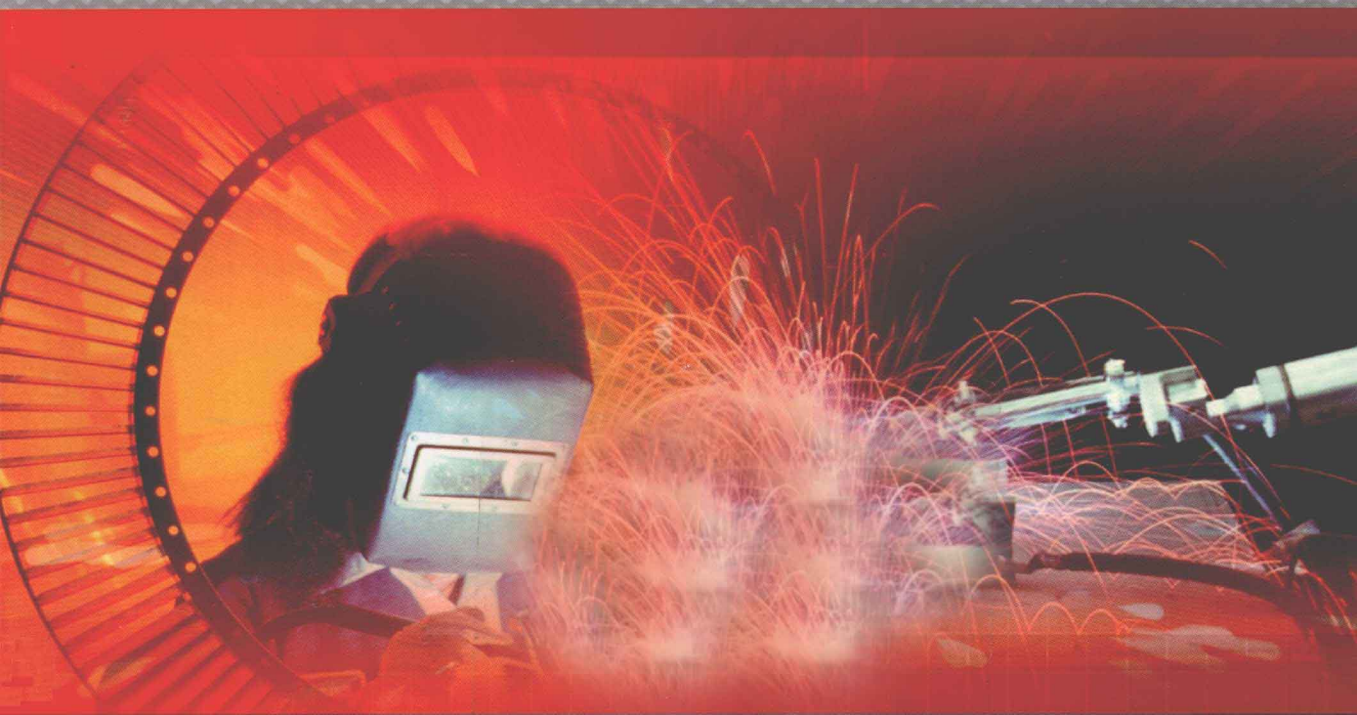


高效 焊接方法

林三宝 范成磊 杨春利 © 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高效焊接方法

林三宝 范成磊 杨春利 主编



机械工业出版社

本书被列入哈尔滨工业大学本科生“十二五”规划教材。

本书作为“电弧焊基础”等焊接方法类教材的拓展和延伸,对近年来开发或广泛应用的优质高效焊接新技术进行了系统性的介绍,包括高效非熔化极焊接技术(如 A-TIG、热丝 TIG、VPPAW、K-TIG 等)、高效熔化极焊接技术(CMT、Tandem、TIME、AC-MIG、STT、MIG 钎焊等)、高效埋弧焊接技术(多丝、粉末、带极等)、窄间隙焊接(TIG、GMAW 和 SAW)、复合热源(激光-电弧、PAW-MIG、双面双弧等)焊、电渣焊、气电立焊和 FSW,重点介绍了这些高效焊接技术的原理、特点、设备及工艺应用。

本书内容安排合理,重点突出,实例典型,文字精练,既可以作为授课教材,也可供广大工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高效焊接方法/林三宝,范成磊,杨春利主编. —北京:
机械工业出版社, 2011. 12
ISBN 978-7-111-36650-8

I. ①高… II. ①林…②范…③杨… III. ①焊接工艺
IV. ①TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 248523 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:吕德齐 责任编辑:吕德齐 崔滋恩

版式设计:张世琴 责任校对:张晓蓉

封面设计:赵颖喆 责任印制:乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2012 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 18.25 印张 · 446 千字

0001—4000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-36650-8

定价:39.00 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

社服务中心:(010)88361066 策划编辑:(010)88379733

销售一部:(010)68326294 门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

传统的电弧焊技术自 20 世纪初发明以来陆续在工业生产中得到了广泛的应用, 电弧焊占焊接总量的 70% 以上。随着现代工业的发展, 新材料及超薄和大、厚结构的不断应用, 以及对效率和质量的更高追求, 使得普通焊接方法越来越难以满足现代制造业的需求。自 20 世纪 90 年代以来, 陆续涌现出了许多新型焊接技术, 如 A-TIG、双丝焊、复合热源焊接、搅拌摩擦焊等, 引起了业内的广泛重视, 但目前尚未有书籍对这些新型焊接技术进行集中介绍。

目前, 我国焊接专业(包括材料成形与控制专业焊接方向)的教学体系中, 仍然局限于 TIG/PAW、MIG/MAG、SAW 等传统方法。从教学上看, 仅能满足基本知识点的要求, 不能满足学生了解现代科技和学术前沿, 拓展学术视野的需求, 也不能满足素质教育的诉求。基于上述认识, 哈尔滨工业大学焊接专业于 2005 年率先开展了“高效焊接方法”课程的讲授, 并将其作为本科生的专业必修课, 受到了学生的热烈欢迎。从已经毕业学生的反馈来看, 课程讲授内容与生产实际结合较紧密, 学生毕业后明显感到见识广、上手快、后续学习不畏难。

作为“电弧焊基础类”教材的有效拓展和延伸, 本书主要介绍了常用高效化电弧焊技术的原理、特点及应用, 包括高效非熔化极焊接技术(如 A-TIG、热丝 TIG、VPPAW、K-TIG 等)、高效熔化极焊接技术(CMT、Tandem、TIME、AC-MIG、STT、MIG 钎焊等)、高效埋弧焊技术(多丝、粉末、带极等)、窄间隙焊接(TIG、GMA 和 SAW)、复合热源(激光-电弧、PAW-MIG、双面双弧等)焊、电渣焊、气电立焊和 FSW。在本书的撰写过程中, 注重了对这些方法的实际应用方面知识的介绍, 这也是本书的一个特点。

本书既可以作为焊接专业(包括材料成形与控制专业)的本科生教材, 也可供材料加工工程、热加工、机械及船舶制造等专业的师生和工程技术人员参考。

本书由哈尔滨工业大学林三宝副教授、范成磊副教授和杨春利教授主编。全书共分为 7 章, 其中第 3 章由沈阳航空大学姬书得副教授编写, 第 5.1 和 5.3 节由哈尔滨工业大学李福泉副教授编写, 第 5.2 和 5.4 节由哈尔滨工业大学李海超副教授编写, 第 6 章由北京科技大学张华副教授编写, 其余章节由林三宝、范成磊副教授编写, 全书由杨春利教授审定校稿。

本书编写过程中, 参阅了哈尔滨工业大学和兄弟院校同行专家的许多著作和研究成果, 一些知名设备制造商为本书提供了珍贵的资料, 部分学生参与了本书插图的绘制, 在此一并致谢。

焊接技术发展日新月异, 受篇幅限制, 还有一些新型高效焊接技术尚未列入本书。加之时间仓促及编者的知识水平有限, 差错和不足在所难免, 恳请广大读者批评指正。

编者

目 录

前言

第1章 高效非熔化极气体保护焊

1.1 A-TIG 焊技术	1
1.1.1 A-TIG 焊概述	1
1.1.2 A-TIG 焊的优点	2
1.1.3 A-TIG 焊的研究与应用	3
1.1.4 A-TIG 焊的使用方法	13
1.1.5 A-TIG 焊的熔深增加机理	13
1.2 热丝 TIG 焊	16
1.2.1 热丝 TIG 焊的原理及优点	16
1.2.2 焊丝加热方法	19
1.2.3 热丝 TIG 焊应用示例	20
1.3 TOPTIG 焊	21
1.3.1 TOPTIG 焊的原理及特点	21
1.3.2 TOPTIG 焊的熔滴过渡形式	23
1.3.3 TOPTIG 焊的设备组成	26
1.3.4 TOPTIG 焊的主要参数	26
1.3.5 TOPTIG 焊的工业应用	28
1.4 变极性等离子弧焊	30
1.4.1 原理与发展	30
1.4.2 VPPA 小孔焊的优点	31
1.4.3 VPPAW 的成形规律	33
1.4.4 VPPA 的双填丝焊接工艺	36
1.4.5 铝合金中厚板的 VPPAW 工艺	38
1.4.6 VPPA 焊在 GIS 铝合金壳体焊接中的应用	39
1.5 尾孔 TIG 焊技术	41
1.5.1 K-TIG 焊的基本原理	41
1.5.2 K-TIG 焊的焊接设备	41
1.5.3 K-TIG 焊的特点	42
1.5.4 K-TIG 焊应用实例	42

1.6 磁力旋转电弧焊	44
参考文献	45

第2章 高效熔化极气体保护焊方法

2.1 双丝 GMA 焊	48
2.1.1 双丝 GMA 焊的分类	48
2.1.2 Tandem 双丝焊的技术原理和设备	50
2.1.3 Tandem 双丝焊的特点	52
2.1.4 Tandem 双丝焊的应用	53
2.2 T. I. M. E. 焊	54
2.2.1 T. I. M. E. 焊的基本原理	54
2.2.2 T. I. M. E. 焊的特征、优点和不足	55
2.2.3 T. I. M. E. 焊的应用	56
2.2.4 其他类似的焊接方法	57
2.3 带极 GMA 焊	58
2.3.1 带极 GMA 焊的原理和特点	58
2.3.2 焊材及设备	59
2.3.3 带极 GMA 焊的电弧形态及影响因素	60
2.3.4 带极 GMA 焊的熔滴过渡	61
2.3.5 带极 GMA 焊的应用	63
2.4 表面张力过渡技术	64
2.4.1 STT 的原理	64
2.4.2 STT 的设备	66
2.4.3 STT 的优点及限制	66
2.4.4 STT 的实际应用	68
2.5 药芯焊丝电弧焊	69
2.5.1 药芯焊丝电弧焊的分类和特点	69
2.5.2 药芯焊丝的种类	71

2.5.3 药芯焊丝的“滞熔”现象	72	3.4.3 带极埋弧堆焊的应用举例	105
2.5.4 药芯焊丝的焊接条件	72	3.5 粉末埋弧焊	108
2.6 MIG 钎焊	73	3.5.1 粉末埋弧焊的定义与特点	108
2.6.1 MIG 钎焊技术的提出	73	3.5.2 粉末埋弧焊的焊接工艺	109
2.6.2 MIG 钎焊的原理和特点	74	3.5.3 粉末埋弧焊的应用举例	110
2.6.3 MIG 钎焊设备	75	参考文献	111
2.6.4 MIG 钎焊材料	75		
2.6.5 MIG 钎焊工艺和冶金过程	75	第4章 窄间隙焊接技术	113
2.7 冷金属过渡焊接	76	4.1 窄间隙焊接的原理及特点	113
2.7.1 CMT 焊接简介及其特点	76	4.1.1 窄间隙焊接概述	113
2.7.2 CMT 焊接设备	78	4.1.2 窄间隙焊接的特征及分类	114
2.7.3 CMT 和脉冲混合过渡技术	79	4.1.3 窄间隙焊接的优点及不足	115
2.8 交流 MIG 焊	79	4.2 窄间隙 TIG(NG-TIG) 焊	116
2.8.1 交流 MIG 焊的原理	80	4.2.1 HST 窄间隙热丝 TIG 焊	116
2.8.2 交流 MIG 焊的优点	80	4.2.2 传统窄间隙热丝 TIG 焊	118
2.8.3 交流 MIG 焊的应用	81	4.2.3 MC-TIL 法窄间隙热丝 TIG 焊	120
2.9 ColdArc 和 ForceArc 技术	82	4.2.4 窄间隙 TIG 焊的应用——压水 堆核电站主回路管道的焊接	121
2.9.1 ColdArc 技术	83	4.3 窄间隙 GMAW(NG-GMAW)	125
2.9.2 ForceArc 技术	84	4.3.1 NG-GMAW 的发展	126
2.10 双脉冲 MIG 焊	86	4.3.2 NG-GMAW 的分类	126
参考文献	88	4.3.3 NG-GMAW 焊接参数的影响	131
第3章 高效埋弧焊方法	90	4.3.4 BHK 窄间隙焊接方法	134
3.1 埋弧焊概述	90	4.3.5 高速旋转电弧窄间隙焊接方法	136
3.1.1 埋弧焊的焊缝形成过程	90	4.3.6 国内的研究情况	140
3.1.2 埋弧焊的特点	91	4.4 窄间隙埋弧焊(NG-SAW)	143
3.1.3 埋弧焊的分类	92	4.4.1 概述	143
3.2 双丝埋弧焊	92	4.4.2 精密控制双丝窄间隙埋弧焊	145
3.2.1 双丝埋弧焊的种类与特点	92	4.4.3 SUBNAP 窄间隙埋弧焊方法	149
3.2.2 双丝埋弧焊的焊接工艺	95	4.4.4 KNS 窄间隙埋弧焊方法	151
3.2.3 双丝埋弧焊的应用举例	98	4.4.5 大厚度 NG-SAW 设备	152
3.3 多丝埋弧焊	99	4.5 摆动电弧焊接	155
3.3.1 多丝埋弧焊的定义与特点	99	4.5.1 摆动电弧焊接的作用	155
3.3.2 多丝埋弧焊的焊接参数	100	4.5.2 摆动电弧焊接的分类	156
3.3.3 多丝埋弧焊的应用举例	101	参考文献	158
3.4 带极埋弧堆焊	103	第5章 复合及多热源焊接	160
3.4.1 带极埋弧堆焊的原理与特点	103	5.1 激光-电弧复合焊	160
3.4.2 带极埋弧堆焊的焊接参数	105		

5.1.1 激光-电弧复合焊的特点及 激光与电弧的相互作用	160
5.1.2 激光与电弧的复合方式	162
5.1.3 激光-电弧复合焊的应用	167
5.2 双钨极 TIG 焊	173
5.2.1 双钨极 TIG 焊的原理及特点	173
5.2.2 双钨极 TIG 焊耦合电弧的 物理特性	174
5.2.3 双钨极 TIG 焊的工艺特点 及应用	177
5.3 双面双弧焊	177
5.3.1 双面双弧焊的特点及分类	177
5.3.2 双面双弧焊的应用	179
5.4 等离子弧-MIG 同轴复合焊	184
5.4.1 等离子弧-MIG 焊的原理及特点	184
5.4.2 等离子弧-MIG 焊枪的设计	185
5.4.3 等离子弧-MIG 焊的物理特性	186
5.4.4 等离子弧-MIG 焊的应用	189
5.5 等离子弧-MIG/MAG 旁轴 复合焊	190
5.5.1 Super-MIG 焊的基本原理和设备	190
5.5.2 Super-MIG/MAG 焊的特点	192
5.5.3 Super-MIG 焊的应用	193
5.6 超声波-TIG 复合焊接	195
参考文献	199

第 6 章 搅拌摩擦焊及搅拌

摩擦点焊

6.1 FSW 的原理及特点	201
6.1.1 FSW 简介	201
6.1.2 FSW 的特点	202
6.1.3 FSW 的原理	203
6.2 FSW 的焊接参数	208
6.2.1 旋转速度	209
6.2.2 焊接速度	209
6.2.3 焊接压力	211
6.2.4 搅拌头倾角	211
6.2.5 搅拌头扎入速度和保持时间	211

6.2.6 搅拌头形状与尺寸	212
6.3 搅拌头的设计	213
6.3.1 搅拌头的材料选择	214
6.3.2 搅拌头的形状设计	215
6.3.3 搅拌头的结构设计	216
6.3.4 搅拌头的发展趋势	218
6.4 FSW 的应用	219
6.4.1 FSW 在制造业中的应用	219
6.4.2 FSW 在材料制备及改性方 面的应用	226
6.5 搅拌摩擦点焊	229
6.5.1 搅拌摩擦点焊的原理及特点	230
6.5.2 搅拌摩擦点焊的焊接参数	230
6.5.3 搅拌摩擦点焊的研究现状	231
6.5.4 搅拌摩擦点焊的应用	233
6.6 FSW 接头的缺陷及其 检测与修补	234
6.6.1 FSW 接头缺陷	234
6.6.2 FSW 接头缺陷的检测	236
6.6.3 FSW 接头缺陷的修补技术	240
6.7 典型材料的 FSW	244
6.7.1 铝合金的 FSW	244
6.7.2 镁合金的 FSW	246
6.7.3 钛合金的 FSW	248
6.7.4 钢材的 FSW	249
6.7.5 异种材料的 FSW	251
参考文献	252

第 7 章 电渣焊和气电立焊

7.1 电渣焊	255
7.1.1 电渣焊的方法、原理和分类	255
7.1.2 电渣焊过程的冶金因素	258
7.1.3 电渣焊设备	259
7.1.4 电渣焊材料	261
7.1.5 电渣焊的焊接参数	264
7.1.6 电渣焊的焊接工艺过程	268
7.1.7 电渣焊的焊缝质量	272
7.1.8 电渣焊的应用	273

7.1.9 其他电渣焊方法	274	7.2.4 气电立焊的一般用途	278
7.2 气电立焊	275	7.2.5 气电立焊的焊接工艺	278
7.2.1 气电立焊的基本原理	275	7.2.6 气电立焊的焊接参数	279
7.2.2 气电立焊设备	276	7.2.7 气电立焊的焊缝质量	280
7.2.3 气电立焊的材料	278	参考文献	281

第1章 高效非熔化极气体保护焊

TIG 焊是典型的热传导型焊接方法，焊接过程平稳，焊缝质量良好，得到了广泛的应用。但众所周知，TIG 焊也有一个非常突出的不足，即焊缝熔深较浅、生产效率低，这主要受限于传统 TIG 焊钨极的载流能力。例如，在焊枪冷却良好的前提下，常用的直径为 2.0mm 的钨极最高持续焊接电流一般不超过 200A，直径为 3.2mm 的钨极最高持续焊接电流一般不超过 300A。如果强行升高焊接电流，可能导致钨极烧损，甚至熔化过渡到焊缝中去，引起焊缝“夹钨”，严重时会导致焊枪烧毁漏水，甚至酿成事故。正是由于这个原因，TIG 焊一般只用来焊接薄壁构件，或者用于厚大构件的打底焊。

提高 TIG 焊的生产效率，一直以来都是焊接工作者追求的一个目标，于是陆续出现了如活性剂焊、热丝焊、尾孔 TIG 焊(也称“匙孔 TIG 焊”)、TOPTIG 焊等方法，本章就对这些高效非熔化极焊接方法的原理、特点、应用进行详细阐述。

1.1 A-TIG 焊技术

1.1.1 A-TIG 焊概述

A-TIG 焊(Activating flux TIG welding)即指“活性化 TIG 焊”。活性化焊接是把某种物质成分的活性剂涂敷在焊件母材焊接区，正常规范下焊接熔深大幅度提高。

普通 TIG 电弧在进行钢、钛、铝等材料的焊接时，由于电弧热量分散以及电弧力数值低等原因，在正常使用的规范参数下，考虑焊缝深宽比等成形方面的要求，通常单层焊接只能获得较小的熔深。对于厚度较大的板材或管材焊接，在需要背面完全熔透时，就需要进行坡口加工以及采用多层焊接。为发展 TIG 焊的应用，20 世纪 60 年代中期，前苏联巴顿焊接研究所(PWI)提出了“活性化 TIG 焊”的概念，至 80 年代初期，在钢材料、钛合金的焊接中取得了良好结果。

巴顿研究所以实用技术研究为主，在活性剂影响机理方面他们认为是电弧收缩的作用。美国及欧洲对此项技术的研究开展得较晚。20 世纪 80 年代初期，随着表面张力影响学说的提出，人们对活性化焊接机理有了新的认识，随后多年的研究重点也转移到焊接表面张力的研究上。进入 90 年代，人们重新认识了活性化焊接的应用前景，近年来国外科研机构和产业部门对活性化 TIG 焊方法有加速研究的趋势，并形成了 A-TIG 焊的概念和技术，其工作受到广泛重视。

活性化焊接突出特点就是提高熔深，比如不锈钢材料的焊接，其单层熔深可以增加一倍以上，厚度为 6mm 的试板不开坡口可以一次焊透，这使 TIG 焊的发展应用具有很大的优势。活性化焊接所形成的焊缝在深度方向的熔宽差别减小，在减少构件焊接变形方面亦有良好效果，这是焊接中的一项重要成果。由于活性剂在电弧高温下的分解作用，对焊缝金属中的非纯净物有净化作用，能够提高焊接接头的性能。

1.1.2 A-TIG 焊的优点

A-TIG 焊对提高钨极氩弧焊的焊接效率具有重要意义。

图 1-1 所示为在相同规范下，厚度为 6mm 的不锈钢板材采用普通 TIG 焊和 A-TIG 焊所获得的焊接结果。活性剂微量涂敷对焊接熔深的增加有明显的效果，同时焊缝上下表面较宽，而焊缝中部较窄，其树枝晶方向几乎与双面焊效果等同。相同现象也表现在等离子弧焊接中。试验结果表明，A-TIG 焊对于厚板可以显著减少焊道层数，焊接效率提高 1 倍以上。图 1-2 所示为普通钨极氩弧焊、A-TIG 焊、等离子弧焊等方法对 1m 长的不同厚度板进行焊接所需的焊道层数及焊接时间的对比。

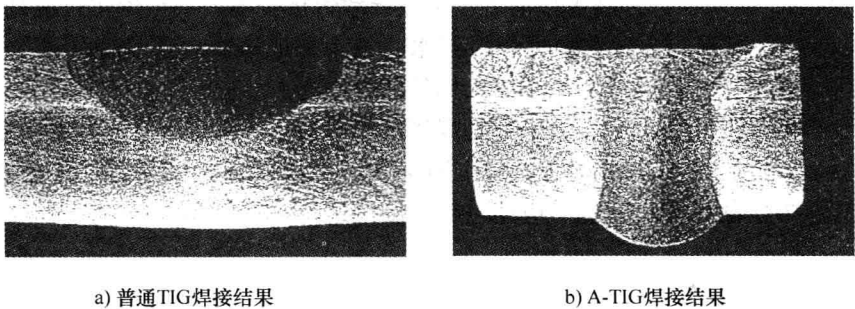


图 1-1 TIG 焊与 A-TIG 焊熔深能力对比(厚度为 6mm 的不锈钢)

A-TIG 焊的优点如下。

1) 由于提高了焊缝熔深，使得焊接生产率得到了提高。传统 TIG 焊能够一次焊透 3mm 厚的不锈钢，而 A-TIG 焊则能够一次焊透 12mm 厚的不锈钢。焊接时间的缩短或者焊道数量的减少，使焊接效率大幅提高。

2) 减少焊接变形。与传统的开坡口多层多道 TIG 焊相比，A-TIG 焊采用不开坡口直接对接焊接，焊道收缩量很小，焊后变形因而减少。对于薄板而言，A-TIG 焊由于减少了热输入，也相应地减小了焊接变形。

3) 消除了各炉次钢板由于微量元素差异而造成的焊缝熔深差异。例如，传统 TIG 焊焊接低硫(质量分数 $<0.002\%$) 不锈钢时，熔深通常较浅，而采用 A-TIG 焊，则可以获得熔深大的焊缝。

A-TIG 焊得到的焊缝，其正反面熔化宽度比例更趋合理，熔宽均匀稳定，由于焊件散热条件变化或者夹具(内涨环)压紧程度不一致所导致的背面出现蛇形焊道及不均匀熔透(或非对称焊缝)的程度减低，对保证焊缝使用性能有利。

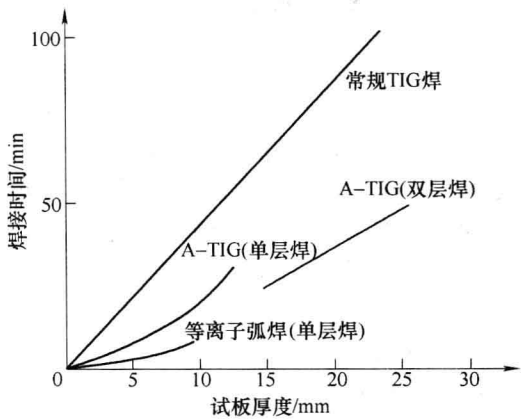


图 1-2 焊接 1m 长度焊缝所需时间及所需焊道层数比较

1.1.3 A-TIG 焊的研究与应用

目前, A-TIG 焊可以用于碳素钢、钛合金、不锈钢、镍基合金、铜镍合金的焊接, PWI 还开发了相关的药芯焊丝用于 MIG 焊中。活性剂的成分和配方是 A-TIG 焊的关键技术。虽然活性剂在国外已有比较成熟的应用, 但由于这种技术的重要性, 公开出版物上关于活性剂配方的报道很少。目前常用的活性剂成分主要有氧化物、氯化物和氟化物。不同的材料, 其适用的活性剂成分不同。

对于不锈钢, 一些金属和非金属氧化物, 如 SiO_2 、 TiO_2 、 Fe_2O_3 和 Cr_2O_3 , 都能有效地增加熔深。而对于钛合金, 一些卤化物, 如 CaF_2 、 NaF 、 CaCl_2 和 AlF_3 , 能起到相同的作用。前苏联也有报道, 氧化物和氟化物的混合物能增加碳锰钢的熔深, 其活性剂的配方(质量分数)大致为 SiO_2 (57.3%)、 NaF (6.4%)、 TiO_2 (13.6%)、Ti 粉(13.6%)、 Cr_2O_3 (9.1%)。

目前, 国外从事 A-TIG 焊商业化应用的厂商主要有 PWI 和美国爱迪生焊接研究所(EWI)。PWI 提供的活性剂以喷雾器形式分装, 或者为膏状(活性剂粉末同丙酮的混合溶液)。后者可以通过刷子涂敷到焊缝的表面。EWI 的活性剂是以粉末形式提供, 在使用前以异丙醇稀释, 然后涂敷到焊缝表面, 异丙醇挥发后留下活性剂粘附在焊件表面。EWI 同样也研制了类似于记号笔的装置, 直接将活性剂涂敷到焊缝表面。表 1-1 列出了上述机构开发的活性剂及适用的材料。

表 1-1 商业化活性剂及适用材料

PATIG-S-A	碳锰钢、低合金钢、Cr-Mo 钢、不锈钢
PATIG-N-A	镍基合金(镍铬合金、因镍合金 600、690)
FASTIG SS-7	不锈钢
CS-325	碳锰钢、低合金钢、铬钼钢
Fi-600	镍基合金

英国焊接研究所(TWI)于 2006 年也开发出了用于不锈钢的活性剂, 它摒弃了丙酮或者异丙醇溶剂, 采用水溶性溶剂, 降低了活性剂的应用成本。

国内的高校, 如哈尔滨工业大学、兰州理工大学等也于 1999 年开始开展了 A-TIG 焊活性剂的研究与开发工作, 主要针对的材料包括不锈钢、低碳钢、钛合金、镁合金、铝合金和镍基合金。近年来, 西北工业大学在激光及激光电弧复合焊中也采用了活性剂, 取得了一定的效果。

下面针对一些典型的材料, 介绍国内外 A-TIG 焊的开发与应用。

1. 不锈钢和碳锰钢

从已经公布的专利及文献上看, 不锈钢 A-TIG 焊的活性剂主要成分为氧化物。美国专利 5804792 给出了参考成分(质量分数)为 TiO 或 TiO_2 (50%)、 Cr_2O_3 (40%)以及 SiO_2 (10%)。PWI 和国内一些机构在其中也添加了氟化物以增加作用效果。其中, PWI 的 FS-71 活性剂参考成分(质量分数)为 SiO_2 (57.3%)、 NaF (6.4%)、 TiO_2 (13.6%)、Ti(13.6%)和 Cr_2O_3 (9.1%)。

图 1-3 所示为各种单一成分活性剂在相同焊接参数下的熔深增加效果照片, 从中可以看出, 氧化物和氟化物均能增加焊缝的熔深, 但熔深的增加程度不同, 氧化物的作用效果更明显。

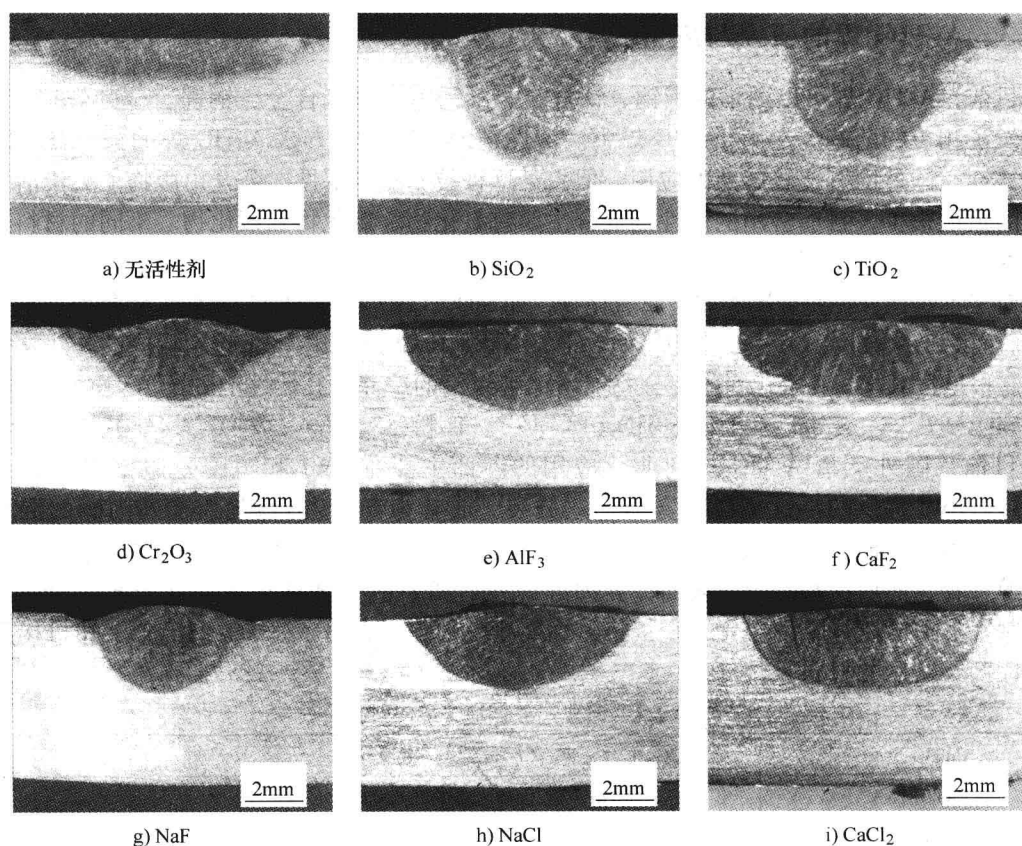


图 1-3 SUS304 不锈钢单一成分 A-TIG 焊焊缝截面比较
($I = 200\text{A}$, $v = 200\text{mm/min}$, $L_a = 3\text{mm}$, $q = 10\text{L/min}$, 保护气体为 Ar)

根据上述单一成分活性剂的试验结果, 综合考虑熔深、焊缝成形、焊缝性能等因素, 通过正交试验或均匀试验方法, 即可配制出多组元活性剂配方。

针对板材结构, A-TIG 焊既可用于手工焊, 亦可用于自动焊, 也适用于各种焊接位置。因为自动焊能够控制电弧高度, 如需一次焊透更厚的板材, 应首先考虑自动焊。例如, 在平焊(PA)位置 A-TIG 焊接碳锰钢对接焊缝时, 自动焊可以单道一次焊透 12mm 厚的板材。需要注意, 如果焊接板材厚度大于 6mm, 需要在焊缝背面用垫板支撑, 以防止熔池下陷。

对于厚度大于 12mm 的板材, 推荐采用双面两道焊接。如果实际结构不允许双面焊, 可用 A-TIG 焊增加根部熔透深度, 减少后续的填充焊道数量。例如, 在焊接 20mm 厚的板材时, 可以采用 7mm 钝边的坡口, 与传统 TIG 焊的 3mm 钝边相比, 可减少 30% 的填充金属量, 如图 1-4 所示。

如果焊接位置为非平焊位置, 或使用手工焊, 在单面焊双面成形的情况下, A-TIG

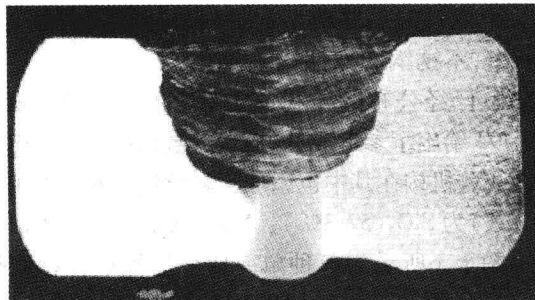


图 1-4 20mm 厚 SUS304 不锈钢的 A-TIG 焊

焊最大可焊厚度小于6mm。

对于管道环缝焊接，A-TIG 焊同样可用于手工焊和自动焊过程，以及各种焊接位置。当焊接位置为平焊(PA, 1G)且单面焊双面成形时，单道最大厚度不宜超过6mm。如有背面垫板支撑，单道厚度可增加至9mm。当焊接位置为全位置(PC, 5G)时，可以用传统的 TIG 全位置焊管设备进行 A-TIG 焊，如图 1-5 所示。在全位置焊接情况下，为了避免焊缝背面上凹，单道可焊最大厚度减小到5mm。全位置 A-TIG 焊管时，应采用脉冲焊接。图 1-6 所示为全位置 A-TIG 焊接直径为70mm、壁厚为5mm 的316 不锈钢管的焊缝照片。焊接过程采用不填丝自熔焊，单道一次焊透。

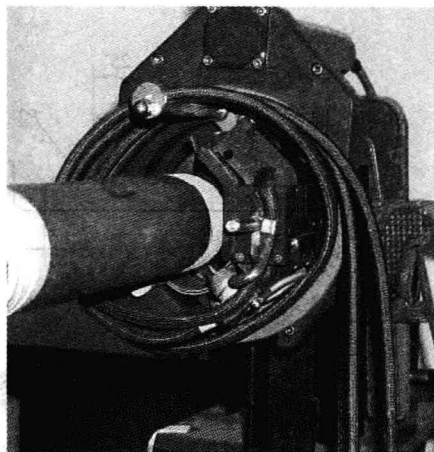
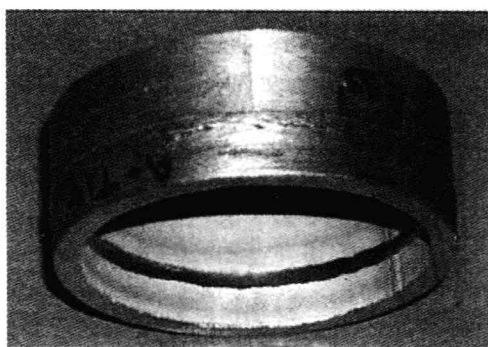


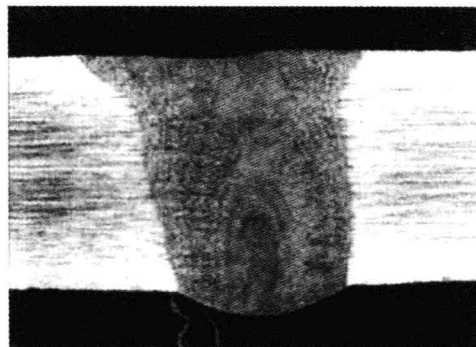
图 1-5 全位置 A-TIG 焊管
(图中活性剂已经涂敷到焊道)

与传统 TIG 焊比较，A-TIG 焊的效率优势明显。

例如，在传统 TIG 焊接直径为60mm、壁厚为5.7mm 的不锈钢管时，需要开图 1-7a 所示的坡口，不摆动时需要焊接8道(见图 1-7b)，摆动焊接为4道(见图 1-7c)。



a) 管子的焊缝成形



b) 焊缝的横截面

图 1-6 5mm 不锈钢管道环缝脉冲 A-TIG 焊

($I_p = 150A$ 、 $I_b = 130A$ 、 $T_p = 300ms$ 、 $T_b = 300ms$ 、 $v = 60mm/min$)

在角焊缝位置时，由于 A-TIG 焊的电弧收缩、挺度增加，可以改善传统 TIG 焊电弧偏熔现象，如图 1-8 所示。

哈尔滨工业大学采用自行研制的不锈钢活性剂焊接了5mm 厚 SUS304 不锈钢，并将此应用到了航天产品的焊接中。图 1-9 所示为焊接试板照片，采用填丝 TIG 焊，在试板左侧涂敷活性剂，右侧不涂敷，采用相同参数单道焊接。从图 1-9 中可以看出，没有涂敷活性剂的部位背面没有焊透，正面熔宽比 A-TIG 焊熔宽大。

目前大多数研究都集中在 A-TIG 焊接奥氏体不锈钢上，EWI 对 A-TIG 焊接双相不锈钢进行了研究，图 1-10 所示为 A-TIG 焊焊接 SAF2507 双相不锈钢材料的焊缝横截面照片，试验结果表明，采用活性剂后，铁素体的体积分数仍然保持在45%~55%，由于热输入减少，变形量得到控制。

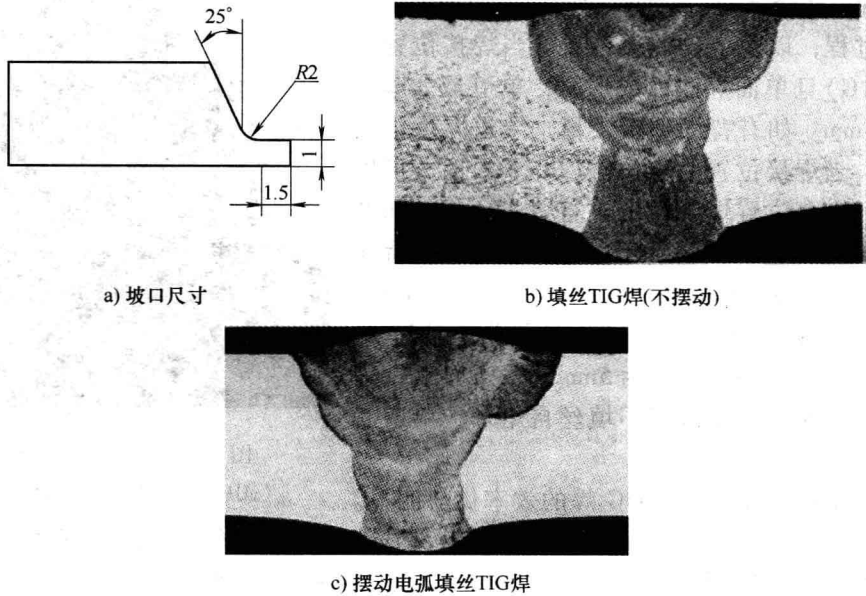


图 1-7 壁厚为 5.7mm 不锈钢管 TIG 焊

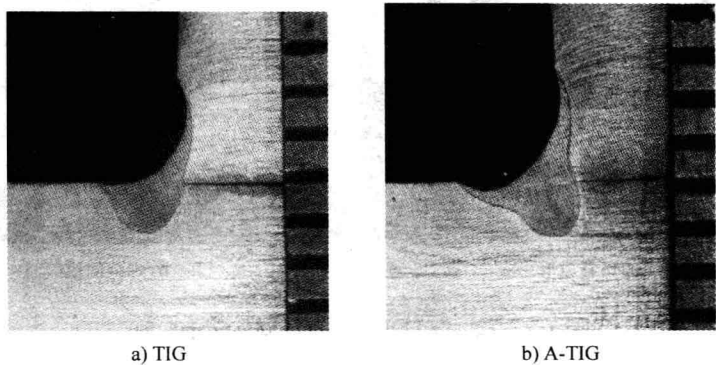


图 1-8 传统 TIG 与 A-TIG 角焊缝焊接横截面比较

($I=90\text{A}$ 、 $v=160\text{mm/min}$ 、 $U_a=8\text{V}$, 保护气体为 Ar)

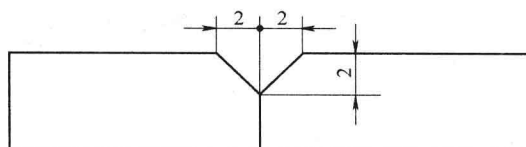
印度的 G. Srinivasan 等人采用活性剂焊接了 5mm 厚的 304L 不锈钢假燃料组件 (dummy fuel), 如图 1-11 所示。

2. 钛合金

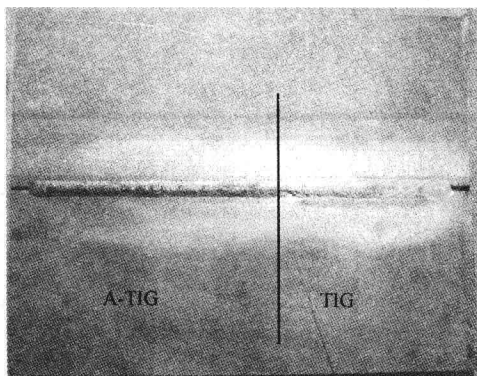
由于钛合金高温下对氧元素比较敏感, 因此钛合金活性剂的主要成分由卤化物组成。

图 1-12 所示为各种单一成分卤化物在相同焊接参数下对厚度为 3mm 的 TC4 钛合金的作用效果, 与不锈钢活性剂类似, 不同成分的活性剂对熔深增加程度不同。

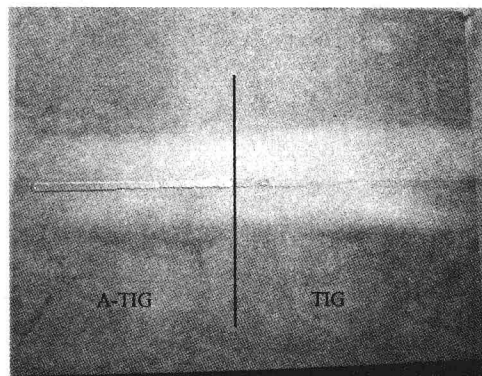
从提高熔深、改善焊缝成形以及提高力学性能等方面考虑选取主要成分和辅助成分, 通过正交试验或均匀试验法可以获得焊接钛合金活性剂的配比。



a) 5mm不锈钢的坡口尺寸



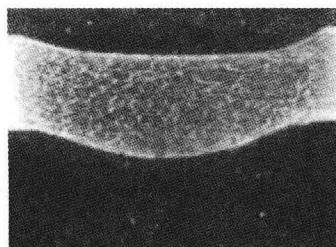
b) 焊缝正面成形



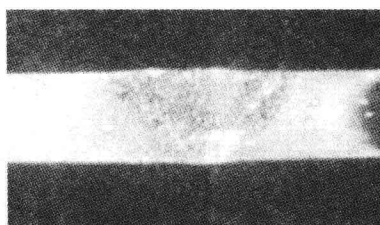
c) 焊缝背面成形

图 1-9 5mm 厚 SUS304 不锈钢的 A-TIG 焊

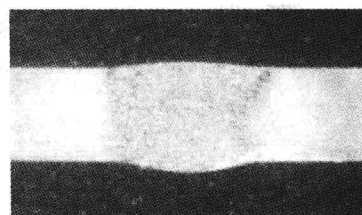
($I = 245\text{A}$ 、 $v = 175\text{mm/min}$ 、 $v_f = 530\text{mm/min}$ 、 $L_a = 2.5\text{mm}$ 、 $q = 10\text{L/min}$)



a) 无活性剂(热输入为0.49J/mm)

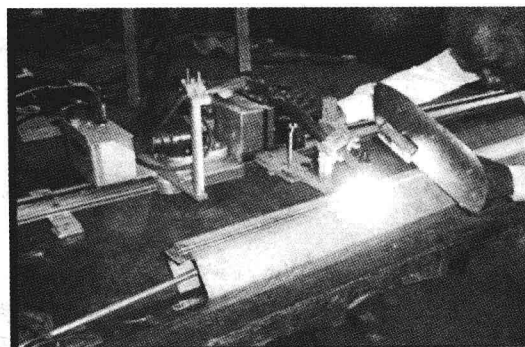


b) 无活性剂(热输入为0.24J/mm)

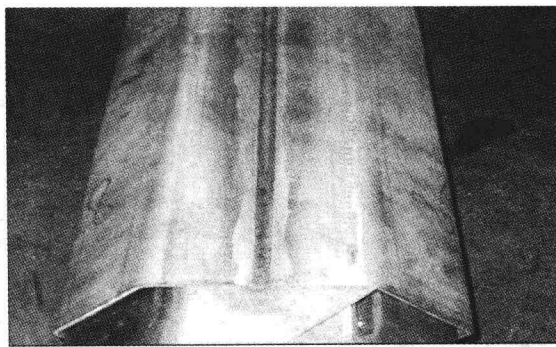


c) 活性剂(热输入为0.24J/mm)

图 1-10 A-TIG 焊接 2.41mm 厚 SAF2507 的效果



a) 焊接中



b) 形成的焊缝

图 1-11 304L 不锈钢的 A-TIG 焊

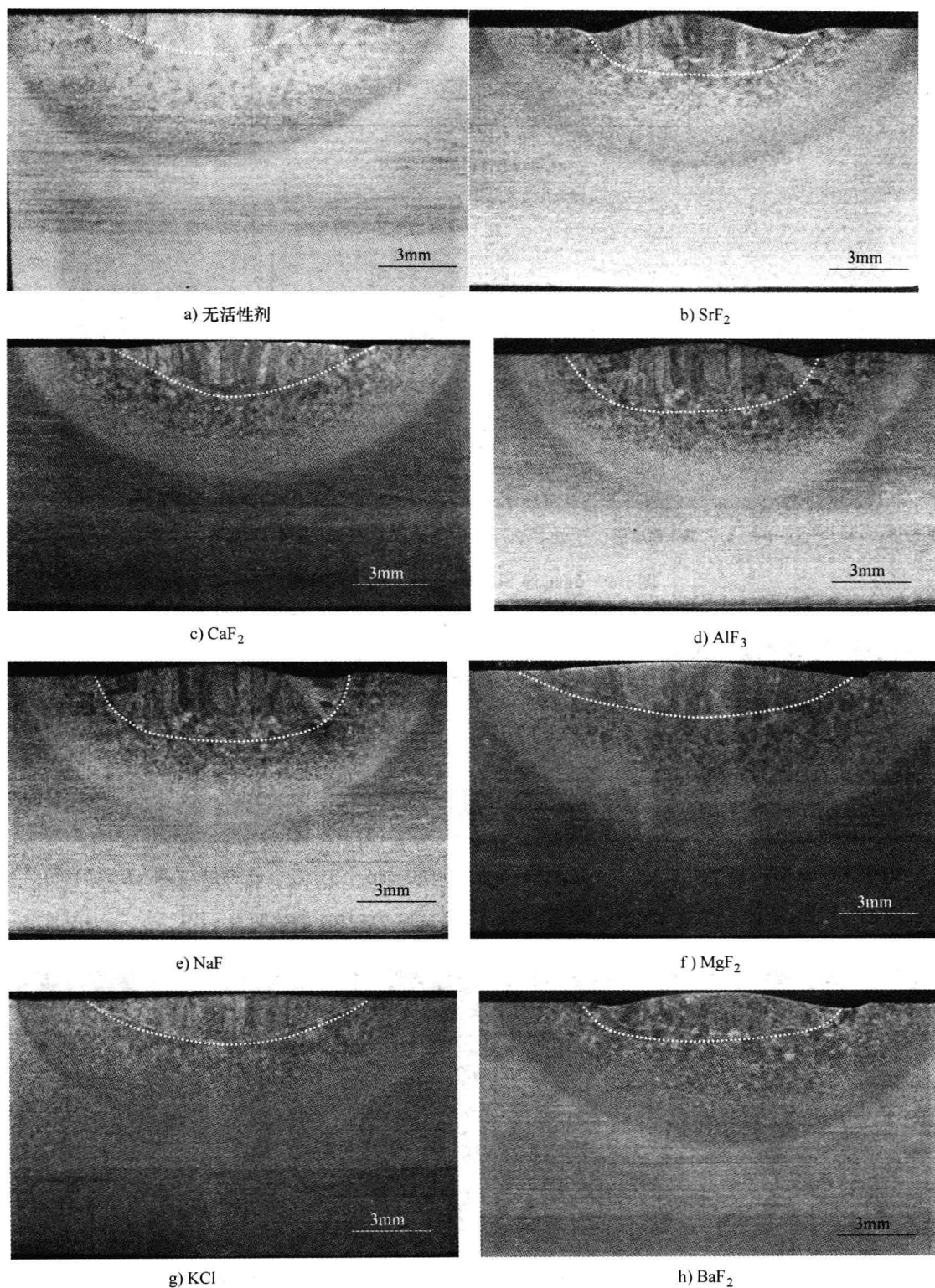


图 1-12 钛合金 A-TIG 焊焊缝截面比较
($I = 180\text{A}$ 、 $v = 250\text{mm/min}$ 、 $L_a = 2.5\text{mm}$ 、 $q = 10\text{L/min}$)

哈尔滨工业大学利用自行研制的钛合金活性剂焊接了 5mm 厚的 Ti31 钛合金管道对接环缝, 焊缝成形照片如图 1-13 所示。图 1-14 所示为 2mm 厚 TC4 钛合金板的 A-TIG 焊和传统 TIG 焊效果对比, 从中可以看出, 施加活性剂后熔深增加, 熔宽变窄。

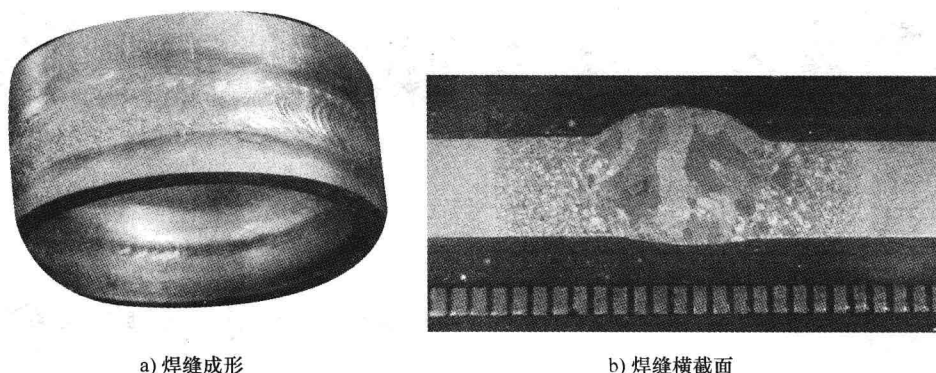


图 1-13 5mm 厚 Ti31 钛合金 A-TIG 焊

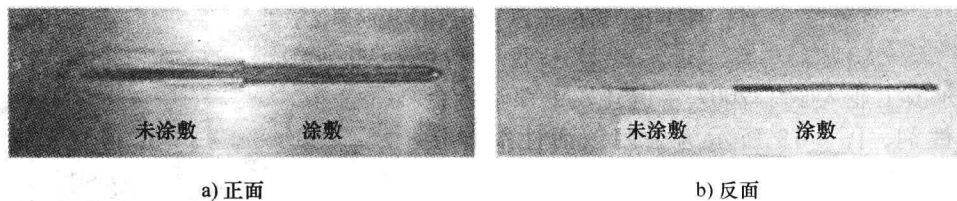


图 1-14 2mm 厚 TC4 钛合金板对接焊缝的对比

PWI 研制的钛合金焊接活性剂已经用于航空发动机钛合金的焊接中。

除此之外, 钛合金活性化焊接还能够消除传统 TIG 焊出现的氢气孔, 也可以净化焊缝 (降低焊缝中的氧含量)。对于表面清理不当、保护出现问题或者潮湿气候下的焊接, 钛合金传统 TIG 焊缝中容易出现气孔, 而采取活性化焊接后, 气孔没有出现。图 1-15 所示为 1.2mm 厚钛合金板对缝焊接时气孔产生情况, 在未涂敷活性剂区域, 焊缝中产生了较多量的气孔, 而涂敷活性剂区域没有产生焊接气孔。

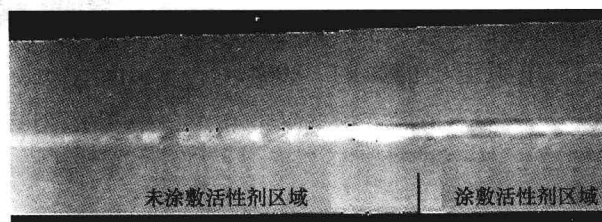


图 1-15 1.2mm 厚钛合金板对缝焊接气孔产生情况(X-光照片)

3. 镍基合金

镍基合金焊接活性剂的主要成分为氧化物, 也有的活性剂采用卤化物成分。

EWI 在 2000 年前后开发了用于镍基合金 A-TIG 焊的活性剂, 并在工业企业中进行了试用。其研制的活性剂主要针对镍基合金 Alloy600, 也针对 Alloy 718 和 Alloy 625 进行了试验。试验结果表明, 在不同电流条件下, 应用活性剂后熔深均增加在 100% 以上。工业企业使用