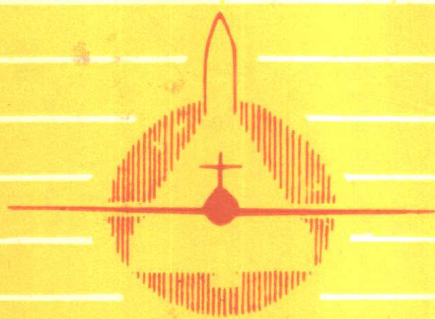


焊 接 实 验

周 达 沈一龙 主编



國 防 工 業 出 版 社

焊 接 实 验

周 达 沈一龙 主编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书共分八章。编入了熔焊原理、金属材料的焊接、弧焊电源、气体保护焊工艺及设备、电阻焊、钎焊工艺、焊接结构及焊接检验等八门焊接专业课的37个实验,实验总学时为116学时。每节除较系统地阐述实验目的、原理和方法步骤外,还对实验结果的整理与分析提出要求,并留有思考题。对于某些专用和通用的测试仪器,分散在各章节中以附录的形式予以介绍。

书中所有实验内容均经过教学实践,再现性好。

本书主要针对航空院校焊接专业编写,也可供各类焊接专业及训练班参考。

焊 接 实 验

周 达 沈一龙 主编

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张 12¹/₂ 288千字

1985年12月第一版 1985年12月第一次印刷 印数: 0,001—3,000册

统一书号: 15034·3042 定价: 2.60元

前 言

本书是按照航空焊接专业教材编写会议确定的《航空焊接实验》教材大纲编写的,尽量反映教学大纲所要求的内容及近年来航空院校焊接专业在教改和科研方面的成果。实验教材充分考虑了课程和实验配合的需要,注重实践性原则,注重学生智能和实验研究能力的培养。书中所有编入的实验内容都经过了教学实验的实践,重复性好、效果可靠。

本书共列入熔焊原理、金属材料的焊接、弧焊电源、气体保护焊工艺及设备、电阻焊、钎焊工艺、焊接结构及焊接检验等八门专业课的37个实验,实验总学时为116学时。

本书可作为航空焊接专业实验课教材,可独立开设,也可配合各门课程的书本教学逐章开设。本书也可供非航空院校焊接专业师生和有关技术人员作参考。

书中所列的实验内容有两类:一种是验证性实验,即主要是用实验来验证以加深理解课堂讲授的理论。另一类是带有一定的综合性的实验,它要求学生综合运用若干章节以至几门课程的知识,通过实验来培养分析问题和解决问题的能力。书中“实验材料”项所列的数量,系指完成教材中该实验全部内容所需的实验材料或试片,并不完全是一组实验所需的数量。对于综合性的实验,常常要分组进行,然后综合各组的实验结果得出共同的结论或规律,也可组织实验课讨论。

由于力求各章实验说明中所用符号同对应的教科书保持一致,因此个别参数在不同章中所使用的符号不尽相同。

参加本教材编写工作的有:北京航空学院周达、邹莱莲、钟明之(第一、二章)、邹僊(第六章),西北工业大学钱聚英(第四章)、吴禄(第五章)、孙志雄(第七章),南昌航空工业学院陈圣鸿(第三章)、胡葆珍(第八章)。北京航空学院张义淑、胡特生、罗树芳、南昌航空工业学院万秋生等参加了部分章节的编写工作。由周达、沈一龙同志担任主编,并由周达同志负责统编工作。

本书由陈幼松同志审稿,南昌航空工业学院的张仁甫、毕惠琴同志参加审稿讨论,北京航空学院王淑琴同志负责绘图工作,一并在内表示感谢。此外,书中的参考文献只列出了公开发表的部分,未列入内部资料,编者在此向原作者表示谢忱。

限于编写者的水平,书中肯定会有不少疏漏和错误,恳切希望读者给以批评指正。

目 录

第一章 金属熔焊原理实验	1
第一节 焊接热循环的测定	1
第二节 焊缝金属中扩散氢的测定	7
第三节 防锈铝合金焊缝中气孔	13
第四节 焊接热裂纹	16
第五节 焊接接头金相组织分析	21
第二章 金属材料熔焊工艺实验	28
第一节 合金结构钢冷裂倾向的测定	28
第二节 30CrMnSiA 钢的金相组织分析、硬度测定和冷裂纹微观形态的观察	36
第三节 不锈钢焊接接头的晶间腐蚀实验	42
第四节 热处理强化铝合金焊接裂纹倾向的测定	46
第五节 钛合金的焊接保护及焊接接头室温冷弯角的测定	52
第三章 弧焊电源实验	59
第一节 电弧静特性的测定与交流电弧的电流、电压波形的观察及分析	59
第二节 弧焊电源外特性与调节特性的测定	63
第三节 弧焊电源动特性的测定	68
第四节 磁放大器输出特性的测定	76
第五节 脉冲弧焊电源输出电流波形的观察	80
第六节 晶体管式弧焊电源实验	84
第四章 气体保护焊工艺及设备实验	89
第一节 焊接电弧及保护气流运动状态的显示与分析	89
第二节 CO ₂ 气体保护焊短路过渡电弧的稳定性	93
第三节 熔化极脉冲氩弧焊工艺因素对熔滴过渡及焊缝成形的影响	97
第四节 微束等离子弧的双弧现象及其控制	102
第五节 大电流等离子弧穿孔焊接焊缝成形的控制	105
第六节 焊接电弧和熔滴过渡的高速摄影影片观察与分析	108
第五章 电阻焊工艺及设备实验	116
第一节 点焊规范参数对于熔核尺寸及接头机械性能的影响	116
第二节 常用材料点焊焊接性分析	126
第三节 点焊机同步控制装置主要电路波形的观察与电路故障的排除	134
第六章 钎焊工艺实验	141
第一节 钎焊接头的金相组织分析	141
第二节 钎料对母材的润湿性	144
第三节 铝用氯化物硬钎剂的组成	146
第四节 铝合金的真空钎焊	149

第七章 焊接结构实验	154
第一节 焊接加热及冷却过程中接头动态弯曲变形的测量与分析	154
第二节 焊接残余应力的测量	160
第三节 焊接接头工作应力分布的测定	164
第四节 焊接接头断裂韧性的测定	167
第八章 焊接检验实验	174
第一节 焊接缺陷的 X 射线检验	174
第二节 焊接缺陷的超声波检验	179
第三节 焊接缺陷的磁粉检验	188
第四节 焊接缺陷的荧光检验	191

第一章 金属熔焊原理实验

第一节 焊接热循环的测定

(参考学时 课内 2 学时)

一、实验目的

- (一) 了解焊接热循环曲线的特征和主要参数;
- (二) 了解焊接规范对热循环曲线的影响;
- (三) 掌握测定焊接热循环曲线的方法。

二、实验装置及实验材料

- | | |
|--|-----|
| (一) 钨极自动氩弧焊机 | 1 台 |
| (二) 电容储能式热电偶焊机 | 1 台 |
| (三) 镍铬-镍硅或铂铑-铂热电偶丝 ($\phi 0.3 \sim 0.5 \text{mm}$) | 3 对 |
| (四) 氩气 | 1 瓶 |
| (五) X - Y 函数记录仪 | 1 台 |
| (六) 试件 $300 \times 200 \times 20 \text{mm}$ 低碳钢板 2 块(可用 A3、A5、09Mn、16Mn 等材料) | |
| (七) $0 \sim 300 \text{ (A)}$ 直流电流表、秒表、 $\phi 5 \text{mm}$ 钻头、 $\phi 5 \text{mm}$ 平头铰刀、深度尺等 | |

三、实验原理

焊接热循环是指焊件上某点经历焊接过程时的温度变化,它可以用 $T = f(t)$ 这一函数关系来描述。按此关系所画出的曲线称为该点的热循环曲线。

焊接过程中,焊件上直接被热源加热的部位将被熔化形成熔池。连续相接的熔池冷却凝固后即成为焊缝。焊缝以远的部位则保持固态,焊件上各点由于处于焊件上的位置不同,受到焊接热的作用不同而经历着不同的热循环,它们的热循环曲线也就不同。图 1-1 为低合金钢手弧焊时,焊件上热影响区不同点的焊接热循环曲线。从该图可以看出:离焊缝熔合线越近的点,加热速度越大,峰值温度越高,冷却速度也越大,并且所有各点的加热速度都比冷却速度要大得多。这表示焊接接头热影响区的金属都经历了一个自发的特殊的热处理过程,产生了相变、晶粒长大、应力和变形等,从而对焊件金属的组织 and 性能发生强烈的影响。因此,实际测量并正确控制焊接热循环,对于控制接头热影响区金属的组织 and 性能具有重要意义。

焊接热循环曲线固然可以借助焊接热过程的理论公式 $T = f(x, y, z, t)$ 计算出来,但由于计算时所采用的假定条件与实际焊接条件出入较大,计算所得的理论热循环曲线对比实际测得的曲线仍有很大误差,故在实际上多用实测的方法来获 得 热 循 环 曲线。

测定焊接热循环的方法,大体上可分为接触式和非接触式两类。在非接触式测定法

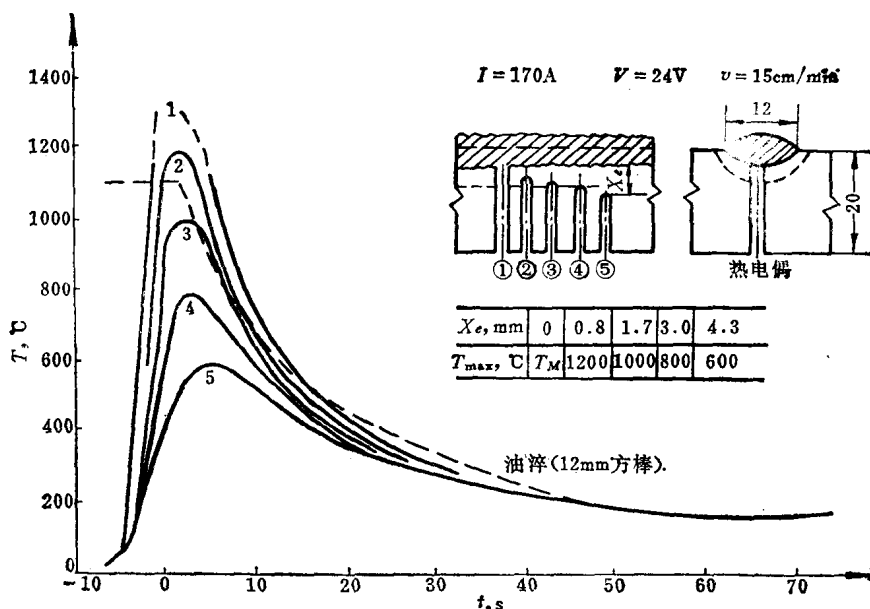


图1-1 低合金钢手弧堆焊时焊缝附近各点的热循环
(t —从电弧通过测温点正上方时开始算起的时间)

中,近年来发展了红外测温及热成像技术。这种方法的实质是从弧焊熔池的背面,摄取温度场的热象(红外辐射能量分布图),然后把热象分解成许多象素,通过电子束扫描实现光电和电光转换,在显象管屏幕上获得灰度等级不同的点构成的图象,该图象间接反映了焊接区的温度场变化,经过计算机图象处理和换算,便可得出某一瞬间或动态过程的真实温度场。这种测定方法的优点是测定装置不直接接触被测物体,不会搅动和破坏被测物体的温度和热平衡,响应时间快、灵敏度高,并且可以连续测温 and 自动记录。目前国内已开展了这方面的研究,但由于这种测定法需要较复杂的设备和技术,所以尚未大量推广。

另一种方法为接触式测温,例如目前最常用的热电偶测温。它是建立在热电偶两端由于温度差而产生热电势的基础上。测温时把热电偶的热结点焊在被测点上,热电偶的另一端接在 X - Y 函数记录仪上,焊接时由于热结点受热产生热电势,并把这个电势作为 X - Y 函数记录仪的输入信号,经放大后由记录仪表笔自动记录下来,然后利用热电势温度换算表,即可得到被测点的热循环曲线。这种测温方法由于热电偶的联接,会影响到被测物体的温度及热平衡,有时将降低测温的精确度,而且由于记录仪的机械惰性等原因,对于微小体积的快速温度变化响应速度也慢。但是,它的突出优点是简单、直观、测出的温度有一定的精确性,因而仍是目前最主要的测温方法,本实验也是利用热电偶测温方法来获得热循环曲线。

四、实验方法及步骤

(一) 实验方法

焊接热循环的测定方法如图1-2所示。测定前,把热电偶丝的端头焊入试件背面的

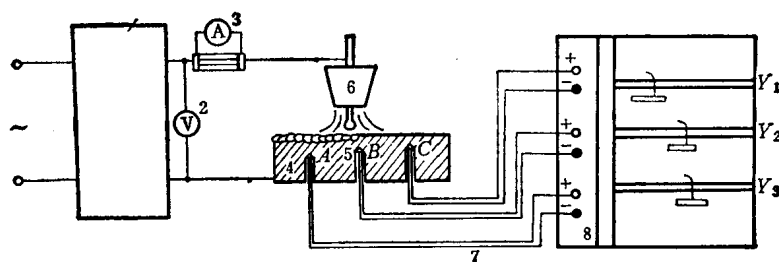


图1-2 焊接热循环曲线测定方法示意图

1—弧焊整流器；2—电压表；3—电流表；4—试件；5—测温孔；6—TIG焊炬；
7—热电偶；8—X-Y函数记录仪。

测温孔，当TIG电弧在试件表面上移动时，在X-Y函数记录仪上即可绘出工件上离熔合线不同距离的A、B、C三点的“热循环”曲线。它们实际上为热电势-时间曲线。

应使第一个测温小孔离起弧处的距离不小于80mm，以便测定时该点已处于准稳定状态的温度场。测温孔的深度越大，表示该点离熔合线越近，则该点在焊接过程中所达到的最高温度也越高。表1-1给出了采用手工电弧焊时离熔合线不同距离的各点所达到的最高温度 T_m °C，以供参考。

表1-1 钢焊接时测温点位置与最高温度的关系

最高温度 T_m (°C)	熔 点	1200	1000	800	600
测温点离熔合线的距离(mm)	0	0.8	1.7	3.0	4.7

焊接规范：板厚20mm，焊接电流170A，电弧电压28V，焊接速度2.5mm/s，焊条直径 $\phi 4$ mm

（二）实验步骤

1. 焊接热电偶 分别把每对镍铬-镍硅或铂铑-铂热电偶丝的端头以电容储能式热电偶焊机焊合，以形成热结点。在试件待焊焊道的中心线背面钻三个 $\phi 5$ mm的测温孔。孔底锥角要大于 120° ，可用平头铰刀将孔底铰成平端面，孔深各为16、17及18mm，用深度尺实测深度，并记录下来。

然后将三对热电偶的热结点分别焊到测温孔A、B及C的底部（如能将热电偶一端的两根单丝分别焊在被测点上十分接近的位置，则其测温结果比焊在一起的热结点时更为准确），要仔细检查焊接点的质量，务必保证焊牢。热电偶的正负极之间要隔开，以防短路影响测量。

2. 接X-Y函数记录仪 把热电偶的另一端分别接到X-Y记录仪上，注意把镍铬丝或铂铑丝接正极，镍硅丝或铂丝接负极。镍硅丝有磁性，可用磁铁或磁性材料加以鉴别。铂铑丝比铂丝更硬，略加弯曲便可以区分开来。注意选择函数记录仪各旋钮所置定的量程及走纸速度。

3. 焊接规范的调节 建议采用表1-2所列的焊接方法及规范参数。施焊时当焊接电弧经过被测点正上方时，即可先后得到某焊接电流下离熔合线不同距离的A、B、C三点的“热循环”曲线。

表1-2 测温用的焊接方法和规范参数

试板编号	焊 接 规 范			焊 接 方 法
	焊接电流(A)	电弧电压(V)	焊接速度(mm/s)	
1	100	12~14	2.85	钨极自动氩弧焊(不加填充丝)
2	170	12~14	2.85	同上

五、实验结果的整理与分析

根据记录纸上获得的三条“热循环”曲线，查热电势-温度换算表，把纵坐标所代表的电势换算成温度，经过整理将有关数据记入表 1-3 中。画出以温度-时间为坐标轴的 A、B、C 三点的热循环曲线。

应该注意：在用 X-Y 函数记录仪记录热电偶的热电势时，因为热电偶的冷端受环境温度的影响，往往达不到 0℃，因而对所测得的热电势应该进行修正。

表 1-3

试板编号	测温孔号	测温孔深度 $T_m(^{\circ}\text{C})$ (mm)	加热至 T_m 所需时间 (s)	900℃以上 停留时间 (s)	800~500℃ 冷却时间 (s)	550℃瞬时 冷却速度 (℃/s)	焊接线能量 (J/cm)
1	A						
	B						
	C						
2	A						
	B						
	C						
3	A						
	B						
	C						

例：冷端温度为 30℃，热电偶分度号为 LB-3（铂铑-铂分度号为 LB-3，镍铬-镍硅分度号为 EU-2），由 X-Y 函数记录仪表示的热电势为 8.421mV，试求所测点的温度 $T^{\circ}\text{C}$ 。

解：由 LB-3 热电偶分度表查得：

$$E_{\text{LB}}(30, 0) = 0.176\text{mV}$$

$$E_{\text{LB}}(T, 0) = E_{\text{LB}}(T, 30) + E_{\text{LB}}(30, 0)$$

$$= 8.421 + 0.176 = 8.597\text{mV}$$

查 LB-3 分度表得 $T = 916^{\circ}\text{C}$

如果不进行修正，根据 8.421mV 查表得

$$T = 900^{\circ}\text{C}$$

结果会产生 16℃ 的误差。

但是，实验时如果采用冷端补偿器，则可自动消除误差，因而测得的热电势可不必进行修正。

六、思考题

(一) 焊接规范的其它参数(如焊接时间 t 、电弧电压 U 、焊接速度 v 和预热温度 T_0 等)对热循环曲线有何影响?

(二) 从热循环曲线,可以得出什么判据,并用这些判据预测试板上 A 、 B 和 C 点在热循环过程中所发生的组织变化。

(三) 试以理论公式计算离熔合线最近的某一测温点上的最高加热温度 T_m 、 900°C 以上高温停留时间以及 550°C 的瞬时冷却速度。将计算所得的数值与实验测定的结果加以比较,并说明产生误差的原因。

七、附录

附录1-1 LZ3 系列X-Y函数记录仪

(一) 工作原理

X-Y函数记录仪是一种采用自动平衡原理的记录仪,它的测量电路由桥式电位差计线路组成(图1-3)。

图中 R_0 为调零电位器, R_M 为测量电位器。 R_0 及 R_M 所组成的桥路由一稳定的参考电源供电。为了降低 R_M 电位器的动触点在运转时所产生的热电势,桥路的输出采用分压形式,以提高仪表的动态性能。被测电压 U_x 与 U_R 进行比较,当两者不相等时,产生偏差电压 ΔU 。此差值输入到放大器中,经放大后使电机 M 转动,从而驱动测量电位器 R_M 的滑动触头移动,使电桥输出电压 U_R 发生改变。当 U_R 和 U_x 之差值为零时,放大器没有信号输出,电机便停止转动, R_M 的滑动触头也就不再移动,电桥便在新的位置达到了平衡。仪表的记录笔和测量电位器 R_M 的滑动触头相连,因此记录笔随滑动触头移动,并在记录纸上描绘出相应的曲线。

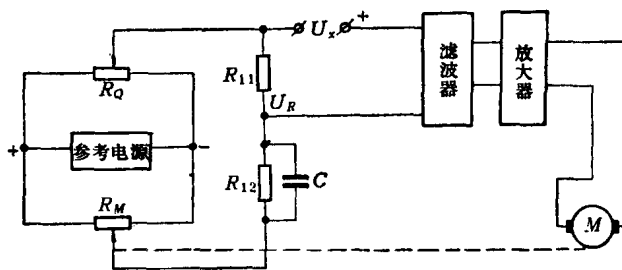


图1-3 X-Y函数记录仪测量回路原理图

当 U_R 和 U_x 之差值为零时,放大器没有信号输出,电机便停止转动, R_M 的滑动触头也就不再移动,电桥便在新的位置达到了平衡。仪表的记录笔和测量电位器 R_M 的滑动触头相连,因此记录笔随滑动触头移动,并在记录纸上描绘出相应的曲线。

LZ3系列函数记录仪是一种通用的函数记录仪。它可在直角坐标轴上自动描绘两个电量的函数关系,即 $y=f(x)$ 。另外,记录仪在 X 轴方向带有走纸机构,因此记录仪能自动描绘一个电量对时间的函数关系,即 $Y=f(t)$ 。

(二) LZ3 系列函数记录仪使用方法

1. 在仪器通电前做好下列准备:

- (1) 将“电源”及“记录”开关置于断开位置。
 - (2) 将“X-T”开关置于“X”位置,将“记录”开关打向“抬笔”的位置;将“测量”开关断开(多笔记录仪)。
 - (3) 将量程开关置于短路位置。
 - (4) 将“⊥”接线柱用联接板与“—”接线柱联接。
 - (5) 将信号接到控制箱面板接线柱上。
2. 接通电源,稍待片刻,将测量开关接通。

3. 作 $Y-t$ 运用时, 将 “ $X-T$ ” 开关打向 “ T ” 的位置并将 t 的量程开关选择至所需要的记录纸速度。

4. 根据对位移传感器标定时所用的量程, 选定 Y 轴的量程, 同时根据输入信号的变化情况, 再将零位进行适当调整。

5. 确定 $Y-t$ 运行正常后, 将记录开关打向 “记录” 位置, 即可开始实验, 进行自动记录。

附录1-2 热电势与温度对照表

温度(°C)	热电势(mV)		温度(°C)	热电势(mV)	
	镍铬-镍硅	铂铑-铂		镍铬-镍硅	铂铑-铂
0	0	0	610	25.32	5.324
25	1.00	0.143	620	25.75	5.427
50	2.02	0.299	630	26.18	5.530
75	3.06	0.466	640	26.60	5.633
100	4.10	0.643	650	27.03	5.735
125	5.13	0.830	660	27.45	5.839
150	6.13	1.025	670	27.89	5.943
175	7.13	1.228	680	28.29	6.046
200	8.13	1.436	690	28.71	6.151
225	9.14	1.650	700	29.13	6.256
250	10.15	1.867	710	29.55	6.361
275	11.18	2.089	720	29.97	6.466
300	12.21	2.315	730	30.39	6.572
325	13.25	2.545	740	30.81	6.677
350	14.30	2.777	750	31.22	6.784
375	15.35	3.013	760	31.64	6.891
400	16.40	3.250	770	32.06	6.999
410	16.83	3.364	780	32.46	7.105
420	17.25	3.441	790	32.87	7.213
430	17.67	3.538	800	33.29	7.322
440	18.09	3.634	810	33.69	7.430
450	18.51	3.731	820	34.10	7.539
460	18.94	3.828	830	34.51	7.648
470	19.37	3.925	840	34.91	7.757
480	19.79	4.023	850	35.32	7.867
490	20.22	4.121	860	35.72	7.978
500	20.65	4.220	870	36.13	8.088
510	21.08	4.310	880	36.53	8.199
520	21.50	4.418	890	36.93	8.310
530	21.93	4.517	900	37.33	8.421
540	22.35	4.617	910	37.73	8.534
550	22.78	4.717	920	38.13	8.646
560	23.21	4.817	930	38.53	8.758
570	23.63	4.918	940	38.93	8.871
580	24.05	5.019	950	39.32	8.985
590	24.48	5.121	960	39.72	9.098
600	24.90	5.222	970	40.10	9.212

温度(°C)	热电势(mV)		温度(°C)	热电势(mV)	
	镍铬-镍硅	铂铑-铂		镍铬-镍硅	铂铑-铂
980	40.49	9.326	1150	46.97	11.317
990	40.88	9.441	1160	47.34	11.437
1000	41.27	9.556	1170	47.71	11.556
1010	41.60	9.671	1180	48.08	11.676
1020	42.04	9.787	1190	48.44	11.795
1030	42.43	9.902	1200	48.81	11.915
1040	42.83	10.019	1210	49.17	12.035
1050	43.21	10.136	1220	49.53	12.155
1060	43.59	10.252	1230	49.89	12.275
1070	43.97	10.370	1240	50.25	12.395
1080	44.34	10.488	1250	50.61	12.515
1090	44.72	10.605	1260	50.96	12.636
1100	45.10	10.723	1270	51.32	12.756
1110	45.48	10.842	1280	51.67	12.875
1120	45.85	10.961	1290	52.02	12.996
1130	46.23	11.080	1300	52.37	13.116
1140	46.60	11.198			

第二节 焊缝金属中扩散氢的测定

(参考学时 课内 3 学时)

一、实验目的

- (一) 了解手工电弧焊时影响焊缝中扩散氢含量的因素;
- (二) 掌握甘油法测定扩散氢含量的方法。

二、实验装置及实验材料

- | | |
|-----------------------------------|------|
| (一) 测氢仪 | 1 台 |
| (二) 集气管 | 12 个 |
| (三) 交流电焊机 | 1 台 |
| (四) 直流电焊机 (或整流器) | 1 台 |
| (五) 试件夹具 | 1 个 |
| (六) 烘箱 (0~450°C) | 1 台 |
| (七) 吹风机、钳子、榔头、钢丝刷、瓷盘、绒布、丙酮、乙醚、酒精等 | |
| (八) 试件 低碳钢板 20×70×10mm | 35 块 |
| 20×40×10mm | 70 块 |
| (九) 焊条 ϕ 4mm 结 422 焊条 | 25 根 |
| ϕ 4mm 结 507 焊条 | 15 根 |

三、实验原理

氢对焊接接头的影响极大。氢不仅能在焊缝中生成气孔,而且是产生冷裂纹的主要原因之一。氢致裂纹常带有延迟性,往往使焊件在工作一段时间以后开裂,因而其危险性更大。氢也引起金属的微裂和发裂等。虽然这些微观缺陷不致于直接导致焊件的破坏,

但却能明显地降低金属的强度、屈服极限、冲击韧性、延伸率、断面收缩率，尤其对疲劳强度有较大的影响。

氢主要来自水和有机物。水可能以水汽的形式吸附在焊丝和工件的表面或混杂在保护气体内，也可以其它多种形式包含在金属表面的氧化膜、铁锈和焊接材料中。有机物可能是焊条药皮中的木屑、纤维素或淀粉等造气剂，也可能是沾染在工件或焊丝表面的油污。水和有机物在焊接高温下分解出氢，氢再以原子或质子的形式进入熔池，终于使焊缝金属或多或少地含有氢。因此，焊缝金属的含氢量受到许多因素的影响。如大气温度与湿度，保护气体的含水量，焊丝及工件的清理质量，焊接材料的型号、烘焙温度、保温时间和存放条件，所用的焊接方法、工艺参数、焊接电流的种类和极性，以及焊件的焊后热处理情况等，都能影响焊缝金属的含氢量。图 1-4 表示焊条烘焙温度对于焊缝金属含氢量的影响。

氢对于不同金属材料的危害性是不同的。在焊接中碳钢、低合金高强钢和中合金钢时，更容易产生氢致裂纹。

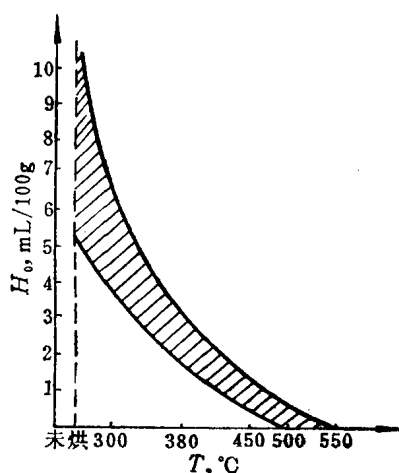


图1-4 焊条烘干温度对焊缝含氢量 H_0 的影响
(低氢型低合金钢焊条，烘干时间均为 2 小时)

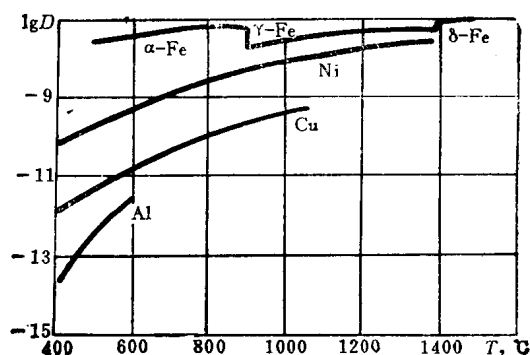


图1-5 氢在不同金属中的扩散
系数 D 与温度的关系

一定的金属材料在一定条件下焊接，焊接接头最终是否发生裂纹，与整个焊接过程中溶入焊缝的氢量以及从液、固态金属中析出的氢量多少有关。焊缝金属中总的含氢量可以用下式表示：

$$[H]_z = [H]_f + [H]_s$$

式中 $[H]_z$ ——焊缝金属中总的含氢量 mL/100g；

$[H]_f$ ——金属凝固后氢的扩散析出量 mL/100g；

$[H]_s$ ——残留在固态金属中的残余氢量 mL/100g。

显然， $[H]_f$ 和 $[H]_s$ 是氢致裂纹的主要根源， $[H]_f$ 随着固态金属的冷却不断地由金属内部扩散至表面而逸出，其扩散过程和扩散量的多少对裂纹的发生和发展都有很大的影响。残余氢则以氢的固溶或氢化物的形式存在，对裂纹的产生也有一定的影响。

焊缝中氢的扩散是一个复杂的过程，氢在各种金属内的扩散系数 D 不同，表示氢在不同金属中有不同的扩散性能（图1-5）。扩散系数 D 又都随温度的降低而减小。

在78~200℃温度范围内氢在铁中的扩散系数 D 与温度的关系可用下式表示。

$$D = 1.82 \times 10^{-2} e^{-\frac{6.75}{T}}$$

而且氢在同一金属的不同组织结构中也具有不同的扩散性能, 如表 1-4 所示。

表1-4 氢在不同组织中的扩散系数

组织 扩散系数	铁素体、珠光体	索氏体	托氏体	马氏体	奥氏体
$D(\text{cm}^2/\text{s})$	4.0×10^{-7}	3.5×10^{-7}	3.2×10^{-7}	2.5×10^{-7}	2.1×10^{-12}

由于扩散氢的量很少(每100 g 金属中最多含有几十mL), 通常采用气体排液法把扩散氢收集到一个密闭的集气管内量测(图1-6)。由金属表面扩散逸出的微小氢气泡必须通过收集介质浮升到集气管顶部, 为使氢气泡通过介质时不至于对量测的氢有所影响, 必须要求收集介质具有一定的物理和化学性能, 这些要求是: 对氢的溶解度较小, 具有低的蒸气压力, 化学稳定性好, 对人体无害和液体的低粘度值。当然, 也要求价格低廉。

目前试验用的介质一般有甘油、石蜡油、酒精、水银、20mol·K₂CO₃以及硅油等。甘油和石蜡油的主要缺点是粘度较大; 水银有害健康、且价格昂贵; 酒精则可能溶解氢且易挥发。现在还没有一种介质能同时满足上述各项要求。甘油虽然有缺点, 但其它条件基本上符合要求, 并且甘油法的操作也较简单, 所以在我国和日本甘油法获得广泛应用。但是, 扩散氢收集介质较多地采用水银, 现在国际焊接学会(IIW)和国际标准组织(ISO)亦规定用水银作为收集介质。因为水银的比重大于一般试件材料, 为防止试件浮出水银表面, 气体收集器需要特别设计。水银有毒, 操作时必需严格防止水银蒸汽外溢。甘油作为介质时, 氢气泡的上浮条件及浮升速度都较水银介质差, 部分微小的气泡悬浮在甘油中或粘附于试件表面和试管壁, 而不能浮升到集气管顶部。这些悬浮和粘附的气泡约占扩散氢逸出总量的30~50%, 所以甘油法测得的 $[H]_r$ 要比水银法测得的 $[H]_r$ 约少40%。因此, 甘油法测定的结果不够准确, 只能把测得的扩散氢量作相对比较。表 1-5 列出了我国关于用甘油法测定扩散氢的技术条件。

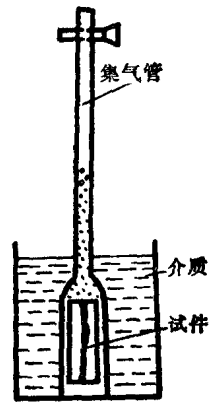


图1-6 气体收集器

表 1-6 为扩散氢的评定标准。

测得的扩散氢体积(mL)首先要换算成温度为0℃、标准大气压(760mm汞柱)下的氢体积, 再算出100 g 熔敷金属中析出的扩散氢含量, 其计算公式如下:

$$[H]_r = 100 \left(\frac{V}{G_1 - G_0} \right) \frac{PT_0}{P_0 T} \quad (\text{mL}/100 \text{ g}) \quad (1-1)$$

式中 $[H]_r$ ——标准状态下100 g 熔敷金属中的扩散氢含量;

V ——集气管中收集的扩散氢气体量(mL);

P_0 ——标准大气压(760mm汞柱);

P ——试验环境大气压(汞柱高、mm);

表1-5 测定扩散氢的技术条件

编 号	标 准	试验材料	材料处理	试片尺寸(mm)	引、收弧板
I	中国国家标准 修订小组	GB-700-65	250°C 6~8小时	10×20×70	有
II	中国哈尔滨焊接研究所	低碳钢	同 上	同 上	有

试片数	焊 条			焊 接 规 范			入水前 时 间 (s)
	型号	直径 (mm)	烘干要求	U(V)	I(A)	堆焊缝长度/消耗焊条长度	
3	T42~55	φ4	按说明书要求 烘干, 使用前	21~25	按使用说明 取最大值	100/150	2
3	结507	φ4 φ3.2	120°C保温	21~23	210~220 100~110	100/130	5

冷却清理时间(s)	收 集 介 质	收 集 时 间(h)
60	甘油(45°C)	24
120	同 上	24

表1-6 扩散氢的评定标准

评 定 标 准	堆焊金属的含氢量(mL/100g)
高	>15
中	≤15, 但>10
低	≤10, 但>5
很低	≤5

T_0 ——标准大气的温度 (273K);

T ——集气管内的温度 (K);

G_0 ——试件原始重量 (g);

G_1 ——试件焊后的重量 (g)。

四、实验方法及步骤

测氢试验的基本操作过程和步骤如下:

焊前准备——焊接——水冷——清洗——吹干并放入气体收集器。

(一) 焊前准备 将尺寸为20×70×10mm的试件和20×40×10mm的引弧板及收弧板预先在250±10°C加热6~8小时作去氢处理, 然后清理表面, 去除氧化物, 用乙醇去水, 乙醚去油, 吹干冷却。把每个试件打钢印编号, 然后用感量为1/10g的天平称出每个试件的重量 G_0 。

(二) 焊接 将试件及引弧、收弧板放在试件夹具台上进行焊接(图1-7)。焊接过程中尽可能采用短弧焊, 绝不允许中间灭弧, 以免产生弧坑。如发生灭弧, 则该试件作废。施焊时建议采用表1-7的焊接规范。

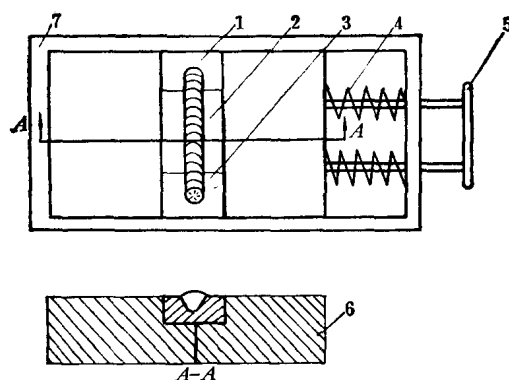


图1-7 测氢试件夹具示意图

1—引弧板；2—试板；3—收弧板；4—弹簧；
5—手把；6—铜垫板；7—夹具支架。

表1-7 焊接规范

焊条直径(mm)	电流(A)	电压(V)
4	170~180	21~23

(三) 水冷 停焊后 5 s 内立即将试件投入 0~20℃ 的水中急冷并摆动试件，避免局部温度过高，10 s 以后取出。

(四) 清洗 试件从水中取出后，迅速清除焊渣及其它脏物，然后用铁锤敲断引弧板和收弧板，把中间的一段试件擦干并用酒精去水、乙醚去油。

(五) 吹干和放入气体收集器 将去水和除油的试件擦净并吹干（注意吹干时一定要用冷风，以免焊缝中氢的逸出）。把试件立即放入气体收集器内。

试件从焊完到放入收集器的全部操作过程，要求在 60 s 内完成。试件在 45℃ 恒温下放置 24 h，便可认为扩散氢已大致全部逸出。根据集气管中甘油柱液面的刻度，就可以读出扩散氢量 V 。这时，要记录恒温集气箱的温度 t ，实验现场的气压 P 。把试件从收集器中取出，清洗吹干，称出重量 G_1 。根据前述的公式 (1-1)，计算出 $[H]_r$ 。

以同样的条件和规范按上述程序重复做二次，测定结果取三个试件扩散氢量的平均值。

为了解工艺因素对于 $[H]_r$ 的影响，实验应包括以下内容：

1. 用未烘焙和以 250℃ 保温 2 小时烘焙的结 422 焊条，分别以交流和直流反接在试件上堆焊，测定熔敷金属的 $[H]_r$ 。

2. 用未烘焙和以 350℃ 保温 2 小时烘焙的结 507 焊条，分别在未经清理的和经过严格清理的试件上堆焊，测定熔敷金属的 $[H]_r$ 。

3. 用未经烘干的结 422 焊条以直流反接在未经清理的和经过严格清理的试件上堆焊，以及用未经烘焙的结 422 焊条在未经清理的试件上进行直流反接长弧堆焊，测定熔敷金属的 $[H]_r$ 。