

管—板焊接参数和结合区压力场测量

王诚洪 张学书

提 要 本文介绍管—管板爆炸焊接动态参数和结合区压力场的测量技术和结果。实验中，用斜电阻丝方法测量动态焊接参数：碰撞速度 V_p 、碰撞点速度 V_c 、碰撞角 β ；用锰铜压力量计测量结合区中基板一侧的压力场 $P(L)$ ；用电探针方法测量爆速 V_D 。这三种测试方法可在实验中同时使用。

一、引 言

对任何爆炸焊接工作来说，都希望有关于动态焊接参数和结合区压力场方面的数据。因为这些数据对结合区的外貌特征和冶金学性质有着非常重要的影响，同时直接决定了复合材料的机械性能和结合强度。由于对爆炸焊接的机理，高速碰撞下材料的动态强度以及高温高压下金属流动等重要问题还没有完整的理论，因此目前还不能提出一个精确确定这些数据的方法，往往靠大量的试验来归纳一些经验，或根据适当的理论进行估计。显然，所获得的结果并不能真实地反映实际情况。这样，实验上直接测量动态焊接参数和结合区压力场就成了十分重要的课题。

我们曾经用锰铜压力量计测量了在泰乳炸药的爆轰作用下铝板—铝板非对称碰撞焊接结合区的压力场^[1]。现在，我们以管—管板焊接为对象，测量动态焊接参数和结合区压力场。显然，这些测量技术也适用于其它几何结构的爆炸焊接系统。

二、实 验 技 术

实验中，采用复板（管）与基板（管板）平行安装的形式。图1是实验装置简图。实验用的管子是20*无缝钢管（内径46mm，外径52mm），管板是A—3钢板（厚16mm）。炸药是岩石硝铵炸药（装填密度 $0.99\text{g}/\text{cm}^3$ ，测得的爆速为 $3.3\text{mm}/\mu\text{s}$ ）。在管板上钻一个直径为58mm的圆孔，这个圆孔是供放管子的。在圆孔的周围钻一些圆弧（与圆孔同心）形的洞。用树脂胶把锰铜压力量计粘结在圆弧形洞的洞壁上，然后再在量计的背面粘结上圆弧形垫片（与管板材料相同），以防止背后稀疏波的影响，在管

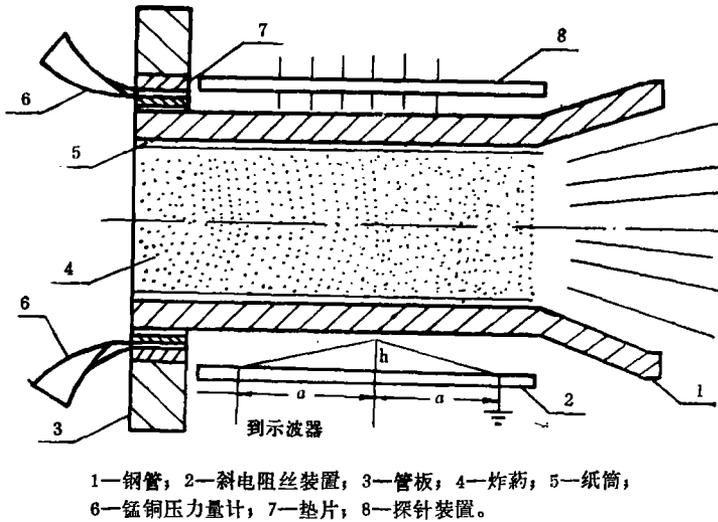


图1 实验装置简图

的下方，安装着供测量动态焊接参数用的屋顶形斜电阻丝（ $\phi 0.1\text{mm}$ 的镍铬丝），在管的上方，布置直接测量爆速的电探针。

当炸药爆轰后，爆炸产物形成高压脉冲载荷，直接作用在复板上，复板被加速，在几个微秒时间内，复板就达到每秒几百米的速度，并以碰撞速度 V_c 和碰撞角 β 自右向左运动。它首先碰撞斜电阻丝的上升分支，然后再碰撞它的下降分支，与此同时，复板使得电探针依次接通。在此以后，复板与基板（管板）相碰撞，碰撞点以 V_c 的速度向前移动，同时在结合区形成了一个强的压力场。

测量压力场压力的锰铜压力量计的结构示意图表示在图2上。它是由滚轧成 0.02mm 的锰铜箔（ $11\sim 13\% \text{Mn}$ ， $2\sim 3\% \text{Ni}$ ， $0.5\% \text{Si}$ ， $0.5\% \text{Fe}$ 等杂质，余量为铜）制成的。为了减少引线电阻，在引线上镀上几微米厚的铜。压力量计具有四端结构的形式，这是为了减少由于引线的拉伸而造成引线电阻变化的影响。另外，根据爆炸焊接的特殊情况，量计的四条引线是从同一侧引出的。为了绝缘起见，把量计封装在两片聚四氟乙烯薄膜之间。量计组件的总厚度约为 0.3mm 。其电阻约为 1 欧姆。

图2 锰铜压力量计结构示意图
(阴影部分为量计有效部分)

锰铜压力量计由图3所示的恒流源供给恒定的电流 I_0 。恒流源主要是由充电电容 C_2 和可控硅管 3KT 组成。电源动作：当触发探针接通后，触发电路中的电容 C_1 放电。在电阻 R_4 上产生一触发脉冲，通过变压器的耦合，使得可控硅管开启，于是电容 C_2 经锰铜压力量计 R_0 放电，这时在 R_0 上有一恒定电流 I_0 流过。当冲击载荷到达量计时，量计的电阻 R_0 要发生 ΔR 的变化，但通过量计的电流可认为是恒定不变的。

测试系统的同步是通过把触发探针放在炸药中的适当位置来实现的。在要测量的压力脉冲到达压力量计之前为几微秒，量计通以电流 I_0 ，示波器开始扫描，量计上的电压通过 50 欧姆的电缆，直接显示在示波器上。

测试系统的同步是通过把触发探针放在炸药中的适当位置来实现的。在要测量的压力脉冲到达压力量计之前为几微秒，量计通以电流 I_0 ，示波器开始扫描，量计上的电压通过 50 欧姆的电缆，直接显示在示波器上。

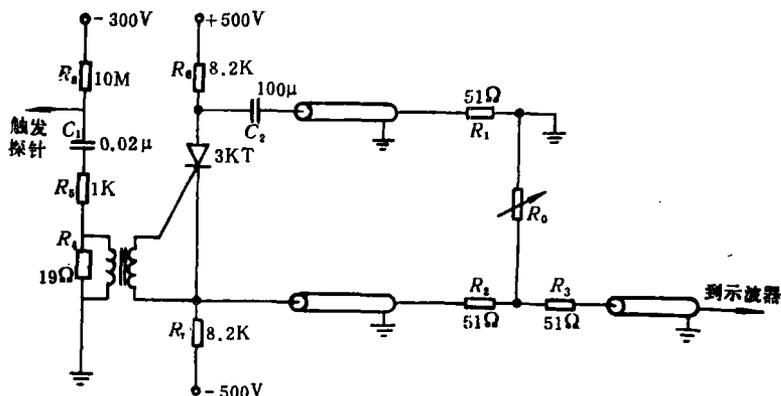


图3 测量线路图

示波器扫迹表现为：扫描基线；与量计初始电阻 R_0 成正比的初始电压台阶 $V_0 = I_0 R_0$ ；与量计电阻改变 ΔR 成正比的附加电压台阶 $\Delta V = I_0 \Delta R$ ；于是电阻相对变化为： $\Delta R/R_0 = \Delta V/V_0$ 。

在求得 $\Delta R/R_0$ 后，就可利用锰铜压力量计的标定曲线^[2]：

$$P(10\text{kb}) = 0.24 + 35.70 \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right) + 5.85 \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)^2 - 3.18 \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)^3$$

求出相应的压力。

为了用斜电阻丝方法测量动态焊接参数，同样必须对斜电阻丝供给恒定电流 I_0 。实验中，采用图3所示的恒流源电路，但是，由于斜电阻丝的初始电阻 R_0 是约为11欧姆，所以电缆终端的匹配电阻的数值与前面锰铜量计的匹配电阻的数值不一样，这时 $R_1 = 51\Omega$ ， $R_2 = 40\Omega$ ， $R_3 = 40\Omega$ 。

复板在运动过程中，首先与斜电阻丝的上升分支接触，然后再与下降分支接触。随着时间的推移，电阻丝与复板接触的部分越来越多，未与复板接触的部分越来越少，因而剩余电阻也越来越小。由于供给电阻丝的电流是恒定的，因而电阻丝上的电压值也相应地下降。电阻丝上的电压降由示波器记录。

在斜电阻丝的上升分支，复板和电阻丝闭合的速度 V_1 为：

$$V_1 = \frac{V_p}{\sin(\beta - \eta)} \quad (1)$$

在斜电阻丝的下降分支，复板和电阻丝闭合的速度 V_2 为：

$$V_2 = \frac{V_p}{\sin(\beta + \eta)} \quad (2)$$

这里 η 是安装角。显然， $V_1 > V_2$ 。这样，示波器记录下来的扫迹是由斜率截然不同的两部分所组成。如果在上升分支和下降分支，复板与电阻丝的碰撞持续时间分别为 t_1 和 t_2 ，则

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{h(t_1 + t_2)}{a(t_2 - t_1)} \right] \quad (3)$$

$$V_a = \frac{2a}{t_1 + t_2} \quad (4)$$

$$V_p = \frac{2ah}{[h^2(t_1 + t_2)^2 + a^2(t_2 - t_1)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

如果 h/a 很小, 则(5)式简化为

$$V_p = \frac{2h}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

因此, 只要在示波图上测得 t_1 和 t_2 就可以求出相应的动态焊接参数。

至于用电探针方法测量爆速, 只要用示波器记录下复板(管)闭合探针时产生的脉冲信号之间的间距就可以了, 因为探针之间的距离实验前已精确测量了。

三、结果和讨论

我们测得了基板(管板)中距碰撞界面六个不同距离处的压力剖面。典型的记录表示在图4上。测得的压力剖面不象在凝聚炸药中测得的爆轰波的压力剖面以及在惰性材料中测得的平面冲击波压力剖面那样有陡峭的前沿, 这里测得的压力剖面是三角波, 这与爆炸焊接的物理过程相一致, 因为在焊接过程中, 复板依次与基板碰撞, 而且在碰撞点前后都有射流, 传到基板中的应力波不是平面波。

从测得的记录发现, 随着距碰撞界面距离的增加, 压力峰值下降, 压力脉冲宽度增加。我们在图5上画出了压力与到碰撞界面距离的关系曲线。从图5可看出, 越接近界面, 压力上升就越厉害。

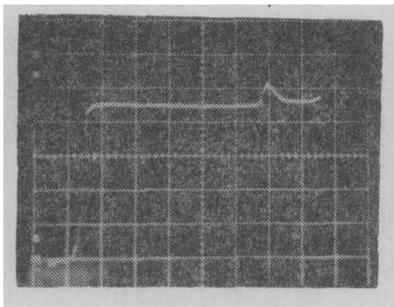


图4 用锰铜压力量计测得的典型压力剖面 (0.1V/div, 2μs/div)

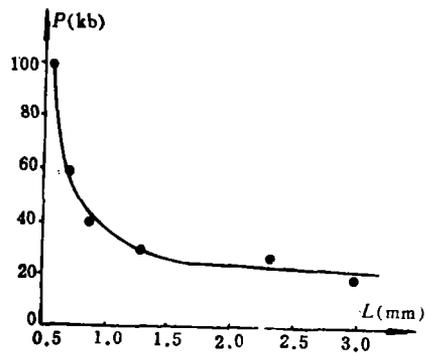


图5 压力——到碰撞界面距离的关系曲线

除了测量基板中的压力外, 我们还试图测量交界面处的碰撞压力。但是, 实验中遇到了困难, 这是由于在碰撞点前的再入射流向未结合的空间高速喷射, 并冲刷了金属内表面的表面膜。如果把锰铜压力量计直接放在基板的内表面, 它要受到射流的冲刷。显然, 这要严重地影响量计的寿命, 在绝缘层较薄的情况下, 有时连压力峰值未记录下来量计就失效了。在增加绝缘层厚度的情况下, 虽然能测得整个压力剖面, 但是, 此时

由于较厚绝缘层的存在,射流的形成和运动,以及碰撞压力的大小都将受到影响,因此测得的结果已不能反应实际情况。

用斜电阻丝方法测量动态焊接参数的典型记录表示在图6上。由方程(1)—(3)计算得到的参数如下:

$$\beta = 8.89 \pm 0.18^\circ, V_c = 3.41 \pm 0.07 \text{ mm}/\mu\text{s}, V_p = 0.54 \pm 0.03 \text{ mm}/\mu\text{s}$$

产生误差的主要原因是,在我们的实验室条件下,斜电阻丝的高度 h 不能较为精确地测量,以及斜电阻丝难以拉得紧。此外,由于装药外壳的作用增加了有效装药量,因而 V_c 偏大。

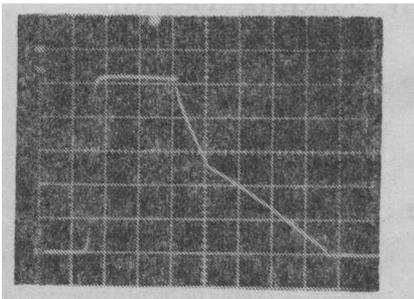


图6 用斜电阻丝方法测得的典型示波图
(0.1V/div, 5 μ s/div)

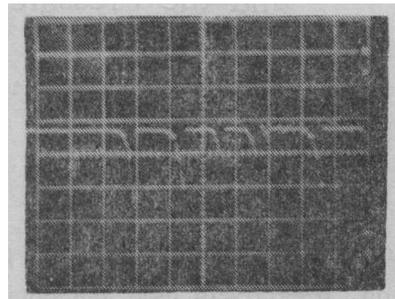


图7 用电探针方法测得的典型示波图
(3V/div, 2 μ s/div)

为了检验斜电阻丝方法,我们用电探针方法测量了爆速 V_a 。因为在我们的实验中,复板与基板是平行安装,如果爆轰波是稳定传播的话,那么碰撞点速度 V_o 应等于爆速 V_a 。爆速的测量过程如下:沿圆管(复板)的轴向布置六根探针,当炸药爆轰后,运动的圆管依次接通探针,其中,第一根探针是触发探针,它使示波器开始工作,其余五根探针接通后,分别形成五个尖脉冲信号,被示波器记录下来。典型的记录表示在图7上。由于各探针之间的距离是事先测定了的,于是根据所记录的脉冲信号之间的间隔就可以求出每对探针之间的平均爆速。图7上脉冲信号之间的距离不等是由于探针之间的距离不等造成的。使用这种方法测得的平均爆速 V_a 是 $3.30 \pm 0.04 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 。用斜电阻丝方法和电探针方法测得的爆速基本一致。用斜电阻丝方法测得的爆速高于电探针法测得的爆速,其主要原因是由于实验时,电阻丝拉得不够紧,从而对管与电阻丝的闭合速度有影响。

四、结 束 语

我们已经用上述技术测得了管—管板爆炸焊接动态参数和结合区压力场,并获得了一些初步结果。应当指出,我们的目的主要是建立测试这些参数的方法,而不是着重于爆炸焊接机理的研究。基于这个原因,我们对如何合理地选择焊接的初始参数以及其它一些有关的条件,往往考虑得不够周密。

参加这项工作的还有张家碧、陈雪芳、鲍武臣、马法成。

参 考 文 献

- [1] 王诚洪、孙百连、鲍武臣、张家碧、张学书, 爆炸焊接结合区压力场的锰铜量计测量, 国防科技大学学报, 1986年第2期。
- [2] 王诚洪等, 在冲击载荷作用下锰铜压力传感器的压阻特性, 国防科技大学学报, 1985年第1期。

The Measurement of the Dynamic Welding Parameters and the Pressure Field in Bonding Region

Wang Chenghong Zhang Xueshu

Abstract

This paper gives a detailed account of the measuring techniques and the results of the dynamic welding parameters and the pressure field in bonding region, respectively used and obtained in the tube-to-tubeplate explosive welding. In the experiments, the dynamic welding parameters, such as the impact velocity V_P , the collision point velocity V_C , and the dynamic angle of collision β , are measured with slanting wire method; for verifying the slanting wire method, the electrocontact probe technique is used to measure the detonation velocity V_d ; while the pressure field $P(L)$ in the bonding region is measured with manganin stress gauge.