

# 激光机器人焊接

许多读者将会亲眼见到用 He-Ne 激光器或类似气体激光器发出的细单色激光束描绘的图案(这种激光器的输出功率通常只有几个毫瓦)。在制造工业中常常要求高得多的平均输出功率和运行效率。在电磁辐射谱近红外波段运行的电激励激光器可满足这种要求。这样的激光器有 Nd:YAG( $1\mu\text{m}$ )激光器,  $\text{CO}_2$ ( $10\mu\text{m}$ )气体分子激光器和  $\text{CO}$ ( $5\mu\text{m}$ )激光器, 这些激光器都发射高度定向的辐射束。虽然激光器的物理原理早在 60 年代就清楚了, 但是把它们应用到工业加工的研究只是近来才迅速发展起来, 特别是在德国和日本。“高科技”激光车间现已常规地应用了 Nd:YAG 和  $\text{CO}_2$  激光器, 其典型的输出功率为 0.2—2kW, 用于各种计算机数控(CNC)打孔和切割。大功率激光器的广泛应用已成世界趋势, 在以色列集体农庄里就可见到这类复杂的设备。

然而, 对厚度相近的金属, 焊接比切割要求更强的激光。这是因为, 在切割过程中气喷可用来吹走熔化的金属, 如果气体是化学活泼的, 它还能提供放热反应以强化来自激光的热输入。高质量的焊接和热处理应用, 要求激光更为可控和便于应用。因此, 我们同英国、荷兰和德国的 20 多家企业和组织合作, 以在 BRITE/EURAM (欧洲工业技术基础研究和欧洲高级材料研究)计划范围内解决部分上述技术障碍。我们在 Culham 的工作重点是自适应控制数千瓦功率的  $\text{CO}_2$  激光器, 用之于焊接 12mm 和 25mm 厚的钢板。

## 一、锁眼焊接过程

设想  $\text{CO}_2$  激光器的高度定向辐射束由透镜或反射镜聚束在直径为数百微米的焦点上, 聚焦点沿钢板直线移动。如果考虑熔化的潜

热, 熔化钢板所需的吸收功率下限可以相当精确地由二维热传导解析模型求出。然而, 需要更为复杂的计算来模拟其它重要的参数: 表面的反射, 它随温度升高而减弱; 表面上局部电离的等离子体的吸收和散射; 发生在深部“锁眼”内的过程, 这种“锁眼”是当激光束在金属里或穿过金属打出孔洞时形成的。这些过程包含金属的蒸发, 以及由随温度变化的表面张力和引力导致的复杂流动。

粗略地说, 如果采用 He 气而不是用更易于电离的 Ar 气来减小等离子体衰减效应, 穿透 25mm 厚的钢板所需的  $\text{CO}_2$  激光器功率在 12—25kW 之间。显然, 若要取得好的焊接效果, 锁眼必须填满, 在固化的金属中不能有太多的气泡或小孔。虽然许多因素可以影响焊接质量, 如工件未对好, 或者焊点与激光束错位, 但是激光束本身是高度可控的。因此, 在技术方面, 监测焊点及配备合适的闭循环辅助控制系统, 以改进对焊点质量的控制是很重要的。

## 二、大功率

十年前, 只有一家美国公司在市场上推销功率大于 10kW 的  $\text{CO}_2$  激光器, 这种激光器采用电子束预电离技术。我们打算自己制造西欧第一个 10kW 级的  $\text{CO}_2$  激光器 (CL10)。

设计这样的激光器主要有三个要求。前两个是根本性的: (1) 确保工作介质的电激发足够均匀, 因为放电容易收缩成局部电弧; (2) 获取定向性能足够好的辐射束, 有好的空间相干性, 在通过其后的光学元件后相位畸变要小。原则上电子束预电离系统可以满足这两个要求。这种技术最先是莫斯科的列别捷夫研究所和美国的 AVCO 公司发展的。值得注意的是, 该技术还提供两个完全独立的“控制柄”, 以便控

制电子密度(通过预电离设备的电子束)和放电温度(通过激发电位,它不需要高到可产生自持放电)。第三个要求不是属于物理范围内的,它更为复杂,是对技术和经济的挑战,即在可承受的费用下提供可靠和稳定的装置。无疑,未来十年的市场将取决于这些问题的解决与否。

我们的原型激光器采用气体的直流激发,其激发方向垂直于光轴和冷却循环激光气体的气流方向。虽然功率只有10—11.5kW,但免去了高压电子束预电离系统,且光束品质很好。这是因为我们选用了气体动力窗而不是固体窗来将激光气体和大气隔开。在这样的窗里,通过适当调节流经出口小孔的气流,利用伯努利效应来确保激光气体(50m bar)和大气之间正确的压力平衡。问题仍然是如何设计出使用方便和可靠的系统。CL10激光器的亮度在9.5kW聚焦束的中心85%区域内可高于 $4\text{TWm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 。在稍高的运行功率11.3kW,激光束成功地穿透了25mm厚的钢板。

这样大功率的激光器通常是固定的。看来将来也不会设计可沿一个以上方向移动的激光器。用可移动光学系统操纵激光束,使光束在工件上移动是方便而可行的。通常激光束几乎是垂直入射到工件上,等离子体控制气体护罩也是足够可控的,因此有时要求光学系统有五轴或六轴的CNC控制(取决于工件是否沿某轴移动)。由于光学纤维现在还不适合传输10kW功率的 $\text{CO}_2$ 激光束,我们研制了三轴移动反射镜CNC激光机器人来控制光束在6m长工件上的移动。在此前,我们还检验了在适当控制的大气条件下,在70m以上距离传输这种激光束的能力。通常的工业污染物和水蒸气对激光的吸收也许会引起不期望的发热、对流和光束的折射。

### 三、自适应控制的激光机器人

作为BRITE计划P1206的一部分,我们建造了两支撑的光学台架系统。台架的控制臂上装有反射镜聚焦头、自动焊料配给器、过程监

物理

控设备和一套商用视觉系统。聚焦镜头和气体护罩可同时沿6m长的水平 $x$ 轴、垂直 $z$ 轴(聚焦)和横向转动 $\varphi$ 轴移(转动)。弧焊视觉系统采用可见光波段激光扫描和CCD探测器自动进行三角测量,其用途有:确定焊件之间对焊的位置(即焊缝跟踪),计算焊接前焊缝的截面大小,实时控制焊料配给速率以补足焊缝里的金属缺少量,最终控制聚焦头的轨迹和速率。在12.5mm厚6m长的冷轧钢板对焊试验中,我们成功地实时演示了所有上述视觉系统的功能(当焊件这样大时,即便采用像激光焊接这样的低畸变技术,也会导致很大的应力和可探测的焊件位移)。

对辅助控制的激光束定位和功率控制,我们也采取了一些措施,使许多很重要的过程参量可以精确确定和保持。然而,我们的实验表明,次级相互作用可能发生。例如, $\text{CO}_2$ 激光偏振矢量的方向会影响金属的吸收,因此对金属切割和表面工程应用,甚至有时对焊接,它是很重要的效应。由于来自工件的光学反馈,原本稳定的激光会呈现出偏振方向的波动,以及常常伴随的输出功率和模式结构的涨落变化。这种效应不是我们所期望的,因此需要实时评估整个光学系统的稳定性。基于这个原因和其它理由,也许有必要建立实时的质量保证监控(例如确定是否达到了完全的焊接穿透)。为此,我们调查了下列技术:He-Ne激光探针信号的背反射测量及其在锁眼中的穿透;自发声发射;外源超声诊断;自发发射的等离子体光;涡流诊断信号;测量 $\text{CO}_2$ 激光实际传输到工件的热量。在自适应控制的激光T对接焊试验中,我们已成功地应用了两种上述NDT技术。然而,我们还没有将它们应用于10kW激光/6m光学台架机器人系统。

当然,对这种设备的最终检验是其焊接的质量,我们因此评估了焊接的孔隙、硬度、夏氏冲击能(即抗断裂强度)和相关的焊点金相学特征。与常规焊接和其它激光焊接实验室的结果也作了相互比较,以使结果标准化。虽然本文集中描述在12mm厚钢板的自动 $\text{CO}_2$ 激光焊

接(单面)和 25mm 厚钢板焊接(双面),许多这样的技术可应用于高速激光焊接(薄的断面)、激光切割或表面处理。Culham 正在与其它 BRITE 计划合作解决激光切割和表面处理方面的问题,同时在探索可替换波长激光器(紫外 Excimer 和红外 CO)的工业应用前景。

#### 四、目前应用状况

据瑞士一家市场研究公司估计,目前各种工业激光系统的世界市场为每年八亿美元,销售正在稳步上升。美国激光研究所的 Belforte 估计,在机械制造业中,全世界至少已有 18000 个工业激光系统。它们中大多是千瓦功率以下的 Nd:YAG 和 CO<sub>2</sub> 激光器,用于打孔或切割,其工件可在  $x-y$  平面内作简单线性移动。然而,更笨重和更复杂的工件更难处理,因此需要制造能将激光束传输到表面不平工件上的多轴激光机器人。估计世界上已有 500—600 个五轴

激光机器人,主要用于切割。很可能世界上最大的五轴激光机器人已由 Cincinnati Milacron 公司安装在美国的 Douglas 飞机制造厂,用于剪裁机翼部件。它可沿  $x$  方向移动 12m,沿  $y$  方向移动 3 m,精度分别可达  $\pm 0.17$  mm 和  $\pm 0.13$  mm。最复杂的激光机器人肯定要数国际技术协会的 CO<sub>2</sub> 激光机器人,据称它可提供 20 轴的视觉系统控制的激光处理加工。

由于这种系统技术新颖,资本密集,目前还没有很多自适应控制的大功率 CO<sub>2</sub> 激光焊接系统用于工业过程中,但是在许多发达的工业国家,对其研究的兴趣非常浓厚且日益增长。许多日本、美国和欧洲的公司已经在低功率激光器的切割应用中表现活跃。预计未来十年里,上述部分大功率激光技术将会得到很好的应用。

(敬克兴根据 Physics Today 1990年  
第 7 期第 38—41 页编译)

---

## 中国物理学会第五届全国会员代表大会简讯

中国物理学会第五届全国会员代表大会暨学术年会于 1991 年 3 月 5 日至 8 日在北京召开。来自全国各地学会及各分科学会、专业委员会的会员代表 180 余人参加了大会。与会代表听取了黄昆教授代表第四届理事会所作的工作报告,并进行了认真讨论,一致认为第四届理事会在中国科学技术协会的领导下开展学术交流,物理教学研究,科学普及与青少年活动,刊物出版,物理学名词审订及咨询工作等方面进行了大量卓有成效的工作,取得了较好的成绩。大会一致通过了工作报告的决议。会议还颁发了第二届胡刚复、饶毓泰、叶企孙、吴有训物理奖:中国科学院上海光学精密机械研究所林尊琪同志的“高功率激光物理实验技术的发展”获胡刚复物理奖;中国科学院物理研究所叶佩弦、傅盘铭两位同志的“四波混频光谱术”获饶毓泰物理奖;中国科学院物理研究所李方华、范海福两位同志

的“高分辨电子显微学中图象处理方法的研究”获叶企孙物理奖;中国原子能科学研究院张焕乔、许谨诚和刘祖华三位同志的“自发裂变和中子诱发裂变的瞬发中子多重性的研究”获吴有训物理奖;中国原子能科学研究院陈永寿同志的“连续  $\gamma$  谱学中的高能磁偶极跃迁”获吴有训物理奖。会议还表彰了 120 位从事物理学工作 50 周年的物理学界前辈和 127 位学会工作积极分子。会议期间还举行了学术报告会,有 28 位同志就物理学一些分支学科的研究和发展进行了学术报告,受到与会代表的好评。

大会选举了由 99 名理事组成的中国物理学会第五届理事会及 20 名常务理事。冯端当选为理事长,周光召、李寿椿、杨国桢、赵凯华、杜祥琬为副理事长,杨国桢为秘书长。

(程义慧)