

3. 高频电阻焊管生产技术的新发展

〔日〕芳贺博世等

前 言

电阻焊管（ERW）已经被用作高压输送管和石油管。不过，电阻焊管还没有得到象UOE焊管和无缝管那样高的评价。事实上，已经有很多报告谈到了用电阻焊管做输送管线中的问题。电阻焊管性能不高的一个最主要原因是焊接质量不够好。

在电阻焊管上可能出现的缺陷有两种，一是冷焊，二是过烧，而过烧有时会引起脆性破裂，如图3—1所示（略）。从高频电阻焊管方法发明到今天已有几十年的时间了，在此期间，很多工程师只是凭着他们的经验和对焊接状态的直观进行了大量工作来减少焊接缺陷，但是他们的工作不能说是成功的。

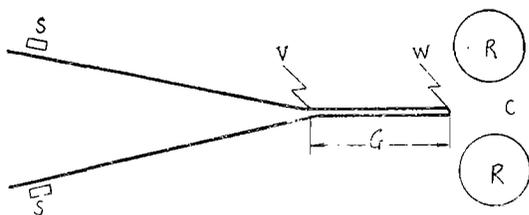
本文将简单地介绍一下新日铁公司多年来所进行的研究工作，其目的在于阐明焊接状态，焊接机理和焊接缺陷的形成特征，以便找出一种减少焊接缺陷的途径并建立一种新的焊接工艺和控制系统。

焊接状态的观察

用一台高速摄影机来观察电阻焊管过程。为了能够看到所有可能出现的焊接状态，试验是在变化范围很大的焊接条件下进行的。

焊接条件包括焊接速度，输入热量和电极（借以通入电流）的位置。高速摄影机就安装在焊接区的上方。

观察的结果表明，带钢边缘并不总是在V形会聚点处进行焊接的，有时会在它后面出现一个狭窄的间隙，如图3—2所示。在这种情况下，带钢边缘将在焊接点处焊接或在沿着这一狭窄间隙地带被焊接起来，并且，焊接通常是间断的而不是连续的。



V: V形会聚点; G: 狭窄间隙区;
W: 焊接点; R: 挤压辊;
C: 挤压辊中心点; S: 电极（通入电流的位置）

图3—2 电焊管成形过程示意

这一观察的重要结果是：电阻焊管的焊接现象可以根据狭窄间隙的长度和形状以及焊接的间断时间长短，分为三种类型，分别称做第一，第二和第三种焊接状态。

图3—3所示是第一种焊接状态，这里没有产生狭窄间隙，带钢边缘在V形会聚点连续地进行焊接。当焊接功率小的时候会出现这种状态。

图3—4是第二种焊接状态，在会聚点后面形成了一个狭窄间隙，熔化的金属不断地产生，搭在带钢的两个边部。搭在边部的熔融金属沿着狭窄间隙迅速地移向焊接点。在这种情况下，焊接是间断进行的，相隔时间

在0.5—10毫秒之间。

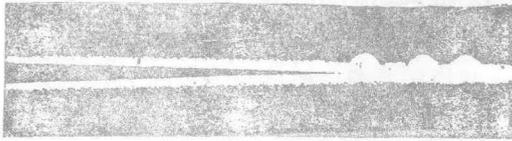


图3—3 第一种焊接状态的高速摄像

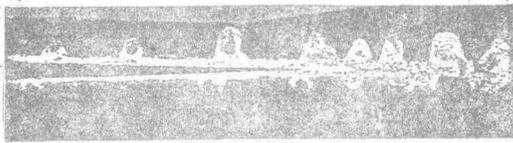


图3—4 第二种焊接状态的高速摄像

图3—5所示为第三种焊接状态。此时，焊接点从靠近V形会聚点的地方开始以焊管作业线的相同速度向挤压辊中心移动，同时，狭窄间隙成扇形形状。在焊接点移动的时候，带钢边缘并不是马上焊接，而是在它移动到某一位置（这里焊接位置同焊接条件

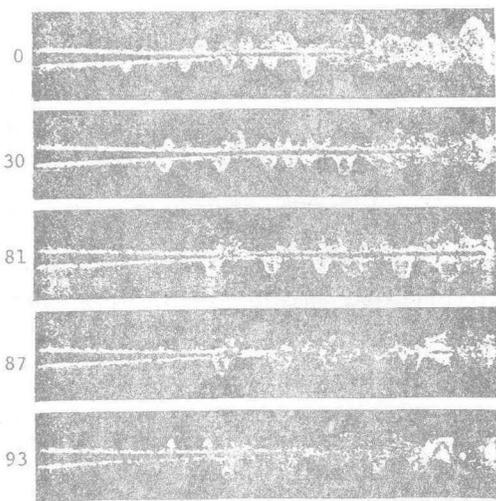


图3—5 第三种焊接状态的高速摄像

有关)时突然开始的，虽然带钢的两个边部是在V会聚点相接触的。在此瞬间，熔化金属搭上桥并向焊接点方向移动。与此同时，带钢两边缘的熔化金属开始被拉进狭窄间隙中去。从图3—5上可以看出这一点，在图3—10上可以看得更清楚。最后，在V会聚点和焊接点之间的狭窄间隙熔化金属充满了并且凝固起来。结果，焊接点不得不回到靠近V会聚点的位置，再重新开始它的移动过程。第三种焊接状态中的整个焊接过程就是上述过程的周期性的反复。相隔时间大于10毫秒。在焊接功率大的情况下，就会出现第三种焊接状态。

除了上述这三种焊接状态和其组合之外，不会有其它任何类型的状态。

下面再更加详细地说明上述几种焊接状态。

狭窄间隙的形成

在电阻焊管过程中，由于高频电流的集肤效应和邻近效应，在相对带钢边缘的表面上通过一个非常大的、方向相反的电流。大家知道，相反方向的电流是互斥的。在焊管的情况下，带钢边缘的表面之间作用着一个互相排斥的力。这个电磁力的大小从理论上计算至少有170mm汞柱。

这一电磁力的大小足以把带钢边缘上所产生的熔融金属立即赶到带钢表面上去，如图3—6所示。

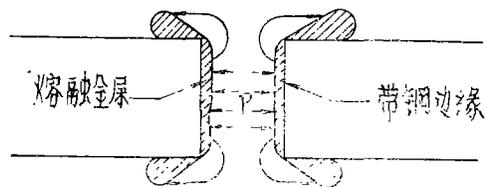


图3—6 由于电磁力的作用熔融金属从带钢边缘上被赶出

带钢边缘相互接触以前，其表面开始熔化，同时在焊接时又不断地从边部表面上被赶走。在焊接过程中，带钢边部在运动中互相靠拢，同时又按照金属熔化的速度而互相远离。这就是说，两个边缘的表面不能够在V会聚点相遇，而这一点正是它们应该接触的地方。

决定焊接状态的条件

从上面所讲的可以得出这样的重要关系：那就是到底会出现哪一种焊接状态决定于 V_a 和 V_r 这两个速度的大小。这里， V_a 是指带钢边缘互相靠拢的速度， V_r 是指由于熔化金属被赶走而使边缘表面互相远离的速度。

当 $V_a > V_r$ 时，焊接点前带钢边部所形成的是V形，从而出现第一种焊接状态。

当 $V_a = V_r$ 时，就会从V会聚点开始形成一个平行的间隙，于是出现了第二种焊接状态。

当 $V_a < V_r$ 时，随着焊接点的移动这一间隙加大，并形成一扇形。这时出现第三种焊接状态。图3—7就是这三种情况的示意。

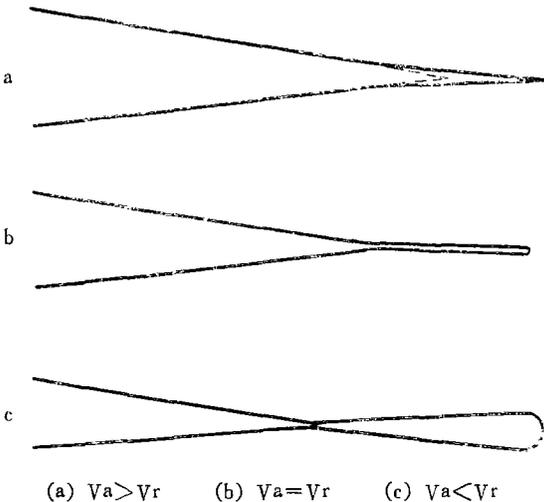


图3—7 当 $V_a > V_r$, $V_a = V_r$, $V_a < V_r$ 时的焊接状态

V_a 仅仅与带钢移动速度和带钢边缘会聚角的大小有关。而 V_r 则与输入功率成比例(V_r 用理论方法确定)。这说明了这样的试验结果，即当焊接速度低或在输入功率大的时候，就有可能出现第三种焊接状态。

焊接过程的周期性

整个焊接过程具有周期性的特点。

这一周期性在第三种焊接状态(此时 $V_a < V_r$)中表现得尤其明显。在这种情况下，焊接点不得以焊管作业线的速度移动，因为没有金属来填充所形成的间隙。在焊接点移动的同时，被赶出的熔化金属由于磁力和熔化金属的表面张力之间的平衡而形成雨点形状。

不过，这种状态是不可能稳定下来的，焊接点的移动使焊接电流通路上的阻抗增加，于是焊接电流会减少。这样，带钢边缘部表面开始熔化的那个位置就会逐渐向离开电极(焊脚)的方向移动，一直移到V会聚点的地方。在这一瞬间，两个边部在V会聚点互相接触，在会聚点处有大量电流通过。熔化的金属在这一点上形成搭桥，并且被电磁力推移到焊接点上。同时，所有的焊接电流都通过V会聚点，电磁力在间隙地带突然消失，只有表面张力作用在熔化金属上，力失去平衡。于是，熔化金属开始回去并填充到间隙地带中去，如图3—10所示(略)。

这一金属回流过程的时间不到10毫秒，这一时间等于从熔融钢水的表面张力和总的毛细作用计算出来的数值。

总之，焊接过程的周期性是由于焊接电流的变化引起的，而电流变化的原因是焊接点移动所造成的电流阻抗的改变。

焊接缺陷的形成

观察焊缝的断口组织显微照片就可以清

楚地发现电阻焊管的焊接缺陷。在焊缝的夏比断口上所发现的缺陷：冷焊及过烧（图3—8，略）。冷焊均匀分布在焊缝的一段相当长的距离上，而过烧则是零零星星地存在。同时用扫描式电子显微镜（SEM）观察，发现过烧的显微组织也不同于冷焊。冷焊是分布在平面上的许多细小凹坑，而大部分凹坑的直径小于 1μ （图3—9a）。

伴随过烧缺陷出现的凹坑和夹渣具有大得多的直径（图3—9b）。X光检查表明，多数夹渣是由脱氧化物组成的，如 SiO_2 ， MnO ， Al_2O_3 及 FeO 。

在多数情况下，冷焊出现在第一种焊接状态中。从冷焊的组织结构以及从带钢边缘熔化速度低的时候才出现第一种焊接状态这一事实，我们可以认为冷焊是带钢边缘表面上所形成并残留下来的氧化物。冷焊可以看作是由于没有熔化。

过烧经常出现在第三种焊接状态中，偶而也出现在第二种焊接状态中，但决不会在第一种焊接状态中出现。由于在第二和第三种焊接状态中，大量的熔化金属从带钢边缘表面上排挤出去，所以过烧不能认为是一种残留的氧化物。边缘表面上的氧化物与熔化金属一起被电磁赶出去了。

为了研究有过烧现象出现的焊缝，曾经用高速摄影机仔细观察焊接状态。观察结果证明，过烧正是出现在熔化金属从带钢边缘表面排挤出去又返回来充满那个间隙位置，如图3—10所示（略）。熔池表面被一层熔渣所覆盖。从过烧的性质来看，可以认

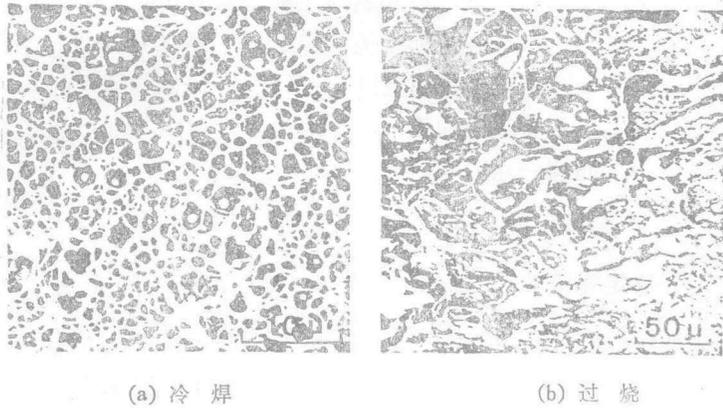


图3—9 冷焊和过烧的SEM照片

为它就是熔渣在返回到熔池中的过程中所产生的夹渣。

在第三种焊接状态中，产生了一个狭长的间隙，在这种情况下，大部分是由返回的熔化金属进行焊接的。在第二种焊接状态中，间隙较短，熔化金属回流现象也较轻。在第一种焊接状态中，没有产生这种间隙。这些事实说明，在这几种焊接状态中过烧所产生缺陷的多少不同。

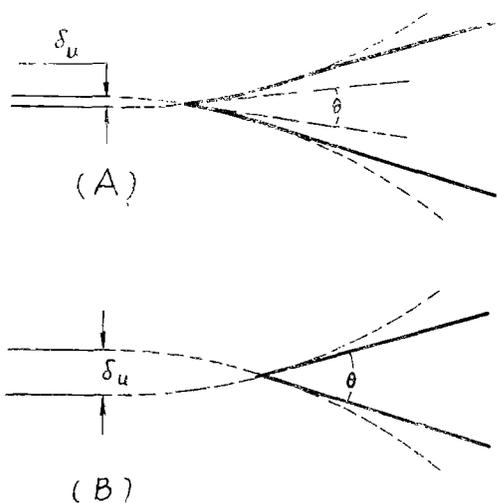
减少焊接缺陷的方法

上面的讨论表明，焊接状态决定着焊接缺陷的种类和缺陷的多少。

第一种焊接状态通常会出现冷焊的缺陷，而第三种焊接状态则会引起较严重的过烧。在多数情况下，第二种焊接状态可以得到质量最佳的焊缝。

输入功率、焊接速度和V会聚角这些决定焊接状态的诸因素，与焊接缺陷有着十分密切的关系。

图3—11表明焊接状态和焊接速度对焊接缺陷多少的影响。事实上，在第二种焊接状态时，缺陷最少。



δ_u : 镦量 实线: 带钢边缘

图 3-14 镦量小(A)和大(B)时带钢边缘形状的不同

就可以得出一个结论, 挤压力虽然和焊接状态没有直接关系, 但却有着很大的影响。

上述的研究结果可以总结为这样一句话, 即: 高的焊接速度、大的V会聚角和第二种焊接状态可以使焊接缺陷减少。焊速高、角度大意味着 V_a 要大。第二种焊接状态则意味着 V_r 一定得等于 V_a 。因此, 输入功率(V_r)大可以防止产生冷焊, 而稳定的焊接状态(第二种)则可以避免过烧。

控制焊接状态的方法

在第二种焊接状态中, 焊接缺陷可以减少。

当其它焊接参数固定不变时, 输入功率就决定着焊接状态的种类。因此, 就有可能用调节输入功率大小的办法来得到第二种焊接状态, 如果焊接状态的种类在焊接过程中是能够知道的话。

焊接状态的特征是焊接点的周期性移动。随着焊接点的移动, 阻抗的变化将引起

焊接电流的变化, 这就是产生上述周期性的原因。所以, 如果能够测出由于阻抗变化所引起的某一物理量的变化的话, 就有可能检测出是哪一种焊接状态。

这种物理量就是电流、电压和振荡频率。电流和电压是容易测量的。不过, 从三相交流电全波整流所引起的电流和电压中所包含的脉动分量通常要比在焊接状态中由于周期性所引起的变化大得多。

另外, 焊接设备的振荡频率受脉动分量的影响很小。

图3—15中所示的等效电路的频率或周

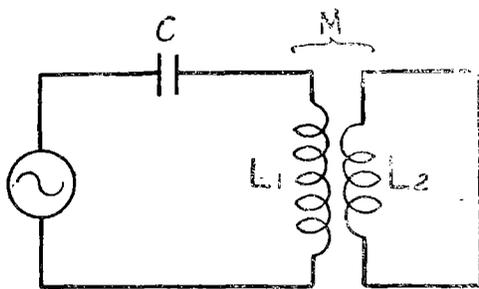


图 3-15 焊接设备的等效电路

期可以用下式计算:

$$\frac{1}{f} = T = 2\pi \sqrt{C \left(L_1 \frac{M^2}{L_2} \right)} \quad (1)$$

(1)式中, 只有 L_2 随焊接点的移动而变化, C 、 L_1 和 M 都是常数。因此, 测量频率的大小就等于测出了负载电感 L_2 。由于 L_2 变化而引起的振荡周期的变化就成了:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{(4\pi^2 C L_1 f^2 - 1)^2}{8\pi^2 C M^2 f^2} \Delta L_2$$

在第三种焊接状态中, 振荡频率的变化率为0.1%~0.5%, 而在第二种焊接状态中, 还不到0.1%, 这是理论计算出来并得到试验证明了的数字。另外, 如上所述, 在第二种焊接状态中, 焊接点往返移动的周期

时间不到10毫秒。这一点对于通过测量频率来检测焊接状态来说，是非常重要的。

基于这些发现，研制了一种控制装置。这一装置的设计原则如下：

1) 控制装置应该具有相当高的灵敏度，能够测出振荡频率的微小变化（小到0.01%的变化），并且其测量速度必须相当快，能够测出小到1毫秒的焊接状态的周期变化。

2) 为了达到上述要求，推荐使用一个频率计数器，反复测量振荡周期（1/f），而不是直接测量频率的大小。

3) 从计数器连续测得的数字可以计算出频率的变化。计算结果通过一个数字信息—模拟信息转换器得到模拟信号。从数—模转换器输出的信号可以显示在示波管或示波器上。图3—16所示就是这种控制装置的框图。

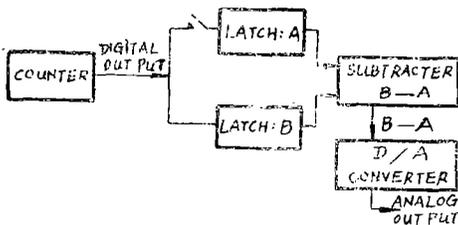


图3-16 振荡周期起伏的测量方法

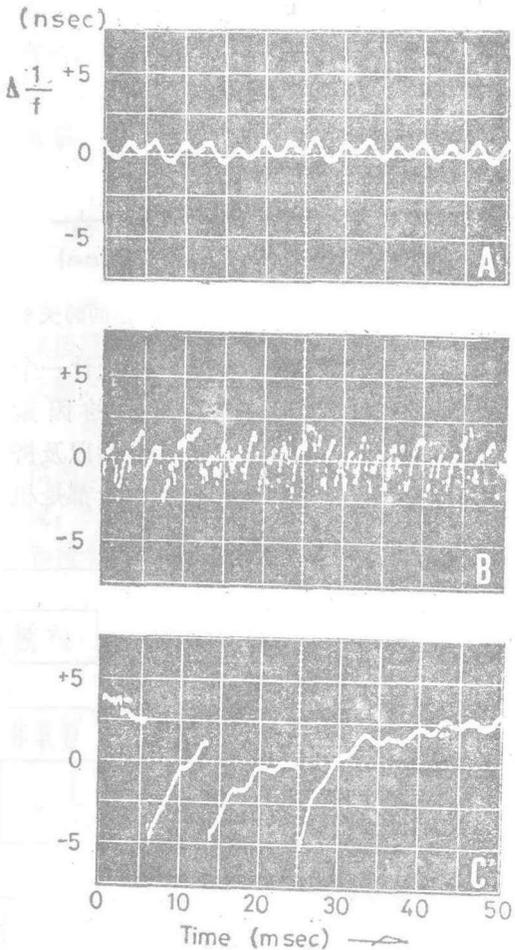
图3—17是振荡周期起伏变化 $\Delta(1/f)$ 的示波图一例，从中可以看出对应于三种焊接状态的不同波形。监视示波管上显示出来的波形就可以使操作工知道是哪一种焊接状态并调节输入功率的大小来得到质量良好的焊缝。

焊接自动控制系统

对于频率变化和焊接状况或焊接质量之间的关系曾做过详细的研究。图3—18所表

示的就是狭窄间隙长度与振荡周期变化 $\Delta(1/f)$ 的关系。对于壁厚相同的钢管来说， $\Delta(1/f)$ 可以认为是与间隙长度成比例的。随着壁厚的增加，这一比例系数稍有减小。这是因为负载电感几乎与壁厚成反比。

$\Delta(1/f)$ 可能与焊接缺陷的影响范围有关，如图3—19所示。很明显，当 $\Delta(1/f)$ 在一定范围内，焊接缺陷可以减少到最低限度。



- A—第一种焊接状态；
- B—第二种焊接状态；
- C—第三种焊接状态。

图3—17 三种焊接状态的振荡周期起伏变化 $\Delta(1/f)$ 的示波图

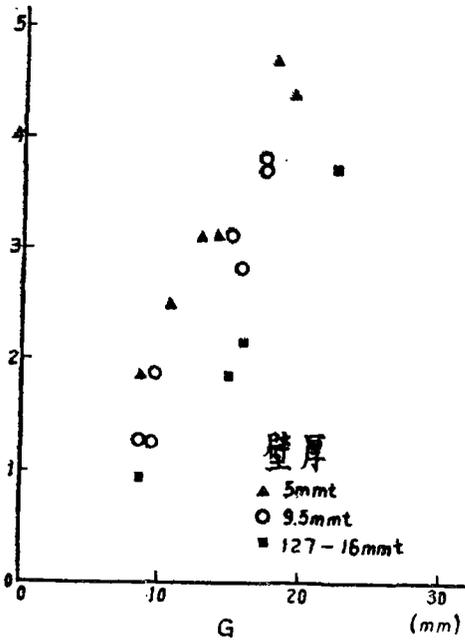


图3-18 狭窄地带长度G和 $\Delta(1/f)$ 之间的关系

有了这些研究结果，就有可能设计一个焊接自动控制系统。影响焊接质量的因素是：输入功率、焊接速度、V会聚角以及挤压力。除了输入功率以外，这些因素都是机

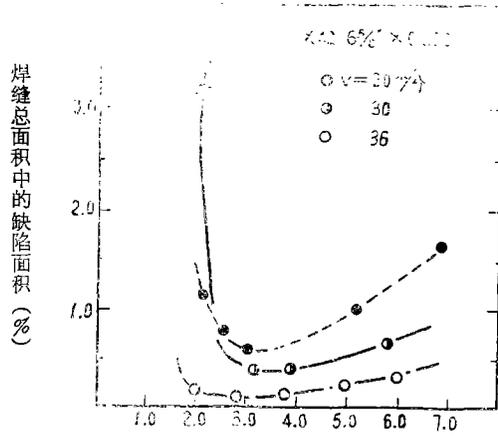


图3-19 $\Delta(1/f)$ 和焊接缺陷影响范围的关系

械的，可以调整到最佳的条件。不过，在焊接过程中，这些因素不可能保持不变。在它们一旦被调整好以后，不可能再次进行调整而得到迅速的反应。

另外，与上述各机械因素相比，输入功率的时间常数是相当小的。所以用控制输入功率大小来补偿机械因素的变化，保持最佳的焊接条件是一个最实用的办法。

图3-20所示为最近发展的焊接自动控

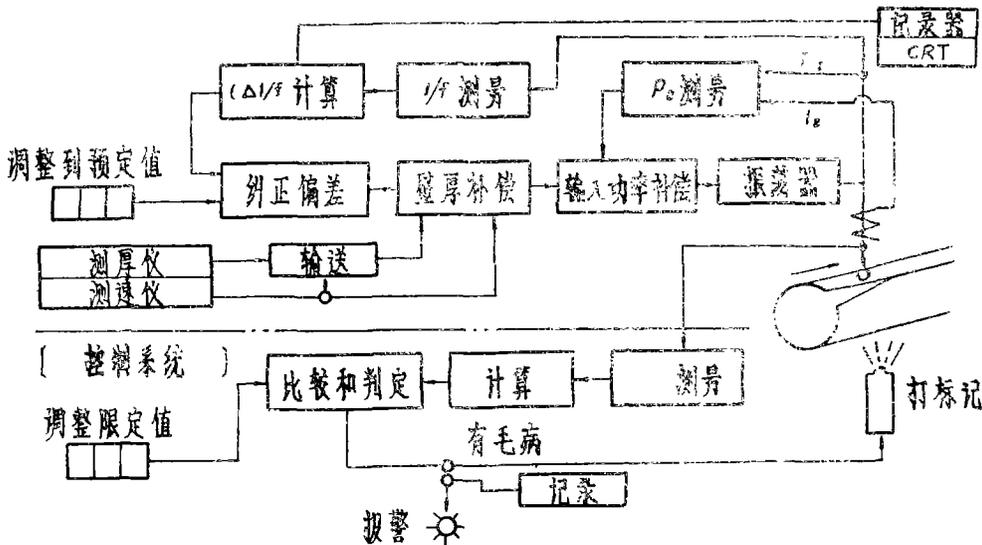


图3-20 焊接功率自动控制系统图

制系统，通过反馈和正馈控制系统，在焊接过程中，使 $\Delta(1/f)$ 保持在所要求的数值上。由于 L_2 ($\Delta 1/f$ 亦然) 可能会因某种事故(如带钢边缘不规则)而发生突然的变化，所以也能被这一系统检查出来。

结论

通过对焊接过程和焊接缺陷的形成所进行的研究，弄清了这样一点，即在第二种焊接状态中，焊接缺陷的影响范围通常可以减小。用一种新的控制装置可以区别各种焊接状态，控制的原则是发展出一种自动的焊接系统，它能够生产出质量优良的电阻焊管。

李长穆 译

讨论

1. 关于焊接状态对焊接质量的影响

如前所述，根据 V_a 和 V_r 之间的关系，焊接过程可以有三种不同的状态。第一种状态是由于焊速高、加热功率小、温度低，从而 $V_a > V_r$ ，带钢边缘金属在刚融化之后即被挤焊在一起。这时，一方面由于金属融化得不透，另一方面融化金属表面的氧化物被挤入焊缝，因而往往会发生未焊透和焊缝夹杂等缺陷。一般称这种焊接状态为冷焊或低温焊接。

第二种状态：由于焊接过程是周期变化的，而且由于 V_a 和 V_r 是相对平衡的。所以变化周期也较短（焊接的来回循环次数为1000次/秒），金属熔化和熔接较为充分。因此焊缝质量较好。由于焊接过程中金属回流少，故氧化物被挤入焊缝内的机会也少。这种焊接状态是比较理想的。

第三种状态：由于加热温度高、金属熔化量大，焊接过程中回流量很大，因此产生大量回流夹杂影响焊缝质量。

2. 焊接过程的控制问题

研究焊接过程的目的是掌握焊接机理，找出产生焊接缺陷的原因，从而研究控制焊接过程，保证焊接质量的方法。

根据以上分析，为了保证焊接质量，一般管和小直径管应将焊接过程控制在第一种和第二种焊接状态之间。重要用途的专用钢管、如锅炉管、油井用管或厚壁管应完全控制在第二种焊接状态下。在任何时候都应避免第三种状态的发生。不锈钢和高合金钢管焊接必须采用第二种焊接状态。

几种焊接状态的主要标志是 V_a 和 V_r 的关系。

$$V_a = V \tan \frac{\theta}{2}$$

$$V_r = CJ^2 \alpha p$$

从上式中得知： V_a 是成型焊接速度 V 和焊接开口角 θ 的函数；而 V_r 是输出功率 p 的函数。

因此只要控制焊速 V 、焊接开口角 θ 和输出功率 p 就可以控制焊接状态。一般来说， $\theta \geq 3^\circ$ 。 θ 角过大，成型就成问题了， θ 角过小则熔化了了的金属跑不出去。

经验公式 $P \propto V^m \cdot t^m$

式中 $m = 0.5 \sim 0.6$

$n = 0.85$

t (表面温度) = $Kf\sqrt{\tau}$

所以可通过直接测得焊接温度 t 的方法控制 p ，也可以通过控制电流频率 f 的办法来控制 t ，进而控制 p 。

由于直接测温只能测焊接之后的焊缝温度，直接测焊接温度几乎是不可能的。所以这种方法只能用于控制第一种焊接状态。

在第二种焊接状态下，由于要求带钢边部的表面和整个厚度的金属都熔化，而直接测温只能测得表面温度，因此就不能用直接测温控制系统，而需采用控制电流频率的办

法。

控制 $\Delta \frac{1}{f}$ 也就是控制变化周期 ΔT 。这样,实质上就控制了在第二种焊接状态下焊接过程周期变化的次数,使其控制在1000次/秒。从图3—15中可以看出,只要控制 ΔL_2 就可以控制 $\Delta \frac{1}{f}$ 。试验证明,只要将 ΔL_2 控制在0.1~0.5%范围内就不会出现第三种焊接状态。如果采用高精度的计算器来检测 $\Delta \frac{1}{f}$ 的变化次数并通过控制每一个循环的时间也可达到控制的目的。

直接测温控制法仅适用于小直径薄壁管(即第一种焊接状态的焊接控制)。

对于壁厚 $S \geq 5\text{mm}$ 的钢管(即第二种焊接状态)的焊接控制,最好采用 $\Delta \frac{1}{f}$ 的控制法。新日铁名古屋厂已正式采用 $\Delta \frac{1}{f}$ 控制

法。该厂的机组生产 $\phi 14''$ 石油输送管,而且已成功地使用近两年时间了。

3. 新日铁电焊锅炉管和油井管的生产和控制。

新日铁电焊锅炉管和油井管生产已有一定的历史,质量水平较高。

锅炉管焊接生产采用控制速度,温度和带钢厚度的办法,而油井管焊接则采用控制

$\Delta \frac{1}{f}$ 或直接测温控制法。

油井管对焊接要求最高,必须用第二种焊接状态进行焊接,并且控制 $\Delta \frac{1}{f}$ 法来进行焊接过程的自动控制。

挤压力通过调整挤压力来控制。对一种规格的产品来说,挤压力是不变的,可不进行动态调整和控制,事先调好就行了。

挤压力根据焊缝中金属所产生的偏转角 α 的大小进行调整。 α 角由试样的金相分析来测定。一般来说, α 角应在50—60°范围内。在此范围内, α 越小则焊接韧性越高。但当 $\alpha < 50^\circ$ 时,焊接过程就不稳定了,从而会产生其他缺陷。当 $\alpha > 70^\circ$ 时就不能保证焊接尺寸和焊接精度了。

此外,新日铁在油井管和锅炉管焊接生产中还采用了超声探伤,压扁、扩口试验、焊缝显微组织检查(包括检查 α 角)及焊缝宽度控制(一般要求控制在 $20\mu\text{m}$ — $100\mu\text{m}$)。

新日铁用电阻焊方法生产的油井管的钢级有J55, K55和N80,而且不久即将生产P110级的电焊油井管。

电焊管壁厚较均匀,对承压管来说这是很重要的。另外,带钢可以用控制轧制得到较高的性能,而无缝钢管要达到同样级别则需通过增加合金元素的办法。所以电焊高强油井管比无缝管经济。

美国的油井管总产量中有30%是电焊管,而且这个比例还在逐年增加。

关于无缝管由于采用连铸坯直接生产以后将在生产成本和经济效益上向电焊管提出挑战的问题,作者认为目前还未感觉到这种威胁。近几年来电焊管机组在各国仍然大量地兴建,用电焊管代替无缝管的趋势仍在继续。

