

金属机械性能 的微型试验法

张赤心 编著



華中工學院出版社

金属机械性能的微型试验法

张赤心 编著

华中工学院出版社

金属机械性能的微型试验法

张赤心 编著

责任编辑 郑兆昭

华中工学院出版社出版
(武昌喻家山)

湖北省新华书店发行

湖北省蒲圻县印刷厂印刷

开本:787×1092 1/32 印张:3.625 字数:78,000

1985年5月第1版 1985年5月第1次印刷

印数: 1—4,000

统一书号:15255—027 定价:0.85元

内 容 简 介

本书介绍一种新的材料机械性能试验方法——微型拉伸与微型剪切试验法。着重介绍微型剪切试验法。这种方法采用微型试样，可测出材料微小区域的强度和塑性指标。适合于测量焊缝热影响区中各微小区域的机械性能。

书中介绍了微型剪切试验法的基本原理、测试方法及其与常规机械性能试验方法之间的关系，举例说明了微型剪切试验法在焊接技术中的应用。

本书可供从事金属材料机械性能及焊接性能研究的科技工作者和大专院校金属材料及焊接专业师生参考。

前 言

本书介绍一种研究金属材料机械性能的新型试验方法——“微型剪切与微型拉伸”试验法及其在焊接技术中的应用。

该试验方法是从被试验材料或焊接接头中取出微型试样，用逐点剪切或小负荷拉伸的方法，确定各试验点的机械性能。此法特别适于测定焊接热影响区中各极窄的不同组织区段的机械性能。并可根据其性能变化规律确定不同材料的最佳焊接规范，以保证接头的质量，提高焊接结构的使用安全性。

此法源于西德西柏林工业大学机械结构研究所焊接组 (Technische Universität Berlin, Fügetechnik / Schweißtechnik im Institut für Maschinenkonstruktion) 的研究工作。他们已针对目前西德常用的几种可焊低合金高强度细晶结构钢做过大量试验，并总结出了一套经验公式和图表。西德焊接学术界对此项研究颇为重视。因为这种方法可直接定量地测定狭小范围(如焊接热影响区)内任意点的机械性能，并可绘出连续的“性能梯度”曲线，比常规力学性能试验及热模拟等方法可大大地省时、省料、省资金。目前，他们还在研制新型的试验设备，以求扩大此试验方法的实验项目与应用范围。

本书可供研究金属材料力学性能的科技工作者、焊接工程技术人员及高等院校和中等专业学校焊接专业师生参考。

由于编者学识水平有限，且所介绍的方法也还处于研究完善之中，故本书一定存在不少缺点和错误，诚恳地希望广大读者给予斧正。

编 者

一九八三年十月

目 录

前 言

第一章 概 述..... 1

§ 1-1 微型试验法的由来 1

一、焊接热影响区的“组织层次”与“性能梯度” 1

二、焊接接头组织性能试验方法概况 3

三、焊接接头的微型剪切试验法 5

§ 1-2 微型剪切试验法的特点 7

§ 1-3 微型剪切试验法的研究现状 10

第二章 微型剪切机理..... 12

§ 2-1 剪切变形的实质 12

§ 2-2 剪切形式分类 14

§ 2-3 剪切曲线 16

§ 2-4 微型剪切试验装置及测试原理 19

一、剪力的测量 20

二、径向剪切位移的测量 20

§ 2-5 剪切性能参数 20

一、剪切强度 τ_b 20

二、临界剪切强度 $\tau_{G0.2}$ 22

三、剪切试验的塑性指标——剪切截面压入率 α 23

§ 2-6 影响剪切试验结果的诸因素 28

一、刀具的种类和几何形状 28

二、试件的形状和尺寸 36

三、试件的加工硬化与表面光洁度 44

四、剪切间距 50

五、加载速度 53

§ 2-7 剪切过程中的力、力矩和应力	56
第三章 微型剪切试验与常规拉伸试验及硬度试验之 间的关系	64
§ 3-1 微型剪切强度 τ_b 与抗拉强度 σ_b 之间的关系	64
§ 3-2 剪切屈服极限 τ_G 与拉伸屈服极限 σ_s 之 间的关系	66
§ 3-3 剪切截面压入率 α 与拉伸断面收缩率 ψ 之 间的关系	69
§ 3-4 剪切强度与硬度之间的关系	72
一、常规拉伸强度 σ_b 与硬度的关系	72
二、剪切强度与维氏硬度之间的关系	73
第四章 微型拉伸试验	78
§ 4-1 微型拉伸试验设备简介	79
§ 4-2 微型拉伸试件	80
§ 4-3 微型缺口拉伸试验	80
§ 4-4 试件体积的减小对各特性参数值的影响	81
§ 4-5 试件表面状况对微型拉伸试验结果的影响	84
第五章 微型试验法在焊接技术中的应用	87
§ 5-1 发展概况	87
§ 5-2 焊接接头微型试件的制作	87
一、微型剪切试件制作法	87
二、微型拉伸试件制作法	90
§ 5-3 应用举例——WStE47钢焊接接头的性能 梯度检验	90
一、材料及焊接工艺	91
二、母材的微型剪切、微型拉伸及常规拉伸试验	92
三、焊接接头的微型剪切试验	94
四、模拟焊接热循环试验	99
结束语	102
参考资料	103

第一章 概 论

§ 1—1 微型试验法的由来

决定一个机械构件使用安全性的主要因素之一是构件材料的机械性能。对于焊接结构件来讲,其安全性则主要取决于焊接接头、特别是焊接热影响区的组织和性能。但是焊接热影响区的范围很小,要准确地检验它的机械性能,用常规的机械性能试验方法已无能为力。因此必须有新的试验方法和试验手段来适应对这种微小区域内进行机械性能试验的要求。微型试验法正是应这种要求而研制产生的。它目前的主要应用就是检验焊接热影响区材料的机械性能。

一、焊接热影响区的“组织层次(Gefügegradation)与性能梯度(Eigenschaftsgradient)”

在焊接生产中,焊接接头处的材料要经历局部快速加热并迅速冷却的热循环。整个接头热影响区所经历的温度范围是,从接近母材的熔点到所在的环境温度(室温或预热温度)。从焊接温度场的分布特征及其规律性^[1]可知:在焊接热影响区中,距焊缝中心不同距离处的材料,所经历的最高加热温度与冷却速度是不同的,也就是它们经历着不同的焊接热循环。一切可能的热处理过程,都会在热影响区中发生。从焊缝边缘的熔合区→晶粒粗大的过热区→相变重结晶区(细晶区或正火

区)→不完全重结晶区,一直到母材,其组织是不断变化的,图1为20号钢的热影响区组织图。

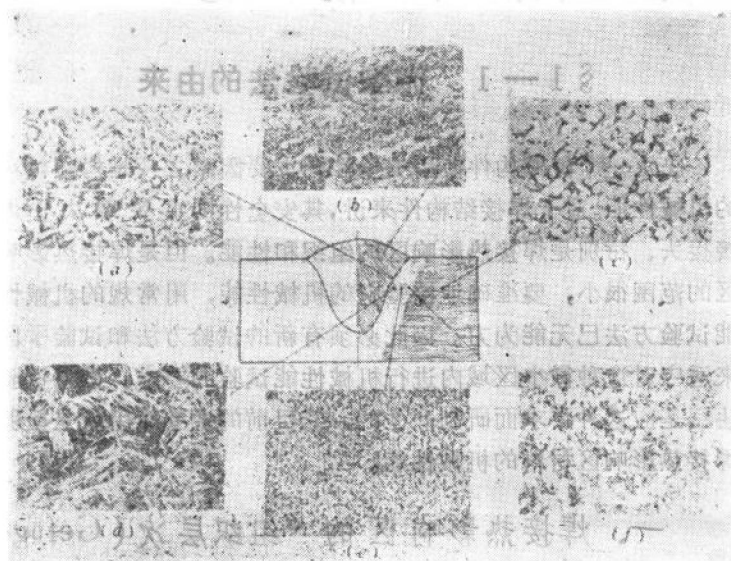


图1 20号钢焊接热影响区组织层次示意图

(a),熔合区 (b),焊缝 (c),母材 (d),过热区 (e),相变重结晶区 (f),不完全重结晶区

这种因焊接热循环造成的以焊缝为中心的层状组织分布称为“组织层次”。

应当指出:焊接温度场中的等温线或等温面有无数多个,且连续分布;焊接接头区的热循环也有无数种,并连续分布。所以严格地讲,焊接接头的组织层次也是多种多样,并且连续变化的。但是,在焊接技术研究中,只是将焊接接头的组织粗略地以同类组织为界限分为几个区域。

焊接接头中，不同的组织层次，具有不同的机械性能，称为“性能梯度”。

以焊接接头中心或熔合线为参考点，以至该点的距离为横坐标，以机械性能值为纵坐标，将不同位置处的表征机械性能的各类特性数值（强度、塑性及韧性值）点用曲线连接起来，即可得到“性能梯度曲线”。性能梯度曲线反映了焊接接头机械性能的变化规律。

二、焊接接头组织性能试验方法概况

焊接结构的质量好坏及使用安全性，与焊接接头的组织性能密切相关。而焊接接头的组织性能又受许多因素的影响，如：

- （1）焊接材料的物理特性，如：材料的导热系数 λ 、比热 c 、材料密度 ρ 、母材厚度 d 等，
- （2）焊接材料的化学成分，
- （3）焊接方法与热源的种类，
- （4）焊接规范（焊接电流、电压、焊接速度等），
- （5）工艺措施如预热温度、层间温度、焊后热处理规范及焊条、焊丝的处理等。

因此，研究焊接接头组织性能的变化与这些影响因素之间的关系及其规律，便成为研究金属材料及其焊接的科技工作者的重要课题之一。

检验焊接接头经过焊接过程产生的组织与性能的变化，有一系列的试验方法，归纳如图2所示。

焊接时，由于焊接热源的热量高度集中，焊接过程非常迅速，因而焊件热影响区单位长度上的温差（温度梯度）很大，焊接热循环曲线很陡峭。与之相应的热影响区的组织和性能的

变化也很剧烈。几种不同的组织分布在极窄的区段内，如：真空电子束焊的热影响区宽度仅有零点几毫米。大多数焊接方法所造成的焊接热影响区也只有几毫米宽。焊接热影响区的狭小和组织性能的急剧变化，将给焊接热影响区性能变化规律的研究带来很大困难。

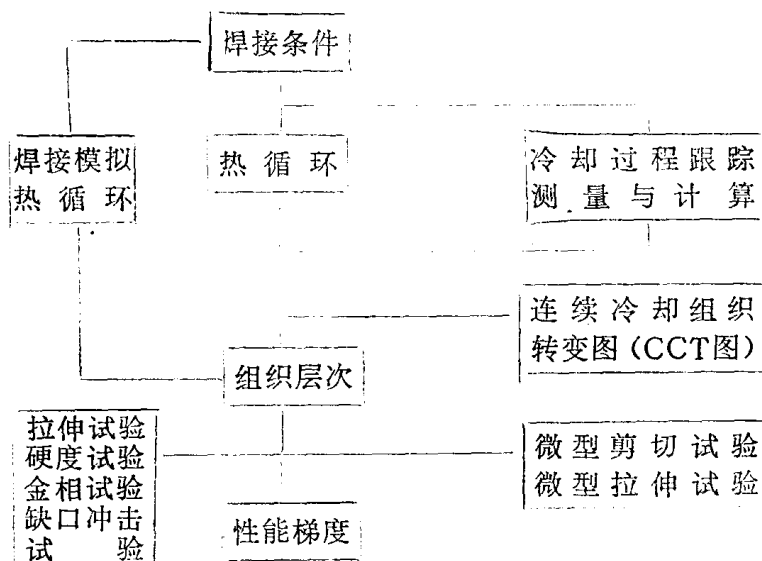


图2 焊接接头组织性能试验方法示意图

要想研究焊接热影响区的性能变化规律，首先必须定量地、准确地测量出热影响区中各微小组织区的强度、塑性和韧性值。要达此目的，有两种方法。一种方法是近年来发展起来的模拟热循环试验法。它将焊接热影响区中某特定部位的金属组织通过相同的热循环加以模拟“放大”，使得整个试件（或者被测试区域）都是相同类型的均匀组织。然后用常规试验方法测试其性能。

另一种方法是采用极小的试件，使所要研究的组织尽可能

处于测试范围内。这样就能直接从焊接接头中取样。目前所用的常规试验方法中，只有显微硬度试验和缺口冲击试验比较接近这种情况。微型剪切试验法^[2]也正是从这种指导思想出发的。

三、焊接接头的微型剪切试验法

迄今为止，材料强度、塑性及韧性的试验方法，都是对材料施加各种形式的负荷，直至材料被完全破坏。在这一过程中，测试材料所能承受的最大负荷，用以衡量材料强度；测量材料在这一过程中的最大变形能力，用以衡量材料的塑性；测量材料在这一过程中所吸收的能量，用以衡量材料的韧性。

如果要将某一物体剪切断，则必须对其施加一定大小的剪切力。而且构成该物体的材料强度越高，将其切断所需的剪切力就越大。这样，剪切力的大小也可以用来衡量材料的强度；另外，在剪切物体时，对不同的材料施加同样大小的力，剪切刀口切入物体的深度也有深有浅，剪切面的变形量也有大有小。构成该物体的材料越硬越脆，则刀口切入材料的深度就越浅，剪切面的变形量也小；反之，材料的塑性较好，则剪切刀口的切入深度就较深，剪切截面的变形量也较大。因此，用剪刀刀口的切入深度或剪切截面的变形量也可以衡量材料的变形能力（主要指材料的塑性）。我们知道，采用冲击力剪切试件时，将试件冲剪断要耗去一定的能量。用所耗去的能量也可以衡量材料的“冲击韧性”。另外，采用慢速剪切试件时，试件剪切处会产生裂口，并因剪切而缓慢张开。用材料临近断裂时裂口的张开量，也可以作为衡量材料断裂韧性的一种指标。这样一来，如果从焊接接头中取出包含有热影响区在内的微型试件，对之逐点加以剪切，并且记下每点的剪切力 F 、刀口切入量 h 、断裂时试件单位面积所吸收的能量 a_k ，和裂口张开位移量

δ_{cr} ，我们就可以得到焊接热影响区的各种性能梯度曲线。

图3绘出了某种钢材焊接热影响区的强度梯度曲线和塑性梯度曲线。图上方表示出微型剪切试件在焊接接头中的取样位置。

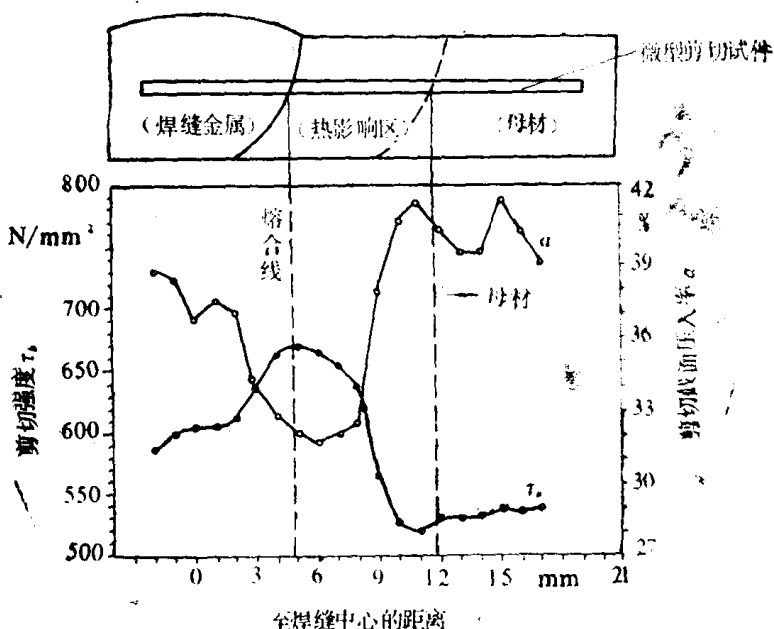


图3 某种钢材焊接热影响区的强度梯度曲线和塑性梯度曲线

将图3的上、下图对应起来看，我们就可以很方便地找到焊接热影响区中任何一点的强度值和塑性值。从图3中还可以看出：性能梯度曲线是连续的。即使焊接热影响区很狭小，该曲线也可以较好地反映出热影响区机械性能的变化规律。而且它与焊接热循环及组织层次都有较好的对应关系。如果根据所测出的性能和组织状况来对影响焊接的各条件因素进行调整和控

制，就能得到较理想的焊接接头。所以，微型剪切试验在焊接技术中的作用就是：

(1) 可以测定焊接热影响区的性能梯度曲线。

(2) 研究焊接条件-焊接热循环-组织层次-性能梯度之间的关系。寻求合理的焊接条件，以得到理想的焊接接头，保证焊接结构的使用安全性。

§ 1—2 微型剪切试验法的特点

金属材料焊接热影响区的大小受许多因素的影响。不同的材料和板厚、不同的焊接方法和线能量、不同的预热温度及焊后热处理规范，以及不同的施工条件等，都会使热影响区的尺寸发生变化。对低碳钢和低合金高强钢，用不同的方法焊接时，其热影响区的平均尺寸参见表一。

表一 低碳钢及低合金高强钢焊接热影响区的平均尺寸

焊接方法	各区平均尺寸 mm			总宽 mm
	过热区	细晶区	不完全重结晶区	
手工电弧焊	2.2~3.0	1.5~2.5	2.2~3.0	6.0~8.5
埋弧自动焊	0.8~1.2	0.8~1.7	0.7~1.0	2.3~4.0
电渣焊	18~20	5.0~7.0	2.0~3.0	25~30
氧乙炔气焊	21	4.0	2.0	27.0
真空电子束焊	—	—	—	0.05~0.75

目前,在用常规的力学性能试验方法(如拉伸试验)来研究焊接热影响区的机械性能时,通常是在垂直于焊缝方向上截取拉伸试件,让焊接热影响区位于拉伸试棒的试验长度上。这样的试件经拉伸后,有时断在母材上,有时断在热影响区。在这种情况下,我们只能定性地知道:热影响区的强度高于或低于母材,而对于热影响区的塑性指标则无法确定。即使断口处于热影响区,所得出的试验数据也只能是焊接热影响区的整体性能指标。至于粗晶区、细晶区、不完全重结晶区等各区段的性能如何?常规拉伸试验是无法测出的。如果采用微型剪切法,就完全可以克服上述缺点。假如象图3所示那样垂直于焊缝截取微型剪切试样,那么,我们对热影响区的任何区域的机械性能都可以进行定量的测试。因为微型剪切试验时,剪切间距(试件上相邻两个剪切点之间的距离)可以小到只有0.4mm左右。比如埋弧自动焊热影响区的过热区(宽0.8~1.2mm)。就可做2~3次微型剪切试验。即使是对真空电子束焊的热影响区(0.05~0.75mm),我们也可以用微型剪切法测试出该区的机械性能。

模拟焊接热循环试验法虽然也可以用来研究金属材料焊接热影响区的组织性能,然而,这种方法对所要模拟的热循环参数须逐点测试或计算,然后编成程序输入热模拟机控制单元。材料经热模拟循环后再加工成试件,最后进行性能试验。其过程复杂,操作麻烦。而且焊接过程也只能是近似的被模拟。因此用这种模拟试样所得出的试验数据不可能完全真实地反映出微观组织区的性能特征。如果想要研究热影响区性能变化的规律,作出如图3那样的性能梯度曲线的话,用热模拟法就必须根据各点不同的热循环,模拟出若干个试件。所费的人力、物力、财力相当可观。而微型剪切法只须直接从焊缝处取出一根

或几根1.5mm粗的微型剪切试棒就可以达到上述目的。

从设备条件来看，焊接热模拟设备十分复杂，造价昂贵，操作也很麻烦。作为材料的机械性能试验手段来说，热模拟试验只不过是中间环节，仍需配合其它常规机械性能试验才能完成定量的测试。而微型剪切试验本身就是一种机械性能试验方法。其设备造价远比热模拟试验机便宜。其试验结果可通过数字显示、打字输出 $x-y$ 函数仪记录三种方式得到。只要有关仪表调试、标定正确，工作稳定，微型剪切试验的操作就十分简单。

图3中所示的用微型剪切试验法得出的焊接接头性能梯度曲线，乍看起来，它似乎与焊接接头维氏硬度分布曲线相同。而作维氏硬度试验比作微型剪切试验更简单。那么微型剪切试验与维氏硬度试验及显微硬度试验比较起来，其区别和特点何在呢？

实际上，性能梯度曲线与维氏硬度分布曲线相比较，无论在形式上或本质上，都是不同的。其理由是：

(1) 严格地讲，硬度并不属于力学范畴。而微型剪切试验中的剪切强度、剪切截面压入率以及以后还会出现的剪切冲击韧性和剪切面裂口张开位移等，都是可以从力学角度加以研究的。因此，可以说：微型剪切试验与硬度试验有着本质的不同。

(2) 硬度分布曲线仅仅只是反映了热影响区各不同显微组织区硬度值的高低。但不包括其它机械性能指标。而微型剪切试验法所获得的性能梯度曲线包括了强度梯度曲线、塑性梯度曲线和可能的韧性梯度曲线。所以说，微型剪切试验与硬度试验在内容上也是不一样的。

(3) 虽然硬度与抗拉强度之间，存在某种近乎正比的关系。

在工程技术中，有时也用测得的硬度值来近似地估算材料强度。但它毕竟不是一种材料的强度性能指标。不能给工程技术人员提供设计依据。而微型剪切试验中的剪切强度本身就是一种强度性能指标。此外剪切截面压入率同拉伸试验中的断面收缩率一样，也是一种塑性指标。都可以为工程技术人员在设计结构、选择材料时提供依据。

(4) 关于硬度与强度和塑性的关系，已往，人们认为：硬度高的，则强度高，塑性差；硬度低的，则强度差，塑性好。但随着材料科学的不断发展，这一概念已变得越来越不符合实际情况。有些强度很好的新材料，其塑性并不差，硬度也不很高；而有些硬度较低的材料，其强度却较高，塑性也较好。这样一来，再用硬度来估量材料的强度和塑性，就显得很不妥当，甚至会出现错误。而微型剪切试验法所得出的性能梯度曲线则不会出现这种问题。

所以说，微型剪切试验与硬度试验在形式、内容及作用上都有着本质的区别。

§ 1—3 微型剪切试验法的研究现状

微型剪切试验法是七十年代后期发展起来的。1974年，西德西柏林工业大学焊接研究所所长Lutz Dorn教授和Günter Niebuhr博士开始研究此方法，研制出了第一台微型剪切试验机，并运用这台试验机配合其它常规机械性能试验方法及热模拟法对西德常用的八种钢材（StE36、StE51、StE70、13CrMo 44、58CrV4、StE47、23CrNiMo747、C15）作了大量试验，从而确定了各剪切性能参数，研究了影响试验结果的各种因素，还研究了微型剪切试验与常规机械性能试验的对应关