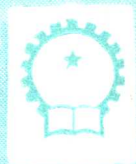


# 熔 焊 原 理

[苏] A. A. 叶罗欣



机 械 工 业 出 版 社

# 熔 焊 原 理

[苏] A. A. 叶罗欣 著  
赵裕民 张炳范 贾安东 译



机械工业出版社

本书是一本系统论述熔化焊过程的物理-化学规律的专著。主要研究探讨了焊接金属和焊接材料的熔化过程，熔化金属与周围介质的相互作用，以及焊缝成形的规律及控制，提供了焊缝参数及其成形的工程计算原理。书中介绍了一些新的试验方法，引用了许多新的试验结果，并对熔焊过程的某些方面进行了定量的分析，反映了近年来熔焊过程中基本物理-化学规律的研究成果。

本书可供从事焊接工作的研究人员、工程技术人员、高等院校的师生参考。

## ОСНОВЫ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

А. А. ЕРОХИН

Москва «МАШИНОСТРОЕНИЕ»

1 9 7 3

\*

### 熔 焊 原 理

〔苏〕 А. А. 叶罗欣著

赵裕民 张炳范 贾安东 译

\*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub>·印张14·字数 370 千字

1981年5月北京第一版·1984年6月北京第三次印刷

印数 14,001—17,700·定价 1.70 元

\*

统一书号：15033·4912

## 译者的话

《熔焊原理》这本书是一部论述熔化焊接过程的物理-化学规律的专著。围绕这个主题,全书共分三大部分,即金属和焊接材料的熔化、焊接时的化学反应—焊接冶金学、焊缝金属的成型。第一部分所阐明的金属和焊接材料的熔化规律是为论述第二部分,即熔焊过程中的化学反应准备条件的,而第三部分则是冶金反应之后的过程和结果。

这本书较深入地论述了熔焊过程的基本原理,介绍了一些新的试验方法,引用了许多新的实验数据,并在某些方面进行了定量分析,反映了近年来熔焊过程中基本物理-化学规律的研究成果。但在某些方面显得有些繁琐。

本书可以作为从事焊接工作的研究人员、工程技术人员、高等学校焊接专业的教师和学生的参考书。

本书的第一篇是由赵裕民翻译的,第二篇是由张炳范翻译的,第三篇是由贾安东翻译的。张文钺和霍立兴二同志对译稿进行了审定。

由于译者水平所限,错误之处在所难免,希读者批评指正。

在校正中我们发现原书公式10多处有误,特在此次印刷中改正,不再另加译者注。

1982年10月

## 序 言

对熔焊时进行的物理-化学过程规律性的认识和控制这些过程的本领,是制定合理焊接工艺的基础。

由于下列过程的结果而形成熔焊接头:母材、电极金属和同时采用的保护材料(药皮、焊剂)的熔化;金属与周围介质的相互作用和熔池金属凝固时焊缝的形成。据此,本书由如下三篇组成: I——“金属和焊接材料的熔化”, II——“焊接时的化学反应”, III——“焊缝金属的成型”。

紧密联系熔焊的各别形式:电弧焊(各种方法)、电渣焊、电子束焊等等的特点,来阐明熔焊的规律。

电弧焊与其他焊接方法相比在应用上占首要地位,所以最注意的是电弧焊。

书中引用了关于各种金属和合金焊接的资料,而这些金属和合金对于某种方法、过程或现象来说是最典型的。同时考虑了被焊金属对所讨论的规律的影响,例如材料的热物理性质对其在焊接时加热和熔化的影响。

书中不包括在焊接热的影响下,母材(和焊缝金属)组织和性能的变化问题(其中包括材料可焊性的所有问题),因为这超出了本书讨论的范围。根据这个理由,本书也没有讨论焊接应力、变形、焊接接头强度以及焊接热源的物理学。

本书打算献给熟悉焊接工艺和物理-化学原理的读者。但是,在个别情况下,对所运用的物理-化学概念也给予简要的说明,而这些说明或者在指导焊接方面阐明得不够充分,或者在解释上可能有不同的说法。

书中有一些争论性质的材料,作者将感谢所有对它们提出意见的读者。

# 目 录

## 第一篇 金属和焊接材料的熔化

第一章 熔焊能源 .....	1
1. 能源的总功率和有效功率 .....	1
2. 能源的效率 .....	4
3. 热源的理想模型和被焊金属中温度场的计算 .....	10
4. 焊接热源的热流密度及其分布 .....	17
5. 焊接热源作用下材料的蒸发和损失 .....	24
6. 能源对被焊材料的机械作用 .....	28
7. 焊接电弧的动力学特性 .....	33
8. 热源——渣池的特性 .....	42
第二章 电极金属的加热和熔化 .....	44
9. 电极熔化过程的宏观特性 .....	45
10. 焊接热源特性对电极熔化的影响 .....	49
11. 焦耳热对电极熔化速度的影响 .....	59
12. 电极金属滴状熔化和过渡的规律性 .....	64
13. 电极金属熔滴的热焓及其温度 .....	91
14. 电极加热的有效系数和电极端部的热平衡 .....	103
15. 金属的飞溅、蒸发和氧化损失 .....	106
16. 电极熔化的特殊情况 .....	109
第三章 母材(被焊金属)的熔化和焊接熔池的形成 .....	113
17. 母材(被焊金属)熔化过程的效率 .....	113
18. 焊接条件对熔化区尺寸和形状的影响 .....	121
19. 熔化区尺寸的计算 .....	130
20. 焊接熔池 .....	140
第四章 焊接材料(药皮、焊剂)的加热和熔化 .....	159
21. 焊条药皮和粉芯焊丝药芯的加热和熔化 .....	159
22. 焊剂的熔化 .....	168

## 第二篇 焊接时的化学反应

第五章 焊接时金属的保护及其冶金处理 .....	171
23. 金属的保护 .....	172
24. 金属、保护材料和周围介质之间的化学反应 .....	183
25. 焊接过程中再熔化金属成分的变化 .....	211
第六章 焊接热力学和动力学计算基础 .....	220
26. 过程的主要阶段和在各阶段上反应进行的条件 .....	220
27. 焊接时平衡的热力学计算 .....	225
28. 关于反应动力学和焊接时动力学计算的概念 .....	236
第七章 焊接材料加热时的反应 .....	246
29. 大理石分解和二氧化碳对锰氧化的动力学 .....	247
30. 焊接材料加热时进行的一些其他反应 .....	257
第八章 熔滴阶段的反应 .....	263
31. 熔滴阶段反应动力学 .....	263
32. 空气中的氧对熔滴中锰和硅氧化的试验研究 .....	273
第九章 熔池中的反应 .....	278
33. 过渡时期熔池中的反应动力学 .....	279
34. 在熔池伪稳定状态中反应的动力学 .....	285
35. 熔池中反应的试验研究 .....	289
第十章 焊接时金属与气体和熔渣相互作用过程中个别阶段的作用 .....	300
36. 金属与气相相互作用时熔滴和熔池阶段的作用 .....	302
37. 金属与熔渣相互作用时熔滴和熔池阶段的作用 .....	306
38. 描述焊接过程各阶段上进行化学反应的基本方程 .....	313
第十一章 焊接时金属的合金化 .....	316
39. 通过焊接材料合金化过程的物质平衡 .....	317
40. 合金元素由熔渣向金属中的过渡和残留在熔渣中的损失 .....	320
41. 合金元素的过渡系数 .....	323

## 第三篇 焊缝金属的成型

第十二章 规定焊缝形状中获得 .....	329
----------------------	-----

42. 决定焊缝形状的基本因素 .....	330
43. 焊缝形状参数的近似计算 .....	344
44. 焊缝形状的控制方法 .....	347
<b>第十三章 焊缝金属中宏观不均匀性的形成 .....</b>	<b>351</b>
45. 不同成分的金属熔合时由于混合不充分在焊缝金属中形成的 不均匀性 .....	353
46. 通过焊接材料合金化时焊缝金属中不均匀性的形成 .....	358
<b>第十四章 熔池吸收及析出气体和焊缝金属中气孔的形成 ...</b>	<b>374</b>
47. 熔化金属吸收气体及熔融体析出气体的基本规律 .....	375
48. 在电弧放电条件下熔化金属吸收气体的特点 .....	386
49. 焊缝金属中气孔的形成及其防止方法 .....	398
<b>第十五章 非金属夹杂物的形成和排除 .....</b>	<b>414</b>
50. 焊缝金属中非金属夹杂物的来源和种类 .....	414
51. 非金属夹杂物从焊接熔池中的排除 .....	430
<b>参考文献 .....</b>	<b>434</b>



# 第一篇 金属和焊接材料的熔化

## 第一章 熔焊能源

焊接时,焊件局部区域的金属受到加热和熔化。用于加热和熔化金属的局部高温能源有:电弧、等离子流、渣池、电子束、激光束以及其他能源。

由此可知,各种熔化焊接方法首先按照能源的类型分成电弧焊、等离子焊和电渣焊等等。

在这个总分类中,焊接方法是按照该类型热源的特征及其使用条件来划分的。

这样一来,应用最为广泛的电弧焊,又可包括按其不同特征分成的许多种方法。例如,包括熔化极和不熔化极焊接,有保护和无保护焊接,手工焊和自动焊等等。

焊接时金属的加热和熔化,在使用电弧、渣池、电子束的情况下,是电能转变为热能的结果。在使用激光的情况下,是光能转变为热能的结果。若使用气体火焰,则是化学反应能转变为热能的结果。所以,人们常常讨论焊接热源问题。

从工艺观点,也就是从对材料(工件)的热作用观点来看,这些能源的主要特性是:

能源的有效功率(传递给被加热物体的功率);

热流能量的分布及其密度;

能源的工作规范(短时的,连续的,脉冲的)。

此外,能源对被焊材料的机械作用也具有相当**重要的意义**。

### 1. 能源的总功率和有效功率

焊接(和用局部能源加热的其他形式的加工)时,并非**是能源**

的全部功率  $q_0$  (即所谓能源的总功率) 都输送给被加工的材料, 而只是它的一部分, 这部分功率被称为能源的有效功率, 即

$$q = \eta_{\text{н}} q_0 \quad (1-1)$$

其余部分  $(1 - \eta_{\text{н}}) q_0$  不可避免地消耗在辐射、与介质对流热交换等方面。能量传至工件之前在路径上的损失, 本质上取决于焊接规范和焊接条件。所以同一  $q_0$  值能够对应着不同的  $q$  值。

有效功率由过程的热测试验来确定。由于实验测定  $q$  的工作量很大, 所以试验通常在限定数量的焊接规范和条件下进行。在所研究的焊接规范和条件的范围内, 由试验求出比值  $q/q_0 = \eta_{\text{н}}$  的平均值, 或者建立  $\eta_{\text{н}}$  与过程参数的关系。

Н. Н. 雷卡林 (Рыкалин) 把系数  $\eta_{\text{н}}$  称为工件加热过程的有效系数。为了简化, 我们把  $\eta_{\text{н}}$  称为能源的有效系数。

根据已知的  $\eta_{\text{н}}$ , 由关系式 (1-1) 求出给定  $q_0$  值的有效功率。

根据已知的能源工作参数, 求出能源的总功率  $q_0$ 。在许多情况下, 准确地确定  $q_0$  是困难的。

**焊接电弧的功率** 以瓦特表示时, 等于电弧电压与电流的乘积:

$$q_0 = \psi UI \quad (1-2)$$

式中  $\psi$ ——修正系数。

在交流电情况下, 这个系数考虑了电流和电压曲线与正弦波形的偏差。用直流电焊接时, 一般取  $\psi = 1$ 。但实际上, 由于金属的滴状过渡 (常常伴随短路) 和其他原因引起的电流和电压的波动, 所以  $\psi \neq 1$ 。计算  $\psi$  具有一定的困难。

用瓦特表直接测量  $q_0$  是最准确的。

在  $\psi = 1$  时, 公式 (1-2) 可以求得  $q_0$  的象征值。 $q_0$  与其实际数值偏差的大小, 取决于计算时取用的  $U$  和  $I$  值与它们的平均积分值相差的程度。

根据式 (1-2) 进行计算时, 一般不考虑电极外伸长度上的电压降。例如, 用单根电极焊接时, 该电压降每 100 安约为 1 伏<sup>[144]</sup>。不但在直流电的情况下取  $\psi = 1$ , 而且对于交流电, 也常常取

$\psi=1$ , 虽然在这种情况下电弧的有效功率与视在功率有很大不同。这就使得难于比较不同研究者的数据。

**等离子流的功率** 实际上就是等离子发生器喷口处气体流的功率, 它等于喷口处单位质量气体的平均热焓和气体的平均质量速度的乘积。

但是, 由于实验测定等离子流的热焓是比较复杂的, 所以它的功率通常由式 (1-2) 进行计算。公式中包括等离子发生器中用于加热阴极和其他部件的能量损耗, 这些损耗决定于等离子发生器的结构, 可达  $q_0$  的 50% 甚至 50% 以上。在这样一些情况下, 把  $q_0$  提得过高会使系数  $\eta_n$  相应降低。

为了算出电渣过程的功率, 也可以利用公式 (1-2), 这时取渣池中的电压降代表  $U$  (由于流过电极和金属熔池的电流析出的热量很少, 可以忽略)。利用式 (1-2) 也可以算出电子束过程的功率, 这时把  $I$  理解为束流强度, 而把  $U$  理解为加速电压。

**量子发生器的束流(激光)功率** 以脉冲规范工作时, 用脉冲测热的方法来确定(忽略有关时间结构)。如果  $s$  表示脉冲能量,  $\tau$  表示脉冲持续时间, 则脉冲输出功率为

$$q_0 = \frac{s}{\tau}$$

但是必须注意的是, 工作在所谓自由发生规范的激光脉冲, 是由单个短时间的突然发光即脉冲组成, 它在晶体发光波形图上呈现一组尖峰。在这种情况下, 光束对材料的作用, 不只是由脉冲期间的平均功率决定, 而且还与单个尖峰的特性有关。

一般, 用于焊接的激光脉冲能量为 10~40 焦耳。在这种情况下可以焊接厚度为 0.5~2.0 毫米以下的金属。

人们正在开始利用光束(目前还在实验室条件下)来作为焊接(钎接)热源, 例如应用超高压氙灯的聚焦辐射, 太阳辐射等。在焦点处光束析出的功率取决于灯和整个光学系统的参数。根据试验数据, 它占灯的输入电功率的 20%, 甚至 20% 以下<sup>[75]</sup>。

**气体火焰的总热功率** 由可燃气体的化学性质决定, 并等于

单位体积可燃气体的最低热值  $A$  和气体消耗量  $M$  的乘积,

$$q_0^\ominus = AM$$

乙炔——氧混合气体的最低热值是 4800 千焦耳/米<sup>3</sup> (11470 卡/升)。若气体消耗量  $M$  以升/小时表示, 则

$$q_0 = \frac{48000}{3600} M = 13.3M \text{ (瓦)}$$

## 2. 能源的效率

系数  $\eta_n$  表示由能源传递给被加工工件的那部分能量份额。正确选定  $\eta_n$  (也就是  $q$ ) 对于整个焊接热计算来说具有很大意义。因为在这个问题上文献中的报导很不一致, 所以我们将详细研究影响  $\eta_n$  的因素。

决定焊接能源能量损失的主要因素是: 随被加热的气体带走的热量, 它由气流对金属的对流热传递条件决定; 与周围介质的热交换; 用于加热焊接设备和装置的各种部件 (例如, 非熔化电极, 电弧焊炬喷嘴, 电渣焊的滑块等等) 的损失; 由于反射一部分射至焊件上的能流而造成的损失, 例如从被焊材料表面光辐射的反射等。

对不同的能源, 不同形式的损失占优势。能源析出能量 (转变为热能) 的部位具有很大意义。例如, 气焊时在火焰处将能量转变为热量, 并且仅通过热交换 (主要是对流) 将热量传至工件。电弧焊时, 在工件和电极的斑点处, 以及在弧柱中析出能量, 在这些放电部分之间的能量分布及其利用的程度影响到工件的加热效率。此外, 电子束焊接时, 全部能量都在被加工的材料上析出, 这就保证得到高的  $\eta_n$  值。

我们来分析一下在使用各种能源 (各种焊接方法) 时, 决定  $\eta_n$  值的主要因素。

**焊接电弧和等离子体** 用光焊条、药皮焊条和粉芯焊丝焊接时, 热损失主要是由于弧柱能量利用得少和金属飞溅造成的。在这方面, В. А. 佩特鲁尼契夫 (Петруничев) 的试验是很典型的, 他

⊖ 原著误为  $q$ , 应为  $q_0$ , ——译者注

在  $I = 310 \sim 350$  安、 $U = 24 \sim 27.5$  伏、 $v_{\text{св}} = 40$  米/时和不同的热交换条件下, 在钢板上进行明弧堆焊时, 得到了不同的  $\eta_{\text{н}}$  值<sup>[92]</sup>:

$\eta_{\text{н}} \ominus$	
除与焊缝宽度相等的一窄条外, 钢板表面都用石棉覆盖	$\frac{0.63 \sim 0.74}{0.7}$
钢板表面不覆盖	$\frac{0.77 \sim 0.82}{0.79}$
在深度为 15 毫米的沟槽中堆焊	$\frac{0.75 \sim 0.91}{0.89}$

在 А. П. 戈里亚契夫 (Горячев) 和 В. А. 泽列宁 (Зеленин) 用钨电极焊接钛合金的论文中得到了类似的结果<sup>[24]</sup>。当电极处于板料表面上方 3 毫米时,  $\eta_{\text{н}} = 0.73$ 。与此相比, 当电极深入材料表面下凹 6.5 毫米时,  $\eta_{\text{н}}$  增加到 0.88。作者指出, 随着电极的深入,  $\eta_{\text{н}}$  值的发散程度减小。

T 型焊比在平面上堆焊的  $\eta_{\text{н}}$  大 5~10%, 这是因为较好地利用了弧柱的辐射和环绕 T 型壁的气体的热量, 以及飞溅损失较少。在坡口中焊接时, 应有类似的结果。

$\eta_{\text{н}}$  随金属厚度的增加而增加, 这一点已为不同研究者所指出 (表 1-1)。看来, 这主要是与电弧的深入有关 (坡口深度随金属厚度而增加; 在不开坡口进行焊接时, 采用深熔金属)。

表 1-1

焊 接 方 式	金属厚度 $\delta$ (毫米)	系数 $\eta_{\text{н}}$
直径 4 毫米白垩焊条, 手弧焊	1.5~2.5	0.67~0.77
	5	0.83~0.84
直径 4~5 毫米 УОНИ-13 焊条, 手弧焊	4	0.76
	14~20	0.84
АН-348 焊剂, 直径 2 毫米的 С <sub>9</sub> -08А 焊丝	8	0.86
	14	0.93
直径 2.2 毫米的粉末焊丝 ПП-Ю6	4	0.79
	8	0.83
	14	0.89

⊖ 此表和后面的表格, 分子中所给的是最小值和最大值, 分母是平均值。

电流对  $\eta_{\text{a}}$  有双重影响。一方面, 随着电流的增加, 由于电弧的深入而使热传递增加。另一方面也使弧柱温度提高, 而且辐射和飞溅损失增多。电流的影响能够以不同的方式表现出来, 要取决于这些因素中那一个占优势。

在气体保护焊时, 对于上述因素, 还要补充难以考虑的气体流量的影响和焊接喷嘴中的热量损失。后者由喷嘴的结构和冷却的强烈程度来决定。由于这些因素通常没有适当的数值, 而使不同研究者的数据有很大差别。

在埋弧焊时, 热损失的根源之一是加热焊剂, 它随电弧的加长(提高电压)而增大。气体保护焊时, 必须注意到气体的物理性质, 因为气流与金属的对流热交换(放热系数), 电极与工件之间能量分布到某种程度, 以及过程的稳定性(飞溅程度)都由气体的物理性质决定。例如, 在氮气中焊接时阳极的  $\eta_{\text{a}}$  比在氩气中焊接时大约高 25%。

在等离子焊接, 即压缩(等离子)电弧焊接, 特别是在间接等离子焊接时, 能源的效率包括等离子发生器的效率  $\eta_{\text{r}}$  和束流的效率

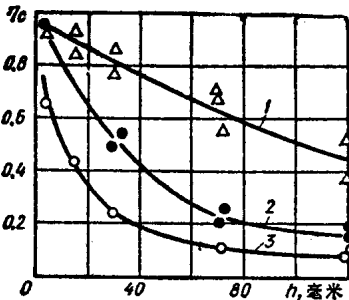


图 1-1 等离子束流的效率与  
氩气流量  $v_{\text{Ar}}$  和被加热物体距  
喷嘴口的距离  $h$  的关系

- 1— $v_{\text{Ar}}=0.25$  米<sup>3</sup>/小时
- 2— $v_{\text{Ar}}=1.2$  米<sup>3</sup>/小时
- 3— $v_{\text{Ar}}=4.3$  米<sup>3</sup>/小时  
( $I=200$  安<sup>[112]</sup>)

$\eta_{\text{c}}$ , 即

$$\eta_{\text{c}} = \frac{q}{q_0} = \frac{q_{\text{r}}}{q_0} \frac{q}{q_{\text{r}}} = \eta_{\text{r}} \eta_0$$

等离子发生器的效率  $\eta_{\text{r}}$  由它的结构参数和工作规范决定。

等离子束流的效率  $\eta_{\text{c}}$  随着喷嘴口到被加工材料的距离的增加而降低, 因为此时束流同周围介质的热交换损失增大。当束流从层流状态过渡到紊流状态时, 这种损失便急剧增加。随着气体流量的增加, 损失也随之增大(即  $\eta_{\text{c}}$  降低), 这是因为与介质的热

交换损失增加, 而且由于束流平均温度降低, 而恶化了对材料的热

传递(图 1-1)<sup>[110]</sup>。

**电渣渣池** 电渣焊时, 焊件和滑块中的热流之比对  $\eta_{\text{H}}$  有很大影响。随着被焊金属的厚度、导温系数和焊接速度的增加, 这个比例变得比较有利, 因为对工件的热输入得到改善, 而对滑块的热输入(如果滑块的面积保持不变)则保持不变或减少(随着焊接速度的提高)。所以板厚从 50 毫米变化到 400 毫米时,  $\eta_{\text{H}}$  几乎提高一倍(图 1-2)<sup>[106]</sup>。

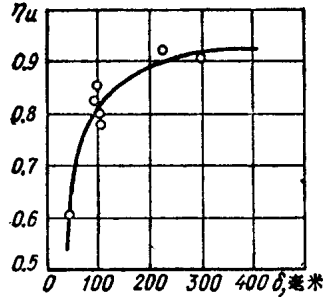


图 1-2 电渣焊时的  $\eta_{\text{H}}$  与金属厚度  $\delta$  的关系

**气体火焰** 用气体火焰加热时, 其加热的有效系数  $\eta_{\text{H}}$  取决于燃烧的完全程度和火焰与金属表面的热交换条件。随着乙炔流量(喷嘴号数)的增加, 燃烧的完全程度和热交换率降低<sup>[108]</sup>。而在同一流量的可燃气体情况下,  $\eta_{\text{H}}$  随喷嘴到工件表面距离的增加而降低。可燃气体和氧的混合比, 焊炬的倾角和某些其他因素对  $\eta_{\text{H}}$  也有影响。被加热材料的厚度及其热物理性质也起很重要的作用。随着金属的厚度和导热性的提高, 由于向金属深处的排热增加而使金属表面的温度降低, 能源对金属的对流热传递增强, 因而随气体离散而造成的损失减少。

例如, 金属的厚度从 1 毫米增加到 16 毫米时, 气体火焰的  $\eta_{\text{H}}$  增加 30~40%, 当导温系数从  $9 \times 10^{-6}$  增加到  $110 \times 10^{-6}$  米<sup>2</sup>/秒<sup>⊖</sup> (低碳钢和铝)时, 气体火焰的  $\eta_{\text{H}}$  增加 12%<sup>[108]</sup>。

**电子束和光束** 电子束与金属表面相遇时, 能量损失的主要形式是:

1) 从金属表面反射电子所带来的损失。这种损失主要由被加工金属的性质(它的原子序和原子质量)决定。根据初步计算, 对于铝来说, 它占束流功率的 8~11%, 对于钨, 它占 30~40%。

2) 从熔池表面热电发射方面的损失, 根据计算, 它能达到束

⊖ 原著误为 110 米<sup>2</sup>/秒, 已更正。——译者注

流功率的百分之几。

3) 把电子束缚在原子核场中而产生伦琴射线辐射所造成的损失,它取决于核电荷(原子序),加速电压和束流强度。在焊接时所采用的规范范围内,这种损失不超过发射功率的1%。在蒸气电离及其他方面的损失更少。

电子束焊接时,正如 В. Ф. 列兹尼钦科 (Резниченко) 和 А. Ф. 胡迪谢夫 (Худышев) 的热测试验所证明的那样,  $\eta_n$  随束流强度的增加而增大(图 1-3)。同时熔化区的宽度变窄而深度增加(焊缝的成型系数增大)。这是因为电子与通道壁的碰撞是非弹性的,随着束流向金属中深入,反射出来的电子所携带的那部分能量也就减少。这一点被带有深度可变,以便模拟通道的沟槽试验所证实。随着沟槽孔径角( $\alpha$ 角)的增大,束流效率便降低(图 1-4)。

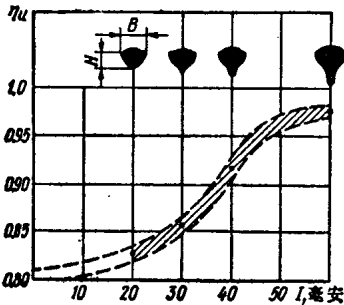


图 1-3 电子束焊接时  $\eta_n$  和电流强度的关系 ( $U=20$  仟伏)

$B$ —焊缝宽度  $H$ —焊缝高度

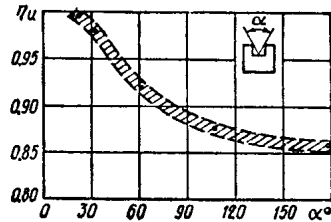


图 1-4  $\eta_n$  与沟槽孔径角的关系 ( $I=30$  毫安,  $U=20$  仟伏)

用激光束焊接(或加工)时,其效率主要由金属表面反射光的条件决定,并与表面的光学性质、状态和能流的比功率有关。显然,

$$q = \eta_n q_0 \approx (1-r) q_0$$

式中  $r$ ——反射系数(对于钢,  $r=0.4\sim 0.6$ ; 对于抛光的铜,  $r\approx 0.1$ );

$q_0$ ——激光的输出功率。

完全吸收入射光束能量的物体称为绝对黑体。对于实际的所



谓灰色的物体,其吸收能力永远小于1。为了提高光源的 $\eta_{\text{H}}$ ,必须提高被表面吸收的能量,例如利用人工将表面涂黑。

举例来说,在Г. Д. 尼基弗罗夫(Никифоров)等人的论文中指出,用光束焊接铝时,当从被烟黑覆盖的黑色表面(黑度系数大于0.9)过渡到光洁的抛光表面(黑度系数约等于0.1)时,即使能源工作规范保持不变,工件加热的有效系数也会减小到使金属不再熔化的程度<sup>[75]</sup>。

为了提高激光的 $\eta_{\text{H}}$ ,必须增加被加工材料表面吸收的光能,为此在某些情况下要采用人工涂黑表面。

各种焊接方法的 $\eta_{\text{H}}$ 值示于表1-2中,这些数值是由不同研究者取得的。

表 1-2

焊 接 方 法	$\eta_{\text{H}}$	焊 接 方 法	$\eta_{\text{H}}$
焊 条, 直 流	0.75~0.85	钨 极 氩 弧 焊 <sup>⊖</sup>	0.65~0.75
焊 条, 交 流	0.65~0.75	碳 弧 (焊 接 和 加 热)	0.50~0.60
埋 弧 焊	0.80~0.90	气 体 火 焰 (焊 接 和 加 热)	0.30~0.80
熔 化 极 氩 弧 焊	0.70~0.80	电 子 束	0.80~0.95

我们注意到,在同一过程的不同研究所得出的 $\eta_{\text{H}}$ 值有很大差别,这不仅是因为焊接规范和条件不同,而且在测定 $q_0$ 时也有误差。

例如,用药皮焊条在直流下进行焊接时, $\eta_{\text{H}}=0.75\sim0.85$ ,而在交流(当 $\psi=1$ )时, $\eta_{\text{H}}=0.65\sim0.75$ 。在交流氩弧焊时, $\eta_{\text{H}}=0.5\sim0.55$ ,而在考虑电弧有效功率的条件下, $\eta_{\text{H}}=0.7\sim0.8$ <sup>[109]</sup>。

К. 阿恩多(Андо)和К. 米基(Мики)的研究工作指出,在考虑 $\psi$ 以及电极伸出长度上的电压损失和功率降低的情况下,当用各种药皮焊条焊接时,由于存在短路而不能找出直流和交流情况下的 $\eta_{\text{H}}$ 值之间任何本质上的差别<sup>[114]</sup>。这时,24种工业牌号焊条

⊖ 在原著表1-2中,“钨极氩弧焊”一项重复,已删去。——译者注