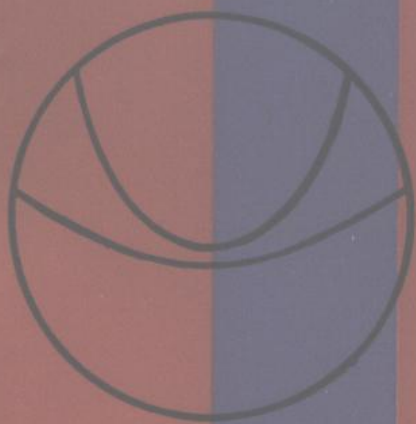


焊接热模拟技术



HANJIE RE MONI JISHU

陈楚 张月嫦 主编

机械工业出版社

焊接热模拟技术

陈 楚 张月嫦 主编



机械工业出版社

5151

焊接热模拟技术

陈 楚 张月嫦 主编

*

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 $14 \frac{1}{4}$ · 字数 346 千字

1985 年 7 月北京第一版 · 1985 年 7 月北京第一次印刷

印数 0.001—7,500 · 定价 3.00 元

*

统一书号, 15033 · 5793

前 言

本书是根据1978年4月在天津召开的“高等学校一机部对口专业座谈会”及同年6月在黄山召开的“全国焊接专业教材会议”的精神，编写的焊接专业教学参考书。

本书内容是根据编者近几年所做的研究工作，结合国内、外焊接热模拟研究的新成就，着重焊接热模拟技术的实际应用而编写的。

本书由上海交通大学陈楚、张月嫦主编。绪论及第二章由陈楚同志编写；第一、三、四、六、七章由张月嫦同志编写；第五章由姚寿山同志编写。全书由北京工业大学徐碧宇教授主审。

本书在修改、汇总过程中曾得到上海交通大学王铎、周浩森两位同志的帮助，谨向他们致以深切的谢意。此外，编写时援引了一些国内外文献资料，也在此向原作者致谢。

由于编者水平有限，书中肯定有缺点和争议，希望读者批评指正。

常用换算因子

长度

$$1\text{ m} = 39.37\text{ in} = 3.281\text{ ft}$$

$$1\text{ in} = 25.40\text{ mm}$$

$$1\text{ \AA} = 10^{-10}\text{ m}$$

面积

$$1\text{ m}^2 = 1.550 \times 10^3\text{ in}^2 = 10.76\text{ ft}^2$$

$$1\text{ in}^2 = 6.452 \times 10^{-4}\text{ m}^2$$

$$1\text{ ft}^2 = 9.29 \times 10^{-2}\text{ m}^2$$

力

$$1\text{ N} = 0.102\text{ kgf}$$

$$1\text{ lb} = 4.45\text{ N}$$

压力

$$1\text{ N/m}^2 = 1.02 \times 10^{-7}\text{ kgf/mm}^2$$

$$1\text{ Torr} = 133.32\text{ N/m}^2$$

能量

$$1\text{ J} = 0.2390\text{ cal} = 0.624 \times 10^{10}\text{ eV}$$

目 录

前言	
绪 论	1
第一章 焊接热模拟曲线的基本参数	3
§ 1-1 焊接热模拟的基本概念	3
§ 1-2 焊接热模拟曲线的主要参数及计算	4
一、焊接热循环曲线的主要参数及其物理意义	4
二、主要参数的计算	8
§ 1-3 焊接热循环曲线的实际测定	20
一、热电偶测温原理	20
二、焊接热循环曲线的测定	24
三、实测的焊接热循环曲线	29
参考文献	30
第二章 焊接过程的应力与应变	32
§ 2-1 焊接应力与应变	32
一、焊接应力的一般概念	32
二、金属受热后的机械性能和热物理性能的变化	33
三、均匀加热时引起的应力与变形	34
四、不均匀加热时的应力与变形	37
五、焊接引起的应力与变形	38
六、相变对焊接应力与应变的影响	41
§ 2-2 拘束应力和拘束度	41
一、拘束应力的产生过程	42
二、拘束度的解析和实验测量	43
三、拘束度对焊接裂纹的影响	48
§ 2-3 有限元法在热应力计算中的应用	52
一、材料机械性能随温度变化对应力-应变的影响	52
二、平衡方程式	54
三、对于各向同性材料的平面应力状态下的基本方程式	56
四、解析的程序	58
参考文献	59
第三章 焊接热模拟装置	60
§ 3-1 焊接热模拟装置概况	60
§ 3-2 感应加热焊接热模拟装置——Thermomator-W	63
一、装置的组成及主要性能	63
二、热系统	64
三、力学系统	70
四、程序设定和信号发送器	72
§ 3-3 电阻加热式热模拟试验装置	74
一、轴向均温区及其影响因素	75
二、温度测量及控制	75
三、Gleeble-1500热模拟装置简单介绍	77
参考文献	78
第四章 焊接热模拟研究 HAZ 组织及性能	79
§ 4-1 模拟焊接热影响区连续冷却转变图(SH-CCT) 及其应用	79
一、焊接HAZ各区的划分及典型组织	79
二、SH-CCT图及其应用	84
§ 4-2 模拟的与实际焊接的HAZ组织的比较	97
一、模拟的与实际焊接的HAZ组织的差别及原因	97
二、缩小模拟的与实际焊接的HAZ组织差别的方法	100
§ 4-3 焊接热模拟在实际焊接HAZ性能研究中的应用	105
一、焊接热模拟在“熔合脆化区”韧性研究中的应用	105
二、焊接热模拟研究HAZ粗晶区热应变脆化	110
参考文献	118
第五章 焊接模拟技术的应用之一——热裂纹的研究	119
§ 5-1 结晶裂纹	119
一、结晶裂纹的形态和特征	119
二、结晶裂纹的形成机理	121
三、结晶裂纹与脆性温度区	121
§ 5-2 多边化裂纹	122
一、多边化裂纹的形态和特征	122
二、多边化裂纹形成机理	124
三、多边化裂纹的主要特点	124
四、多边化裂纹的影响因素	125
§ 5-3 液化裂纹	126
一、液化裂纹的形态和特征	126
二、液化裂纹形成的机理	126
三、液化裂纹与脆性温度区间	127
四、液化裂纹的影响因素	129
§ 5-4 典型金属材料的液化裂纹问题	132
一、高强度热影响区液化裂纹	132
二、奥氏体钢的液化裂纹	132
三、高温合金的液化裂纹	133
四、铝及铝合金的液化裂纹	135

五、铜及铜合金的液化裂纹	136	二、焊接接头中氢的行为	174
§ 5-5 液化裂纹的模拟试验	136	三、氢致裂纹的裂源及其扩展	178
一、液化裂纹的模拟试验方法	137	四、焊接接头的拘束应力	182
二、关于液化裂纹模拟研究中的几个评定参数	138	§ 7-2 模拟充氢HAZ粗晶区延迟裂纹的	
三、热塑性试验的影响因素	139	研究	183
四、热塑性试验中的操作注意点	140	一、“三点弯曲”试验方法及装置	184
参考文献	141	二、模拟充氢及模拟HAZ粗晶区试样的制备	185
第六章 热模拟技术应用之二——再热裂纹		三、模拟充氢HAZ粗晶区“三点弯曲”试验法对氢致	
的评定方法及机理的研究	143	延迟裂纹机理的探讨	187
§ 6-1 再热裂纹的特征及产生条件	143	四、恒定拉应力氢致延迟裂纹试验方法介绍	192
一、再热裂纹的特征	143	§ 7-3 热模拟方法在层状撕裂研究中的	
二、再热裂纹产生的条件	144	应用	197
§ 6-2 再热裂纹的常用试验方法	145	一、层状撕裂的特征及产生原因	197
一、实际焊接试样的再热裂纹试验方法	145	二、层状撕裂的热模拟试验方法	199
二、模拟热循环试样的再热裂纹试验方法	146	参考文献	202
§ 6-3 再热裂纹微观机理的研究	151	附录	204
一、再热裂纹脆性与回火脆性间的关系	152	附录 1 各种测温材料的物理性质	204
二、杂质元素在再热裂纹形成过程中的作用	154	附录 2 镍铬-镍铝热电极直径和使用温度及	
三、合金元素对再热裂纹敏感性的影响	165	寿命关系	206
四、再热裂纹开裂模型	167	附录 3 热电极直径和最高使用温度	
参考文献	169	的关系	206
第七章 焊接模拟技术应用之三——		附录 4 热电偶技术数据	206
氢致延迟裂纹敏感性的评定		附录 5 镍铬-镍硅(镍铝)热电偶分度表	207
及机理的研究	170	附录 6 铂铑 ₁₀ -铂热电偶分度表	211
§ 7-1 氢致延迟裂纹的机理	171	附录 7 铂铑 ₃₀ -铂铑 ₈ 热电偶分度表	215
一、钢种的淬硬倾向及钢材的塑性储备	171	附录 8 镍铬-考铜热电偶分度表	220

绪 论

模拟技术在工程技术中的应用是很广泛的，这是由于任何工业产品都必须满足使用性能和安全可靠的要求。例如：在交通运输方面，订货主提出速度、装载量、能耗、使用寿命以及安全可靠等要求；在压力容器方面提出压力、容量、工作温度、安全可靠等要求。但是在设计时或制造前如何预测制造出来的产品能否达到上述要求呢？如果仅仅依靠理论分析和计算是无法完全解决的。这是由于实际工程问题相当复杂，影响因素很多，而理论分析和计算中都有若干假定条件，简化了各种影响因素。例如：按材料力学或弹性理论进行梁柱受力的理论分析和计算，所得的结构尺寸是不够安全的，必须加上安全系数——经验得来，这是由于实际受力条件要复杂得多。在过去一般都是依靠长期积累的经验数据或者首先进行试制，然后经过实物试验来判断。但是用实物进行试验在经济上损失太大，而引用经验数据又限制了新产品的发展。为此，随着科学技术的发展，模拟技术应运而生。例如：应用相似定律，通过船模试验池、风洞等，来解决船舶的性能（流体力学）和航空发动机、飞机机身的性能（空气动力学）等。在焊接中，焊接热模拟技术问世已有三十多年的历史。近二十年来，世界各国对模拟试验技术的研究十分重视并发展迅速。其中美国、日本、苏联在焊接热模拟机研制工作中取得了较大进展，并以定型产品投向国际市场。目前拥有焊接热模拟试验机的国家据不完全统计已有十多个。美、英等国已着手制定模拟试样及模拟试验程序的标准化工作。我国近几年来自行研制并且引进了焊接热模拟试验机，开展了焊接热模拟技术的研究工作。

焊接热模拟试验机，按加热热源的特点可分为电阻加热及高频感应加热两大类型；若根据焊接热模拟机的模拟功能又可分为焊接热模拟机及焊接热、应力-应变模拟试验机（可带有气氛模拟）。其中代表性的产品有美国的 Gleeble-1500 机、日本的 Thermorestor-W 机，此两种属于焊接热、应力-应变模拟试验机，苏联的 ИМЕТ-4 机也属此列。

焊接热模拟的特点是利用焊接热模拟机在试样上重现焊接热影响区的焊接热、应力及应变循环，使试样在较大的尺寸范围（3~7mm 长度方向）内获得焊接热影响区某一特定温度区的均匀温度及（显微）组织。使焊接热影响区各狭小的特定温度区域得以放大，提供了对各特定温度区组织及性能研究的可能性。大量的试验研究证明模拟试样与焊接热影响区的组织及性能有着良好的吻合。因此焊接热模拟技术以它的可靠性及良好的重现性而受到重视。随着程控技术及微处理机的应用，焊接热模拟技术已引入各种焊接裂纹试验的研究工作中，例如 Thermorestor-W 机在比较不同钢材的热裂纹、冷裂纹、氢致延迟裂纹及再热裂纹方面有独到的优点。而 Gleeble-1500 机在不同金属材料的热处理性能研究方面别具一格。目前焊接热模拟技术可用来研究的有焊接热影响区的脆化、应力腐蚀性能、断裂韧性及各种裂纹试验。Gleeble-1500 机还可以测定钢材的 CCT 连续冷却曲线。这些方面的研究为焊接工作选择最佳焊接工艺方法及规范参数、保证焊接热影响区的良好性能提供了可靠的技术依据。美国 HY-80 钢及焊接性能试验就有刚性固定对接裂纹试验、斜 Y 型坡口对接裂纹试验等方法，即是模拟实际结构的刚性（拘束度）和应力集中程度，利用小块材料来预测在实际施工过程中可能出现的问题。因此，模拟技术在科学技术领域，特别在工程中占有重要的地位。

模拟技术的发展,说明人们对工程实际认识的深化。

由于焊接工艺的特点——快速加热和冷却及温度分布的不均匀性,使焊接热影响区的大小(根据不同的焊接工艺方法)从零点几毫米到几十毫米。因此,焊接接头的各个部位所经受的热循环是不同的,一般来说可分为熔合线、粗晶区、细晶区、不完全重结晶区等。焊接接头的组织是一个连续变化的并具有非常陡峭的组织梯度的区域,这也可以说在焊接热影响区中,每一点均经受了一个特定的热处理过程(取决于板厚、焊接工艺参数等),因此每一点的力学性能不同,变化复杂,而用实际焊接接头来研究焊接热影响区的力学性能是困难的。美国和苏联提出用热模拟试样研究焊接热影响区性能,如HY-130钢的研制过程中大量地采用了焊接热模拟技术。

限于焊接热影响区特别是熔合区附近的动态应力应变过程实测工作的困难,因此目前停留于假设的应力-应变循环曲线的模拟阶段。但是近几年利用热弹塑性理论建立了数学模型和依靠数值解析法(有限元法或差分法等)及电子计算机对焊接过程的应力应变循环进行大量的研究取得了可喜的成果,这对确切地全面地模拟焊接热影响区是重要的一步。事实也证明,应力应变对低合金高强钢冷却过程中组织转变存在着影响,组织的变化也影响焊接内应力的变化。因此尽快地得到焊接过程中的应力-应变循环曲线已成为模拟工作者的研究目标。

目前对焊接模拟技术还存在一些看法,主要认为虽然通过焊接热循环模拟得出的单一组织基本上和实际焊接热影响区中陡峭的组织梯度中某一处的组织相同,但它们的性能只是近似而并不相等,这是由于焊接热影响区相邻的组织对该处的组织有制约作用,也就是说焊接热影响区裂纹扩展是穿过不同的组织区域,因此模拟试样单一组织的性能不能反映真实的焊接接头性能。这一特点对于横向裂纹的扩展途径是存在的,而对于纵向裂纹来说,裂纹的扩展完全可能沿着单一组织进展的。由此说明若以模拟组织的性能为评定依据,则更偏向于安全。这涉及到模拟试样性能评定的标准与实际接头的关系问题。

本书较详细地编写了焊接热模拟技术在焊接热影响区的组织性能、焊接裂纹试验及热应变脆化等方面的研究方法及应用实例,并在理论上进行了一定的分析,为焊接热模拟技术工作提供了一定的基础知识及实际应用的研究方法,并且阐明了焊接热模拟技术只有把焊接金相、焊接力学及焊接工艺三方面有机地结合才能得到更迅速的发展。

第一章 焊接热模拟曲线的基本参数

§ 1-1 焊接热模拟的基本概念

焊接结构发生提前破坏，经事故分析证明：焊接热影响区的缺陷（裂纹）及脆化是造成事故的主要原因。因此，在金属材料焊接性能的研究中，焊接热影响区性能的研究占有特殊的地位。

焊接热影响区是母材在焊接过程中，经受了特有的加热及冷却过程后，明显地发生组织和性能变化的区域。该区常用 HAZ (Heat Affected Zone) 表示。焊接热影响区的宽度很窄，一般只有几毫米，并在这几毫米的范围内包括有几个组织和性能不同的特定温度区。若想在实际的焊接接头中，对这些特定温度区的金属分别进行力学性能试验或可靠地测定焊接特性（例如，抗裂性能等）是困难的。为了使焊接热影响区各特定部位的尺寸大到足以进行正常的性能试验，只有采用焊接热模拟的方法才能达到。

焊接热模拟试验方法是利用特定的装置在试样上造成与实际焊接时相同的或近似的热循环，使得试样的金相组织与所需研究的热影响区特定部位的组织相同或近似，但这一组织区域大小比实际焊接接头热影响区要放大很多倍。也就是说，在模拟试样上有一个相当大的范围获得这一特定部位的均匀组织，从而可以制备足够尺寸的试样，对其进行各种性能的定量测试。先进的焊接热模拟试验方法除了在试样上施加焊接热循环以外，还可在试样上模拟焊接时的应力或应变，研究热影响区中某一特定部位的各种性能。图 1-1 为焊接热循环模拟装置示意图。

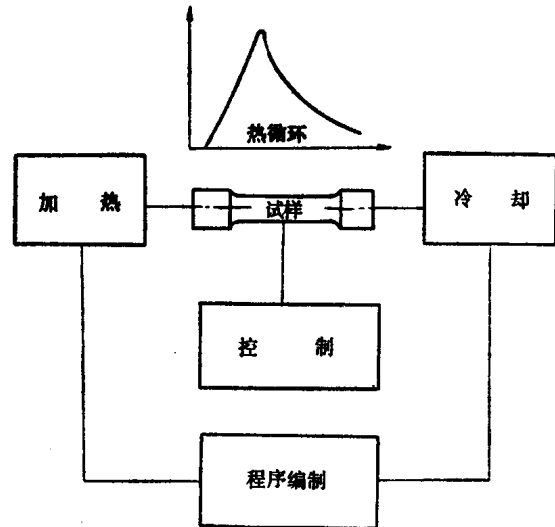


图1-1 焊接热循环模拟装置示意图

焊接热模拟试验大致可分为两种，即是在模拟过程中进行的试验与模拟完成后进行的试验。这种划分主要决定于试验的内容，但也决定于所采用的热模拟设备的功能。例如，要测定热影响区各特定部位的韧性指标，那么只需要在试样上进行焊接热循环模拟，然后用这种试样进行韧性试验，没有必要将热模拟设备与冲击机合为一体。然而，像抗裂性能试验，如冷裂纹、热裂纹、再热裂纹等，应该在模拟过程中完成，但由于受到热模拟设备功能的限制，也往往把不应该分割的试验程序加以分割，成为模拟过程中及模拟完成后进行的试验。

焊接热模拟方法已应用在以下几方面：

（一）热影响区显微组织的模拟

如图 1-1 所示，电流直接通过小试样进行加热或者电流通过感应线圈对试样进行加热，

使选定的焊接热循环重现于试样上，从而试样得到焊接热影响区特定部位的显微组织。这种模拟的显微组织与真实接头相应部位的组织相比，结果证明它们是相当吻合的。用这种热模拟方法最方便，所以是当前应用最广泛的一种方法。该试验关键在于如何获得焊接热影响区各部位的焊接热循环曲线，国内外焊接模拟工作者对于测定、计算及收集不同条件下的焊接热循环曲线都给以很大的关注，这是焊接热模拟技术的基础工作，也是至关重要的。

(二) 热塑性试验

这种试验是在热模拟过程中进行的，其结果用作评定材料抗热裂纹敏感性的指标。通过这种试验方法可测定出加热过程和冷却过程中试样断面收缩率的变化曲线，并确定出塑性为零 (ψ 为 0%) 的峰值温度。如果某种材料的热塑性曲线呈图 1-2 中 H_1 类特征，也就是经过零塑性以后，随着温度的降低塑性立即回升，那么，可以认为这种材料抗热裂性能良好；反之呈现出如图 1-2 H_2 类的特征，则认为抗热裂性能不良。不过，对于这一点也有不同的见解，有人认为材料的抗热裂性能除了与热塑性有关外，热强度也是必须加以考虑的因素。

(三) 相变行为的研究

在焊接热模拟过程中，利用快速膨胀仪与热模拟设备配合使用可测定应变曲线，并可确定金属材料在特定热循环条件下的相变行为。

(四) 焊接裂纹试验

根据不同的焊接热模拟设备可完成不同的试验内容。例如，经过实践证明，Thermoresistor-W 类型模拟设备可以完成冷裂纹、氢致裂纹及再热裂纹的研究工作。用这一类设备研究裂纹的优点是：可以取得定量指标，通过这些指标就可以对不同金属材料的抗裂敏感性加以比较；另外还可以为降低某一种材料的抗裂敏感性而选定工艺规范（提供较为理想的焊接热循环曲线）。迄今为止，由于此项试验结果尚未能与实际应用的标准试验方法进行相关性的比较，所以仍未能列为标准试验方法。这方面的工作正是焊接热模拟技术的主要研究内容之一。

除了上述应用外，焊接热模拟方法也已在材料的热应变脆化及热处理等方面获得应用。

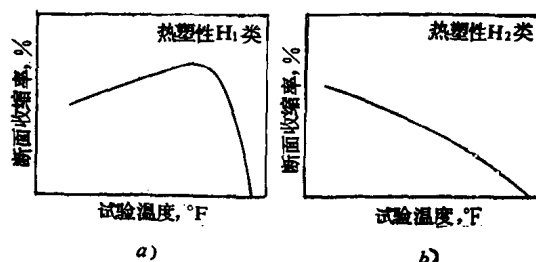


图1-2 热塑性曲线示意图

§ 1-2 焊接热模拟曲线的主要参数及计算

随着热模拟技术的发展，焊接模拟已不是在试样上单纯地模拟焊接热循环了，针对不同的研究内容可以同时模拟热、应力及应变循环。因此焊接热模拟曲线制订的内容将是温度-时间；应力-时间及应变-时间三种类型的曲线。但是，焊接热模拟技术中使用最广泛的最基本的曲线还是焊接热循环曲线。这类曲线也较复杂，如果掌握了此类曲线主要参数的计算及物理意义，那么，对于制订焊接热模拟试验曲线也就比较方便了。

一、焊接热循环曲线的主要参数及其物理意义

焊接热循环是指焊件上某一点，在焊接热源作用下经受的热过程，也就是该点的温度随时间的变化过程。用焊接热模拟方法研究焊接热影响区各特定部位的性能，事先要制订出该

部位的焊接热循环曲线，再模拟出特定部位的温度-时间 $[T = f(t)]$ 关系。

焊接热循环曲线可以通过理论计算及实际测定来得到。用实测办法可以比较真实地描述出焊接热影响区各部位经受的焊接热过程全貌。图 1-3 为低合金钢手工电弧焊时焊接热影响区各部位的焊接热循环曲线。其焊接条件及规范：板厚 = 20mm，试样长宽方向尺寸较大，焊道也较长，（选择这种尺寸的试样，目的是形成一个较为稳定的焊接温度场。）焊条直径 4mm，焊接电流 170 A，焊接速度 v 为 15cm/min。该图直接描绘了焊接热影响区各部位的焊接循环曲线，给出了 $T = f(t)$ 的关系图。但是，单从曲线图中无法了解对 $T-t$ 曲线的影响因素，因此也就难以深刻理解曲线的物理意义。如果我们把这些曲线加以分析找出其共性，确定组成焊接热循环曲线的几个基本参数，并且运用理论公式加以计算，那么对焊接热循环曲线的物理意义可以较深入地理解，也能较灵活地应用。

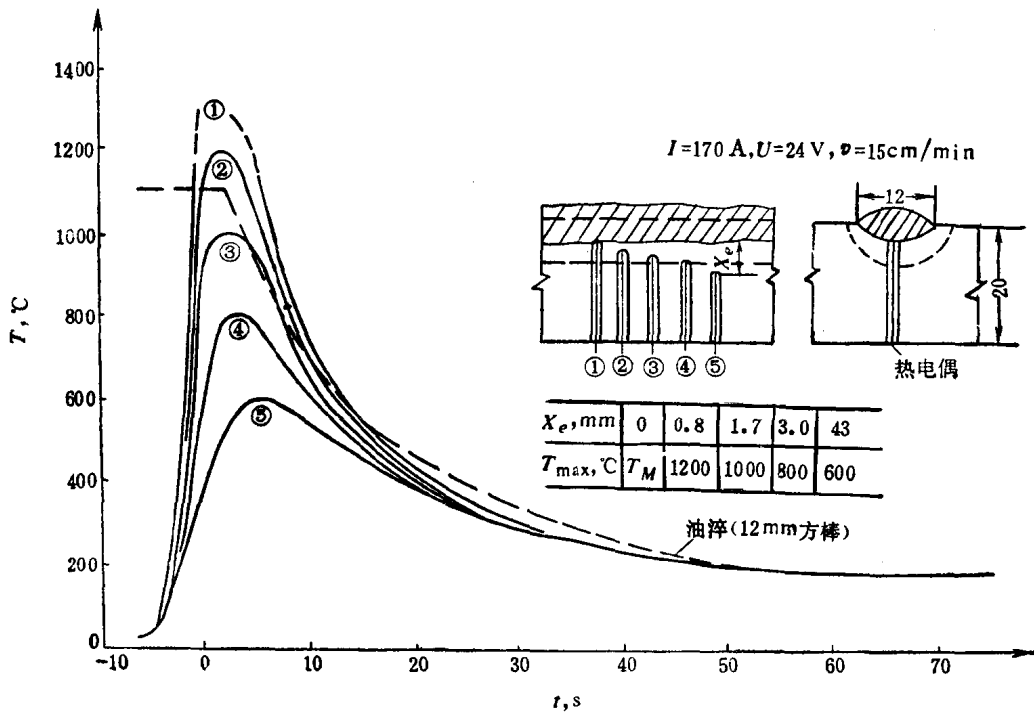


图 1-3 低合金钢手弧焊堆焊时焊缝附近各点的焊接热循环

t —电弧通过热电偶正上方开始计算的时间 T_M —母材的熔点

从图 1-3 中一组焊接热循环曲线中可以看出以下特性：各曲线的加热速度是不同的，离焊缝越近的点其加热速度越大；各曲线达到的最高加热温度-峰值温度 T_{\max} 是不同的，离焊缝越近的点峰值温度越高；各曲线在同一温度的冷却速度是不同的，而且同一条曲线在不同温度下的冷却速度也是不相同的，离焊缝越近的点冷却速度也较大。因此可以认为每一个焊接热循环的特性是由四个主要参数决定的：加热速度 ω_H ；峰值温度 T_{\max} ；在某一高温以上的停留时间 t_H ；在某一温度时的瞬时冷却速度 ω_c 或在某一温度区间的冷却时间 t_c 。见图 1-4 所示。

根据焊接热模拟工作的实践，若制订出一条焊接热模拟曲线，必须绘出三个基本参数：不同温度的加热速度 ω_H 、峰值温度 T_{\max} 及某一温度区间的冷却时间 t_c 。一般情况下，具有这三个参数已可制订出一条模拟焊接热循环的热模拟曲线，这是因为当加热速度 ω_H 及冷却

速度 ω_c 确定后, t_H 也决定了。这时 t_H 虽然不是一个独立参数,但由于 t_H 对热影响区的组织及性能有着一定影响,因此在热模拟曲线中也把它列为参数。从热模拟技术考虑,当热模拟设备的加热速度无法达到所要求的加热速度 ω_H 时就会影响到 t_H 值的准确性,如果试验内容要求保证 t_H 这一项指标,那么只能通过调节该温度的冷却速度 ω_c 的办法来得到。以下对四个参数的物理意义加以讨论。

1. 加热速度 ω_H 由图1-3可见,焊接热源加热焊件的速度比一般热处理条件下金属的加热速度快得多。

根据热传导理论^[1],式(1-1)及(1-2)表示三元热流的温度场计算式及二元热流温度场的计算式,其中 $r = \sqrt{Y^2 + Z^2}$, $t = \frac{X}{v}$,推导过程见文献^{[1][2]}。

$$T = \frac{q/v}{2\pi\lambda t} \cdot e^{-\frac{r^2}{4\alpha t}} \quad (1-1)$$

$$T = \frac{q/v}{2(\pi\lambda c\rho t)^{\frac{1}{2}}} \cdot e^{-\left(\frac{y^2}{4\alpha t} + bt\right)} \quad (1-2)$$

式中 q/v ——焊接线能量, J/cm;

α ——热扩散率, J/cm²·s·°C;

λ ——导热系数, J/cm·s·°C;

c ——比热, J/g·°C;

ρ ——密度, g/cm³。

如果令 $r = 0$, $y = 0$,也即是把焊缝轴线作为测定部位,那么当 $t = 0$ 时, $T = \infty$,这是由推导这些公式时的边界条件造成的,实际上焊缝轴线部位的加热速度 ω_H 也不可能为 ∞ ,这说明这些公式不适用于焊缝轴线,但可以应用于轴线以外的部位。从图1-3中可见,离焊缝边界不远的部位,它的加热速度 ω_H 很大。从实际测定曲线可知加热速度与焊接方法及焊接线能量有关。表1-1列出了不同焊接方法及工艺规范对加热速度及冷却速度的影响。严格地讲,加热曲线部分的斜率是变化的而不是一个定值,常用的手工电弧焊及埋弧自动焊中加热速度较快,因此在热模拟时把加热曲线的斜率作为峰值来考虑。但是,根据实测的手工钨极氩弧焊低合金钢板的数据可知加热曲线的斜率变化显著,300°C以下时,加热速度缓慢,在300°C以上时,加热速度陡升(见本章第三节)。因此在制订热模拟加热曲线时,要采用分段模拟加热来保证与实测曲线的相似性,而不能采取平均加热速度进行模拟加热。

从金属学观点考虑,随着加热速度的提高,相变温度将随之提高,奥氏体的均质化和碳化物的溶解过程也变得不太充分,这将影响到冷却过程中的相变产物及特性。也就是说,加热速度的变化必然影响到热影响区的组织和性能,因此,这也就决定了焊接热模拟时不能脱离实际焊接热循环曲线而笼统采取平均加热速度的原因。

2. 峰值温度 T_{max} 峰值温度是焊接热模拟曲线的主要参数之一。它既标志着焊接热影响区的特定部位,也是对焊接热模拟试样与实际焊接热影响区特定部位的组织及性能进行比较的依据。因此,峰值温度计算值的正确与否或者实际测定值是否精确,都会影响到模拟试样试验结果的可靠性。

根据实测经验,测量贴近焊缝边缘部位的峰值温度是比较困难的,往往容易发生热电偶

被熔化的现象,所以只好借助于计算。如,钼合金(含Ti0.5%)是高熔点难熔金属,焊接时易产生热裂纹、再结晶、晶粒长大、脆化等问题。这些问题与焊接热过程密切相关。但是,高温实测受到现有热电偶熔点的限制而无法进行,只得用有限元法计算钼合金的焊接温度场。计算结果表明,焊缝边缘的温度达2600°C。该计算值看来存在一定的误差,但目前尚无法用实测数据加以校核,从而很难确定具体误差值,所以热循环参数确定过程中这也是一个需要解决的问题。

从金属学观点考虑,峰值温度 T_{max} 对金属材料的组织变化,例如奥氏体转变、晶粒长大及碳化物的溶解等都有很大影响。此外 T_{max} 对实际焊接接头的焊后变形及残余应力也有着密切的关系。

3. 冷却速度 ω_c 或冷却时间 t_c 。 ω_c 是指某一温度的瞬时冷却速度。但是,制订焊接热模拟曲线时经常采用的是某一温度区间的冷却速度 t_c 。某一温度的冷却速度可以用该温度的斜率 ω_c 表示(图1-4)。冷却速度或冷却时间是影响焊接热影响区组织和性能的决定因素。对于中、高碳钢或合金钢来讲,在1300°C以上的近缝区内冷却速度最大,容易形成淬硬组织。因此,在这种特定温度区域内540°C附近的冷却速度或800°C至500°C的冷却时间(奥氏体分解的温度区域),必须在焊接热模拟过程中严格地控制其精确性,

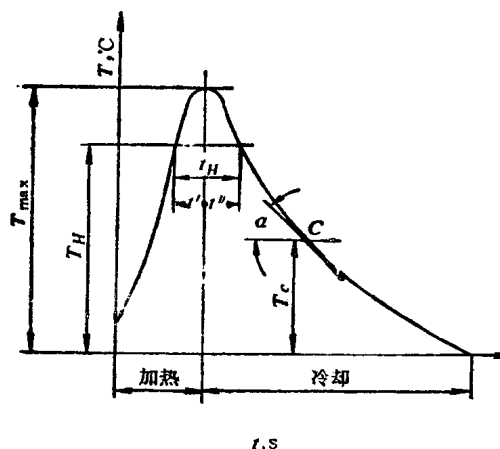


图1-4 焊接热循环曲线及主要参数

因为在此温度区间相变最激烈,直接影响到焊接热模拟试样的组织和性能,影响到模拟试样试验结果的可靠性。

4. 高温停留时间 t_H 。高温停留时间 t_H 一般指在 A_{c3} 相变温度以上停留的时间。它实际上包括加热阶段的 t'_H 及冷却阶段的 t''_H ,因此它不是一个独立的参数。一般 t'_H 均小于 t''_H (见表1-1)。

表1-1 单层电弧焊和电渣焊低合金钢时近缝区热循环参数^[2]

板厚 (mm)	焊接方法	焊接线能量 (J/cm)	900°C时的 加热速度 (°C/s)	900°C以上的 停留时间(s)		冷却速度 (°C/s)		备 注
				加热时 t'_H	冷却时 t''_H	900°C	550°C	
1	钨极氩弧焊	840	1700	0.4	1.2	240	60	对接不开坡口
2	钨极氩弧焊	1680	1200	0.6	1.8	120	30	对接不开坡口
3	埋弧自动焊	3780	700	2.0	5.5	54	12	对接不开坡口,有焊剂垫
5	埋弧自动焊	7140	400	2.5	7	40	9	对接不开坡口,有焊剂垫
10	埋弧自动焊	19320	200	4.0	10	22	5	V型坡口对接,有焊剂垫
15	埋弧自动焊	42000	100	9.0	20	9	2	V型坡口对接,有焊剂垫
25	埋弧自动焊	105000	60	25.0	75	5	1	V型坡口对接,有焊剂垫
50	电渣焊	504000	4	162.0	335	1.0	0.3	双丝
100	电渣焊	672000	7	36.0	168	2.3	0.7	三丝
100	电渣焊	1176000	3.5	125.0	312	0.83	0.28	板板
220	电渣焊	966000	3.0	144	395	0.8	0.25	双丝

高温停留时间对于相的溶解或析出、奥氏体的均匀化以及晶粒粗化等都有影响。例如，低碳钢及低合金钢电渣焊时，则由于受到较长时间的高温作用，热影响区的焊后组织发生严重的晶粒长大，因此重大的电渣焊构件要进行正火后才能使用。当峰值温度很高时，如在焊缝边界部位，即使高温停留时间不长也会产生严重的晶粒长大现象。对于不同金属材料高温停留时间 t_m 的含义也不同，例如铬镍不锈钢焊接热影响区的抗晶间腐蚀能力与在 $600\sim 800^\circ\text{C}$ 温度的停留时间有关，因此制订热模拟曲线时要保证这一温度范围停留时间的精确性。

二、主要参数的计算

根据热传导理论，结合焊件的尺寸和形状，焊接温度场可以是三维的（三向传热）、二维的（两向传热）和一维的（单向传热）。在厚大件上进行表面堆焊时，它的温度场可看作是三维的，热源可看成是一个点（点状热源），热向三个方向（ X, Y, Z ）传播，如图 1-5 a）所示。薄板对接焊（一次熔透）时，温度场可以看成是二维的，把热源沿板厚方向看成均匀分布，亦即在板厚方向无温度差，把热源看成是沿板厚方向的一条直线（线状热源），热向两个方向（ X, Y ）传播，如图 1-5 b）所示。细棒对接焊时，它的温度场是一维的，热向单方向传播。如果热在细棒截面上的分布是均匀的，那么此时的热源可看成为平面热源（面热源），此时热只向一个方向（ X ）传播，见图 1-5 c）。由此可知，在焊接具体条件下，热传导存在三种不同的形式，当我们计算焊接热循环曲线的参数时，也必须分别不同的场合，采用相应的计算公式。

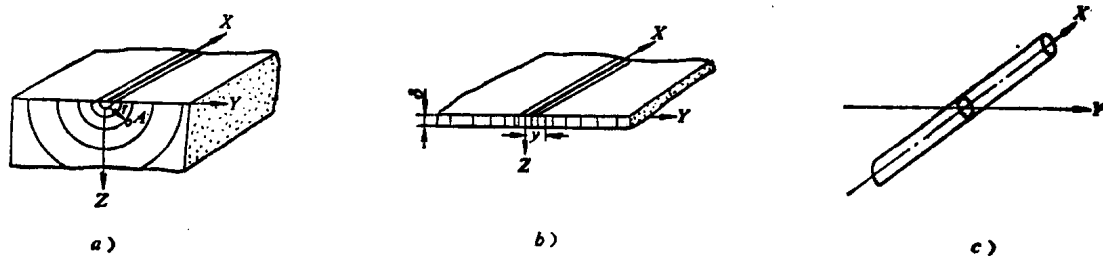


图1-5 焊接温度场的分类

根据焊接传热理论，焊件上某点的温度经 t_m 秒后，达到最高温度 T_{\max} ，此时温度变化的速度应为零（见图 1-6），即

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

因此可以利用快速移动热源传热公式求得 T_{\max} 值。

根据热传播方向是三维还是二维，把计算式分为三元热流计算式和二元热流计算式，三元热流计算式对应的是点热源，如厚大件堆焊状态。二元热流计算式对应的是线热源，如薄板对接焊状态。

（一）最高加热温度（ T_{\max} ）的理论计算式

1. T_{\max} 的三元热流计算式（厚大件堆焊）
由公式（1-1）推导可得

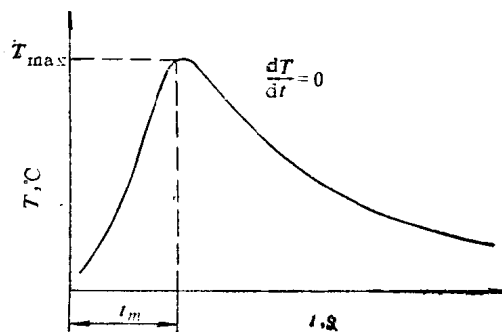


图1-6 焊接上 A 点热循环曲线上的 T_{\max}

$$T_{\max} = \frac{0.234q}{c\rho v r_0^2} \quad (1-3)$$

2. T_{\max} 的二元热流计算式 (薄板对接焊)

由公式 (1-2) 推导可得(推导过程见本章附录):

$$T_{\max} = \frac{0.242q}{vc\rho\delta y_0} \left(1 - \frac{by_0^2}{2\alpha} \right) \quad (1-4)$$

(二) Adams (爱特姆) 的 T_{\max} 计算公式

C. M. Adams 在理论计算基础上加以修正后提出了下列计算式:

1. T_{\max} 的三元热流计算式

$$T_{\max} - T_0 = \frac{q/v}{2\pi e\lambda k} \cdot \frac{1}{2 + R^2} \quad (1-5)$$

式中 q/v ——焊接线能量, J/cm;

T_0 ——焊件的初始温度, °C;

k ——热扩散率 ($k = \lambda/c \cdot \rho$), 即前面提到的导温系数 $\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$;

$$R = \frac{v \sqrt{y^2 + z^2}}{2k}$$

2. T_{\max} 的二元热流计算式

$$\frac{1}{T_{\max} - T_0} = \frac{4.13c\rho\delta y'}{q/v} + \frac{1}{T_M - T_0} \quad (1-6)$$

式中 T_0 ——焊件初始温度, °C;

T_M ——母材熔化温度, 一般钢的熔点为 1510°C;

y' ——($y' = y - y_0$, y_0 为焊缝宽度的 $\frac{1}{2}$) 离开熔合线的距离, cm。

举例: 低碳钢板 $\delta = 1\text{cm}$, $q/v = 10000\text{J/cm}$ ($T_M = 1530^\circ\text{C}$, $T_0 = 30^\circ\text{C}$, $c\rho = 3.9\text{J/cm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$) 进行焊接, 求出 $T_{\max} = 780^\circ\text{C}$ 的区域离开熔合线的距离。

因为板厚为 1cm, 所以用公式 (1-6) 求解, 得 $y' = 4.1\text{mm}$ 。

以上是根据传热学理论推导出计算焊接热循环曲线最高温度 T_{\max} 的数学模型, 由于它的假定条件与焊接实际情况有较大的差异, 正确性尚感不足。因此一些学者在传热学理论上通过大量的实验, 建立了一些经验公式。

Adams 测定了 $\delta = 1.25\text{cm}$ 铝板气保护焊时的焊接热循环曲线, 同时又应用了 T_{\max}

$-T_0 = \frac{1}{4.13c\rho\delta y'} (q/v)$ 这个公式进行解析, 求出了应用于二元热流的最高温度 T_{\max} 的经验公式(1-7)。

$$\frac{1000}{T_{\max} - T_0} = 0.79 \left(\frac{1000\delta v y}{U \cdot I} \right) + 1.48 (^\circ\text{C}^{-1}) \quad (1-7)$$

式中 δ ——板厚, cm;

v ——焊接速度, cm/s;

y ——垂直于熔合线的距离, cm;

$U \cdot I$ ——电弧电压 × 焊接电流, W。

3. 桥本、松田等的经验公式^[14] 桥本等人测定了 $\delta = 1 \sim 3\text{mm}$ 的碳钢、18-8 不锈钢、铝以及钛四种材料在 TIG 焊接时的热循环曲线, 从而得到了最高温度的分布。在此基础上推算出最高温度和焊接输入热以及达到该温度的距离 y' 间的关系, 并制订了表 1-2。根据所要求的最高温度值, 从表 1-2 中可确定达到此温度值 ($T_{\max} - T_0$) 的距离 y' 的值。

表1-2 最高温度 $T_{\max} - T_0$ 、焊接规范和距离 y' 的关系

$T_{\max} - T_0$ (°C)	$\left[\frac{v}{U \cdot I} \cdot \delta \cdot y' \right]$ (v : cm/s; U : V; I : A; δ : cm; y' : cm)			
	18-8 不锈钢	工业用纯钛	低碳钢	铝
1180	$1.1 \pm 0.5 (\times 10^{-5})$	$1.5 \pm 0.6 (\times 10^{-5})$	$0.9 \pm 0.3 (\times 10^{-5})$	—
986	1.8 ± 0.5	2.6 ± 0.7	1.3 ± 0.4	—
875	2.2 ± 0.4	3.3 ± 1.1	1.6 ± 0.4	—
780	2.6 ± 0.5	3.8 ± 1.0	1.9 ± 0.5	—
681	3.4 ± 0.9	4.3 ± 1.1	2.6 ± 0.6	—
569	4.6 ± 0.1	6.1 ± 0.8	3.6 ± 0.7	—
560	—	—	—	$1.8 \pm 0.4 (\times 10^{-5})$
476	5.5 ± 1.0	6.8 ± 0.9	4.6 ± 0.6	—
467	—	—	—	2.9 ± 0.7
375	7.4 ± 1.2	9.6 ± 1.2	6.3 ± 0.7	—
366	—	—	—	6.7 ± 1.3
278	9.0 ± 1.2	12.3 ± 1.4	10.1 ± 0.9	—
269	—	—	—	10.5 ± 2.3
180	14.7 ± 1.4	17.9 ± 1.2	16.4 ± 1.0	—
171	—	—	—	21.9 ± 2.1
116	—	—	—	33.3 ± 4.0

$$y' = [\text{表 1-1 中对应最高温度的值}] \times (U \cdot I / v) \times (1/\delta) \text{ (cm)} \quad (1-8)$$

(三) 给定温度以上停留时间 t_H 的计算

给定温度以上停留时间 t_H , 可以根据资料[1]采用的计算与图解相结合的方式加以确定(具体的推导过程参阅文献[1])。

1. 厚大焊件堆焊时 t_H 的计算式

$$t_H = f_0 \frac{q/v}{\lambda (T_{\max} - T_0)} \quad (1-9)$$

2. 薄板焊接时 t_H 的计算式

$$t_H = f_1 \frac{(q/v \cdot \delta)^2}{\lambda c \rho (T_{\max} - T_0)^2} \quad (1-10)$$

式(1-9)及式(1-10)中的 f_0 及 f_1 为无因次系数, 可由图 1-7 查得。比较上述两个公式可以得出: 当焊接线能量 q/v 增加时, t_H 都增加, 而且薄板焊接时 t_H 显著增加。预热温度 T_0 增高时, t_H 也将增加, 即给定温度以上停留时间延长。

图 1-8 及图 1-9 表示了不同的线能量及预热温度对高温停留时间 t_H 的影响。

(四) 瞬时冷却速度 ω_c 的计算

为了简化计算, 在推导计算式过程中只选定焊缝轴线坐标原点 0 点的冷却速度, 而以此值近似地代替离焊缝轴不远的熔合线附近的各点冷速。

1. 计算某一给定温度的冷却速度 ω_c