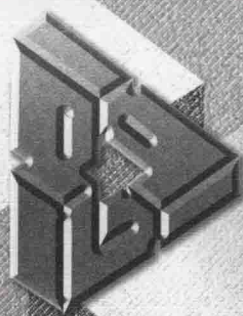


李亚江 等编著

先进焊接/连接工艺



XIANJIN HANJIE
LIANJIE GONGYI



化学工业出版社

李亚江 等编著

先进焊接/连接工艺



XIANJIN HANJIE
LIANJIE GONGYI



化学工业出版社

· 北京 ·

本书涉及的先进焊接/连接工艺主要包括高效电弧熔焊工艺、激光-电弧复合焊、搅拌摩擦焊、过渡液相扩散连接、先进堆焊(熔覆)技术、机器人焊接技术等。这些工艺具有先进性和实用性,符合优质、高效、低耗、无污染生产的发展方向,是值得推广的先进焊接技术。本书的特点是,从实用性角度对先进焊接/连接工艺要点及应用等做了简明阐述,并给出了一些研发和生产中的成功实例,为读者掌握先进焊接/连接工艺提供了理论指导和实践中的成功经验。

本书可供材料成型、焊接技术的研究人员、工程技术人员以及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

先进焊接/连接工艺/李亚江等编著. —北京:化学工业出版社, 2015. 12

ISBN 978-7-122-25527-3

I. ①先… II. ①李… III. ①焊接工艺②连接技术
IV. ①TG44②TN605

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 255534 号

责任编辑:张兴辉

文字编辑:陈 喆

责任校对:战河红

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:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 12½ 字数 307 千字 2016 年 2 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:58.00 元

版权所有 违者必究

前言

近年来，焊接技术渗透到社会经济和工业领域的各个方面，呈现出加速发展的趋势。焊接技术在能源、汽车、电子电器、船舶、航空航天、核工业等部门中得到了广泛的应用，市场需求潜力很大。

所谓先进焊接/连接工艺是相对于传统焊接工艺而言的。本书所涉及的先进焊接/连接工艺主要包括：高效电弧熔焊工艺、激光-电弧复合焊、搅拌摩擦焊、过渡液相扩散连接、先进堆焊（熔覆）技术、机器人焊接技术等。这些工艺具有先进性和实用性，符合优质、高效、低耗、无污染生产的发展方向，是值得推广的先进焊接技术。先进焊接/连接工艺与高新技术的发展密切相关，而且有独特的和难以替代的作用。本书的特点是注重阐明先进焊接/连接工艺的特点和应用，并给出了一些典型领域生产应用的实例，可以推动企业先进焊接工艺的应用和新产品开发。

本书主要供从事与焊接/连接生产和制造相关的工程技术人员、管理人员、质量检验人员和操作人员使用，也可供高等院校师生、科研单位、厂矿企业的相关人员参考。

参加本书撰写的其他人员还有：江苏科技大学胥国祥、胡庆贤、夏春智，山东建筑大学李嘉宁、刘鹏、沈孝芹，山东大学王娟、马群双、刘坤、魏守征，以及山东科技大学胡晓东等。

书中内容难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

编著者

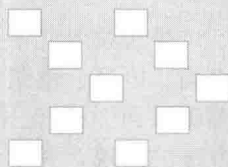
目录

第 1 章 概述	1	3.3.5 激光-电弧复合焊在汽车工业中的 应用	57
1.1 焊接过程的物理本质	1	3.3.6 在铁路机车制造业中的应用	59
1.2 何谓先进焊接/连接工艺	2	3.3.7 在管道（线）中的应用	59
1.3 先进焊接工艺的发展	4	3.3.8 在其他行业中的应用	61
第 2 章 高效电弧熔焊工艺	6	3.3.9 铝/钢异种金属的激光-MIG 复合 焊接	61
2.1 高效气体保护焊	6	第 4 章 搅拌摩擦焊	63
2.1.1 何谓高效焊接技术	6	4.1 搅拌摩擦焊的原理及特点	63
2.1.2 高速气体保护焊特点	7	4.1.1 一种全新的焊接工艺	63
2.1.3 高速焊对焊接设备的要求	9	4.1.2 无弧光、无烟尘、无飞溅的绿色 制造技术	64
2.1.4 高速 CO ₂ 气体保护焊应用示例	9	4.1.3 搅拌摩擦焊的产热和温度分布	65
2.1.5 高熔敷率 MAG 焊接技术	10	4.1.4 轻金属搅拌摩擦焊的特点	67
2.2 窄间隙焊接技术	15	4.2 搅拌摩擦焊设备及工艺	69
2.2.1 窄间隙焊接的原理及工艺特点	15	4.2.1 搅拌摩擦焊设备	69
2.2.2 窄间隙焊对焊接设备、焊接参数 的要求	16	4.2.2 搅拌摩擦焊的工艺参数	70
2.2.3 窄间隙钨极气体保护焊	17	4.2.3 搅拌摩擦焊的接头形式和装配 精度	72
2.2.4 窄间隙熔化极气体保护焊	18	4.2.4 搅拌摩擦焊接头的组织与性能	75
2.2.5 窄间隙气体保护焊的应用	21	4.2.5 搅拌摩擦焊缺陷与摩擦塞焊	78
2.2.6 窄间隙埋弧焊	22	4.3 搅拌摩擦焊的应用示例	80
2.3 多丝或双电极焊接技术	23	4.3.1 船舶铝合金构件的搅拌摩擦焊	80
2.3.1 多丝高效 MIG/MAG 焊	23	4.3.2 AZ31B/AZ61A 异种镁合金的搅拌 摩擦焊	81
2.3.2 双电极钨极氩弧焊	26	4.3.3 大厚度机翼框架铝合金搅拌 摩擦焊	83
2.3.3 双丝（或三丝）埋弧焊	26	4.3.4 搅拌摩擦焊在核工业中的应用	87
2.3.4 热丝焊接技术	29	4.3.5 FSW 在地铁、高速列车铝合金 车体上的应用	88
2.3.5 载重车轮的双枪自动 MAG 焊 示例	31	4.3.6 铝合金薄板搭接接头搅拌摩 擦焊	91
第 3 章 激光-电弧复合焊	34	第 5 章 过渡液相扩散连接	93
3.1 激光-电弧复合焊原理及特点	34	5.1 过渡液相扩散连接的特点	93
3.1.1 激光-电弧复合焊原理	34	5.1.1 何谓过渡液相扩散连接	93
3.1.2 激光-电弧的复合热源及方式	35	5.1.2 如何获得过渡（瞬间）液相	93
3.1.3 激光-电弧复合焊的特点	39	5.1.3 过渡中间合金的选择	94
3.2 激光-电弧复合焊设备及工艺	41	5.2 TLP 扩散连接设备与工艺	95
3.2.1 激光-电弧复合焊设备	41	5.2.1 TLP 扩散连接设备	95
3.2.2 激光-电弧复合焊工艺模式	42	5.2.2 TLP 扩散连接工艺参数	96
3.2.3 激光-电弧复合焊参数对焊缝成形 的影响	43	5.2.3 同种材料 TLP 扩散连接特点	98
3.3 激光-电弧复合焊技术的应用	52	5.2.4 异种材料 TLP 扩散连接特点	101
3.3.1 大厚度板复合热源深熔焊接	52	5.3 TLP 扩散连接的应用示例	104
3.3.2 有色金属激光-电弧复合热源 焊接	53		
3.3.3 激光-电弧复合热源高速焊	55		
3.3.4 激光-电弧复合焊在船舶制造中的 应用	55		

5.3.1 陶瓷与金属的 TLP 扩散连接	104	第 7 章 全位置机器人焊接	158
5.3.2 金属间化合物的 TLP 扩散 连接	109	7.1 机器人焊接技术进展	158
5.3.3 Al_2O_3 /6061 铝基复合材料的 TLP 扩散连接	111	7.1.1 机器人焊接发展概况	158
5.3.4 钛合金与镁合金的 TLP 扩散 连接	115	7.1.2 焊接机器人分类	160
5.3.5 航空发动机叶片的 TLP 扩散 连接	117	7.1.3 焊接机器人系统组成	162
5.3.6 石油钻杆的 TLP 扩散连接	118	7.1.4 焊接机器人控制技术	166
5.3.7 TP304 钢管的 TLP 扩散连接	120	7.1.5 焊接机器人的选择	167
第 6 章 先进堆焊和熔覆技术	122	7.2 机器人自动化焊接专用工装	168
6.1 埋弧带极堆焊	122	7.2.1 专用型自动弧焊设备	168
6.1.1 埋弧带极堆焊技术特点	122	7.2.2 点焊机器人自动化焊接工装	169
6.1.2 埋弧带极堆焊工艺	123	7.2.3 弧焊机器人自动化焊接工装	174
6.1.3 带极堆焊应用示例	126	7.2.4 柔性轨道全位置机器人自动化 焊接工装	176
6.2 激光熔覆	130	7.2.5 无导轨机器人自动化焊接 工装	177
6.2.1 激光熔覆技术特点	130	7.3 机器人自动化焊接示例	180
6.2.2 激光熔覆工艺	133	7.3.1 柴油机机架的双机器人焊接	180
6.2.3 激光熔覆应用示例	142	7.3.2 厚壁管道的机器人全自动 打底焊	184
6.3 等离子弧堆焊	147	7.3.3 海底管道铺设的机器人焊接	186
6.3.1 等离子弧堆焊特点	147	7.3.4 液压支架的机器人焊接	188
6.3.2 等离子弧堆焊工艺	148	7.3.5 汽车白车身镀锌板的机器人激光 焊接	190
6.3.3 等离子弧堆焊示例	152	参考文献	193

第1章

概述



1.1 焊接过程的物理本质

科学技术的发展使新的焊接方法不断产生。传统意义上焊接的概念,是指采用物理或化学的方法,使分离的材料产生原子或分子间的结合,形成具有一定性能要求的整体。换句话说,焊接是指通过适当的手段(加热、加压或两者并用),使两个分离的物体(同种材料或异种材料)产生原子间结合而形成永久性连接的加工方法。焊接这个概念至少包含三个方面的含义:一是焊接的途径,即加热、加压或两者并用;二是焊接的本质,即微观上达到原子间的结合;三是焊接的结果,即宏观上形成永久性的连接。

研究表明,固体材料之所以能够保持固定的形状,是由于其内部原子之间的距离足够小,使原子之间能形成牢固的结合力。要想将固体材料分成两块,必须施加足够大的外力破坏这些原子间的结合才能达到。同样的道理,要想将两块固体材料连接在一起,从物理本质上讲,就是要采取措施,使这两块固体的连接表面上的原子接近到足够小的距离,使其产生足够的结合力,从而达到永久性连接的目的。

对于实际焊接件,不采取一定的措施,而使连接表面上的原子接近到足够小的距离是非常困难的。这是因为连接表面的粗糙度较大,即使经过精密磨削加工,其表面粗糙度从微观上看仍是凹凸不平的;而且连接表面常带有氧化膜、油污等,阻碍连接表面紧密地接触。因此,为了实现材料之间可靠的焊接,必须采取如下的几点有效措施。

① 用热源加热被焊母材的连接处,使之发生熔化,利用熔融金属之间的相溶及液-固两相原子的紧密接触来实现原子间的结合。

② 对被焊母材的连接表面施加压力,在清除连接面上的氧化物和污物的同时,克服连接界面的不平度,或产生局部塑性变形,使两个连接表面的原子相互紧密接触,并产生足够的结合力。如果在加力的同时加热,结合过程将更容易进行。

③ 对填充材料加热使之熔化,利用液态填充材料对固态母材润湿,使液-固界面的原子紧密接触,相互扩散,产生足够大的结合力从而实现连接。

关于焊接方法的分类,传统意义上通常分为熔化焊(Fusion Welding)、压力焊(Pressure Welding)和钎焊(Brazing and Soldering)三大类(以上三项措施正是熔化焊、压力焊和钎焊方法能够实现永久性连接的基本原理);然后,可再根据不同的加热方式、焊接工艺特点将每一大类方法细分为若干小类。但随着连接技术的飞速发展,新的连接技术不断涌现,原先的分类法变得越来越模糊。

1.2 何谓先进焊接/连接工艺

焊接技术几乎运用了一切可以利用的热源（力、热、电、光、声及化学等），其中包括火焰、电弧、电阻热、超声波、摩擦、等离子弧、电子束、激光、微波等。从 19 世纪末出现碳弧到 20 世纪末出现微波焊的发展来看，历史上每一种热源的出现，都伴随着新的焊接方法的出现，并推动了科学技术的发展。焊接热源的研究与开发至今仍未终止，新的焊接方法和新工艺不断涌现。

依托于冶金学、物理学和能源科学的发展，焊接技术发展形成了数十种各具特点的焊接方法，如电弧焊、高能束焊、固相焊和钎焊等。不同的焊接热源作用于不同材质的结构，产生了不同的热力学、冶金学和力学相互交叉的焊接过程，形成了独具特色的焊接物理学、焊接冶金学、焊接结构力学和焊接自动控制等理论分支，并由此指导焊接工艺、焊接设备和焊接结构的发展。

特种焊接技术是指除了常规的焊接方法（如焊条电弧焊、埋弧焊、常规气体保护焊等）之外的一些先进的连接方法。这些先进焊接方法的出现和研发是多学科相互渗透的结果，先进焊接技术（如高能束焊、激光-电弧复合焊、真空扩散焊、机器人焊接等）在电子、能源、汽车、航空航天、核工业等部门中得到了应用。先进焊接技术对于一些特殊材料及结构的焊接/连接具有非常重要的作用，推动了社会和科学技术的进步。

先进材料的焊接与高新技术的发展密切相关，而且有独特的和难以替代的作用。经过 20 世纪的快速发展，焊接技术作为现代工业中的一个重要环节和其他相关制造技术领域一样，以趋于成熟的体系进入了 21 世纪，从手工制造向机械化、自动化、信息化、智能化制造方向发展，这标志着焊接科学与工程进入了一个崭新的发展时期。

先进焊接/连接工艺的范围很广泛，先进工艺是相对于传统工艺而言的。本书所涉及的先进焊接/连接工艺侧重点是在具体焊接工艺方面，主要包括：高效电弧熔焊工艺、激光-电弧复合焊、搅拌摩擦焊、过渡液相扩散连接、先进堆焊（熔覆）技术、机器人焊接技术等，具有先进性和实用性。

（1）激光-电弧复合焊

高能束加工技术被誉为 21 世纪最有希望的加工技术，被认为“将为材料加工和制造技术带来革命性变化”，是当前发展最快、研究最多的技术领域。高能束焊接正在引起越来越多国内外相关人士（如物理、材料、计算机等）的关注。

焊接设备向大型化发展有两层含义：一是设备的功率增大；二是采用该设备焊接的零件大型化。由于先进焊接设备一次性投资大，特别是激光焊和电子束焊设备，而增大功率并提高熔深和焊接过程的稳定性可以相对降低焊接成本，因此才能为工业界所接受，以激光为核心的复合焊接技术也因此才受到人们的关注。事实上，激光-电弧复合在 20 世纪 70 年代就已提出，然而稳定的加工应用直至近几年才出现，这主要得益于激光技术以及电弧焊设备的发展，尤其是激光功率和电弧控制技术的提高。

激光-电弧复合主要是激光与钨极氩弧、等离子弧以及活性电弧的复合。通过激光与电弧的相互影响，可克服每一种焊接方法自身的不足，进而产生良好的复合效应。激光-电弧复合对焊接效率的提高十分显著，这主要基于两种效应：一是较高的能量密度导致了较高的焊接速度，工件热流损失减小；二是两种热源相互作用的叠加效应。焊接钢时，激光等离子体使电弧更稳定；同时电弧也进入熔池小孔，减小了能量的损失。

激光-钨极氩弧的复合可显著增加焊接速度，约为钨极氩弧焊（TIG）时的 2 倍。钨极烧损也大大减小，钨极寿命增加；坡口夹角也可显著减小，焊缝截面积与激光焊时相近。与激光单弧复合焊相比，激光双弧复合焊接的焊接热量输入可减小 25%，而焊接速度可增加约 30%。

激光-电弧（或等离子弧）复合焊接的优点主要是提高了焊接速度和熔深。由于电弧加热，金属温度升高，降低了金属对激光的反射率，增加了对光能的吸收。这种方法在小功率 CO₂ 激光焊的试验基础上，还在 12kW 的 CO₂ 激光焊以及光纤传输的 2kW 的 YAG 激光器上进行试验，并为机器人进行激光-电弧（或等离子弧）复合焊接打下了基础。

近年来，通过激光-电弧复合而诞生的复合焊接技术获得了长足的发展，在航空、军工等部门复杂构件上的应用日益受到重视。目前，高能束流与不同电弧的复合焊接技术已成为高能束焊接领域发展的热点之一。

(2) 搅拌摩擦焊

搅拌摩擦焊（Friction Stir Welding）是 20 世纪 90 年代初由英国焊接研究所开发出的一种专利焊接技术，它可以焊接采用熔化焊方法较难焊接的有色金属。搅拌摩擦焊具有连接工艺简单、焊接接头晶粒细小、疲劳性能、拉伸性能和弯曲性能良好、无需焊丝、无需使用保护气体、无弧光以及焊后残余应力和变形小等优点。

搅拌摩擦焊已在欧、美等发达国家的航空航天工业中获得应用，并已成功应用于在低温下工作的铝合金薄壁压力容器的焊接，完成了纵向焊缝的直线对接和环形焊缝沿圆周的对接。该技术已被应用于新型运载工具的新结构设计，在航空航天、交通和汽车制造等产业部门也已得到应用。搅拌摩擦焊的主要应用示例见表 1.1。

表 1.1 搅拌摩擦焊的主要应用示例

领 域	应用示例
船舶和海洋工业	快艇、游船的甲板、侧板、防水隔板、船体外壳、主体结构件、直升机平台、离岸水上观测站、船用冷冻器、帆船桅杆和结构件
航空、航天	运载火箭燃料贮箱、发动机承力框架、铝合金容器、航天飞机外贮箱、载人返回舱、飞机蒙皮、桁架、加强件之间连接、框架连接、飞机壁板和地板连接、飞机门预成形结构件、起落架仓盖、外挂燃料箱
铁道车辆	高速列车、轨道货车、地铁车厢、轻轨电车
汽车工业	汽车发动机引擎、汽车底盘支架、汽车轮毂、车门预成形件、车体框架、升降平台、燃料箱、逃生工具等
其他工业部门	发动机壳体、冰箱冷却板、天然气和液化气贮箱、轻合金容器、家庭装饰、镁合金制品等

我国的搅拌摩擦焊工艺开发时间不长，但发展很快：在焊接铝及铝合金方面受到重视；在航空航天、交通运输工具的生产中有很好的前景；在异种材料的焊接中也初露头角。搅拌摩擦焊工艺将使铝合金等有色金属的连接技术发生重大变革。

(3) 真空扩散焊

先进材料的不断出现对连接技术提出了新的挑战，许多新材料（如耐热合金、高技术陶瓷、金属间化合物、复合材料等）的连接，特别是异种材料之间的连接，采用常规熔焊方法难以完成，固相扩散连接等新工艺应运而生。例如，超塑性成形扩散焊技术在飞机的钛合金蜂窝结构中得到成功的应用；陶瓷与金属能够采用扩散焊进行连接；过渡液相扩散焊技术的应用，解决了许多过去用熔焊方法无法解决的硬性材料连接的难题。

固相连接可分为两大类。一类是温度低、压力大、时间短的连接方法，通过局部塑性变形促使工件表面紧密接触和氧化膜破裂，塑性变形是形成连接接头的主导因素。属于这类的连接方法有摩擦焊、爆炸焊、冷压焊和热压焊等，通常把这类连接方法称为压焊。另一类是温度高、压力小、时间相对较长的扩散连接方法，一般是在保护气氛或真空中进行。这种连接方法仅产生微量的塑性变形，界面扩散是形成接头的主导因素。属于这一类的连接方法主

要是扩散连接,如真空扩散焊、过渡液相扩散焊、热等静压扩散焊、超塑性成形扩散焊等。

除了先进焊接方法和新工艺的不断出现外(以上列举只是其中的几个特例),各种焊接方法的机械化、自动化水平也在不断提高。电子技术、传感技术、计算机和控制技术的进步极大地推动了焊接学科的发展,焊接自动化正在向智能化控制的方向发展。特别是焊接机器人的大量引入,突破了传统焊接的刚性自动化方式,开拓了焊接柔性自动化这一新方式,使焊接技术有了更为广阔的发展空间。

焊接已成为现代制造业不可缺少的加工方法。而且,随着科学技术进步和社会经济的发展,先进焊接/连接的应用领域还将不断地被拓宽。

(4) 自动化和智能化焊接

机械化、自动化是提高焊接生产率、保证产品质量、改善劳动条件的重要手段。焊接生产自动化是未来焊接技术发展的方向。提高焊接生产的效率和质量,仅仅从焊接工艺着手有一定的局限性。电子束焊、激光焊、搅拌摩擦焊等焊接/连接方法对坡口几何尺寸和装配质量的要求严格,在自动施焊之后,整个焊接结构工整、精确、美观,改变了过去焊接车间人工操作的落后现象。

机器人作为现代制造技术发展的重要标志之一和新兴技术产业,对高技术产业各领域产生了重要影响。焊接制造工艺复杂,对焊接质量的要求严格,而焊接技术水平和劳动条件往往较差,因而能使焊接过程实现自动化、智能化的焊接工艺受到了特殊重视。目前,全世界机器人中有30%~40%用在焊接技术上。焊接机器人最初多应用于汽车工业中的点焊生产流水线上,近年来已经逐渐扩展到其他生产领域。智能化焊接的第一个发展重点是视觉系统,目前已开发出的视觉系统可使机器人根据焊接过程中的具体情况自动修改焊枪运动轨迹,有的还能根据坡口尺寸适时地调节工艺参数。

1.3 先进焊接工艺的发展

随着航空航天、新能源、新材料及电子信息等工业的发展,人们对材料的性能提出了越来越高的要求。开发在特殊条件下使用的先进材料是科学技术发展的趋势之一。许多高性能新型结构材料主要是为开发能源、海洋,发展空间技术、现代交通以及冶金、电力、石化等工业需求而研制的,这些材料具有高强度、高韧性、耐高温、抗腐蚀等优点,与先进焊接工艺的应用密不可分。

(1) 提高生产率是推动焊接技术发展的驱动力

随着科学技术的发展,焊接技术不断进步。提高焊接生产率的途径,一是提高焊接速度,二是提高焊接熔敷效率,三是减少坡口截面及熔敷金属量。为了提高焊接生产率,焊接工作者从提高焊接熔敷效率和减少填充金属两方面做了许多努力:如熔化极气体保护焊中采用电流成形控制或多丝焊,能使焊接速度从0.5m/min提高到3~6m/min;窄间隙焊接利用单丝、双丝或三丝进行焊接,所需熔敷金属量成数倍地降低;电子束焊、激光-电弧复合焊能够一次焊透很深的厚度,对接接头可以不开坡口,有更为广阔的应用前景。

(2) 提高焊接机械化、自动化、智能化水平

由于工艺参数控制严格,先进焊接技术对机械化、自动化的要求更为迫切。焊接自动化的主要标志是焊接控制系统的智能化、焊接生产系统的柔性化和集成化。全部焊接工序(钢板划线、切割、装配、焊接)自动化的优势不仅在于提高了生产率,更重要的是提高了产品的质量——钢板划线、切割、开坡口全部采用计算机数字控制技术以后,零部件尺寸精度大大提高。电子及计算机技术的发展,尤其是计算机控制技术的发展,为特种焊接技术自动化打下了良好基础。

机器人虽然是一个高度自动化的装备,但从自动控制的角度来看,它仍是一个程序控制

的开环控制系统,不能根据焊接时的具体情况进行适时调节。为此智能化焊接成为当前焊接发展的重要方向之一。国内已有大量的焊接机器人应用于各类自动化生产线上,但我国的焊接机器人发展与生产总体需求仍相差甚远。目前的智能化焊接机器人仍处在初级阶段,这方面的研发将是一个长期的任务。

(3) 新热源的研发是推动先进焊接技术发展的动力

焊接新热源的开发将推动特种焊接技术的发展,促进新的焊接方法的产生。焊接工艺已成功地利用电弧、等离子弧、电子束、激光、超声波、摩擦、微波等热源形成相应的焊接方法。今后的发展将从改善现有热源和开发新的、更有效的热源两方面着手。

在改善现有热源、提高焊接效率方面,如扩大激光器的能量、有效利用电子束能量、改善焊接设备性能、提高能量利用率等都取得了进展。在开发焊接新能源方面,为了获得更高的能量密度,可采用叠加和复合热源,如在等离子弧中加激光、在电弧中加激光等。有些预热焊也是出于这种考虑。进行太阳能焊接试验也是为了寻求新的焊接热源。

(4) 新兴工业的发展不断推动焊接技术前进

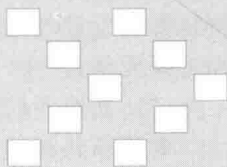
焊接技术是一项与新兴学科发展密切相关的先进制造技术,计算机技术、信息技术、电子技术、人工智能技术、数控及机器人技术的发展为焊接自动化与智能化提供了十分有利的技术基础。目前,焊接技术已取得许多研究与应用成果并已渗透到众多的应用领域中。高新技术、新材料的不断发展与应用以及各种特殊环境对产品性能要求的不断提高,对特种焊接技术及设备提出了更高的要求。最近20年来,在新兴产业和基础学科的带动下,半自动焊、专机设备以及自动化焊接得到了迅速发展。

逆变焊机的出现也是推动焊接技术前进的一个成功例子。逆变焊机体积小、重量轻,具有较高的技术特性,节能、节材显著,受到了国内外焊接界的重视,发展很快。目前世界上的主要焊接设备生产厂商基本上完成了全系列逆变焊机的商品化,使之成为了先进焊接技术的标志之一。

从20世纪80年代初的晶闸管逆变焊机开始,场效应晶体管逆变焊机、大功率晶体管逆变焊机、IGBT逆变焊机等不断推入市场,使焊接设备制造呈现出一个崭新的景象。但是逆变焊机输入电流会产生畸变,存在较大的谐波,一些元器件的稳定性有待提高,焊机的功率因数并不很高。为此人们正在研究谐波控制技术,以便取得更好的效果。

第2章

高效电弧熔焊工艺



在装备制造业发达的工业化国家中,约有 50% 的总产值来自与焊接相关的企业。各生产厂家为增强市场竞争能力,越来越强烈地要求提高生产效率、降低产品成本。为了提高焊接效率,可以采用超常焊接参数、复合焊、多丝或多电弧焊接、改进焊丝等多种途径实现。

2.1 高效气体保护焊

2.1.1 何谓高效焊接技术

所谓“高效焊接技术”,实质上是指高速焊、高熔敷率焊接和高焊接效率的焊接技术等

(1) 提高焊接效率的途径

提高焊接生产效率包括两个方面:一是以提高焊接材料的熔化速度为目的的高熔敷率焊接,即要求在单位时间内熔化更多的焊接材料,主要是用于厚板焊接,熔敷速率可达 30kg/h;二是以提高焊接速度为目的的高速焊接,基本出发点是在提高焊接速度的同时提高焊接电流,以维持焊接热输入大体上保持不变,主要用于薄板的焊接,焊接速度约为普通 CO₂ 气体保护焊的 3~8 倍。

从目前的研发和生产应用情况看,提高焊接生产效率有以下几种途径。

- ① 利用保护气体的不同匹配使最高焊丝熔化速度大幅度提高,从而提高焊接熔敷率。
- ② 采用复合热源提高焊接效率,如激光-电弧复合焊、激光-等离子弧复合焊等。
- ③ 采用多丝送进或热丝送进提高焊接生产效率,如双丝(或多丝)气体保护焊、多丝埋弧焊、热丝气体保护焊等。
- ④ 利用活性元素独特的化学性质提高电弧熔深能力,减小焊缝截面尺寸,提高焊接效率,如 A-TIG 焊接、A-Laser 工艺等。
- ⑤ 减小坡口尺寸,以减小焊缝截面积,减少熔敷金属量,如窄间隙焊接等。
- ⑥ 采用焊接电源的特殊输出波形提高焊接速度。

目前,国际上对高效活性气体保护焊(MAG)的定义为:对于直径 1.2mm 的焊丝,送丝速度超过 15m/min,或熔敷率大于 8kg/h 的 MAG 焊接称为高效 MAG 焊。某些高效 MAG 焊的熔敷效率可达 20kg/h。

(2) 高效 MAG 焊接材料

目前已有的提高 MAG 焊接熔敷效率的手段中,应用最为广泛的是采用药芯焊丝代替实芯焊丝进行焊接,采用加铁粉的金属粉芯焊丝的熔敷效率可比实芯焊丝提高 50% 以上。此外,调整保护气体的成分可以大幅度地提高焊丝的熔敷效率。

① 实芯焊丝适用的直径为 $1.0\sim 1.2\text{mm}$ ，过细的焊丝因挺度不够难以适应高速送丝；而直径大于 1.2mm 的焊丝，即使在大电流下也不易产生稳定地旋转电弧过渡。

② 药芯焊丝可以采用直径为 $1.2\sim 1.6\text{mm}$ 的焊丝。金属粉芯和造渣型药芯焊丝均可以大焊接参数实现高效 MAG 焊接。尤其是金属粉芯焊丝，由于金属粉的填充率高达 45% ，所以采用直径 1.6mm 的金属粉芯焊丝，以焊接电流 380A 和焊接电压 38V 的焊接参数进行焊接时，其焊丝熔化率高达 9.6kg/h 。

金属粉芯焊丝的熔滴过渡与实芯焊丝相似；药芯焊丝可以常规喷射过渡和高速短路过渡形式焊接，但不可能产生旋转电弧过渡。金红石药芯焊丝的最高送丝速度可达 30m/min ，碱性药芯焊丝送丝速度的上限约为 45m/min ，焊丝熔化率可达 20kg/h 。

(3) 高效 MAG 焊熔滴过渡类型

在常规 MAG 焊中，随着焊接电流的提高，熔滴过渡形式从短路过渡、滴状过渡向喷射过渡转变，在保证焊缝成形良好的前提下，熔滴喷射过渡的极限电流约为 400A 。

在高熔敷率 MAG 焊中，通过综合利用多元保护气体的物理特性和适度加大焊丝伸出长度，在超常规 MAG 焊的大电流、高电压范围可极大地提高焊丝的熔化速度，同时熔滴的过渡形态也发生本质的变化，其基本形式为：普通喷射过渡、高速短路过渡、旋转喷射过渡和高速喷射过渡。

① 普通喷射过渡电弧 在高速焊接领域，喷射过渡电弧的送丝速度在 $15\sim 20\text{m/min}$ 的范围。

② 高速短路过渡电弧 高速短路过渡电弧是在送丝速度 $15\sim 20\text{m/min}$ 的范围内通过降低焊接电压，同时增加干伸长得到的。由于干伸长增加到 40mm ，因此焊丝端头出现软化并开始旋转，与焊丝轴线的偏移量为 $1\sim 2\text{mm}$ 。旋转的焊丝端头在焊缝的两边产生周期性的短路过渡。

③ 旋转喷射过渡电弧 焊丝端头被大电流软化并被电弧力偏转，就产生了旋转电弧。对直径 $1\sim 2\text{mm}$ 的焊丝，要求送丝速度达到 25m/min 或更高，等效的最小焊接电流约为 450A 。焊丝自由端与焊丝轴线的总偏离量达几毫米，在焊接过程中可用肉眼观察到。

④ 高速喷射过渡电弧 以熔滴轴向过渡为特征，送丝速度超过 20m/min ，熔滴尺寸与焊丝直径大致相等。与熔滴在电弧中一滴一滴地过渡相比，这个工艺效果最好。熔滴分离过程以相同的方式重复，狭小、集中、耀眼的等离子束是高速喷射过渡电弧的特征。当软化了的焊丝端头下降后，电弧长度减小而等离子弧柱变宽，随后在熔化的熔滴与焊丝端头之间形成液体小桥。液体小桥在电磁收缩力的作用下不断被压缩，使电弧变得较宽。当焊丝端头与熔滴之间的小桥小到一定程度时，在小桥的周围形成了等离子体。在小桥断开的瞬间，高速喷射过渡电弧重新引燃，重新形成狭小、集中的等离子射束。对于高速喷射过渡电弧来说，由于很深但很窄的熔透形状，焊缝根部不能完全被熔化金属填满。

2.1.2 高速气体保护焊特点

在现代工业生产中的某些生产线上需要采用高速 CO_2 气体保护焊工艺，以满足生产效率的要求。一般常用的普通 CO_2 气体保护焊的焊接速度为 15cm/min ，如果再提高速度，就可能发生咬边缺陷，会造成电弧不稳定、得不到成形良好的焊缝。而高速 CO_2 气体保护焊是通过制定合理的焊接工艺措施，选用能满足高速焊接速度要求的设备来实现的，其焊接速度可大大超过 15cm/min 。

(1) 焊接工艺参数

高速 CO_2 气体保护焊的焊接电流和焊接电压的匹配对于焊接速度有很大的影响。高速 CO_2 气体保护焊的接头形式和施焊位置示意如图 2.1 所示，焊枪角度对焊接电流与焊接电压

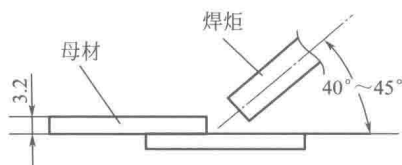
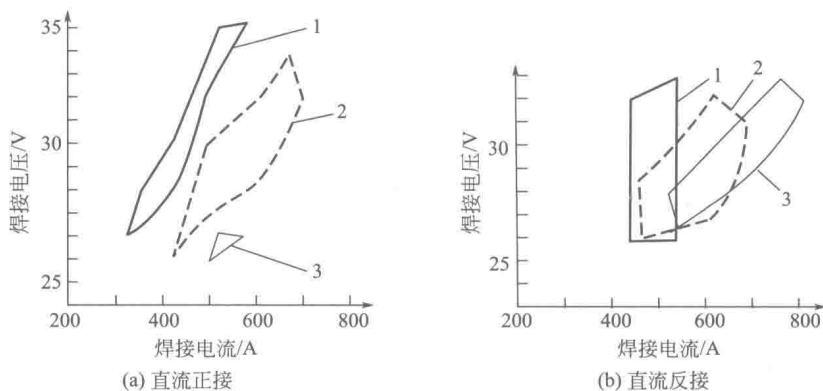


图 2.1 接头形式和施焊位置示意

的匹配也有很大的影响。

直径 1.6mm 焊丝的高速 CO_2 气体保护焊的焊接电流和焊接电压的关系示意如图 2.2 所示。这个结果是在焊接速度分别为 20cm/min、30cm/min、40cm/min 下，采用图 2.1 所示的接头形式及施焊位置进行测量的结果。

图 2.2 高速 CO_2 焊接电流和焊接电压关系示意

1—焊接速度 20cm/min；2—焊接速度 30cm/min；3—焊接速度 40cm/min

从图 2.2 可以看出焊接速度越快，适合的焊接工艺参数越接近大焊接电流、低焊接电压的范围。而采用适合的工艺参数范围之外的任何电流、电压匹配，都可能产生未熔合、断续焊瘤、咬边、大飞溅及烧穿等缺陷。

在合适的焊接电流范围内进行高速焊接，当焊接电压低于某一定极限时，会产生大飞溅和断续的烧穿现象，尤其在直流反接条件下还可能产生断续焊瘤。这主要是因为电弧能量在直流反接时比直流正接时更集中，熔化的宽度较窄及焊丝送进产生的热量造成的。同时，母材的化学成分和接头形式的不同，对熔化金属的流动性也有一定的影响，因此高速 CO_2 气体保护焊应根据被焊材料和坡口形式进行焊接工艺参数的选择。

(2) 对焊缝成形的影响因素

选择合适的焊接参数及工艺措施，高速 CO_2 气体保护焊可以获得成形良好的焊缝。

① 断续焊瘤的防止 在一定的电流和焊接速度下，如果电压过高则容易产生断续焊瘤。为了避免产生断续焊瘤，可以将焊接电压适当地降低，即降低焊接热输入。此时母材局部热量减小、热传导加快，熔化金属获得一定的冷凝，并受到焊缝两侧金属的阻止，因而不会向后迅速流动形成金属聚集，从而消除焊瘤。

断续焊瘤易在进行角焊时产生，而在进行船形位置焊接时，由于坡口较窄不易产生断续焊瘤。

② 电源极性的影响 高速 CO_2 气体保护焊采用直流正接时，由于使用了大电流，只会产生微量而细小的飞溅，并且几乎不会粘结在母材金属上，电弧比较稳定。当采用合适的焊接坡口时，焊接过程更加稳定、焊缝成形美观并可得到良好的熔深。采用直流反接时，在相同的焊接电流下，焊接速度较低，会使母材的热输入增大，极易产生断续烧穿缺陷。此外，采用相同的焊接电流时，直流正接时焊丝的熔化率可以提高 40% 左右，因此，在进行高速 CO_2 气体保护焊时，应采用直流正接。

③ 电感及焊炬倾角 由于在 CO_2 焊接回路中串联电感对焊接效果和飞溅不会产生明显的影响，所以在高速 CO_2 气体保护焊中一般不加电感。焊炬的操作倾角、方向和高度对高

速 CO₂ 气体保护焊有一定的影响，当焊炬与焊缝的垂直方向前倾 7° 时，有利于提高高速 CO₂ 气体保护焊的焊接稳定性。

2.1.3 高速焊对焊接设备的要求

随着焊接速度的提高，焊接工艺对焊接设备的要求也相应地提高。因为随着焊接速度的提高，稳定的焊接工艺参数范围将变窄。当焊接速度大于 20cm/min 时，如果焊接电流不变，易造成电弧不稳、焊缝成形较差等。为了解决焊接速度提高带来的一系列问题，高速 CO₂ 气体保护焊的焊接电源必须具备以下特点。

- ① 焊接工艺参数可以做精确调节，以使焊接工艺参数能准确地调整到最佳值。
- ② 具有足够大的送丝速度，以便于获得大电流进行焊接；同时送丝速度应保持恒定，不受外界条件变化的影响。
- ③ 焊接电压应稳定，尤其具有抵抗网路电压变化的能力，即焊接电源应具有网路电压补偿装置。

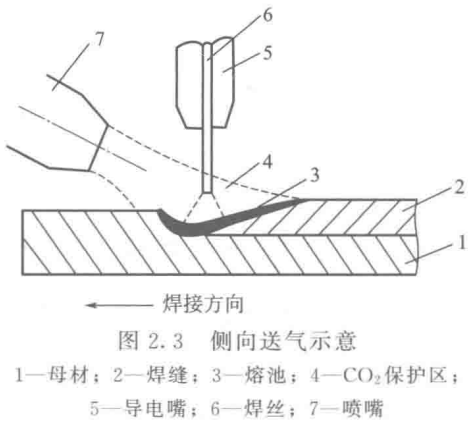
高速 CO₂ 气体保护焊中侧向送气示意如图 2.3 所示。

进行高速 CO₂ 气体保护焊时，由于焊接电流较大以及焊接速度快，易使焊接熔池拉长，此时为了避免产生焊接缺陷，必须加强 CO₂ 气体对熔池的保护效果。通常采用以下两种方法。

- ① 采用椭圆形的特制喷嘴，并且使焊丝位置偏心，沿着焊丝方向有一定的后拖。
- ② 采用侧向送进保护气体工艺，可以防止飞溅物堵塞喷嘴。

当焊接结束时，由于形成的熔池较长，为了填满弧坑，应使焊机具有衰减装置（主要是针对焊接电流、焊接电压和焊接速度等）。

比较成功的高速焊设备的生产厂商有德国的 CLOOS 公司、奥地利的 FRONUIS 公司和美国的 LINCOLN 公司等。采用动特性优异的焊接装备和合理的焊接参数可以实现高速焊和高熔敷率的高效焊接。



2.1.4 高速 CO₂ 气体保护焊应用示例

(1) 热轧硅钢片的焊接

电力工业发展对大容量变压器和电机用热轧硅钢片及其焊接提出了较高要求。现代化的冷轧薄板生产工艺中要求冷轧机和酸洗机之间能连续输送以提高生产率，因此就必须解决将小卷硅钢板拼焊成大卷，以供轧机轧制及酸洗工艺。板厚为 2~2.8mm 的热轧硅钢板（片）的高速 CO₂ 焊的工艺参数见表 2.1。采用 CO₂ + O₂ 混合气体保护焊焊接硅钢板的工艺参数见表 2.2。

表 2.1 热轧硅钢板 CO₂ 焊的工艺参数

焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /cm · min ⁻¹	焊丝伸出长度 /mm	CO ₂ 气体流量 /L · min ⁻¹	供货状态
275~325	27~29	25	8~10	16.7	退火处理
280~300	24~26	22	8~10	20	未退火处理

注：采用直径 1.2mm 的 H08Mn2SiA 焊丝。

表 2.2 采用 CO₂ + O₂ 混合气体保护焊焊接硅钢板的工艺参数

板厚 /mm	预留间隙 /mm	焊丝伸出长度 /mm	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /cm · min ⁻¹	气体流量 /L · min ⁻¹
2.0~2.5	0~0.2	8~10	270~280	26~28	23	20
2.5~2.6	0~0.2	8~10	280~290	26~28	23	20
2.7~2.8	0.1~0.3	8~10	290~300	26~28	21.6	20
2.8~3.0	0.1~0.3	8~10	310~320	26~28	21.6	20

注：采用直径 1.2mm 的 H08Mn2SiA 焊丝。

(2) 汽车钢圈的焊接

汽车生产中对车轮钢圈的焊接要求较高，而钢圈的焊接主要是轮辋和轮辐的焊接。汽车车轮钢圈的高速 CO₂ 气体保护焊的工艺参数见表 2.3。

表 2.3 汽车车轮钢圈的高速 CO₂ 气体保护焊的工艺参数

焊丝直径 /mm	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊丝伸出长度 /mm	焊接速度 /cm · min ⁻¹	CO ₂ 气体流量 /L · min ⁻¹
1.6	520~600	35~38	8~15	15	20~25
2.0	640~700	36~39	10~20	15	
1.6	520~600	32~35	8~15	20	
2.0	640~700	34~36	10~20	20	

注：采用直径 1.2mm 的 H08Mn2SiA 焊丝。

对汽车车轮钢圈进行高速 CO₂ 气体保护焊时采用程序控制，焊机具有工艺参数的衰减装置，可以可靠地保证焊缝结尾处的质量；同时，焊机还具有网路补偿装置，可以在一定程度上抵抗网路电压波动造成的影响。

2.1.5 高熔敷率 MAG 焊接技术

(1) TIME 焊接工艺及应用

① TIME 焊接工艺特点 TIME 焊接工艺 (Transfer Ionized Molten Energy Process) 在 20 世纪 80 年代首先应用于日本和加拿大。1990 年 6 月，在维也纳焊接商贸博览会上，TIME 焊接工艺被首次引入欧洲。TIME 工艺仍属于 MAG 焊的范畴，但其与普通 MAG 焊不同之处在于以下两点。

- a. 保护气体为 Ar(65%) + He(26.5%) + CO₂(8%) + O₂(0.5%)。
- b. 采用大干伸长，在高送丝速度下实现稳定焊接，突破了传统 MAG 焊的电流极限。

四元保护气体混合起到了相互补充的作用，He 具有高电离能、可提高电弧电压和电弧能量、电弧挺度好及熔深大等作用。Ar 的电离能较低，能保证电弧燃烧稳定，维弧容易。CO₂ 可分解成 CO 和自由氧，使电弧冷却，促使电弧电压增高并具有清洁作用。少量 O₂ 的存在有利于电弧的稳定，同时能够降低熔池的表面张力，改善润湿性。各种保护气体综合作用的结果是，能够增加电弧电压，提高射流过渡临界电流值，以便在大电流下得到稳定的熔滴过渡方式，同时还能保证焊缝成形良好。

采用上述四元混合气体保护，再辅以合适的干伸长（长度可达 35~40mm），能够显著提高焊丝熔化速度，而且 TIME 焊接一般采用直径 1.2mm 或 1.6mm 的细焊丝，在 500~700A 的大电流下进行焊接，使焊丝干伸长上的电阻热增大，送丝速度突破了 MAG 焊最高速度 16m/min 的限制，最高可达 50m/min，大大提高了熔敷效率（是传统 MAG 焊的 3 倍）。高熔敷率的 TIME 焊与传统 MAG 焊的比较见表 2.4。

表 2.4 高熔敷率的 TIME 焊与传统 MAG 焊的比较

焊接工艺	保护气体	焊丝直径 /mm	焊丝干伸长 /mm	送丝速度 /m·min ⁻¹	最大电流 /A	最高送丝速度 /m·min ⁻¹	最大熔敷率 /g·min ⁻¹
传统 MAG 焊	Ar、CO ₂ 、O ₂	1.2	10~15	2~16	400	16	144
TIME 焊	65%Ar、8%CO ₂ 、 26.5%He、0.5%O ₂	1.2	20~35	2~50	700	50	450

高熔敷率的 TIME 焊与传统 MAG 焊工艺相比具有如下明显的优点。

a. 大幅度提高了焊丝熔敷率。传统 MAG 焊采用直径 1.2mm 的焊丝，许用最大电流为 400A，最高送丝速度为 16m/min，熔敷速率最高为 144g/min；而采用同等直径焊丝的 TIME 焊许用电流可达 700A（比传统 MAG 焊高 75%），最高送丝速度为 50m/min（是传统 MAG 焊的 3.1 倍），熔敷速率最高为 450g/min（是传统 MAG 焊的 3 倍多）。

b. 改善熔敷金属和焊接接头的质量。由于熔滴在有良好的保护性的弧柱内进行短距离、挺直的射流过渡，所以熔敷金属不受空气侵害和其他污染。加拿大研究人员采用 TIME 焊接工艺对潜艇用钢 HY80 进行了全位置焊接性试验。结果表明，TIME 焊熔敷金属中磷的含量为传统 MAG 焊的 60%~70%，硫的含量为传统 MAG 焊的 65%~80%，焊缝的低温韧性得到明显改善。例如，对厚度为 16mm 的 HY80 钢平焊接头在 -29℃ 下进行冲击试验，接头的动态冲击吸收功可达 130J。

c. 焊接工艺性能好。由于 TIME 焊过程中熔滴能进行短距离、挺直性好的射流过渡，可不受重力的影响进行全位置焊接。

d. 焊缝平滑美观，余高小，飞溅小。当采用逆变式 TIME 电源焊接时，熔滴直径约为 0.05~0.4mm 范围。由于电弧挺直度好，熔滴呈稳定的轴向射流过渡，焊接飞溅量可降至 0.3g/min，同时熔滴很细小，热量小，因而不会粘在焊件表面上，节省了焊后清理飞溅物的时间。由于焊接飞溅量大大减少，过渡到焊缝中的熔敷金属量大大增加，节省了焊丝用量，降低了焊丝成本。采用四元保护气体降低了液态熔池的表面张力，使焊缝成形良好，减小了焊缝余高。

TIME 焊接工艺（65%Ar+26.5%He+8%CO₂+0.5%O₂）有三种熔滴过渡方式，即短路过渡（送丝速度小于 6m/min）、喷射过渡（送丝速度为 9~25m/min）和旋转喷射过渡（送丝速度大于 25m/min），可用于焊接各种板厚的工件。

对高熔敷率 MAG 焊熔滴过渡的研究结果表明，在每两种电弧类型之间存在过渡区（见图 2.4），该区域电弧不稳定。例如，作为过渡区电弧（处于短路过渡和喷射过渡之间，送丝速度 6~8m/min），因熔滴过渡不稳定将产生大量飞溅，在实际应用中应避开该区域。送丝速度 20~30m/min 的高速焊区间也存在类似的情况，喷射过渡、旋转喷射过渡及高速喷射电弧之间都有可能出现过渡区，过渡区的熔滴过渡形态将不断转换从而造成焊缝截面形状不一致。试验结果表明，送丝速度为 20~30m/min 的范围内避免电弧不稳定只可能通过改变保护气体成分来实现。

随着对 TIME 焊接工艺研究的深入，新成分的保护气体不断推出，特别是二元或三元保护气体也能获得优质的焊缝，使高熔敷率的 TIME 焊工艺得到了推广应用。

② TIME 焊接设备 TIME 焊接工艺需配以专用高性能焊接电源，其外特性应为恒压型，并具有电压反馈校正功能，以保证电弧电压的变动量不大于 0.2V。此外，因 TIME 焊保护气体中含有 He，弧压高达 48V，故焊接电源的输出电压较高，最好采用逆变式电源，并按 100% 负载持续率来进行设计。送丝装置的电动机功率需要适当增大，一般取 250W，该装置除应能在 0.5~50m/min 的范围内进行调节外，还应具备输送速度偏差的反馈校正功能。