

八十年代焊接技术 国际会议概况介绍

一九八一年五月

八十年代焊接研究国际会议论文介绍

中国长城工业公司焊接代表小组于1980年10月24日至11月8日,赴日出席了为纪念日本大阪大学焊接研究所成立十周年而召开的80年代焊接研究国际会议,参观了展览会,会后在大阪和东京地区访问了九个研究所和企业单位。会议共有20个国家236名代表参加,分A、B两组进行。A组为高密度束流的特性、控制及其在金属加工中的应用。B组为一般焊接方法的新发展及其应用工艺。会议发表了八十篇论文,就论文的主要内容有重点的作一些介绍。

一、高密度束流的特性与控制以及在金属加工中的应用

(一) 电子束焊接

电子束焊接部分的论文包括以下内容:移动真空室、局部真空及非真空电子束焊接及应用;真空电子束焊接的微处理机控制、焊接参数的自动控制及自动对中;电子束焊接缺陷及消除措施;厚件焊接及电子束焊在重型机器制造中的应用。

1. 移动真空室、局部真空和非真空电子束焊接及应用。

西德Steigerwald Strahltechnik GmbH公司发表一篇文章,谈到采用移动真空室焊接大工件。对于各种不同几何形状工件焊接,采用移动真空室方法来代替各种不同形状的专用真空室可以降低投资。移动真空室系统的设计考虑到工件尺寸的公差及对缝间隙的变化。采用填充焊丝焊接,对缝中的空气在该部分进入焊接区之前就通过另一真空系统抽真空。移动真空室采用多级真空系统,级与级之间允许一定的漏气率。由于最下边一级与大气的压差减少,因而真空系统与工件密封不必采用一般的贴紧的密封结构(tight sealing system),这种密封结构可以设计

的相当简单，只要这个结构能减少气流进入真空室内的速度即可，例如陶瓷纤维甚至钢丝刷，只要能耐焊缝的高温和与高低不平的焊缝相吻合即可。移动真空系统简图如图 1—1 所示。

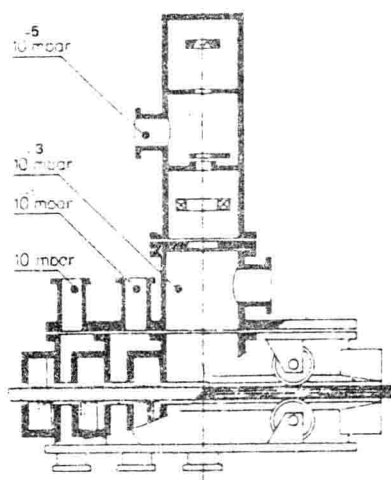


图 1—1 移动真空系统简图

用上述系统对 60mm 厚的 10CrMo 钢 (2.25Cr, 1Mo) 进行了焊接，对缝间隙为 2mm。焊接参数均保持常数，唯有送丝速度为间隙大小的函数，这样可以得到均匀的焊缝。对间隙的测量利用熔池前全功率电子束流的横向扫描而激发的 X 光，接收该 X 光信号而得到间隙宽度值，其精度可以达 ± 0.1 mm。此外电子束流的扫描宽度又根据测得的间隙宽度来决定，其中还考虑到对缝的偏差值而加以修正。

大阪大学焊接研究所与 Mitsubishi 重工联合研制一台局部真空电子束焊机，焊接直径 1.4 米，壁厚为 50 毫

米的钢管，电子枪为横向的，其功率为 120KW (100KV $\times$ 1.2A)，横向位置最厚可焊 300 毫米，滑动密封装置可以保证很好的真空度 (4.0Pa)。焊接 HT 60 钢，经 X 光及超声探伤性能良好。

美国 Leybold-Heraeus D.E.Powers 公司介绍了非真空电子束焊接的应用情况。非真空电子束焊接用于工业生产已有 16 年历史，用于汽车制造方面共有 50 台非真空电子束焊机，包括其它行业在内共有 70 台非真空电子束焊机。同时介绍了各种焊接汽车齿轮、齿罩、汽车框架等的专用非真空电子束焊机，其中焊接齿轮每日可生产 2000 件，共 8000

条焊缝。非真空电子束焊枪的电子束流从真空进入非真空室的效率是90%以上。焊枪的功率为35KW，加速电压为200KV。束流进入大气后的形状见图1-2。所得焊缝形状宽为2~4毫米，深为3~5毫米。



图1-2 束流在大气中的形状

日本Toshiba公司重型设备工程实验室研究了各种焊接参数对非真空电子束焊接熔深的影响，采用焊机的参数为25KW(175KV)。包括工作距离、焊接速度、束流大小及保护气体。采用氢和氮混合气体保护，随着氮含量的增加，熔深增加。采用10毫米厚不锈钢堆焊，用纯氮保护时，其熔深为纯氢时的一倍以上，所用工艺参数为175KV，140mA，4M/分，工作距离15mm。

2. 真空电子束焊接的微处理机控制、焊接参数的自动控制及自动对中
法国Sciaky公司介绍了他们设计的计算机控制的电子束焊机MARK VII型。所用小型计算机包括外部设备：输入输出、CRT显示、读带、A/D和D/A转换，CRT示波器等。机器与计算机之间的接口是专门设计的，并可用于任意给定的焊机。设计中尽量多用软件，少用硬件，所用语言为一般数控机上应用的语言。可控制以下参数：

- (1) X、Y、Z三轴并三个转动座标位置，并且为闭环反馈控制；
- (2) 在给定路线上的速度向量；
- (3) 直线的或圆弧的座标内插值；
- (4) 座标外插值；
- (5) 可变座标的编程；
- (6) 束流参数：加速电压、栅压控制的束流大小、聚焦电源、灯丝温度、焦点偏转电源；
- (7) 电子枪及真空室的真空度监控；
- (8) 其它功能。

控制过程的所有功能和参数由两个系列的予调数值所监控，一个为上限，另一为下限。予调系列数值可分为两个区间：窄区间和宽区间，如果功能值落入窄区间，则显示屏上出现信号，机器继续执行其功能循环。如果功能数值落入宽区间，则除屏幕上有显示外，机器将不执行下一步循环，直到误差被清除为止。

本系统可完成以下附加功能：

- (1) 自动数值化和自动跟踪缝；
- (2) 补偿机械偏差；
- (3) 预先控制一定数量的机械功能；
- (4) 通过一系列的诊断程序对机械加强维护和排除故障；
- (5) 保证在给定时间中的实际焊接循环数，包括灯丝剩余寿命时间在内。

总之 MARK VI1 计算机控制可提高产品质量和生产率，改进维护条件。

图 1-3 为计算机控制原理图。图 1-4 为该设备在航空方面的应用。动枪在 10米^3 真空室中。此设备的特点是计算机控制，自动跟踪焊缝。可以焊接复杂形状的涡轮叶片。计算机控制先探测轨迹，将地址存贮，然后动枪按轨迹进行焊接。

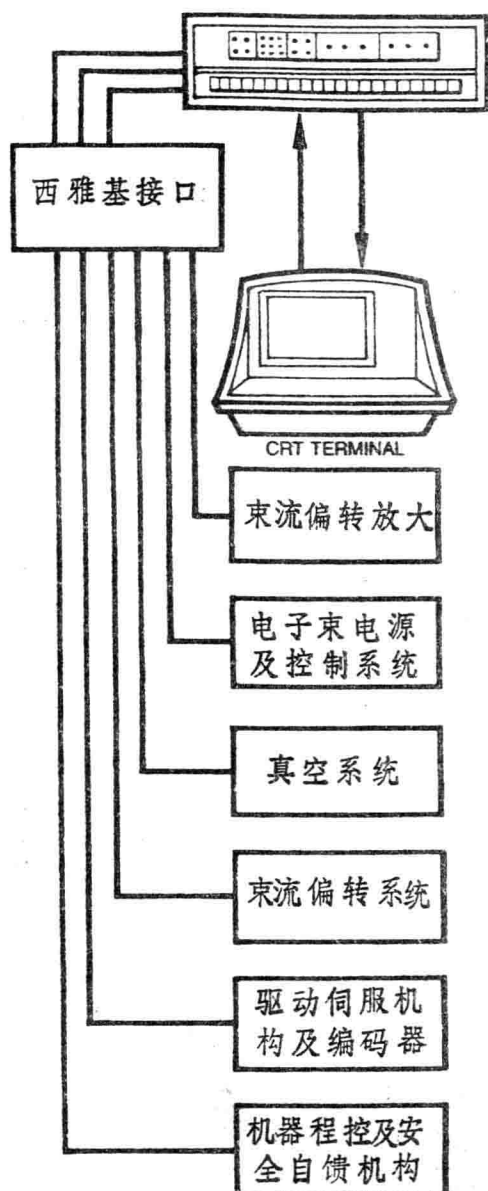


图 1-3 计算机控制原理图

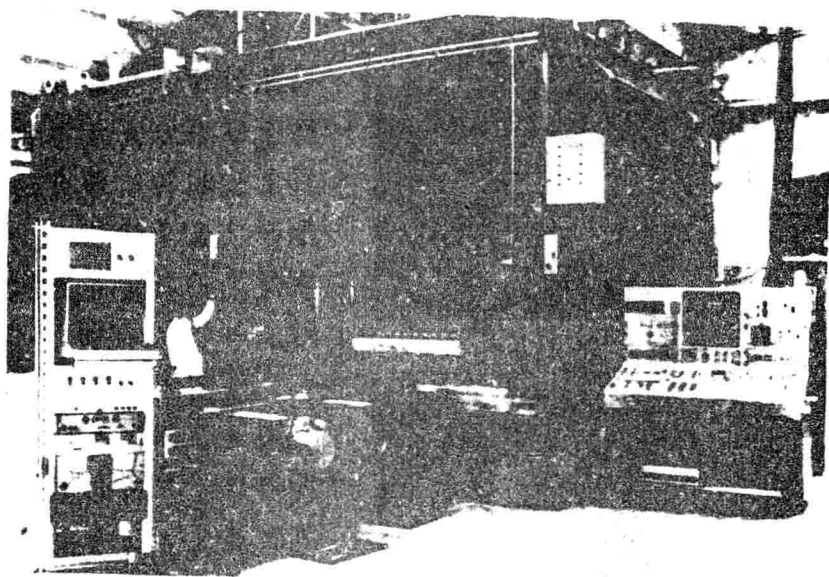


图 1-4 电子计算机控制的电子束焊机

法国 Sciaky 公司介绍了电子束焊接中自动对缝的新方法。过去他们采用的是二次反射电子的自动跟踪方法，即二次反射电子呈 V 形曲线分布，当偏转线圈中的电流为零时，则束流打在屏幕上的斑点代表电子束的轴，如果对准了缝，则斑点对准 V 曲线的尖端，否则偏一边，这种方法用的仪器叫 reflectron。

这次介绍的方法是计算机控制的方法，此方法与上述方法的不同之处是偏转低能电子束不是用正弦规律使偏转扫描在垂直与缝的直线上往返，而是使低能束流划圆，将圆通过对缝，则与之交于 A、B 两点，如图 1-5、图 1-6 所示。计算机将记录从 A 到 B 的扫描时间 t_1 和从 B 到 A 的扫描时间 t_2 ， $t_1 - t_2$ 的差值信号使电子枪或工作台移动，使束流对准缝。当 t_2 等于 t_1 时，说明束流对准了缝，此时的座标值 X、Y 被记入存储器，计算机的程序是安排好的，使 ΔX 、 ΔY 增量保证束流与工件之间的速度为恒定。在全长上自动进行跟踪，跟踪速度最高可达 3 米/分。上述系统可用于表面形状复杂工件的跟踪，甚至其曲率半径小到 2—3 毫米，但此时的跟踪速度应降低。焊接时将记忆的轨迹重放 (Play-back)

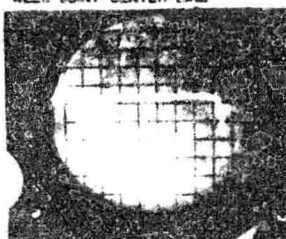
EB SCANNING

← SCANNING PLANE →

BEAM

SQUARE BUTT "Y" WELD

SCOPE PATTERN-BEAM RELATIVE TO WELD JOINT CENTER LINE



TUBE TO-HEADER WELD

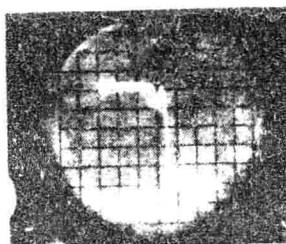


图 1-5 不同接头的“二次反射电子”图形

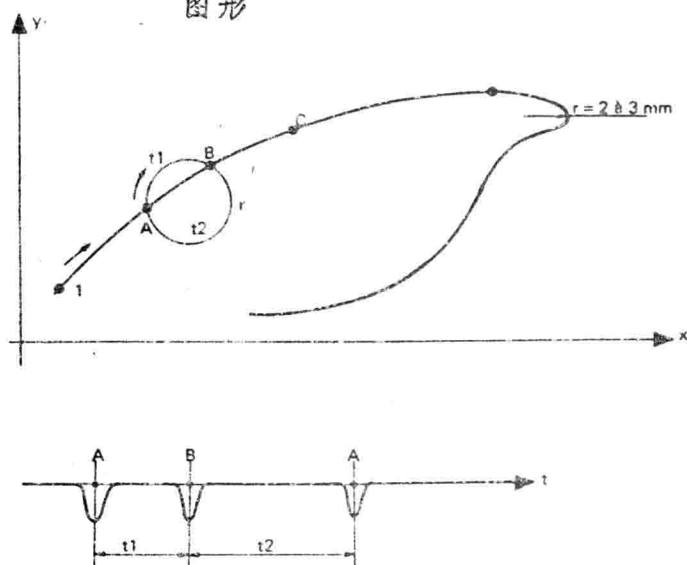


图 1-6 用“二次反射电子”进行轨迹的自动跟踪

以正常焊接规范进行焊接，然而上述系统对在焊接过程中有可能出现的轨迹变动(如焊接变形等)都无法修正，该公司正在发展的新系统能解决这一问题。

法国西雅基 (Sciaky) 公司还介绍了他们发展的管板焊接自动跟踪系统。该系统的原理是使束流的轴与管子的圆心重合。如果不重合时首先通过 X—X 偏转线圈使束流沿 I 方向偏转 (见图 1-7)，并交管壁于 A、B 两点，该二点可以通过二次反射电子系统检出，这样可以定出 AB 线段的中心 C 点。然后将束流通过 Y—Y 偏转线圈使其沿 II 方向偏转，通过 C 点，并交管壁于 D、E 两点，从而可以定出 DE 线段的中心 G 点，而 G 点就是管子的中心。管心 G 点与束流轴心 O 点不重合时，可通过计算机计算出应改变的 X—X、Y—Y 偏转电流大小，通过改变偏转电流使两心重合。

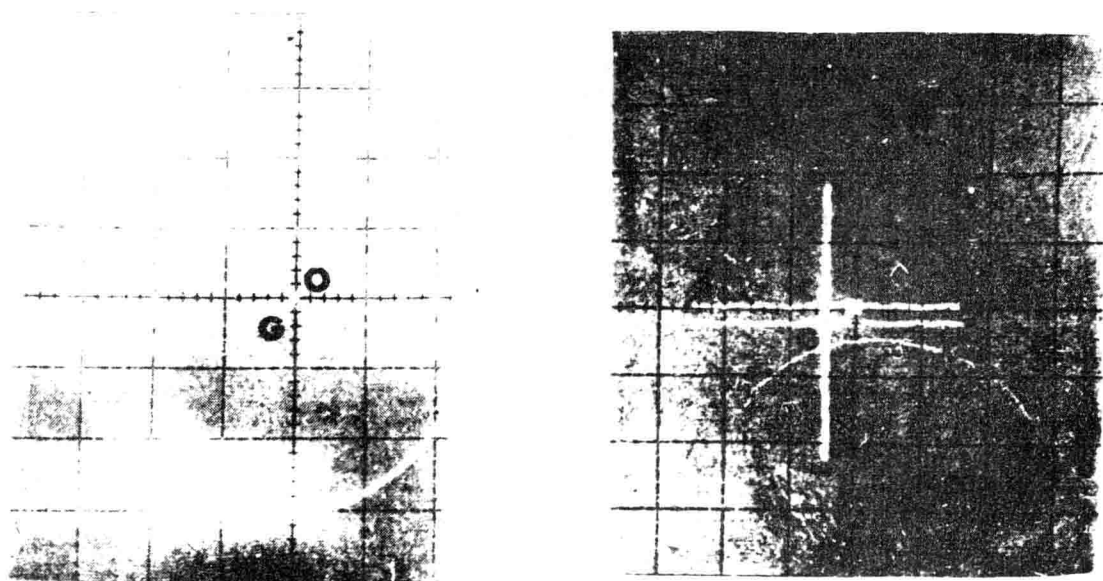


图 1—7 管板焊接自动检测管心原理

3. 电子束焊接缺陷及消除措施

钉形缺陷是电子束焊接常见的缺陷，日本金属材料技术研究所，采用束流反馈控制或束流摆动反馈控制，在一定程度上可以减轻这种缺陷。钉形缺陷的产生规律是随机的，它的产生不但与电子束焊接的熔化过程有关，而且也与熔池的具体情况有关。用一个带有（对工件言）正偏压 6 伏的探头放其在磁透镜与工件之间，用以收集由熔池逸出的低能电子（由于电子束碰撞而造成），可反应出熔化金属的状况，当电子束碰撞试样的上部分时，探头收集电流增加，而当电子束碰冲试样底部或叫做熔池的内部时，探头收集电流减少。而钉形缺陷往往是在电子束撞击熔池底部时产生的。所以减少束流撞击底部时的电流或增加撞击上部时的电流均可以减弱钉形缺陷的产生。束流反馈控制原理如图 1—8 所示。以探头收集的脉冲电流作为反馈信号，通过带通滤波，与一个正电压进行比较，超过时输出一恒定电压给函数发生器的触发线路，函数发生器输出一系列所需形状的脉冲加到栅极上，以改变电子束流。

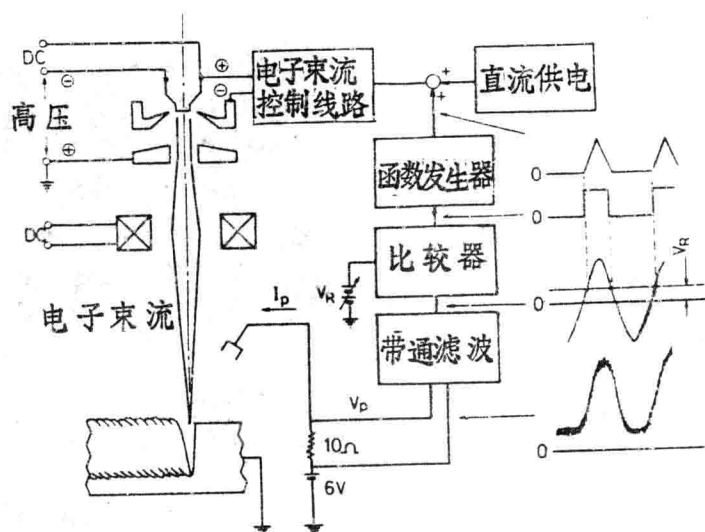


图 1-8 束流反馈控制线路

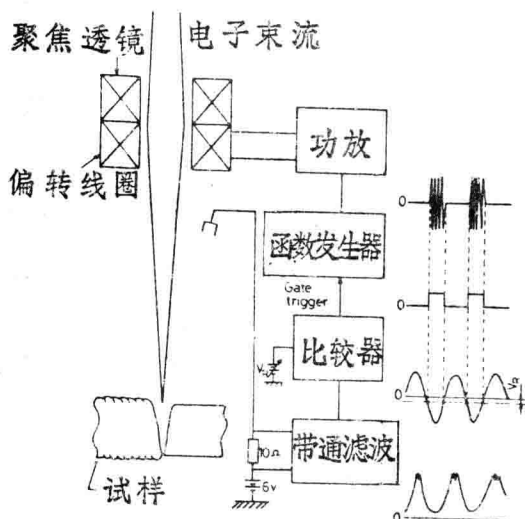


图 1-9 束流扫描反馈控制线路

减少钉形缺陷的另一办法是进行束流扫描，不过是仅仅在束流冲击熔池底部时进行扫描，以减少能量密度，其控制原理见图 1-9。反馈信号输入到偏转线圈。

大阪大学焊接研究所波兰人 K·P Friedel 与荒田吉明教授认为电子束焊接焊缝内部缺陷与焊根形状有密切关系，根部的钉形缺陷、冷塞 (Cold Shuts) 和根部气孔在小曲率的焊根处产生的多。为减少这些缺陷，可采用增加束流直径倾斜电子束、电子束摆动及双电子束焊接。作者通过计算

的方法，计算束流熔化的空腔形状从而得出采用双电子束焊接、横向束流摆动、二重双曲线形束流摆动的方法是消除根部缺陷的效果最好的方法。

(二) 激光焊接

激光焊接方面论文的内容包括激光焊接焊缝形状的变化、焊接熔化特性、焊接质量以及激光焊接、切割、表面热处理、表面硬化加工在工业中的应用等。

1. 激光焊接、熔化特性及焊缝形状变化

激光焊接的机理至今尚未被人们所掌握，它与电子束焊接比较有许多不同之处。例如激光束对于金属具有高反射性和非常浅的焦点深度。日本大阪大学及该校焊接研究所在束流与金属相互作用及热传导理论的基础上研究了激光焊接焊缝形状的变化机理。试验采用 1 KW CO_2 激光器 (971 型 Sylvania Inc)，平面镜和透镜焦距分别为 f : 38、64、127、254mm。用丙烯酸塑料试样在不同的 ab 值 (即不同的透镜试样距离与焦距比值) 处横截束流快速穿过，所得不同直径的熔斑，即束流在不同焦点试样距离时的直径，用高斯分布公式计算，已知激光功率又可算出不同截面的能量密度图，将不锈钢试样放在不同的 ab 位置进行焊接，得到不同焊缝截面 (图 1—10)。由图 1—10 可见当试样的表面接近焦点时，焊缝形状迅速地从半圆形变为深穿透形，类似于电子束焊接的焊缝形状。其中焊缝熔深增加近 5 倍，熔宽增加近 2 倍，焊缝截面积增加近 10 倍。作者将这种现象即 ab 值的不大变化引起焊缝形状质的变化叫做“焊珠转变” (bead-transition)。图 1—11 表示激光束与金属间的相互作用，同时也可以解释在不同的 ab 值时，焊缝形状的变化。在 C—D 线处表示焦点位置，其表面温度达 4000°C，在 C—D 区之外焊缝为半圆形，熔深很浅，由于没有形成熔化的空洞，而金属的反光能力又很强，所以入射光均反射了出去。在 C 与 D 处的液面上，由于金属蒸发的反作用力形成浅坑，其中在发散端 D 处由于熔池表面作用力使其底部是向离开焦点位置的方向移动，能量密度在熔池底部更加减少，因此熔深不可能再增加，相反在收敛端 C 处熔深能够继续增加，因为熔池底部接近焦点位置，能量密度增大之故。

由于激光束与电子束比较具有较大波长，因此其焦点深度小，焊接时工件置放位置的精度也要求高。

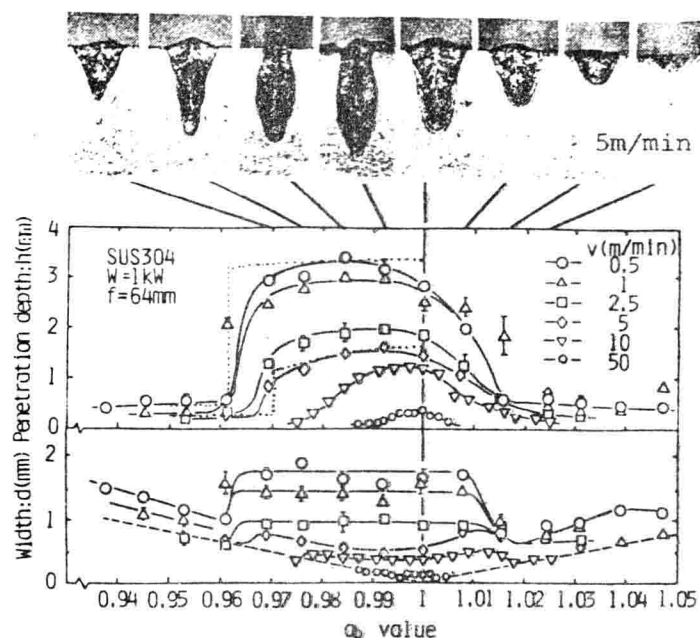


图 1-10 不同焊接速度时 a_b 值
对焊缝穿透深度及宽
度的影响

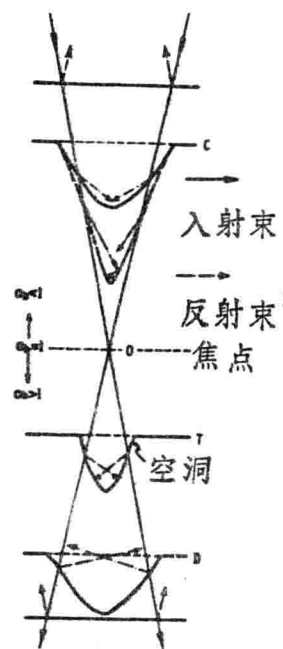
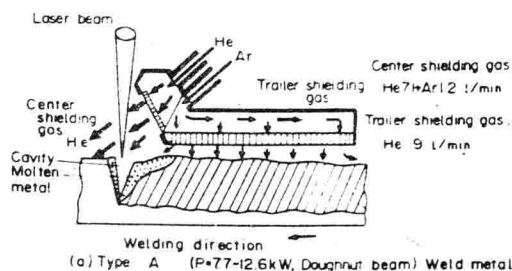


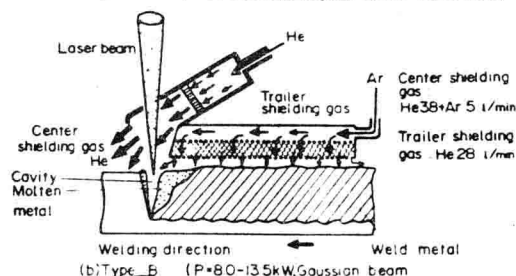
图 1-11 束流与材料之间
的相互作用示意图

日立研究所及日立工场研究了 CO_2 激光焊接的熔化特性，即保护气体、焊接速度、束流模式及功率对穿透深度、束流—金属能量转换效率、熔化比（熔化金属消耗的能量与辐射能量之比）的影响。他们进行激光焊接试验所采用材料有 12mm 或 17mm 厚 SUS 304 不锈钢、18mm 厚 ASTM A 387 D 钢以及 2.5mm 厚因康镍 X-750。采用的激光焊机特性见表 1-1，焊头形式见图 1-12。焊接条件为：焊速 0.3—5 米/分，功率 1.5~13.5 KW，保护气体氩气流量 3~20 升/分，其它参数标在图上。作者的试验说明在采用低的焊接速度焊接 SUS 304 不锈钢时，穿透深度随保护气流量的增加而增加，但在高速度焊接时，熔深很难随保护气流的增加而增加。在采用 6 米/分或以上高焊接速度时，高斯模式的激光束的熔深比环状模式的大。在采用高斯束流模式时，熔化比及束流到金属能量转换效率随着功率的增加而增加，但焊接速度从 0.5 米/分变到 1 米/分时，上述熔化比及束流到金属能量转换效率几乎不变。而对于环状束流模式则熔化比及能量转换效率随焊接速度的增加而增加，并且比高斯模式时为高。图 1-13 为采用大功率低焊速时的焊缝形状、熔深 t 及焊缝截面积的值。

A 型焊头



B 型焊头



C 型焊头

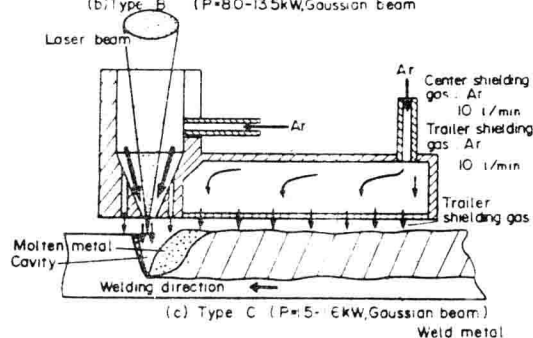
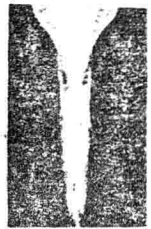
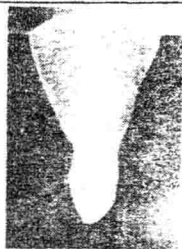


图 1-12 激光焊头的不同形式

表 1-1

序号	束流模式	功率 KW	聚焦系统 *	焦点直径	焊头形式
1	环形	7.7~12.6	F/7 Cassegrain 望远镜	0.9MM	A 型
2	高斯分布	8.0~13.5	F/7 Cu 镜	0.6MM	B 型
3	高斯分布	1.5~1.6	F/8, F/4 KCl 透镜	0.3MM	C 型

* 所有情况下, 焦平面均在试片表面上。

Welding Laser speed beam	$v = 0.51\text{m/min}$	$v = 0.76\text{m/min}$	$v = 1.02\text{m/min}$
Gaussian mode $P = 13.2\text{ kW}$			
Average penetration depth ($\bar{t}$) Average cross section area ($\bar{s}$)	$\bar{t} = 14.0 \pm 1\text{ mm}$ $\bar{s} = 83.4\text{ mm}^2$	$\bar{t} = 13.5 \pm 1.5\text{ mm}$ $\bar{s} = 50.8\text{ mm}^2$	$\bar{t} = 15.0 \pm 1.5\text{ mm}$ $\bar{s} = 39.2\text{ mm}^2$
Doughnut mode $P = 10.5\text{ kW}$			
Average penetration depth ($\bar{t}$) Average cross section area ($\bar{s}$)	$\bar{t} = 11.5 \pm 1.0\text{ mm}$ $\bar{s} = 66.8\text{ mm}^2$	$\bar{t} = 11.5 \pm 0.5\text{ mm}$ $\bar{s} = 47.1\text{ mm}^2$	$\bar{t} = 11.5 \pm 0.5\text{ mm}$ $\bar{s} = 41.3\text{ mm}^2$

10mm

图 1-13 SUS 304 不锈钢焊缝断面变化与焊速及激光模式的关系

英国科学技术皇家学院将一个电弧加到激光焊接所产生的热斑处，可以增加激光的能量。当电弧电流到 100 安，焊接速度到 100MM/秒时不会搅乱焊缝成形。用这种方法可将单用激光焊接时的焊速提高一倍，穿透深度增加 20%。上述试验采用的激光发生器为 2KW CW CO₂ 激光器，Miller 型 SRH 400 焊接电源及一个 Interlas MK3 TIG 高频装置（用于引弧）。激光及电弧焊接的试验装置见图 1-14。

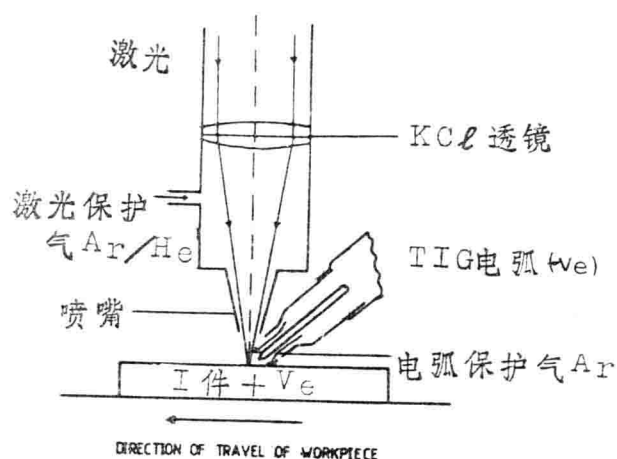


图 1-14 激光与弧焊试验装置示意图

试片的从一侧高速吹保护气的方法,比轴向吹保护气体可以进一步减少等离子缕,从而增加熔深。

在全熔透的焊缝中,一般很难发现有半熔透焊缝中所产生的那种气孔,这说明气孔的产生原因不是由于保护不良而使氧、氮混合气体浸入熔化金属之故,而是由于凝固过程中熔池中的金属蒸气所致。因此减少金属蒸气可以减少气孔。为此控制激光的功率是有效的。图 1-15 为半熔透缝中的气孔情况。

2. CO_2 激光焊接质量的研究

Mitsubishi 重工及广岛工业大学研究了 CO_2 激光焊接缺陷产生原因。认为激光焊接时的焊透不均匀和根部空洞是由于熔池中的金属蒸气,形成一缕等离子体它吸收激光束并使其散射之故。采用不同保护气时,氩气容易产生等离子体,而氦气产生较少,因此采用氦气保护可以得到焊透比较均匀的焊缝。此外采用几乎平行于

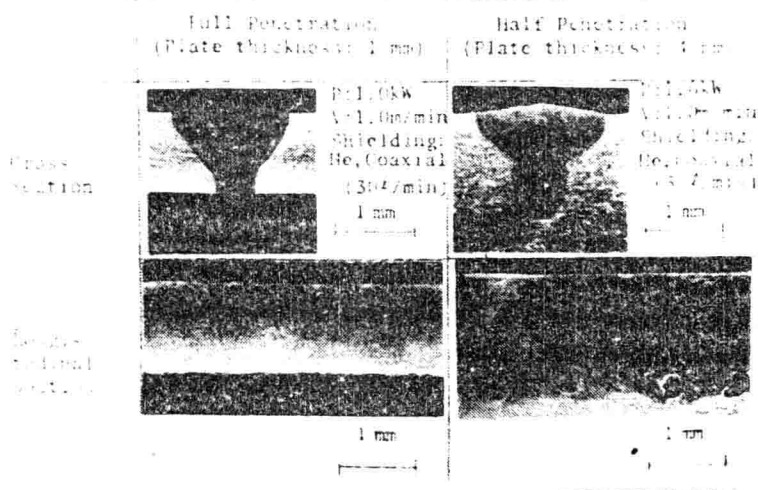


图 1-15 半熔透焊缝中的气孔

3. 激光焊接在工业上的应用

论文中有七篇文章介绍了激光焊接、切割、表面堆焊及热处理在工业中的应用情况。这里只重复介绍焊接应用情况。

川崎重工应用 1~2 KW CO_2 连续激光器进行钢板的切割与焊接，由于切割边缘很光滑，可以利用它进行焊接时的对中和跟踪。焊后焊缝无加强高度可直接进行冷滚。切割后由于表面生成的氧化层而往往会引起产生焊接气孔，因此切割后要用钢丝刷轻轻刷一刷。他们利用 1—2 KW CO_2 激光器焊接了 2~3.2 mm 厚硅钢板，其焊接接头强度高于母材，塑性良好，能进行焊后冷滚。

瑞士 Permascand AB 介绍了 3KW CO_2 多用途激光器用于焊接、切割及硬化热处理情况。激光焊接可以减少变形 90%，因为激光的热输入小的多。对于一个典型构件从采用脉冲 TIG 焊接到改用激光焊接，其焊接变形减少了 90—95%，也就是说变形几乎为零。激光焊接不但可以焊接 I 型对接焊缝，还可用于搭接、T 型接头焊接。焊接过程完全自动化加上输出束流的稳定性，保证焊接质量良好。可以用激光焊接进行金属粉末的表面堆焊，焊接金属丝和网也很简单。例如用激光进行钛电极的修理，切割与焊接综合应用，切去损坏部分，立刻将一预先加工好的补片放上进行焊接。整个工序仅 1~2 分钟。而用一般的机械切割、TIG 焊接及矫正需要 1~2 小时。激光焊接性能与金属的反射能力有直接关系，例如铝、铜和金用激光进行焊接的能力受到限制，而钽、镍等金属都很好焊接。3KW 激光器可以切割 10MM 以下低碳钢和 5—6MM 以下其它金属，还可切割有机玻璃 30MM、木头 20MM 及塑料、玻璃、石英、皮、革、橡皮等。用激光进行表面热处理的优越性是仅仅工件表面硬化，整个工件不变形，不需要再进行机械加工和研磨。

西德 Bremer 轴承钢技术研究所，用 5KW CO_2 激光器进行金属表面防护层的堆焊。例如在非合金钢表面加铬及在钢表面加难熔金属钽、铌、钨等。由于激光焊接的冷却速度相当快，足以使表面层产生非晶体或至少是微晶结构，利用非晶或微晶材料所具有的特殊好的机械性能和抗腐蚀性能来作结构件的防护层，将是一个有意义的问题。美国光谱物理工业激光部门介绍了深穿透的激光焊接、高精度的激光切割、马氏体转变而使硬化的

表面热处理和表面合金化是大功率 CO_2 激光在工业上应用的四个主要方面。采用激光加工的两个主要优点是过程进行的迅速及其作用的局部性。具有高重复精度和可靠性，在多数情况下激光加工后不需要再进行机加工或重复处理，在一些情况下激光加工可以节约能量。激光应用于切割，其切口窄，热影响区小。例如对 10mm 厚钢板切割口宽 0.4mm，热影响区 0.075 mm。而氧气切割则切口为 1mm，热影响区为 0.8mm。用大功率 CO_2 激光目前可以切一英寸厚钢板。由于激光源集中，热影响区小，焊缝深宽比高。例如对 6.5mm 厚的 304[#] 不锈钢，采用 5KW、21mm/秒速度焊接时，其热影响区仅 0.8 mm 宽（母材每边）。同时焊接接头的强度及冲击韧性也提高了。激光焊接存在的问题是由保护气和金属蒸气所产生的等离子体和非穿透焊缝中的气孔。采用等离子去除装置和选择合理焊接规范，上述问题可以得到解决。由于激光焊接的精度高变形小、材料性能变化小、生产率高、质量好，可焊磁性材料及其它方法不能焊的材料，激光焊接可能是目前最好的焊接方法。

美国 Industrial Laser Group, Coherent, Inc 介绍了激光加工在电子工业中的应用。应用 Nd: Yag 激光系统及低功率的 CO_2 激光器进行各种电子器件的焊接及划片制造，并根据电子工业的新发展不断生产新的激光系统。过去激光加工只应用于大的电子器件，例如 TV 管子、电池引线 and 电池密封等，目前仍然应用 Nd: Yag 激光系统焊接。由于微电子技术的发展，对激光加工提出了新要求，例如薄膜、厚膜电阻的调整、陶瓷划片都用激光加工得到解决。陶瓷切割、砧孔、划片、组件的微型钎焊、导线去除绝缘层以及集成电路间联接、封装入壳与引脚的连接等也采用了 CO_2 激光焊接或激光加工来解决。作者介绍了他们用于划片的新机器。

意大利 CISE S. PA-P. O. B 1208 介绍了他们对大功率激光应用于金属加工的研究计划。

（三）等离子焊接

日本日立机械工程研究实验室研究了等离子填充丝焊接，焊丝由另外电源通电加热以提高熔敷效率。等离子电源及焊丝电源接法见图 1-16 所示，等离子弧接正极，电极为负，工件为正即 DCSP。而焊丝电源，焊丝为正，电极为负，两个电弧稳定工作。对于这种焊接方法等离子弧电流

(I_p)、焊丝电流(I_w)和送丝速度(V_f)为主要焊接参数, I_p 和 I_w 单独进行调整, V_f 为等速, 它的选择决定于 I_p 和 I_w 的综合值。采用两种混合气体进行保护, $Ar+7\% H_2$ 用于不锈钢和低碳钢, $Ar+50\% CO_2$ 用于低碳钢, 后者熔敷速度快, 但前者保护效果好。等离子弧电源为恒流特性电源, 而焊丝电源为恒压特性电源。当焊丝采用恒压电源时, I_p 与 I_w 有自调节作用, 见图1-17所示。设焊接规范为 $I_p=200A$, $I_w=100A$, $V_f=5.5$ 米/分, 当 I_p 增大时, 来调整 I_w , 此时 V_f 仍不变, 则 I_w 会自动降低到接近于与 I_w+I_p 之和相等并于 V_f 等于5.5米/分相适应的数值。等离子弧对熔滴过渡的影响是使其以射流状过渡到熔池。作者将这一方法用于滚子焊接成形良好。

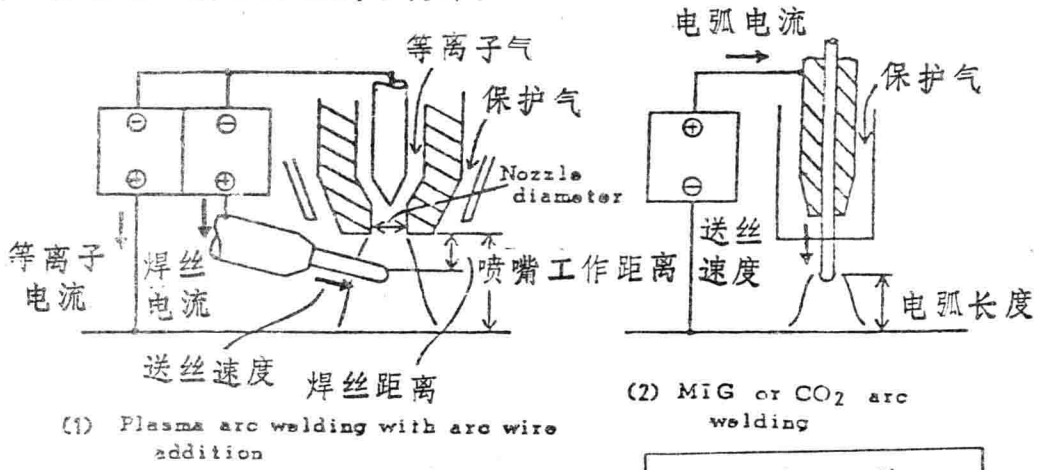


图 1-16 等离子填充丝焊接

新日本制铁基础研究实验室, 用加交变磁场使等离子弧扫描摆动, 以用于金属的表面处理。该装置示意图如图1-18所示, 扫描电弧照片见图1-19。当加以正交磁场时, 电弧在一个平面内摆动, 否则在一个曲面上摆动, 由照片可以看到。摆动幅度与等离子气流速成反比, 电弧电流的

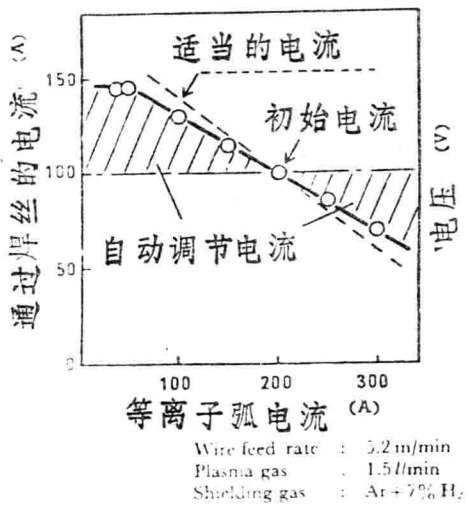


图 1-17 焊丝电流随等离子电流的变化关系