

焊接热模拟装置及其应用

华中工学院 冶金部钢铁研究院 编译



机械工业出版社

焊接热模拟装置及其应用

华中工学院 编译
冶金部钢铁研究院

*

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 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 12 · 字数 292 千字
1980 年 10 月北京第一版 · 1980 年 10 月北京第一次印刷

印数 0,001—5,400 · 定价 1.25 元

*

统一书号: 15033 · 4880

目 录

编者的话

- 1 《Gleeble》模拟机的发展.....W.F.Savage (1)
 - 2 应用感应加热法的热模拟试验机.....J.M.Lowes等 (10)
 - 3 电阻加热的焊接热模拟试验机的设计 和应用.....D.J.Widgery (15)
 - 4 模拟的与实际焊接的热影响区显微组织的比较.....C.F.Berkhout (23)
 - 5 应用热模拟技术评定高屈服强度钢热影响区的机械性能和冶金性能I.M.Kilpatrik 等 (27)
 - 6 用焊接热模拟研究 $1/2\%Cr-1/2\%Mo-1/4\%V$ 钢的热影响区消除应力裂纹J.Myers (42)
 - 7 模拟过程中的试验D.M.Keane 等 (48)
 - 8 热影响区显微组织的模拟 R.E.Dolby 等 (54)
 - 9 焊接热影响区和热模拟试样显微组织的断裂韧性比较.....R.E.Dolby (64)
 - 10 焊接热模拟试验机的评论.....D.J.Widgery (73)
 - 11 讨论会记录整理 (一) ——热模拟机的发展过程、操作和设计
讨论会记录整理 (二) ——热模拟机的应用.....(82)
 - 12 放试样用的气室及膨胀仪控制的改进.....K.C.Wu (88)
 - 13 焊接热循环模拟装置 D.Levert等 (91)
 - 14 关于焊接热、拘束应力和应变循环模拟装置的研制及其应用举例稻垣道夫等 (103)
 - 15 应用高频加热的试验装置峰松裕行等 (121)
 - 16 使用《Thermorester》热模拟机检查堆焊层下裂纹的敏感性金泽 (125)
 - 17 《ИМЕТ-1》和《ИМЕТ-4》热模拟试验机M.A.Шоршоров等 (128)
 - 18 模拟焊接热循环的温度程序控制装置Л.Е.Гукасян (134)
 - 19 平板试样上模拟焊接加热用的装置Л.В.Иванов (137)
 - 20 模拟多道焊接的多次热循环.....P.W.Holsberg等 (140)
 - 21 关于 Inconel 718 合金的模拟焊缝熔化区塑性的评定J.Gordine (145)
 - 22 HY80低合金钢模拟焊接热影响区的组织和性能.....G.T.B.Kellock等 (154)
 - 23 电弧焊焊接热循环—冷却时间的计算.....Dieter Uwer (176)
- 附：焊接热模拟文献目录
——英国焊接学会 1972 年汇编.....(184)

1 《Gleeble》模拟机的发展*

W.F.Savage

摘要 亚共析碳钢焊接热影响区 (heat-affected zone 以下简称 HAZ) 的形成机理是焊接 HAZ 发生复杂冶金变化的一个实例。其热循环包括一系列峰值温度, 从熔点一直到室温。因此, 一切可能的热激活过程, 都必定会在焊缝附近的某些局部区域中发生。这样, 也就产生了显微组织的连续梯度, 而每一种组织则具有其特有的化学性质和机械性能。

这种渐变的显微组织梯度, 妨碍了从实际焊接件中测定这些性能。然而, 正是由于需要在不同材料的焊接 HAZ 中研究个别显微组织的性能特征, 因而引起了人们对发展热模拟试验机的兴趣。

《Gleeble》是一种典型的、使用最广泛的热模拟机。起初, 我们在伦塞勒 (Rensselaer) 工学院投入不多的时间用剩余设备做成。后来约经九年的工作, 终于制出了第一台满意的热模拟试验机。不久, 又增添了一个粗糙的抗拉试验装置, 于是《Gleeble》试验机就诞生了。

这些年来, 经过许多修改和改进, 直到现在, 大约有五十台以上不同价格、不同复杂程度的《Gleeble》在使用中, 其应用领域极广, 使用范围几乎不受限制。所以在任何一篇论文中很难全面说明。下列各篇打算包括这个主题。

一、序 言

《Gleeble》也许是第一流的、卓有成效的热模拟试验机之一, 在讨论它的发展过程之前, 首先必须考虑形成典型焊接 HAZ 的条件。为此, 我们选择了亚共析碳钢, 以研究焊接 HAZ 的形成。这种钢是结构钢的典型, 全世界每天都以大量吨位进行着焊接。

图 1-1 为实测的温度曲线^[1], 表示焊接 HAZ 中温度分布随时间而变化的关系, 钢板厚度为 12 毫米, 焊接时不预热, 热输入量为 2.75 千焦耳/毫米。图 1-1 中的温度是在钢板表面以下稍微超过 1 毫米处测得的, 每条曲线都表明, 时间一定, 温度是到达焊缝熔合线的垂直距离的函数。

每条曲线都标有数值, 系指在电弧通过测量温度分布的那个横断面 (参考平面) 以后所经过的时间 (以秒表示)。请注意, 在电弧中心线通过参考平面约 4 秒钟后, 焊缝熔合线处的温度还在继续上升。接着温度梯度的斜率随着时间的增加而下降。大约 180 秒钟以后, 在图 1-1 所示的整个 5 毫米距离内, 一直降到近似的恒定值 320°C。

在 HAZ 中, 经受任一峰值温度的某点, 到焊缝熔合线的距离, 都能很容易地从代表峰值温度轨迹的点划线 (如图 1-1 所示) 上确定。因此母材金属会经历超过奥氏体晶粒长大的

* 第一至第十一篇译自“Weld Thermal Simulators For Research and Problem Solving”。

温度 (约 1000°C)，则粗晶区一直达到约 1.5 毫米距离。超过 A_{c_3} 的峰值温度区，其距离约为 2.5 毫米。而超过 A_{c_1} 的峰值温度区，则约达 4 毫米。

距离一定，测定此处每一瞬时的温度，就可以把母材上该点所经历的全部热循环建立起来。图 1-2 所示，间隔为 0.5 毫米、一系列点上的、11 条这样的热循环曲线。每隔一条曲线，标有到达焊缝熔合线的距离 (毫米)。

从这些曲线可以看出奥氏体粗晶区发生在距离焊缝熔合线约 1 毫米范围内，而细晶区则发生在稍超过 1 毫米的位置，向外延伸到约 2.5 毫米的范围内。距熔合线 2.5~4 毫米之间的峰值温度位于临界温度区域内，因此，只会发生部分奥氏体转变。

在热循环曲线的冷却部分，所有温度超过下临界点 (723°C) 的地方，所形成的奥氏体必然发生转变。但其转变产物又取决于两个因素，即 HAZ 中每点的冷却速度以及该点奥氏体的有效淬硬性。由图 1-2 可见，在转变温度范围内 (A_{c_3} 和 M_f 之间)，焊缝熔合线处的冷却速度最快，当离焊缝熔合线的距离增大时，冷却速度则减小。

奥氏体有效淬硬性受到下列四个因素的影响，一般来说，随着以下四个因素的增加而加强。

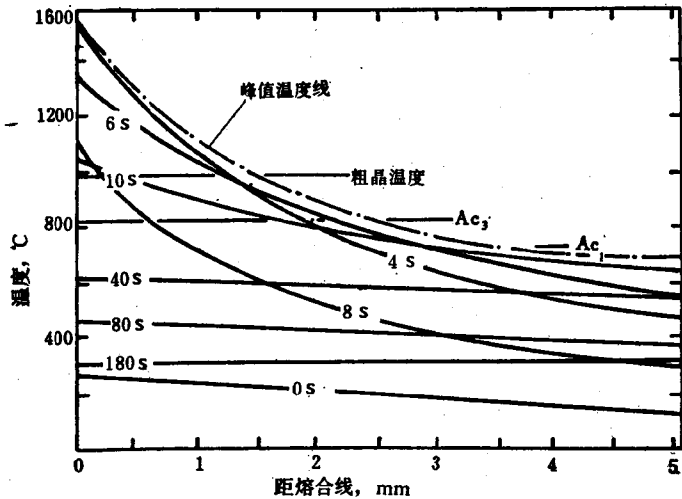


图1-1 电弧焊HAZ典型温度分布曲线
钢板厚度12毫米，热输入量2.75千焦耳/毫米

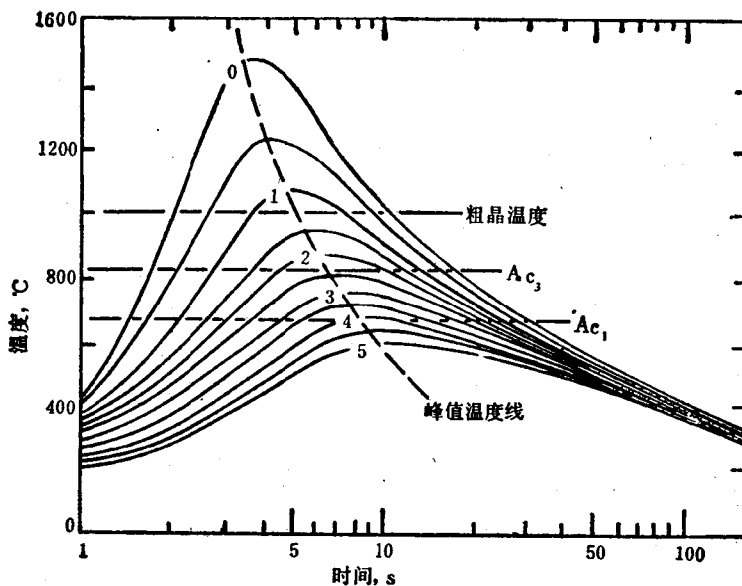


图1-2 电弧焊HAZ的典型热循环曲线
钢板厚为12毫米，热输入量2.75千焦耳/毫米

1. 溶解在奥氏体中的碳量；
2. 溶解在奥氏体中的合金元素总量；
3. 奥氏体的晶粒尺寸；
4. 奥氏体的均匀性。

所以，在HAZ中，各点的有效淬硬性都有明显不同，这主要是由于晶粒尺寸和溶解在奥氏体中碳量的差别所致^{*1}。因此，在经受过临界温度区间的峰值温度的HAZ局部范围内，奥氏体中的含碳量，可以从名义含量（峰值温度恰好低于 A_{c3} 的地方），升高到接近共析成分（ $C=0.8\%$ ）（峰值温度恰好超过 A_{c1} ^{*2}的地方）。

图1-3说明，在亚共析碳钢HAZ中，不同位置的不同冷却速度和有效淬硬性对获得转变产物的影响也不同。此图为三轴正交的立体图，它概括了随着距焊缝熔合线的距离增大而连续冷却转变（Continuous cooling transformation 简称CCT）行为发生的变化。图中有五条CCT曲线，表示间隔为1毫米的五个位置上奥氏体的转变。在每条CCT曲线上又增加了一条曲线，那是以图1-2数据为基础的、特定位置的冷却曲线。

请注意，在焊缝熔合线、1毫米、2毫米这三处中，焊缝熔合线处的淬硬性比1或2毫米处为大。它们所经受的峰值温度全都超过 A_{c3} 。因此，可以推测，这三处的奥氏体都有相同的成分。所以，它们的淬硬性差异，完全是晶粒尺寸差异的结果。这样，焊缝熔合线处晶粒最大，淬硬性也最大，而在2毫米处，奥氏体晶粒发生了细化，因而，淬硬性也是三点中最低的区域。

图1-3还表明，就这种亚共析钢的焊接HAZ而言，在焊缝熔合线处的显微组织是由铁素体、细微片状珠光体以及马氏体组成。必须注意，在奥氏体转变完成之前，冷却曲线就已降低到形成珠光体的最低温度（水平虚线）以下。所以，当残余的、未转变的奥氏体冷却而通过 M_s-M_f 区间时，就会转变为马氏体。

在1毫米和2毫米处的显微组织完全由铁素体和珠光体组成。应当注意，在上述两种情况下，两条冷却曲线皆通过高温转变区中的转变线。不过，可以预料，在1毫米处，其组织由较少的自由铁素体和较多的细小片状珠光体组成。因为该处的冷却速度和淬硬性皆比在2毫米处为高，故其转变发生于较低的温度。

3和4毫米处的热循环峰值温度，恰在临界温度区间（见图1-2）。4毫米处的峰值温度为 A_{c1} ，所形成的奥氏体为共析成分，所以，在CCT图上，就不会出现亚共析转变线。再有，由于4毫米处的奥氏体含有大约 $0.8\%C$ ，因而奥氏体的淬硬性也会显著增加（请注意，在图1-3中，4毫米处珠光体转变的开始时间增长了）。此外，由于该处奥氏体含碳量增大，以致

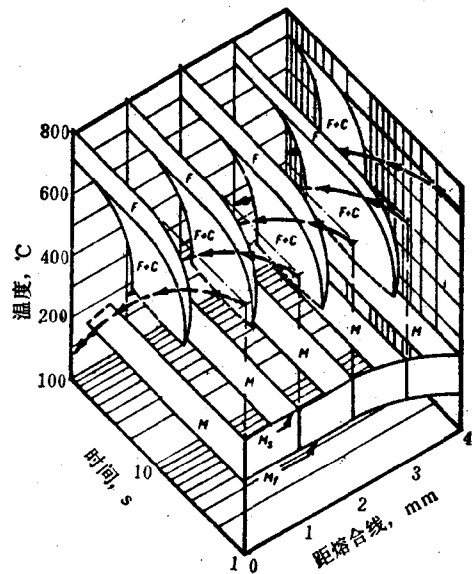


图1-3 亚共析碳钢焊接HAZ的连续冷却转变

*1 均匀性课题虽然重要，但为了论文的简化而忽略，不过也常予以考虑，特别在探讨合金钢时。

*2 在这篇讨论中，虽然也承认某种过热是有可能在高速加热下产生，但仍采用平衡值。

M_1 和 M_2 温度显著降低。因此，该处的显微组织，可能由原来未转变的铁素体晶粒和一小群一小群细小片状珠光体组成，其中散布有高碳马氏体小粒。

在 3 毫米处，奥氏体中含碳量，介于合金的名义含量和共析成分之间。由于该处已存在的、未转变的铁素体起着生核作用，很快地促进亚共析反应，同时奥氏体中含碳量的增加，则会延长完成珠光体转变所需要的时间。这些事实造成的综合结果是：3 毫米处高温转变区的宽度将会显著增加，也应当注意该处碳的中间含量对 M_1 和 M_2 温度的影响，如图 1-3 所示。

从上述的讨论中，显然可见，钢材的焊接 HAZ 是由连续变化的显微组织所组成。由于所经受的峰值温度变化是连续地，从焊缝熔合线处的液相温度一直到远离焊缝的板材处的室温，所以，一切可能的热激活过程都必定会在焊缝附近的某特定部位上发生。典型的是 HAZ 的可见宽度，可以从电子束焊缝的几百微米，到大型电渣焊缝的几个厘米。由于存在着如此陡峭的“显微组织梯度”，要想对整个焊接 HAZ 中个别显微组织的性能作出富有意义的评定，显然是不可能的。

二、问题的说明

1946 年，Rensselaer 工学院作了一个尝试，在一种船用钢板上确定焊接规范对焊接 HAZ 缺口韧性的影响〔2〕。由于上述明显的理由，不管如何谨慎地安置缺口的位置，都毫无结论。回顾往事，似乎非常无知。但激发了我们对研究焊接 HAZ 性能的兴趣。

关键问题在于如何把焊接 HAZ 中某一待试的显微组织，复制成一个足够大的体积以便进行试验。举例来说，为了测定缺口韧性，在“却贝”试样的整个横断面上，分布待试的显微组织的均匀体，并延伸到缺口两侧 1~2 毫米，这是最起码的要求。因此，以此为目标，把焊接 HAZ 中各个区域所出现的显微组织模拟下来，复制成足够大的体积，以便评定其机械和化学性能。

三、《Gleeble》模拟试验机的发展

任何金属材料的显微组织，都是它所承受的热过程的特有产物，这是冶金学的基本原理。因此，要模拟某种特有的显微组织，首先必须了解产生这种组织的精确热规范，然后再按这种规范进行同样的热处理。

利用大的交流电流通过相应试样的这种电阻加热法是获得快速加热的最佳方法。图 1-4 所示是一台早期使用的模拟热循环设备，按程序控制着随时间而变化的加热电流的大小，就可以再现焊接热循环。图的左边是程序控制装置，它由 10 个独立可调的调节器所组成，用以产生连续而有顺序的时间间隔，在每一个时间间隔过程中，可以借助于导通角度来控制引燃管，从而能任意调节电阻焊变压器初级电流的大小。

经过反复试验后，可以调节不同的时间间隔和每一时间间隔中的电流大小，从而，能在夹持于电阻焊变压器次级一方的试样上，产生一个近似于要求的热循环曲线。但要得到精度为 $\pm 50^\circ\text{C}$ 的热循环曲线，往往需要三十次或四十次之多的试验。而且，假如要把一个新的试样经受同样的电程序，那么接触电阻或试样几何形状的差别，总会引起完全不同的结果。

因此，上述设备还需有一个闭环反馈系统。我们采用了一台斩波器——稳定的直流放大

器，改装成如下形式，从而达到上述目的。

图 1-5 居中偏右处，可以看到一个凸轮控制电位器，用来建立一个给定电压，这个电压是按照所要求的热循环随着时间而改变的。请注意，这一薄板金属凸轮是安置在一个由马达驱动的小车上，在小车上安装着凸轮控制电位器。小车的运动提供时间基数，而凸轮随动机构沿着直线样板作横向移动时，就提供了变化的给定电压。

把尺寸稍大的“却贝”试样，夹持在一台 50KVA 闪光焊机的夹头上，示于图的左边。直径为 0.394 毫米、端头交叉焊合的热电偶，用储能焊焊接在试样中部的表面上，这样便产生了一个与瞬时温度成比例的电压，并接入反馈回路。这个信号（电压）与凸轮控制电位器输出的基准电压反向串联，从而产生一个直流差值信号。这个差值信号被放大大约 10000 倍，并用来给引燃管断续器的闸流管提供了一个偏压。如果试样在某一瞬间温度太高，则放大器的输出就向闸流管的栅极上施加一个负偏压，使其停止引燃，从而使引燃管断续器关闭。反之，如果试样在某一瞬间温度太低，则有一个正偏压加到闸流管的栅极上去，从而使引燃管断续器接通，于是试样便通电加热。

令人费解的是这台原始的试验控制装置，在再现所要求的热循环时，竟能把试样温度控制在 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 以内。于是，我们就把它的电路包封和固定下来，把摇晃的临时安装的导线重新安装起来，可是它再也不能满意地工作。显然，这可能是由于敞开导线的临时排列，引进了意外的干扰信号，而把各种不良信号抵消了的缘故。

大约经过九年时间的修改和再设计，终于试制出一台如图 1-5 所示的样机。这台设备的电子控制箱，除引燃管断续器外，都放置在示波器的右前方。在控制器的正下方，可以看到一个直接式笔写温度记录仪（X-Y 函数温度记录仪），被用来检测所经受的热循环。



图1-4 最初研究热模拟用的电子程序控制设备

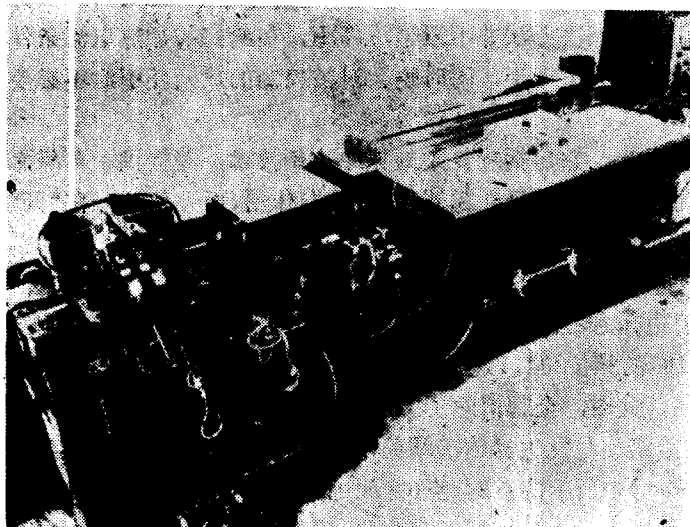


图1-5 在Rensselaer工学院的原始热模拟机

四、热模拟试验机设计的主要问题

设计热模拟试验机时，主要问题是：如何得到一个合适的信号对干扰的比例，使用铬-铝热电偶时，如果温度偏离 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，其差值信号的电流和电压约为几微安和0.2毫伏。然而，这样微弱的信号，却要在5~15伏的电压下，控制1000~10000安培的加热电流是困难的。

使问题更为复杂化的是，只要有电流流过试样，热电偶输出电压就会受到两种电的干扰。

1. 当交流电流流过试样时，产生了强大磁场，导致热电偶两端产生约50~60毫伏感应电压（约为 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 时差值信号的250倍）；

2. 假如热电偶的两条线，沿着试样长度方向处于不等电位时，就可能产生0.01~0.1伏的电压梯度叠加到热电偶的输出端。

通常解决的办法是，设计一个能使交流感应干扰信号衰减，同时又让直流差值信号保持不变的滤波器。即使如此，其它内在的约束因素仍然会使这种作法行不通。

举例来说，当电流流过试样时，加热速度可高达几千 $^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 。而在电流切断时，冷却速度又为几百 $^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 。因此，在正确的操作中，实际温度环绕着程序预定的温度，以 $1/2$ 到 $1/4$ 的网路频率来回交替着。而差值信号的极性也随着主频率的 $1/2$ 到 $1/4$ 的基本频率交替着。很明显，要设计出一种滤波器来消除交流感应干扰，而不减弱差值信号是不可能的，因为它们的基本频率相差只有2-4倍。

五、热模拟试验机的控制方法

第一种解决感应干扰问题的办法是构成这样一种控制系统，使得加热电流只能在有交流输出电压的半波周期时通过。在这种方式中，人们可以在没有电流通过试样时来检测温度。这时热电偶的输出端，就不存在交流感应的干扰。虽然，回想起来，这是一种直观地显而易见的解决办法，但却花费了近四年的时间去认识这一问题的全貌，以及五年以上的时间去完成一个切实可行的解决办法。然而，这种解决办法并不理想，因为，在给定的加热电流条件下，这种办法使得可能的最大加热速度减去了一半，同时也会对被控制的热循环引起不必要的巨大波动。

第二种办法就是目前使用的这种系统，它包括着复杂的脉冲控制技术，并提供了可靠而成比率的控制作用。这就是说，瞬时差值信号的极性起着“开-关”作用，而差值信号在“开”时的大小，能自动地把加热电流的大小调节到所需的数值。

在经受《Gleeble》热模拟的试样中，电压和电流的典型波形如图1-6 a)所示。请注意，甚至在最大需要量的情况下，当没有电压加在试样上，因而也就无电流流过时，这一控制系统在每个半波周期里，提供了大约 20° 的相位角*。这是控制器的一个精心设计的特性，因为它提供了一个周期性重复的时间间隔，此时，全部消除了上述的两种感应干扰源。

图1-6 b)所示为热电偶端的和给定信号发生器输出端的电信号代数相加，而获得的差值信号波形图。这个波形是动作时图1-6 c)中所示的点2与点6之间的典型波形。请注意虚线表示从热电偶端得来的实际差值信号，实线则表示上述实际差值信号、以及由于感应而掺入热电偶

* 网路频率的一个周波等于 360° 相位角。

控制系统的电流和电压两者造成的外来干扰的总和。但也请注意，在没有电压加到试样上的时间间隔里，热电偶的实际差值信号是没有感应干扰的。

图 1-6 c) 表明《Gleeble》的输入部分是如何控制电路进行工作的。我们可以看到，给定信号发生器是与热电偶 (TC) 输出端反向串联的 (如图 1-6 d))。这样，当试样温度稍低于程序给定的瞬时温度时，则点 2 和点 6 之间的差值信号就会使点 2 的正电位更高。这一情况相当于一个“导通”信号。

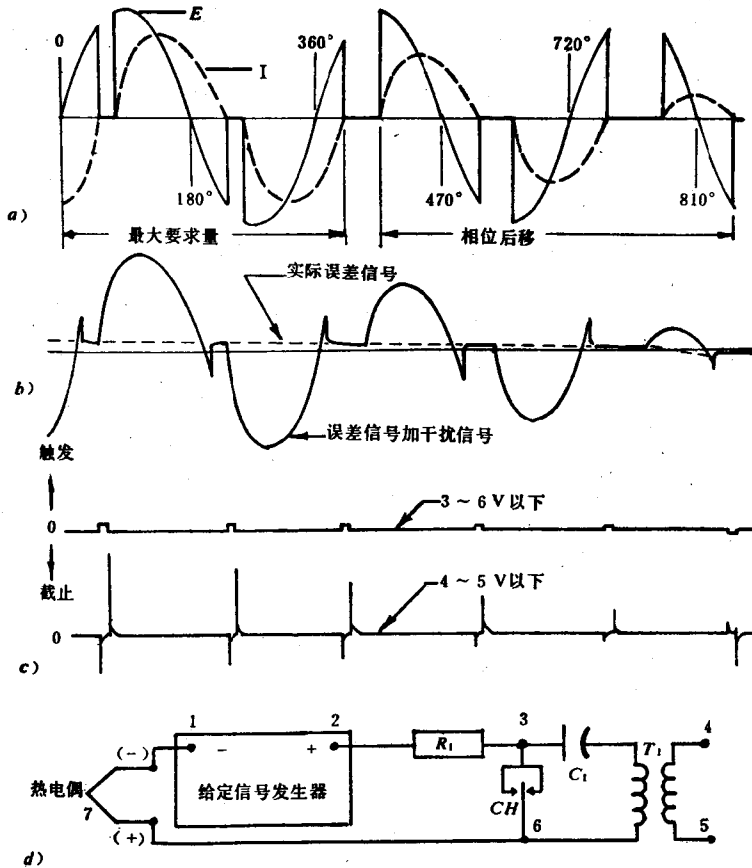


图1-6 现代Gleeble的波形和输入端示意图

除了在每个半周波内有 10° 相位角的短暂周期外，同步斩波器 (CH) 的触点总是把点 3 和点 6 短接起来。此时，在点 2 和点 6 之间出现的整个信号，在电阻 R 的输入端上也有相同的表现，而且，此时也无电压信号进入隔离变压器 T_1 的初级。

借助于斩波器的动作同步化，使得仅在没有电压加到试样上时，而在点 3 和点 6 之间出现一系列的脉冲，才打开 CH 的触点，这些脉冲的高度相当于实际差值信号，如图 1-6 c) 上面的曲线所示。这样的取样技术消除了电干扰的两个主要来源，并在点 3 与点 6 间产生一个适用的差值信号。

当斩波器触点打开而点 3 与点 6 间出现差值信号时，电流通过变压器 T_1 的初级，使电容 C_1 充电。把全部回路的电阻值取得很低，电容 C_1 值取得很小，就能有意地做到时间常数缩短。所以， C_1 以零点几毫秒的时间充电到差值信号电压，然后充电电流降到零，直到 CH 的

触点再次闭合为止。当 CH 触点闭合时，点 3 和点 6 再次联接，电容 C_1 则通过变压器 T_1 和斩波器 CH 的触点放电，使得初级电流向相反方向流过，直到电容 C_1 上的电荷消失为止。这个放电动作的时间常数，甚至比充电动作的时间常数还要短，所以，放电电流显著地大于充电电流。

充电电流和放电电流在变压器 T_1 初级线圈中流通，则在变压器二次线圈中感应出电压。这个二次电压的波形图，示于图 1-6 c) 的下面的曲线。电容 C_1 放电峰值要比充电峰值大得多。

电容 C_1 放电时，感应的电压峰值高度是和差值信号的大小成比例的。而这个电压峰值的极性，则指示着试样温度是高于还是低于所给的数值（注意，图 1-6 c) 右边最后一个脉冲的极性的反向是表明试样温度高于给定值）。因此，这一峰值电压包含了所需要的一切数据，从而得到了完全自动的、成比例的、速度可调的“开-关”控制器。

在接通时间内，借助于差值信号的大小，这个控制系统就能在电子接触器被触发的每半波周期中，自动地调节各点。因此，当差值信号是大的正值时，表明试样温度远远低于给定的数值，试样中的电流波形就会如图 1-6 a) 中标有“最大要求量”字样的区域中所示。如果温度近似给定值时，控制系统就自动改变加在试样上的电压和电流波形，如图 1-6 a) 中相位后移部分所示，因而减小加热电流，以符合要求。在第一周波的末尾，差值信号峰值的极性符号反向，表明试样温度超过给定值，控制系统就自动地切断加热电流。

只要调节适当，当试样温度升高到瞬时程控值的 0.5 毫伏范围时，这个成比例的控制系統就能开始自动地减小加热电流。同时，“开-关”动作环绕给定值作 ± 0.05 毫伏的变化而起着调节作用。对于铬-铝热电偶来说，这意味着温度灵敏度可达 $\pm 2^\circ\text{C}$ 左右。

六、《Gleeble》模拟试验机的进展

图 1-7 所示是现代《Gleeble》的第一代原型，从外形上看是粗糙的，但它能再现程序控制的热循环，钢的加热速度高达 $1650^\circ\text{C}/\text{秒}$ ， 700°C 时的冷却速度高达 $225^\circ\text{C}/\text{秒}$ 。此外，可以施加 49 千牛顿的最大拉伸载荷，夹头运动速度可高达 200 毫米/秒。试样的载荷、夹头位置和温度，都可由示波记录器同时记录。

图 1-8 表明设备发展的最后阶段。这台试验机抗压和抗拉的负载能力均可高达 44 千牛顿。夹头的移动范围有两个：速度高达 5000 毫米/秒时，行程为 60 毫米以内；速度高达 200 毫米/秒时，则行程为 110 毫米以内。设备还有一个可装拆的气氛室，在此气氛室中，试验能在真空或任意要求的气氛中进行。无论加载或夹头的移动速度都由电子程序控制。



图 1-7 Rensselaer 工学院的第三代
《Gleeble》机



图 1-8 最新而又最复杂的
《Gleeble》机

钢材加热速度可高达 $1650^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ ，冷却速度高达 $225^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ ，都能程序控制。任一要求的热循环曲线都能用 32 线电子给定发生器来模拟。

一台直接显示记录示波器，内装两台校准电路和一台监视示波器，连同真空系统的控制构成这台设备，这是一个进步。

七、结束语

几年来，已有五十多台复杂程度不同的《Gleeble》机供给美国和欧洲。由于不同行业的科学工作者是那么多，所以《Gleeble》作为一种热模拟机而应用极为广泛，这是不必大惊小怪的。用户研制的各种辅助设备和仪器，还需要好几篇这样长的报告加以介绍。不过，像高速膨胀仪、热疲劳装置等是经常使用的，还有几家美国钢铁公司经常利用《Gleeble》机作为合金研制中的手段。总而言之，热模拟机已臻于成熟阶段，它的未来将会由于这一领域中工作者的精巧创造而前途无限。

参 考 文 献

[1] Nippes, E. F. Merrill, L. L. and Savage, W. F. "Cooling rates in arc welds in 1/2-in. plate". Weld. J. Res. Suppl 28 (11), 1949, 556s~64s.

[2] Nippes, E. F. and Savage, W. F. "The weldability of ship steels—a study of the effects of travel speed, Preheat temperatures, and arc power level on the notch toughness of weld metal and heat-affected zone". Ibid, 25 (11), 1946, 776s~87s.

2 应用感应加热法的热模拟试验机

J. M. Lowes K. D. Richardson D. M. Hoddrill

摘要 设计和制造了一台应用高频感应加热的热模拟试验机,并介绍其工作原理。已经表明,能在 10×10 毫米²截面的试样上产生大约8毫米长度的均匀组织。这些坯料适宜于制作力学性能试样。

一、前言

现在人们都公认,在焊接的钢结构中,焊接接头的韧性是影响结构使用性能的关键因素。因此,近几年来,对于在焊接接头的不同部位上试验这一性能来说,已经化费了相当大的精力,并且,把取得的数据用于焊接接头设计,现在也已很好地作了规定。

尽管如此,关于测定热影响区(HAZ)韧性的方法,以及对由此得到的数据的解释,还是存在着争论。举例来说,争论之一集中围绕着缺口难以定位的问题,按真实的缺口韧性试验要求,应该把尖缺口准确无误地开在HAZ的关键区域内。但是,钢的成分不同,这个区域相对于熔合线的准确位置肯定也会不同。由于这一事实,所以,缺口位置问题就变得更为突出了。

从设计观点来看,把HAZ看作为一个整体,显然是重要的。在这种考虑下,就拿钢的成分对HAZ韧性的影响这一研究来说吧,假如一定要使用实际焊接接头来测定各种因素的定量影响的话,那么在这个研究中,试验起来将会变得非常麻烦而罗嗦。同一个研究,如果使用模拟HAZ的试样来做,获取需要的数据,那要快得多,并且简单得多了。这些模拟试样,就是对被研究的钢种试样施加一个热循环——重现要研究的那部分HAZ所经受的热循环——而产生的。尽管在完全定量的意义上,热模拟还没有为设计工作提供可以使用的试验成果,但是,在坚持定性的方向上来说,热模拟则是卓有成效的。因此,只要少数针对真实焊接接头的试验,就可以把试验结果引伸为完全定量的基础。

在过去的二十五年里,特别是近几年来,人们已经颇有成效地制造和运用了许多焊接HAZ热模拟机。关于这种方法的最新评论,已由Widgery发表〔1〕。

大多数模拟机是直接对试样进行电阻加热。实际上,所有制作力学性能试样的模拟机,都设计为这种类型。然而,下面将要介绍的模拟机,虽然在许多方面和它们相类似,但是,却采用了高频(HF)感应加热法。选用高频加热有种种原因,主要一点是这种加热方法可提供多种用途。例如,容易为模拟机提供快速膨胀仪,好扩大使用范围。

二、设计

整机外貌示于图2-1,模拟机主要是通过一个闭环控制系统来工作的,闭环系统概略地示于图2-2。在闭环控制系统内,焊在试样上的热电偶,其输出讯号连续地和一个能够变化

的给定电压相比较，以便模拟出需要的热循环。这个给定电压，是在研究了使用中的热电偶特性之后，根据热循环推导出来。

为了便于叙述，模拟机可以分为五个部分：

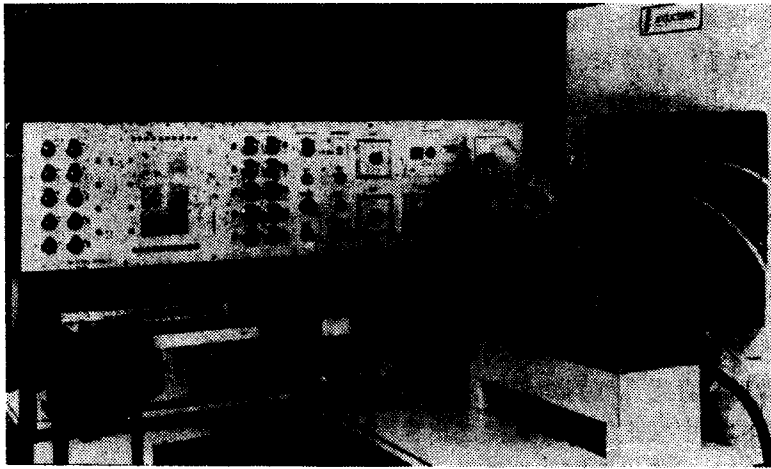


图2-1 气体协会的模拟机

1. 函数发生器；
2. 程序装置；
3. 温度控制器；
4. 电源，由电源控制箱和感应发生器组成；
5. 试样的冷却夹具。

1. 函数发生器

函数发生器主要由一个多圈式精密电位计组成，能够产生代表热循环的可变给定电压。这个电位计的滑动触头由一个小型直流电动机驱动，电动机的转速可以依据热循环上选定的位置来改变，从而也改变了电压梯度 $\frac{dv}{dt}$ 。

电动机转速变化时的电压，也就是温度，用十位调整电位计来确定，而这个电位计的调整位置是预先选定的。在适当的时刻，继电器把预先选定的电压接到差动放大器的输入端，在这里，电压输出值和主给定电位计的电压输出值进行比较。当两者相符，亦即在预定的温度时，程序被推前一步，从而进行下一段函数的选择。这样，完整的函数将由一系列直线所组成，这些直线紧紧地逼近于要求的热循环。

在 50 微伏以内的相符程度都能被检测出来。由于电位计量程为 9 伏，分辨能力约千分之一，即 9 毫伏。所以，可以看出，对符合性的检测能力比系统要求的精确得多。这种切换电位计的方法保证了在装置调定的情况下，调节一个电位计不会影响其它电位计。

主给定电压电位计的电动机转速可以在 10~10000 转/分范围内变化，经过适当的齿轮减速后，得到 $1/1000 \sim 1$ 转/秒的滑动触头速度，即 $0.05 \sim 100^\circ\text{C}/\text{秒}$ 的温度/时间比率。在要求更快的加热或冷却速度的地方，可以让模拟机“自由”地跑到调整温度。在这种情况下，试样的热特性和冷却夹具的冷却能力都成为限制的因素。十个温度调节电位计中的任意一个，都能

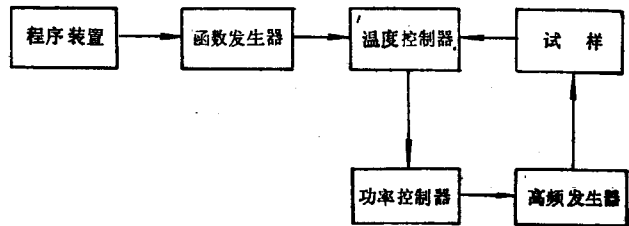


图2-2 模拟机函数设计

调整到所要求的温度，与置于“待令”位置的、预先准备好在要求的温度时刻进行控制的给定电压电动电位计一起起调整作用。

给定电压电位计的电动机转速由第二组十个调整电位器进行控制，这组电位计可以按任意次序选定。全部调节都是互相独立的。按常规方法使用闭环系统来控制电动机的转速，即把由直接耦合的转速传感器来的输出电压和由主电位计获得的给定电压相比较，并在放大以后，用来直接控制电动机的转速。

2. 程序装置

把系统的程序编制部分设计得具有足够的灵活性，以便于操纵模拟机提供的各种装置。这个编程部分和机床编程所用的类型是相同的。主要由一个插销板式矩阵编程器组成，上面的每一横排孔（行矩阵孔）是代表不同的有用功能，例如，自然加热速度和冷却速度的选择，或者是，根据十个速度调整电位计的设定，以任一特定速度来加热和冷却的选择。这个编程部分也包括在热循环的任一点，能方便地维持预定时间的装置。

从左到右排列的直排孔（列矩阵孔）代表程序编制中的各程序步（separate steps），在横线和垂线相交的孔中插进插头，就挑选出程序中适当阶段所要求的功能，因而整个程序可以迅速建立，并记录下来作为下一步参考。程控装置拥有一定数量特有的逻辑线路（logic），因而能把被选取的、但却是矛盾的功能筛掉。

3. 温度控制器

函数发生器和程序装置的效用是模拟需要的热循环，并把它译成电模拟量—电位差，而温度控制器则完成把这个信息输送给电源的任务，这样，足以保证已加热试样的温度接近于需要的温度。

这台模拟机的温度控制器是一般的三项（比例、积分和导数）控制器材料之间的转移（从一种材料到另一种材料），使每一项的最佳调整位置可能变化，但是，实际上，在确定钢试样的最佳调整位置上，并没有碰到过什么困难。

引自函数发生器的模拟给定电压为0~9伏范围，接着，在一个射极跟随器网络里把它降低到0~20毫伏，再按电子学逆变原理逆变成一个交流电压以后，在差动放大器中，和来自焊在试样上的热电偶的电压相比较。放大器的输出经过整流，用来输送给动圈式误差计和晶体管锯齿波发生器，由此产生脉冲，去触发控制电源的硅可控整流器。

由于温度和电源控制系统全是固体元件（solid state），并且感应发生器使用热离子管，所以，从热电偶到电源输入的回路总反应非常迅速。于是，试样的热惯性成为系统反应特性的控制因素。

4. 感应发生器

感应发生器是一个额定频率为450千赫的普通高频发生器，设计的输出回路配用低阻抗线圈。HAZ模拟使用的感应线圈，其电感值为0.25到0.5微亨。发生器的输出功率是通过改变输送给振荡管的直流值来控制的，这种控制是使用硅可控整流器来调节HT变压器初级线圈的平均交流电压来完成的。控制是相位角控制类型的，并且，在零和最大功率之间是有效连续的。

5. 试样冷却夹具

设计的这台模拟机适合 10×10 毫米²*截面的试样。这些试样被夹紧在两个大的水冷铜

* 原文为“10mm² section specimens”有误——译者。

夹具中，其中一个夹具能自由移动，以适应试样的热胀冷缩（见图 2-1）。两个夹具要设计得可以提供足够程度的冷却，因为甚至在模拟热循环的冷却段，发生器总还是要给试样输送功率的。另外，夹具配置了一个氩气净化装置，以防止试样氧化。

三、操 作

夹具之间的距离，也就是模拟机操作时试样外露的长度，由两点要求来决定。

1. 冷却速度；
2. 加热区域的宽度。

虽然，理论上希望有一个很宽的区域，实际上这个区域由于得不到需要的冷却速度而受到限制。另一方面，如果要求快速冷却，则必须记住，以一个小的夹具间距输送足够的功率，在要求的加热速度下，把试样加热到需要的温度是不可能的。模拟 12 毫米厚的钢板上、热输入量为 30 千焦/毫米的埋弧焊，就所需的冷却速度来说，夹头间距 25 毫米是令人满意的，它可以提供 8 毫米长的均热区。并且表明这个区域的表面峰值温度变化不超过 20°C。

大多数感应加热装置都使用圆筒形感应线圈，试验初期，我们也采用这种感应线圈。使用圆筒形感应线圈（直径 $\phi 8$ 毫米）当时曾造成一些问题。首先，试样是方截面（10×10 毫米²）、而加热线圈是圆筒形的，试样拐角处温度超过表面中心处温度大约 100°C，这已有记录。因此，若按照表面中心处确定施加的模拟热循环，其峰值温度刚好低于熔点时，拐角处就必然熔化了。若试样偏离线圈中心稍微有点径向位移时，这种影响就更为明显。由于这些困难，使我们研究改用方形感应线圈。结果发现，试样表面中心处和拐角处的温度差能够降低为 10~15°C。然而，线圈偏移，也就是试样和线圈不共轴心的问题，仍然引起大约 50~100°C 的温度偏差。所以安装时必须始终要相当小心。

在施加真实的热循环时，高频感应加热带来典型的“集肤效应”^{*}的明显后果。这种影响表现为整个试样截面上奥氏体晶粒尺寸不一致（见图 2-3(a)），这是由于加热时试样内部温度滞后于试样表面温度造成的。通过对热循环的改进，包括采用在峰值温度时维持一个短暂时间的方法，使得冷却以前试样中心处达到表面处的温度，基本上解决了这个问题。结果，横截面上晶粒尺寸的均匀性明显地得到了改善（见图 2-3(a) 和图 2-3(b)）。热循环的第一部分（加

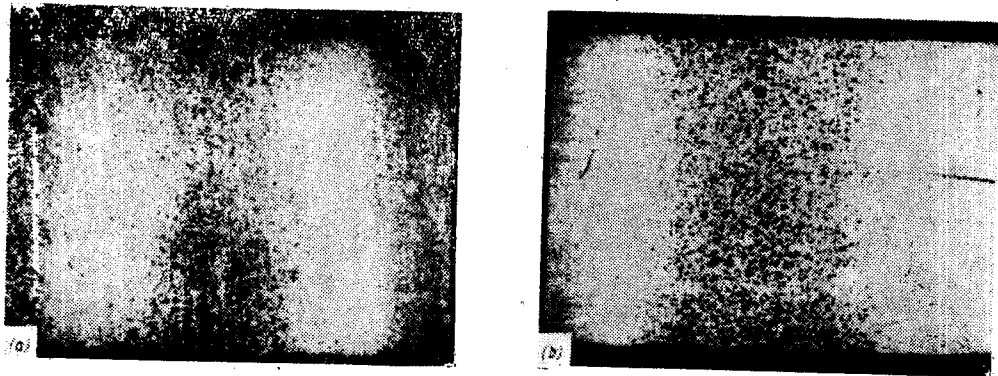


图2-3 (a)和(b) ×5.5

* 集肤效应是感应加热法的伴生现象，由于它而使试样的表层产生感应热。加热层的深度由材料的电阻系数和导电率，以及由发生器的频率来确定。

热段——译者注)模拟,照这样来折衷解决,其正确性不可避免地是有争议的。然而,在使用模拟机完成的同类研究中〔2〕,以及在别处的研究中〔3〕,已经证明:只要模拟试样的奥氏体晶粒尺寸与实际焊接 HAZ 相符,至于对达到这一点的方法,讲究其精确性,显然并不重要了。模拟加热过的试样必然会留下有限的组织梯度,考虑到这一情况的重要性,就应该记住,10×10 毫米²的断裂韧性试样,通常总要开有 2~3 毫米深度的缺口,在研究断裂起始时,重要区域是紧接缺口根部下方的最大拘束度位置处,也就是试样的中间宽度位置处。由图 2-3(b)可以推论出,这个区域将全都位于试样的均匀晶粒尺寸的核心部位,因此,可以料想,表层中粗晶组织的影响是微小的。

四、结 论

1. 设计和制造了一台高频感应加热的、而不是通常使用的直接电阻加热的模拟机。已经证明是一种模拟 HAZ 组织的令人满意的方法,模拟在适当大小的试样上进行,试样可供真实的力学性能试验。

2. 对施加的模拟热循环进行仔细的控制和修改,在 10×10 毫米²截面的试样上,集肤效应以及其它引起不稳定温度分布的来源,对组织均匀性的影响,已经降低到令人满意的程度。

参 考 文 献

〔1〕 Widgery, D. J. "Weld thermal simulators; a review". Metal Con. and Brit. Weld. J., 1 (7), 1969, 328~31.

〔2〕 Lowes, J. M. Haddrill, D. M. and Weiner, R. T. "The effect of different austenising treatments on the toughness of bainitic structures with the same prior austenite grain size". To be published.

〔3〕 Dolby, R. E. Weld Inst. Report R/RB/M53/70, January 1970.