的成形

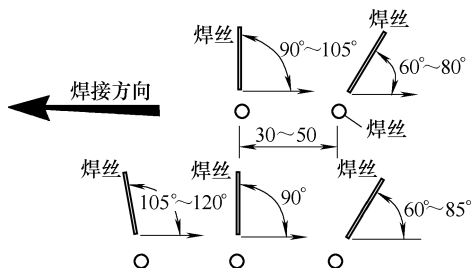


图 1-20 三丝埋弧焊时焊丝  
间距及夹角的调节范围

双丝和多丝埋弧焊的一个重要缺点是焊接热输入相当高，致使焊缝和热影响区晶粒粗大，塑性和韧性大幅度地下降。因此这种埋弧焊只能用于对塑性和韧性要求不高的厚壁接头，或用于对焊接热输入不敏感的钢材。为克服多丝埋弧焊的这一缺点，最近研发成功了双/双丝串联埋弧焊方法，英文名称为 Tandem-twin SAW。其工作原理如图 1-21 所示。实际上是将两套双丝并联埋弧焊机头串联组合使用。与普通的双丝串联埋弧焊相比，既提高了熔敷速度（见图 1-22）又提高了焊接速度，降低了焊接热输入，提高了接头的塑性和韧性，屈服强度为 415MPa，焊缝金属 -50℃ 冲击吸收能量达 70J。这种多丝高效埋弧焊方法首先在风电装备的风塔筒体纵、环缝焊接中得到了实际的应用。

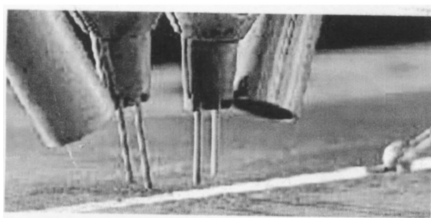
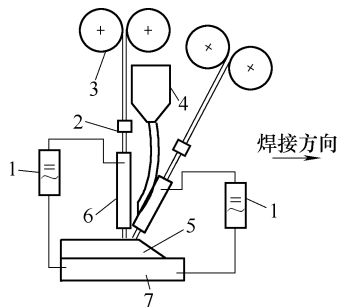


图 1-21 双/双丝串联埋弧焊工作原理

- 1—焊接电源 2—送丝机 3—焊丝盘  
4—焊剂漏斗 5—焊剂层  
6—导电嘴 7—焊件

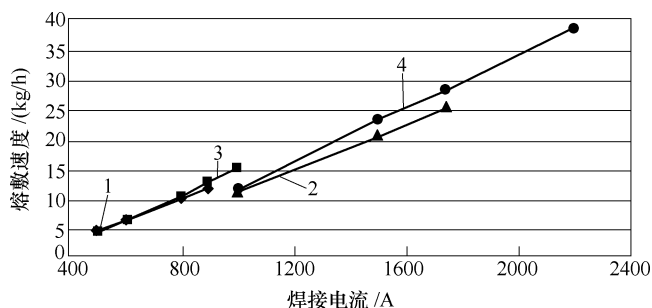


图 1-22 双/双丝串联埋弧焊与其他埋弧焊方法熔敷速度的对比

1—单丝 2—双丝串联 3—双丝并联 4—双/双丝串联

### 1.2.3 热丝埋弧焊接法

热丝埋弧焊是在传统的单丝埋弧焊机上增添一套热丝送丝机和加热电源。热丝在送入焊接熔池之前，通过导电嘴接通加热电流，并以电阻加热的方式将其加热至红热状态（600 ~ 800℃）作为填充焊丝熔入焊接熔池，其原理图如图 1-23 所示。热丝通常采用直径为 1.6mm 的细丝，加热电源为平特性的交流变压器，输出电压为 8 ~ 15V 可调。

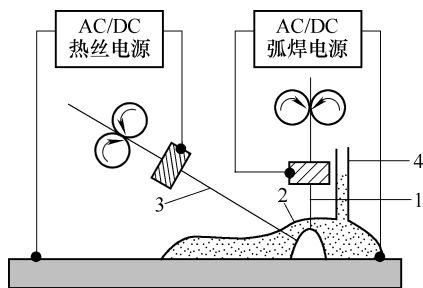


图 1-23 热丝埋弧焊原理图

1—焊丝 2—焊剂

3—热丝 4—焊剂漏斗

热丝埋弧焊与传统的单丝埋弧焊相比具有以下优点：

- 1) 总熔敷速度可提高 50% ~ 80%。
- 2) 降低焊接热输入，适于焊接热敏感的钢材。
- 3) 改善了搭桥性能，根部焊道焊接时，降低了焊穿的危险。
- 4) 厚壁接头多层焊时，减少了焊缝层数，提高了总的焊接效率。
- 5) 降低了焊缝金属中母材的稀释率，提高了接头的力学性能，特别是塑性和韧性。

由此可见，热丝埋弧焊是一种既能提高焊接效率，又能改善接头性能的高效埋弧焊方法。

### 1.2.4 添加冷丝埋弧焊接法

添加冷丝埋弧焊接法是在焊接过程中向焊接熔池给送不通电的冷丝，利用电弧

过剩的热量将其熔于同一熔池中。添加冷丝埋弧焊与传统单丝埋弧焊相比,可提高熔敷速度 50% 以上,如图 1-24 所示。同时,其有效热输入约降低 30%,适用于焊接对热敏感的各种钢材,如奥氏体不锈钢、双相不锈钢和热强钢等。

添加冷丝的机构,可以采用单独的送丝机,也可以共用一台送丝机,以相同的速度送给冷丝。在这种情况下,送丝机的驱动机构应配制两个输出轴,安装两套送丝轮,如图 1-25 所示。

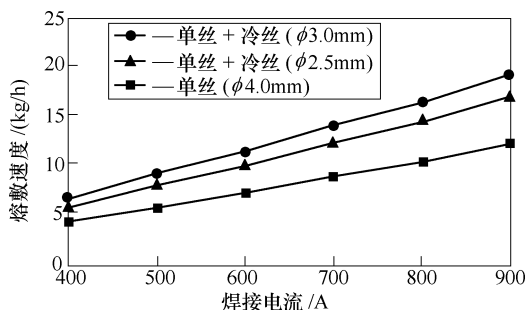


图 1-24 添加冷丝埋弧焊与单丝埋弧焊熔敷速度的对比

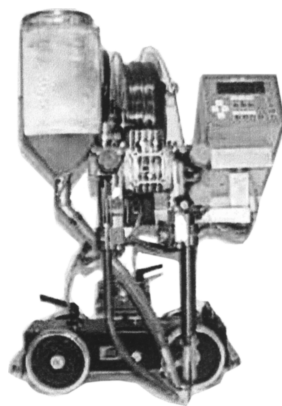


图 1-25 由同一台送丝机添加冷丝的埋弧焊机外形

按所焊工件的技术要求,冷丝与主电弧焊丝可以采取不同的组合。冷丝可以采用各种直径不同牌号的实心焊丝,也可采用相应强度等级的药芯焊丝或金属粉芯焊丝。

最近研发成功另一种添加冷丝的埋弧焊工艺方法,即所谓集束冷丝埋弧焊接法,英文为 Integrated Cold Electrode SAW,简称 ICE 法。不通电的冷丝经由同一个导电嘴给送进入焊接区,如图 1-26 所示。这样可更有效地利用电弧过剩的热量,熔敷速度可提高 50%。

集束冷丝埋弧焊的另一特点是由于焊接热输入和熔池温度的降低,根部焊道的搭桥性能明显地改善。如果接缝的装配间隙符合要求,则根部焊道背面成形良好,无需清根。进一步提高了焊接生产效率。

集束冷丝埋弧焊因其送丝系统的简化,使之采用各种组合方案成为可能。即既可采用单电源和单焊头,也可采用双电源和双焊头,可成倍地提高熔敷速度和焊接

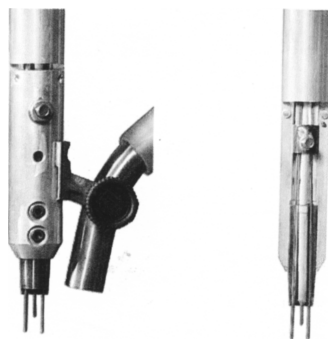


图 1-26 集束冷丝埋弧焊导电嘴的结构外形