

# 焊接实验教程

主编 徐兴文 李建军

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

内容提要

本书是根据教育部颁布的《焊接专业教学大纲》和《焊接专业实验课程教学大纲》编写的。本书可作为高等院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。本书共分5章，主要内容包括：绪论、焊接材料、焊接工艺、焊接缺陷、焊接检验。本书可作为高等院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

# 焊接实验教程

主编 徐兴文 李建军

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

## 内 容 简 介

本书包括焊接冶金原理、弧焊电源、焊接方法与设备、焊接结构、压力焊、钎焊、焊接检验、焊接新技术、材料成形与控制工程、材料工程基础等模块。模块中实验类型包括验证性实验、综合性实验和设计性实验。验证性实验的目的是培养学生的实验操作、熟悉设备、数据处理等能力。综合性实验的目的是培养学生综合运用所学知识点解决问题的能力。设计性实验的目的是培养学生的基础科研能力。

本实验教材结合沈阳理工大学教学方针与实验室具体条件针对沈阳理工大学材料科学与工程学院本科生编写。本书也可作为兄弟院校相关专业本科生教材及相关专业专科生和各类焊接专业学生的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

焊接实验教程 / 徐兴文, 李建军主编. — 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2016. 8  
ISBN 978 - 7 - 5661 - 1348 - 1

I. ①焊… II. ①徐… ②李… III. ①焊接 - 高等学校 - 教材  
IV. ①TG4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 192062 号

选题策划 卢尚昆  
责任编辑 张忠远 马中月  
封面设计 恒润设计

---

出版发行 哈尔滨工程大学出版社  
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号  
邮政编码 150001  
发行电话 0451 - 82519328  
传 真 0451 - 82519699  
经 销 新华书店  
印 刷 黑龙江龙江传媒有限责任公司  
开 本 787mm × 1 092mm 1/16  
印 张 5.75  
字 数 148 千字  
版 次 2016 年 8 月第 1 版  
印 次 2016 年 8 月第 1 次印刷  
定 价 18.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

---

## 前 言

近年来,随着国家政治经济体制改革不断完善,工程教育改革的不断深入,材料类专业的实验教学必须适应国家政治经济体制改革的需要。材料成形与控制工程专业的理论知识涉及领域广,其与生产实践结合紧密,实验教学在学生理论知识学习与工程实践能力培养方面起着重要的作用。

由于教育理论、社会需求、设备与技术日新月异,针对焊接专业的实验教学方面,学校应根据自己的课程教学需要和实验设备情况,设计实验项目和实验内容,编制实验教材。本教材的编写正是遵循该原则,并参考兄弟院校实验教学教材,与兄弟院校该领域教师不断探讨,融入实验教学的一些最新的教学改革成果。力求达到该实验教材能满足新形势下高等学校材料成型与控制工程专业焊接方向的实验教学的实际需要。

本教材所设计的实验对应具体专业课,均为必做实验。沈阳理工大学教学特点与专业课的紧密结合,是专业教学的有机组成部分。针对具体实验项目不断加强其实验内容,提高实验类型。其目的是希望学生通过这些实验环节来加深对课本理论知识的理解,熟悉相关设备的操作,培养实践和动手能力。本书在内容上涵盖了焊接专业所涉及的大部分知识,并将相互孤立的知识点串联起来。希望通过试验,培养学生综合运用所学知识解决工程实际问题的能力,充分发挥学生的主观能动性,即能发现问题,提出问题,完善解决方案,直至获得结果。

本教材借鉴许多兄弟院校及材料专家的著作,首先向他们表示衷心的感谢。本教材无论在章节安排上还是内容取材上,由于作者能力有限,书中不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者  
2016 年 6 月

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 焊接冶金原理 .....          | 1  |
| 实验 1 焊接接头金相组织分析实验 .....     | 1  |
| 实验 2 焊接接头综合性能实验 .....       | 5  |
| 第 2 章 弧焊电源 .....            | 15 |
| 实验 3 焊接电弧静特性测定实验 .....      | 15 |
| 实验 4 弧焊电源外特性的测定 .....       | 20 |
| 第 3 章 焊接方法与设备 .....         | 25 |
| 实验 5 非熔化极气体保护焊实验 .....      | 25 |
| 实验 6 熔化极保护焊实验之埋弧焊工艺实验 ..... | 31 |
| 实验 7 熔化极气体保护焊设备与工艺实验 .....  | 35 |
| 第 4 章 焊接结构 .....            | 40 |
| 实验 8 焊接结构变形与应力控制实验 .....    | 40 |
| 第 5 章 压力焊 .....             | 44 |
| 实验 9 点焊实验 .....             | 44 |
| 实验 10 对焊实验 .....            | 48 |
| 第 6 章 钎焊实验 .....            | 52 |
| 实验 11 钎料的铺展性实验 .....        | 52 |
| 第 7 章 焊接检验 .....            | 58 |
| 实验 12 超声波探伤实验 .....         | 58 |
| 实验 13 着色法渗透探伤实验 .....       | 64 |
| 实验 14 磁粉法探伤实验 .....         | 68 |
| 第 8 章 材料成形与控制工程 .....       | 72 |
| 实验 15 焊缝金属中扩散氢测定实验 .....    | 72 |
| 第 9 章 材料工程基础 .....          | 77 |
| 实验 16 焊接方法综合实验 .....        | 77 |
| 附录 A .....                  | 83 |
| 参考文献 .....                  | 85 |

# 第 1 章 焊接冶金原理

## 实验 1 焊接接头金相组织分析实验

### 【实验类型】

综合性实验(2 学时)。

### 【实验目的】

- (1) 了解焊接接头各区域组织特征；
- (2) 熟悉金相显微镜分类、原理、构造及操作；
- (3) 通过对金相组织分析与研究掌握焊接接头各区域典型金相组织的特征。

### 【实验原理】

焊接接头由焊缝区、熔合区和热影响区(Heat Affected Zone, HAZ)三部分组成,各区域组织特征不同。

#### 1. 焊缝区

焊缝区由熔池金属结晶凝固形成,由于熔池金属冷却速度快且可在运动状态下结晶,因此形成非平衡组织。焊接熔池金属凝固初期,晶体从非熔化区与熔化区交界处的半熔化晶粒上以柱状晶形态联生长大,长大方向与最大散热方向一致。由于熔池金属各部分成分过冷不同,所以凝固形态各异。典型焊缝金属凝固时的结晶形态如图 1-1 所示。

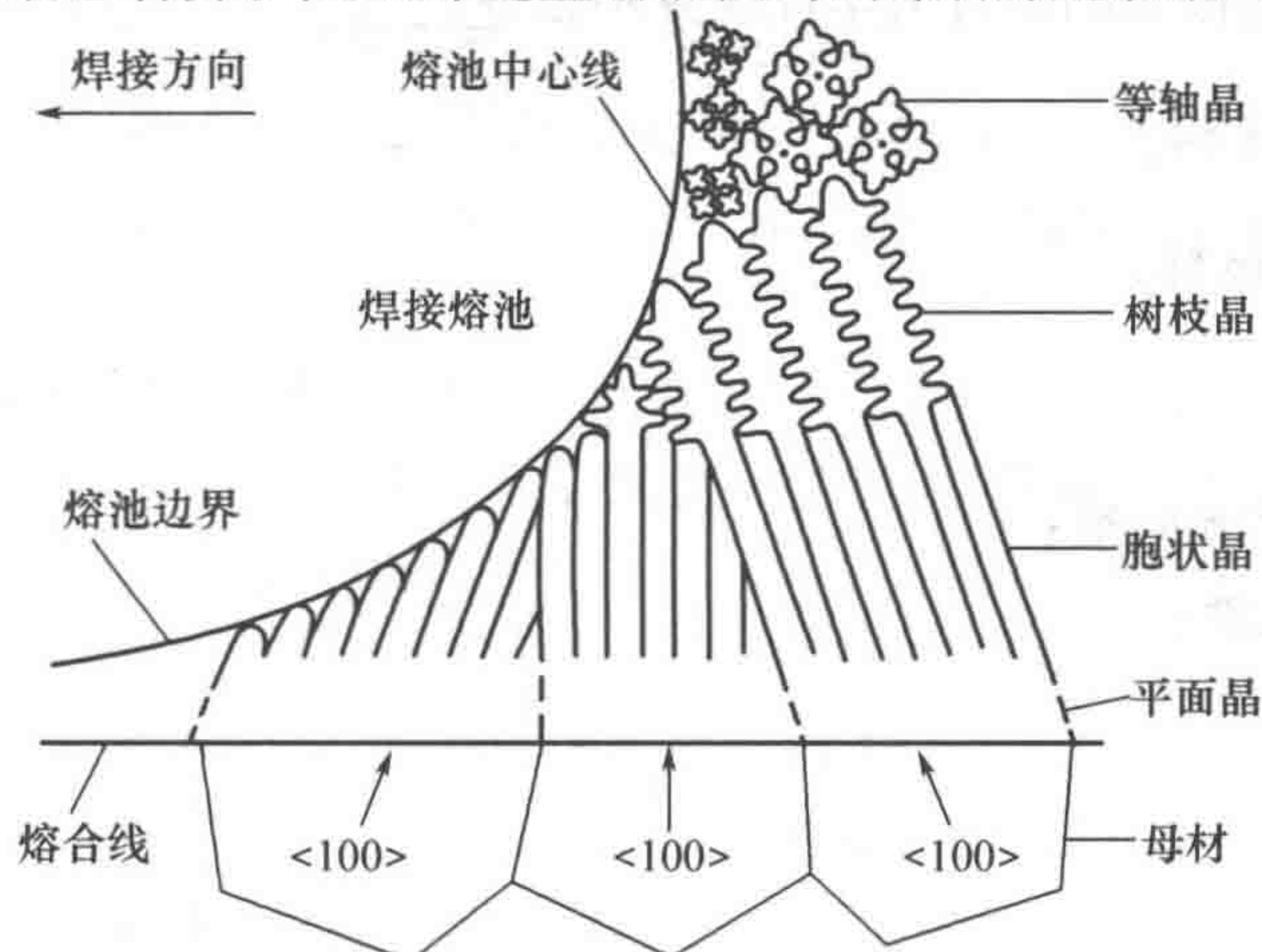


图 1-1 典型焊缝金属凝固时结晶形态

## 2. 熔合区

熔合区是焊接接头中由焊缝区向母材 HAZ 过渡的区域。熔合区由半熔化区和未混合区组成。熔合区构成及附近各区域相对位置如图 1-2 所示。

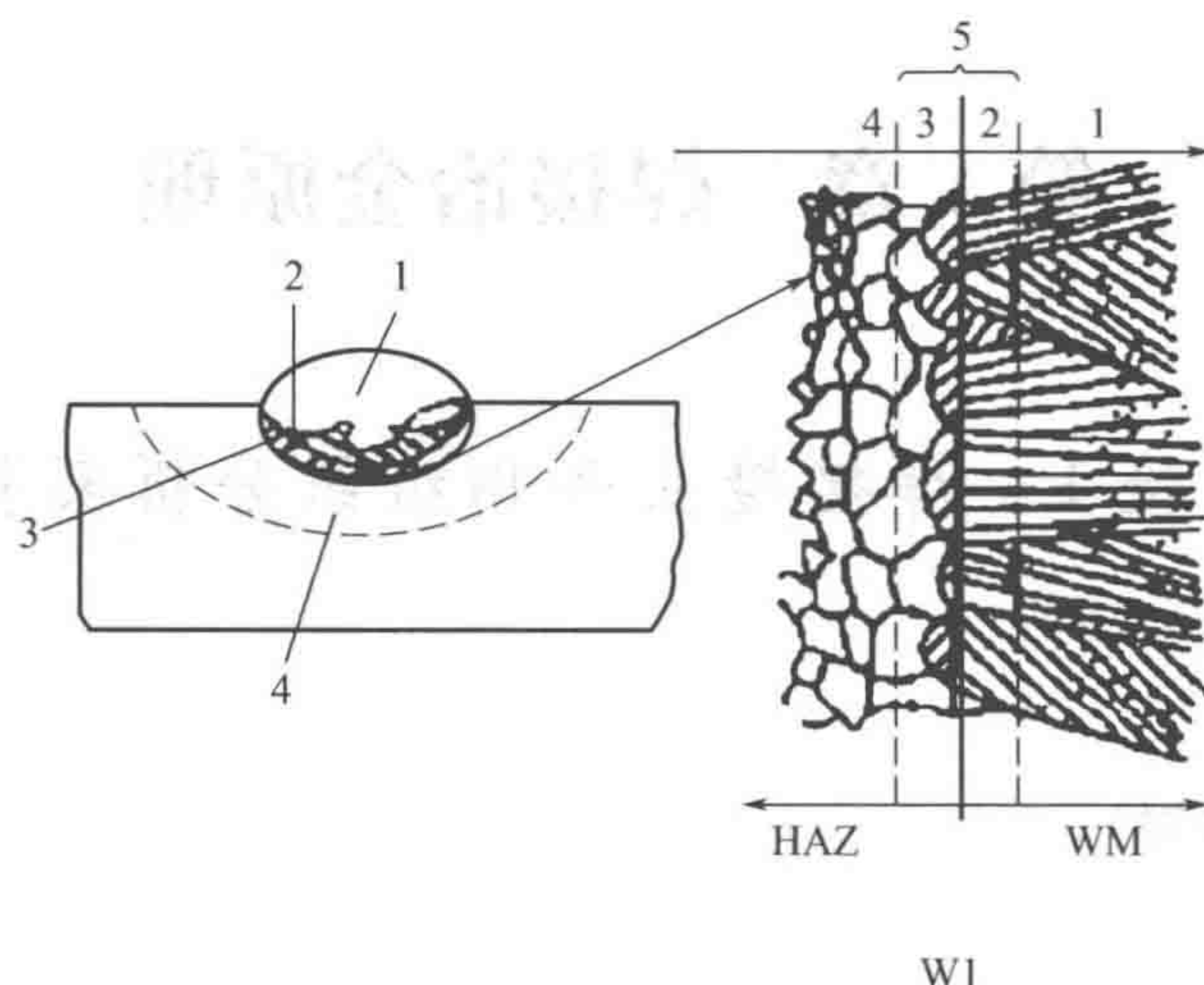


图 1-2 熔合区的构成及附近各区域相对位置示意图

1 - 焊缝区(富焊条成分); 2 - 焊缝区(富母材成分); 3 - 半熔化区; 4 - HAZ;  
5 - 熔合区; WM - Weld Metal 焊缝金属; W1 - 熔合线

## 3. 热影响区(HAZ)

HAZ 焊是焊缝两侧未经过熔化但组织性能发生变化的区域。由于焊接热影响区不同部位受热不一致,导致内部组织与性能分布不均匀,使其成为焊接接头最薄弱环节,以低碳非淬火钢手工电弧焊空冷为例,焊接热影响区包括过热区、正火区和不完全重结晶区。过热区的温度范围为  $1\ 100 \sim 1\ 490\ ^\circ\text{C}$ ,在此区间晶粒急剧长大,相应区域组织粗大,焊接接头性能很差;正火区的温度取在  $900 \sim 1\ 100\ ^\circ\text{C}$  之间,冷却后组织由奥氏体转变为细小的铁素体和珠光体,焊接接头具有较高综合力学性能;不完全重结晶区的温度区在  $750 \sim 900\ ^\circ\text{C}$  之间,冷却时部分奥氏体组织转变为细小的铁素体和珠光体,部分原始铁素体没有发生改变,晶粒大小不均匀,焊接接头的综合力学性能并不很好。

### 【实验设备及材料】

- (1) 20 号钢焊接试样;
- (2) 预磨机;
- (3) 抛光机;
- (4) 100 - 1500 号水砂纸;
- (5) 抛光布,抛光液;
- (6) 腐蚀液;
- (7) 吹风机;
- (8) 金相显微镜。

## 【实验内容及步骤】

### 1. 金相试样的制备

#### (1) 取样

在室温下,用手锯和水冷切割机垂直切割焊缝,并在断面上截取金相试样。试样截取区域要包括焊缝、HAZ 和部分母材三部分。试样截取尺寸和位置如图 1-3 所示。

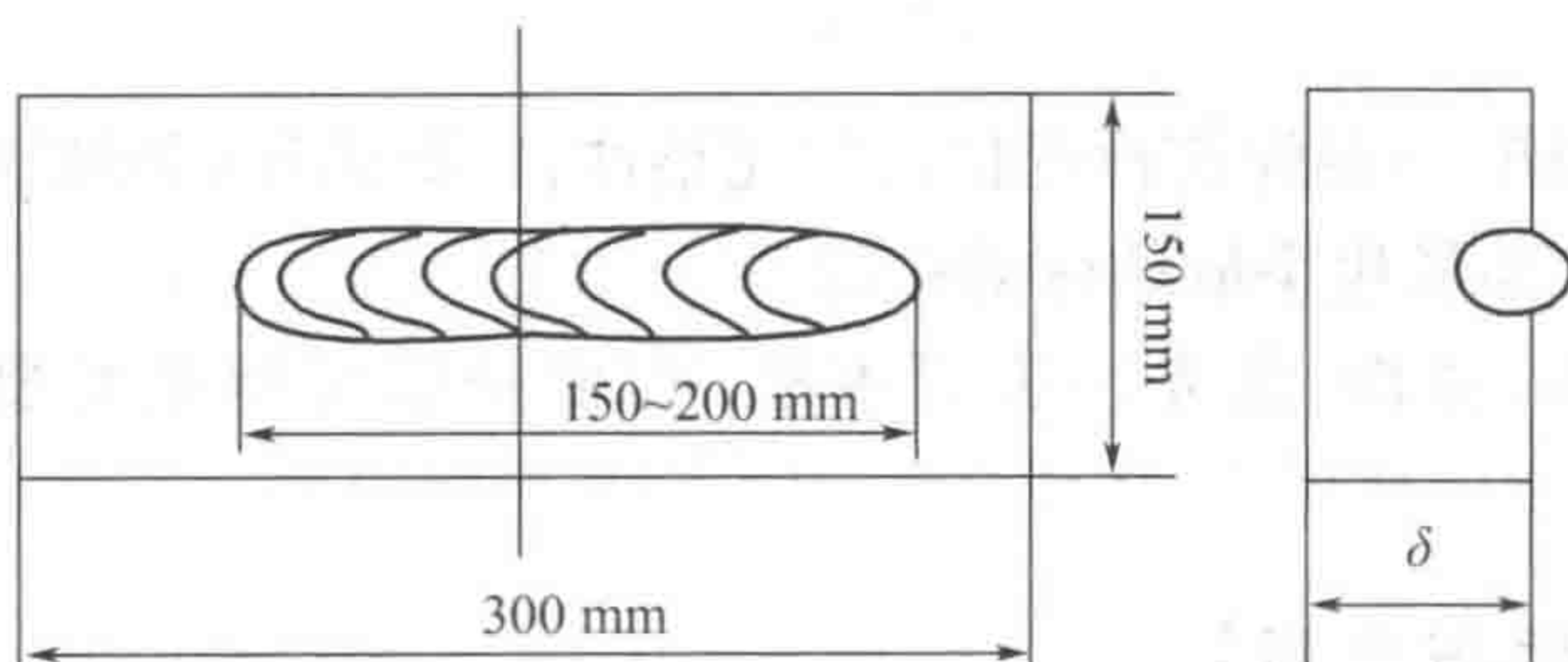


图 1-3 试样截取尺寸及位置

#### (2) 金相试样的预磨、抛光与浸蚀

##### ① 预磨

试样截取后,将试样的磨面在砂轮机上磨制成平面(要点:将变形层磨掉,试件尖角倒圆,防止磨削过程过热变色导致组织改变)。

磨面磨制顺序是砂纸由粗到细。每种砂纸磨制时,将砂纸平铺在玻璃板上,开启冷却水(要点:冷却水要清洁无杂质;冷却水流量控制在保证其不断流布砂纸表面——防止磨面过热和磨削颗粒残留),手握试件单向平行推磨一次,转动试样  $90^\circ$ ,手握试件单向平行推磨一次,如此反复,直至磨到前一道磨痕完全消失时方可更换下一目砂纸。全部砂纸磨完则预磨结束。除上述手工预磨外,还可采用预磨机磨制。

##### ② 抛光

根据不同材料选择抛光布材质、抛光膏种类,具体操作如下:

- 固定抛光布;
- 开启抛光机,用洁净水润湿抛光布,无异响后停机;
- 在抛光布表面均匀涂布抛光膏,开机抛光,抛光至磨面光亮无划痕;
- 抛光后试样先用清洁水冲洗干净,然后用无水乙醇去水,用冷风机吹干。

##### ③ 浸蚀

根据不同材料选择浸蚀液,确定浸蚀时间。浸蚀后试样先用清洁水冲洗干净,然后用无水乙醇去水,用冷风机吹干。立即放在显微镜下观察,能清晰看到焊缝、熔合线、热影响区、原始母材的各区域组织即达到要求。

### 2. 操作步骤

- 严格按照实验教师的指导,掌握所使用显微镜的使用流程及操作规程;
- 使用低倍显微镜观察焊接接头组织,寻找熔合线;
- 使用高倍显微镜观察焊缝组织变化规律;
- 观察 HAZ 的组织特点,采集并记录过热区、正火区、不完全结晶区及母材组织。

## 【安全及注意事项】

### 1. 一般注意事项

- (1)防止高频电磁场伤害,不采用高频稳弧,不频繁引弧;
- (2)防止紫外线辐射伤害,焊前检查护具的完整性;
- (3)防止低熔点重金属蒸气和焊接粉尘危害,还必须保证焊接现场良好通风;
- (4)防止高频灼伤,不仅要保证焊接操作者呼吸空气清洁卫生,还必须保证焊接现场良好通风;
- (5)防止弧光灼伤,一要焊前检查护具的完整性,二要选择相应黑度的护目镜片。

### 2. 焊接实验室可能发生事故的应对措施

火灾、触电、烧伤、烫伤、弧光伤害等事故,必须按照实验室紧急事故处理预案进行处理。

## 【实验结果处理与分析】

对所采用的试样及实验设备数据进行收集整理,填写表 1-1。

表 1-1 焊接接头金相组织观察实验数据

| 记录项目     | 具体数据记录 | 备注 |
|----------|--------|----|
| 焊接材料(母材) |        |    |
| 焊接参数     |        |    |
| 焊接接头组织分区 |        |    |
| 金相组织记录   |        |    |

## 【实验问题与讨论】

- (1)从金相分析的角度,焊接接头有几大分区? 每个分区金相组织的特点是什么? 各区域组织的性能如何?
- (2)可以通过什么措施对性能进行改善?

## 【实验报告撰写要求】

实验报告是整个实验完成情况、学生实验技能和数据处理能力的集中表现,为规范实验报告的写作,制定其撰写标准。

- (1)填写实验报告必须使用学校专用的实验报告纸。
- (2)报告的所有内容必须用钢笔、签字笔等墨水笔填写。

(3)一份独立完整的实验报告必须包括以下几部分内容。

- ①实验编号及题目;
- ②撰写实验报告的日期,实验者专业、年级、班级、学号、姓名,合作者姓名等;
- ③实验目的;
- ④仪器用具,注明所有实验仪器的名称、型号、测量范围及精度;
- ⑤实验原理,包括实验中采用的仪器设备的工作原理、实验方法、相关理论;
- ⑥内容及步骤;
- ⑦安全注意事项;
- ⑧实验结果及数据处理,包括数据处理过程及所有的实验测量结果;
- ⑨问题及讨论,对实验结果进行分析讨论,讨论影响实验不确定度的因素及改进方法,并完成教材中的思考题;
- ⑩参考文献,如实验报告中用到原始记录以外的数据,或教材中没有涉及的内容,就必须注明其来源或参考文献。

(4)物理量与单位采用国际单位制。

(5)作图必须用铅笔在白版纸上手工绘制或将显微镜所记录图片彩色打印。

(6)表格采用三线表。

(7)每份实验报告应单独装订成册,每页须标明页码。装订时应把有指导教师签名的预习报告和原始数据附在正式报告之后。

(8)实验报告都必须独立完成。

(9)若实验报告不符合上述规范,可视情况将报告退回重写。

## 实验2 焊接接头综合性能实验

### 【实验类型】

综合性实验(4学时)。

### 【实验目的】

- (1)了解影响焊缝金属中扩散氢导致延迟裂纹的机理与相关影响因素,掌握甘油法测定扩散氢的含量;
- (2)了解冷裂纹产生条件,掌握斜Y型坡口对接裂纹实验法;
- (3)了解热裂纹产生机理,掌握铝合金结晶裂纹实验方法。

### 【实验原理】

#### 1. 氢的作用机理及测定方法

##### (1) 扩散氢的作用机理

焊接冷却速度很快,液态金属所吸收的氢只有一部分能在熔池凝固过程中逸出,还有相当多的氢来不及逸出而被留在固态焊缝金属中。在焊接金属中,大部分氢以H或H<sup>+</sup>形式存在,并与焊缝金属形成间隙固溶体。氢原子或氢离子半径很小,在金属晶格中移动所受阻力小,故称为扩散氢。部分扩散氢聚集到晶格缺陷,显微裂纹和非金属夹渣物边缘的空隙中,并

结合成氢分子,因其半径大扩散困难故称之为残余氢。在一定条件下两者可以相互转换。

金属内部的缺陷提供了潜在的裂纹源,在应力的作用下,这些显微缺陷的前端形成了三向应力区,诱使氢向该处扩散并聚集,应力随之提高,氢致裂纹扩散过程如图 1-4 所示。

当氢的浓度达到一定程度时,一方面产生较大的应力,另一方面阻碍位错移动而使该处变脆。此部位氢的浓度达到临界值时,就发生启裂和裂纹扩展,扩展后的裂纹尖端又会形成新的三向应力区。氢不断地向新的三向应力区扩散达到临界浓度时又发生了新的裂纹扩展。这种过程周而复始不断进行,直至成为宏观裂纹。由于启裂、裂纹扩展过程都伴有氢的扩散,而氢的扩散需要一段时间,因此这种冷裂纹具有延迟特征。

材料淬硬倾向越大,越易形成淬硬组织,因而促进延迟裂纹的形成。同时焊接接头所在位置的应力状态对延迟裂纹形成也具有决定性作用。

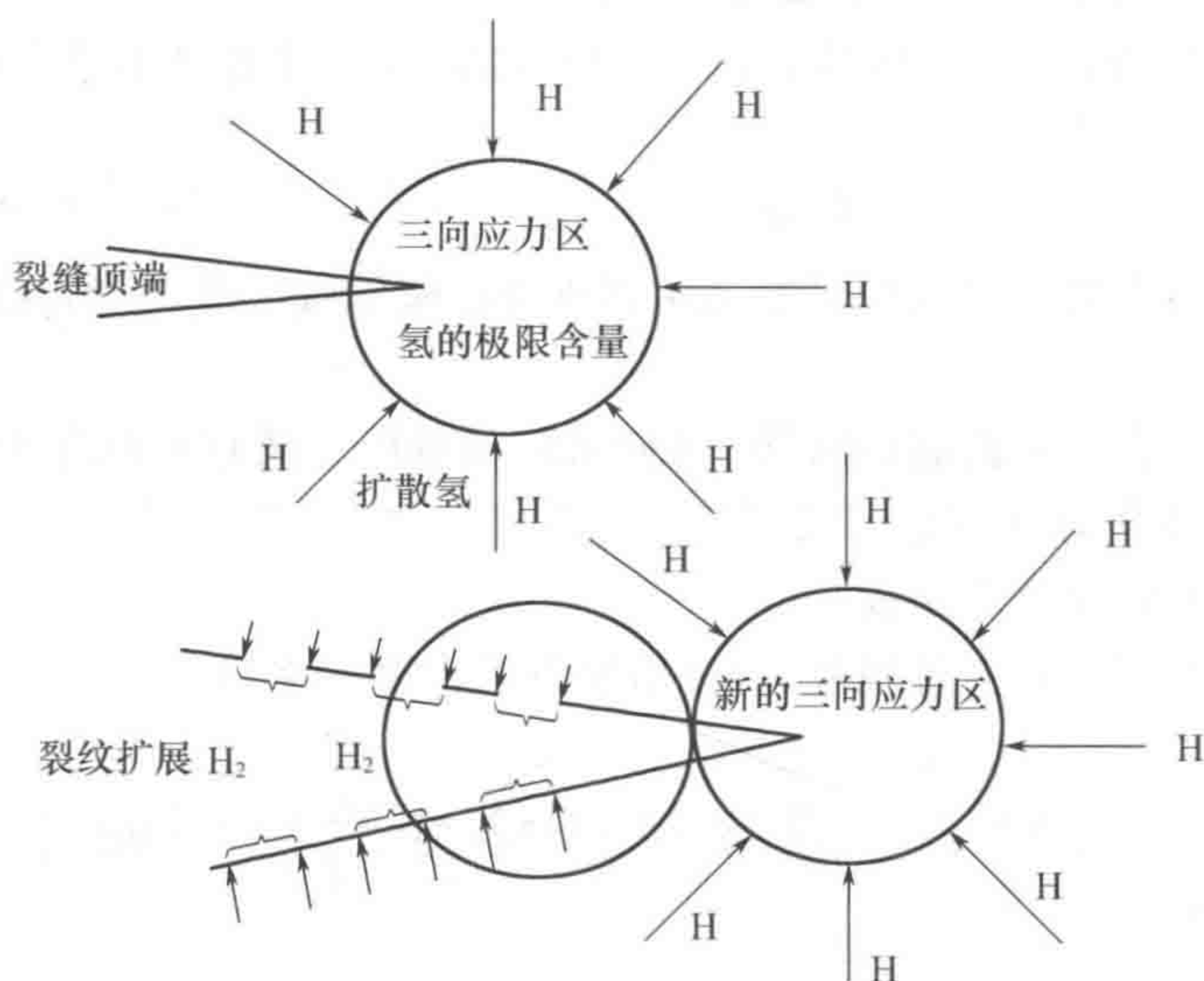


图 1-4 氢致裂纹扩展过程

## (2) 氢的产生及来源

焊接时,氢主要来源于焊接材料中的水分及其他含氢物质,电弧周围空气中的水蒸气和母材坡口表面上的锈蚀与油污等杂质。不同的焊接方法,氢向金属中溶解的途径也不同。对于电弧焊,氢主要以两个途径进入焊缝金属中,具体如下。

- ①氢通过气相与液相金属的界面以原子或质子的形式被吸附后溶入金属中;
- ②氢通过熔渣层以扩散形式溶入金属中。

## (3) 扩散氢的测定方法

目前,测定焊缝金属中扩散氢含量的方法有液体置换法(水银法、甘油法、乙醇法)、排液法、色谱法、硅油置换法等。《熔敷金属中扩散氢测定方法》(GB/T3965—1995)中规定了用甘油置换法、气相色谱法及水银置换法测定熔敷金属中扩散氢含量的方法。当用甘油置换法测定的每 100 g 熔敷金属中扩散氢含量小于 2 mL 时,必须使用气相色谱法测定。标准甘油置换法、气相色谱法适用于焊条电弧焊、埋弧焊和气体保护焊。焊接过程中,焊缝熔敷金属中扩散氢含量是产生延迟裂纹的主要因素之一,所有扩散氢含量的测定是评价焊缝质量的主要指标。

熔敷金属扩散氢( $H_{DM}^{①}$ )含量的计算公式为

$$H_{DM} = \frac{H_{GL} + 1.73}{0.79} \left( H_{GL} > \frac{2 \text{ mL}}{100 \text{ g}} \right) \quad (1-1)$$

式中  $H_{DM}$ ——熔敷金属扩散氢含量(甘油法测定值换算成气相色谱法测定值时每 100 g 氢的含量), mL;

$H_{GL}$ ——甘油置换法测定的每 100 g 熔敷金属扩散氢含量, mL。

$$H_{GL} = V_G = \frac{PVT_G}{P_G WT} \times 100 \quad (1-2)$$

式中  $V_G$ ——收集的气体体积换算成标准状态下每 100 g 熔敷金属中气体的体积数, mL;

$V$ ——收集的气体体积数, mL;

$W$ ——熔敷金属质量(焊后焊件质量 - 焊前焊件质量), g; 精确到 0.01g;

$T_G$ ——273, K;

$T$ ——(273 +  $t$ ), K;

$t$ ——恒温收集箱中温度, °C;

$P_G$ ——101, kPa;

$P$ ——实验室气压, kPa。

## 2. 焊接冷裂纹产生机理及斜 Y 型坡口对接裂纹实验法

### (1) 焊接冷裂纹产生机理

焊接冷裂纹产生时间是焊接结束后, 温度小于该材质马氏点( $M_s$ )点。焊接冷裂纹是焊缝及热影响区金属在焊接热循环作用下, 由于组织硬化倾向严重, 又在拉伸应力和扩散氢共同作用下产生的。

冷裂纹产生的三大因素: 钢材的淬硬倾向、该结构所受拘束应力状态、焊接接头的氢含量与分布。焊接接头抵抗冷裂纹能力的实验有最高硬度法、斜 Y 型坡口对接裂纹实验法(“小铁研”抗裂实验)、刚性固定对接裂纹实验法和插销实验法等。

### (2) 斜 Y 型坡口对接裂纹实验法

#### ① 斜 Y 型坡口对接裂纹实验法简介

该方法广泛用于评价打底焊缝及其焊接热影响区冷裂倾向。由于斜 Y 型坡口对接裂纹实验的接头所受拘束度很大, 根部尖角又有应力集中, 实验条件比较苛刻, 所以认为实验中裂纹率不超过 20%, 实际焊接结构中就不会产生冷裂纹。

斜 Y 型坡口对接裂纹实验法母材加工试样如图 1-5 所示。试样两端 60 mm 范围内先用焊缝固定, 试板中间预留间隙 2 mm, 预留反变形 7°。中间 80 mm 段为实验焊缝位置, 实验焊缝引弧、收弧都应离开拘束焊缝 3 mm, 收弧时应填满弧坑。

#### ② 裂纹检查方法

焊接采用标准参数(例如, 手弧焊, 焊条牌号为 J422, 焊条直径为 4 mm, 焊接电流为 170 A, 电弧电压为 24 V, 焊接速度为 150 mm/min, 焊条在 150 °C 烘干 2 h)在三个试件上重复实验。焊后 24 h 后作裂纹检查。

##### a. 表面裂纹率检查

先采用放大镜测量开口于表面的裂纹, 再采用磁力探伤(使用荧光磁粉)检测, 确定表

① 此表示法参考《熔敷金属中扩散氢测定方法》(GB/T3965—1995)。

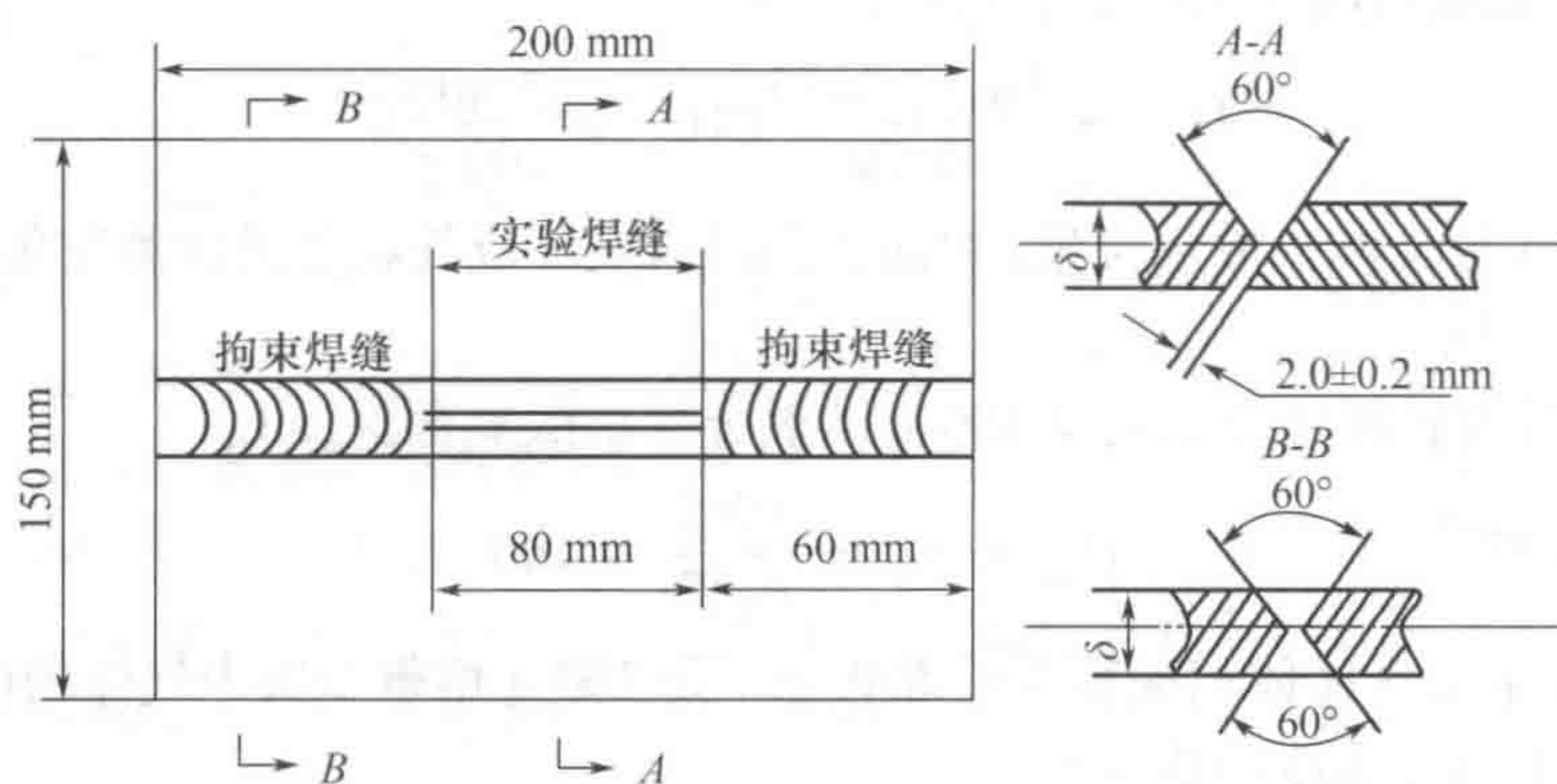


图 1-5 斜 Y 型坡口对接裂纹实验法母材加工试样

面裂纹长度。

#### b. 断面裂纹率检查

将一个试件沿焊缝长度方向均匀截成六段,检查五个断面的裂纹情况。先采用放大镜测量开口于表面的裂纹,再采用磁力探伤(使用荧光磁粉)检测,确定断面裂纹长度。

#### c. 根部裂纹率检测

将一个试件沿焊缝长度方向纵向切开,检查断面的裂纹情况。先采用放大镜测量开口于表面的裂纹,再采用磁力探伤(使用荧光磁粉)检测,确定根部裂纹长度。试样裂纹长度示例如图 1-6 所示。

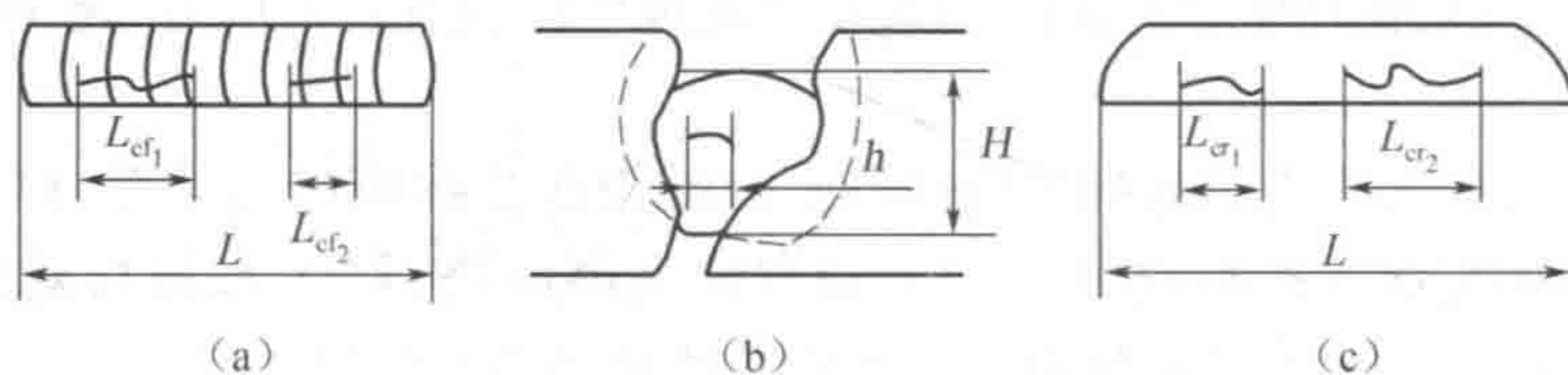


图 1-6 试样裂纹长度示例

(a) 表面裂纹; (b) 断面裂纹; (c) 根部裂纹

各类型裂纹率可根据式(1-3)~式(1-5)求得

$$\text{表面裂纹率} = \frac{\sum l_{cf}}{l_c} \times 100\% \quad (1-3)$$

$$\text{断面裂纹率} = \frac{\sum h}{5H} \times 100\% \quad (1-4)$$

$$\text{根部裂纹率} = \frac{\sum l_{cr}}{l_c} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中  $\sum l_{cf}$ ——表面裂纹长度总和, mm;

$\sum l_{cr}$ ——纵断面上根部裂纹长度总和, mm;

$l_c$ ——实验焊缝长度, mm。

#### (3) 结晶裂纹产生机理和铝合金结晶裂纹测定

热裂纹一般是指在较高温度下产生的裂纹。大部分热裂纹是在固、液相线温度区间产

生的结晶裂纹,也有少量是在稍低于固相线温度时产生的。热裂纹多数产生在焊缝中,有时候也产生于热影响区。热裂纹可分为三类:结晶裂纹、高温液化裂纹和多边化裂纹。

焊缝金属结晶是一个在液态金属中不断形核和长大的过程。非共晶成分的合金没有单一结晶温度,而是存在一个结晶温度区间。当液态金属温度降低至于液相线相交时,结晶开始。随着结晶过程的进行,液态金属逐渐向低熔点成分变化,直至达到共晶成分。焊缝金属结晶要经历液态、液-固态(液相占主要部分)、固-液态(固相占主要部分)、固态四个阶段。在四个阶段中存在一个温度区间,区间内焊缝的塑性非常低,称之为脆性温度区间。

在脆性温度区间内,即熔池结晶的固-液阶段,已结晶的固相占主要部分,尚未结晶的液态金属被排挤在已结晶的固态晶粒之间,并呈薄膜状分布,即在晶粒之间形成液态薄膜。如果此时受到拉伸应力的作用,由于液相本身的抗变形能力小,变形必将集中于液态薄膜处,在晶粒尚未发生塑性变形时,就沿结晶发生开裂,即产生结晶裂纹。

苏联物理学家普罗霍洛夫提出了拉伸应变与脆性温度区间内被焊金属塑性变化之间的关系,如图1-7所示为焊接时产生结晶裂纹的调节曲线图。

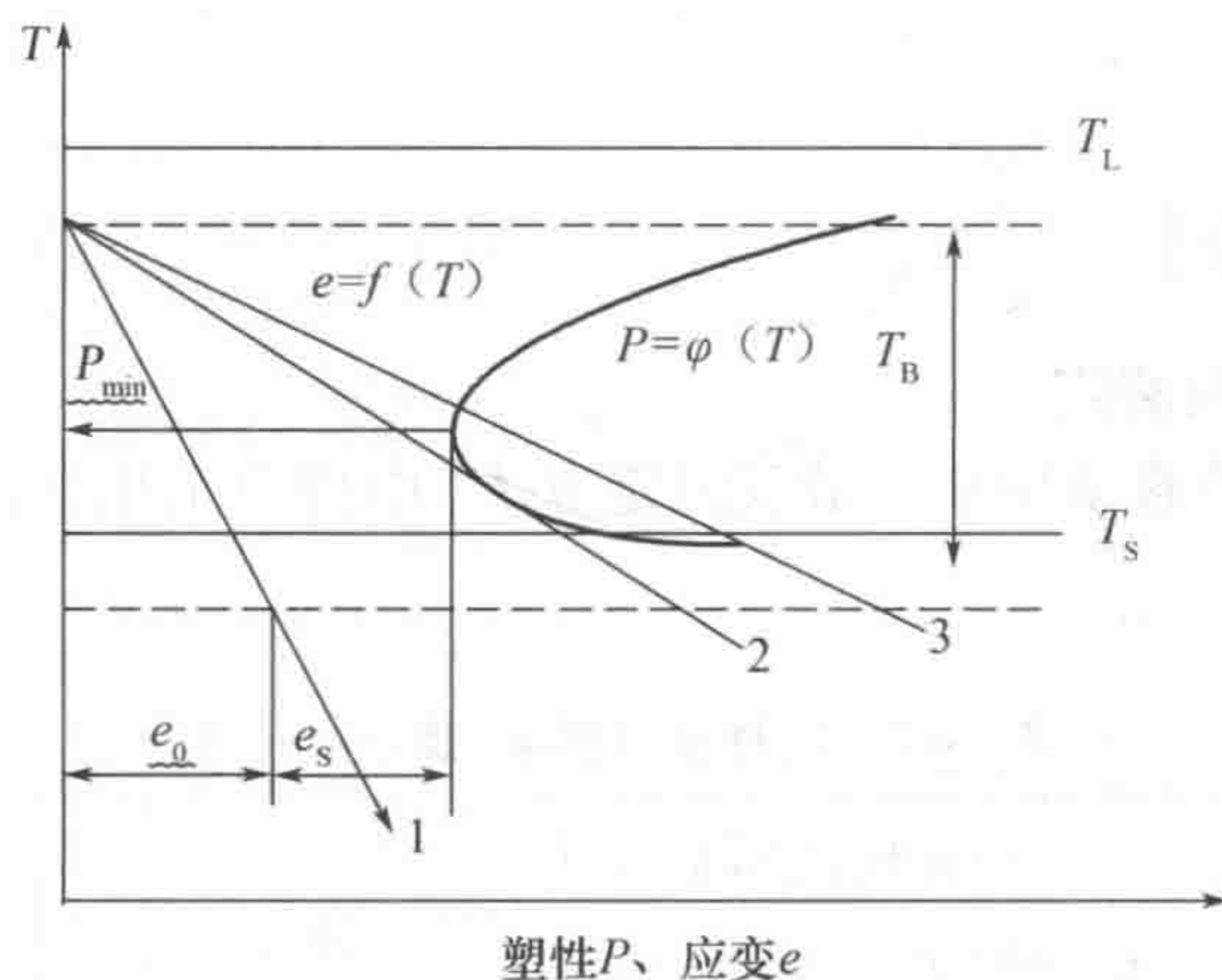


图1-7 焊接时产生结晶裂纹的调节曲线图

$T_L$ —液相线; $T_S$ —固相线; $T_B$ —脆性温度区间

图1-7中, $e$ 表示焊缝在拉伸应力作用下产生的应变,它随温度变化而变化,其应变增长率为 $\partial e / \partial T$ ; $P$ 表示在脆性温度区间焊缝金属的塑性,在液态薄膜形成的时刻, $P$ 存在一个最小值 $P_{\min}$ ,此时焊缝金属产生的应变力 $e_0$ ; $P_{\min}$ 与 $e_0$ 差值称为塑性储备,即 $e_s = P_{\min} - e_0$ 。

当应变增长率较小时,应变随温度按图1-7曲线1变化,此时 $e_0 < P_{\min}$ , $e_s > 0$ 。焊缝具有一定塑性储备量,不会产生结晶裂纹。

当应变增长率较大时,应变随温度按图1-7曲线3变化,此时 $e_0 > P_{\min}$ , $e_s < 0$ 。焊缝金属在拉伸应力作用下产生的应变量已超过了塑性储备量,焊缝必然产生结晶裂纹。

当应变随温度按图1-7曲线2变化时, $e_0 = P_{\min}$ , $e_s = 0$ 。焊缝金属在拉伸应力作用下产生的应变量等于塑性储备量,焊缝处于产生结晶裂纹的临界状态。此时的应变增长率称为临界应变增长率,记作 $CTS$ 。

为防止结晶裂纹产生,应满足如下条件

$$\frac{\partial e}{\partial T} < CTS \quad (1-6)$$

【实验设备及材料】

1. 实验设备

- (1) 扩散氢测定仪;
- (2) 多功能焊机;
- (3) 烘箱;
- (4) 电子天平;
- (5) 清洗工具;
- (6) 干燥箱;
- (7) 切割设备(水切割或线切割)。

2. 实验材料

- (1) Q235 钢板、45 号钢板、6061 铝板;
- (2) 乙醇、丙酮、5% NaOH 溶液、30% ~ 50% 的硝酸溶液;
- (3) CO<sub>2</sub> 气体;
- (4) 金相腐蚀液。

【实验内容及步骤】

1. 焊缝金属中扩散氢测定

GB/T3965—1995《熔敷金属中扩散氢测定方法》中规定了用甘油置换法所采用的试样尺寸,如表 1-2 所示。

表 1-2 试样及引弧板、熄弧板尺寸

| 焊接方法      | 试样尺寸         |              |              | 引弧板、熄弧板尺寸    |              |              | 测定方法  | 排列顺序     |
|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|----------|
|           | 厚 $T$<br>/mm | 宽 $W$<br>/mm | 长 $L$<br>/mm | 厚 $T$<br>/mm | 宽 $W$<br>/mm | 长 $L$<br>/mm |       |          |
| 焊条<br>电弧焊 | 12           | 25           | 100          | 12           | 25           | 45           | 甘油置换法 | 引弧板试样熄弧板 |
| 埋弧焊       |              |              |              |              |              | 150          |       |          |
| 气体<br>保护焊 |              |              |              |              |              | 45           |       |          |

将试样放置 250 ℃ ± 10 ℃ 烘干箱中 6 ~ 8 h 进行去氢处理,然后用钢丝刷和砂布除锈,乙醇去水,丙酮去油。吹干后对试样称重  $W_0$  (精确到 0.01 g)。按照预设焊接参数施焊,焊接结束后水冷 10 s,乙醇去水,丙酮去油,吹干后对试样称重  $W_1$  (精确到 0.01 g)。 $W = W_1 - W_0$ ,将制备好的试样放入已经充满甘油的收集器内,从试样焊完到放入收集器内应在 90 s 内完成。收集器内甘油必须保持在 45 ℃ ± 1 ℃。72 h 后将吸附在收集器管壁上的气泡收集上去,准确读取气体量  $V$ 。根据式(1-2)计算。

2. 斜 Y 型坡口对接裂纹实验法

- (1) 根据图 1-5 加工试样,清理试样表面油污和铁锈。
- (2) 选定焊接方法,确定焊接参数及工艺,制定焊接工艺卡。
- (3) 根据预定好的焊接工艺卡焊接拘束焊缝、实验焊缝,焊接结束 24 h 后检查焊缝表面

裂纹。为了不影响焊接组织,采用水切割或线切割处理试样。

3. 铝合金结晶裂纹测定

(1) 切割试样

按照图 1-8 切割试样。

(2) 清洗试样

用丙酮去除试样及焊丝表面油污,将试样及焊丝放入 50 ~ 60 ℃ 的 5% NaOH 溶液中浸泡 5 ~ 10 min,取出并冷水冲洗,放入 30% ~ 50% 的硝酸溶液中 1 min 光化处理,放入 50 ~ 60 ℃ 的水中冲洗,放入 100 ~ 110 ℃ 干燥箱中备用。

(3) 设定焊接工艺

按照图 1-9 进行装配并施焊。

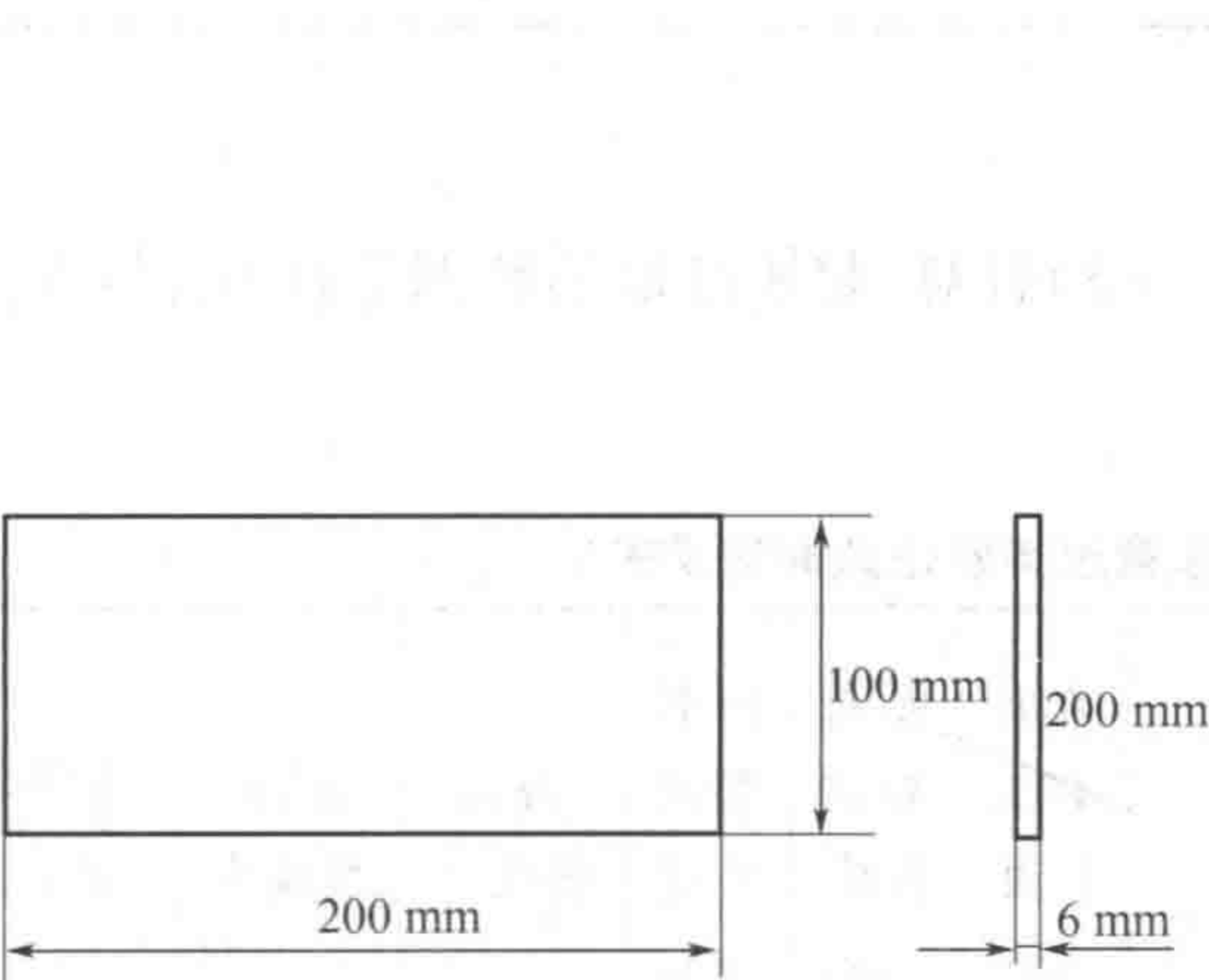


图 1-8 切割试样尺寸

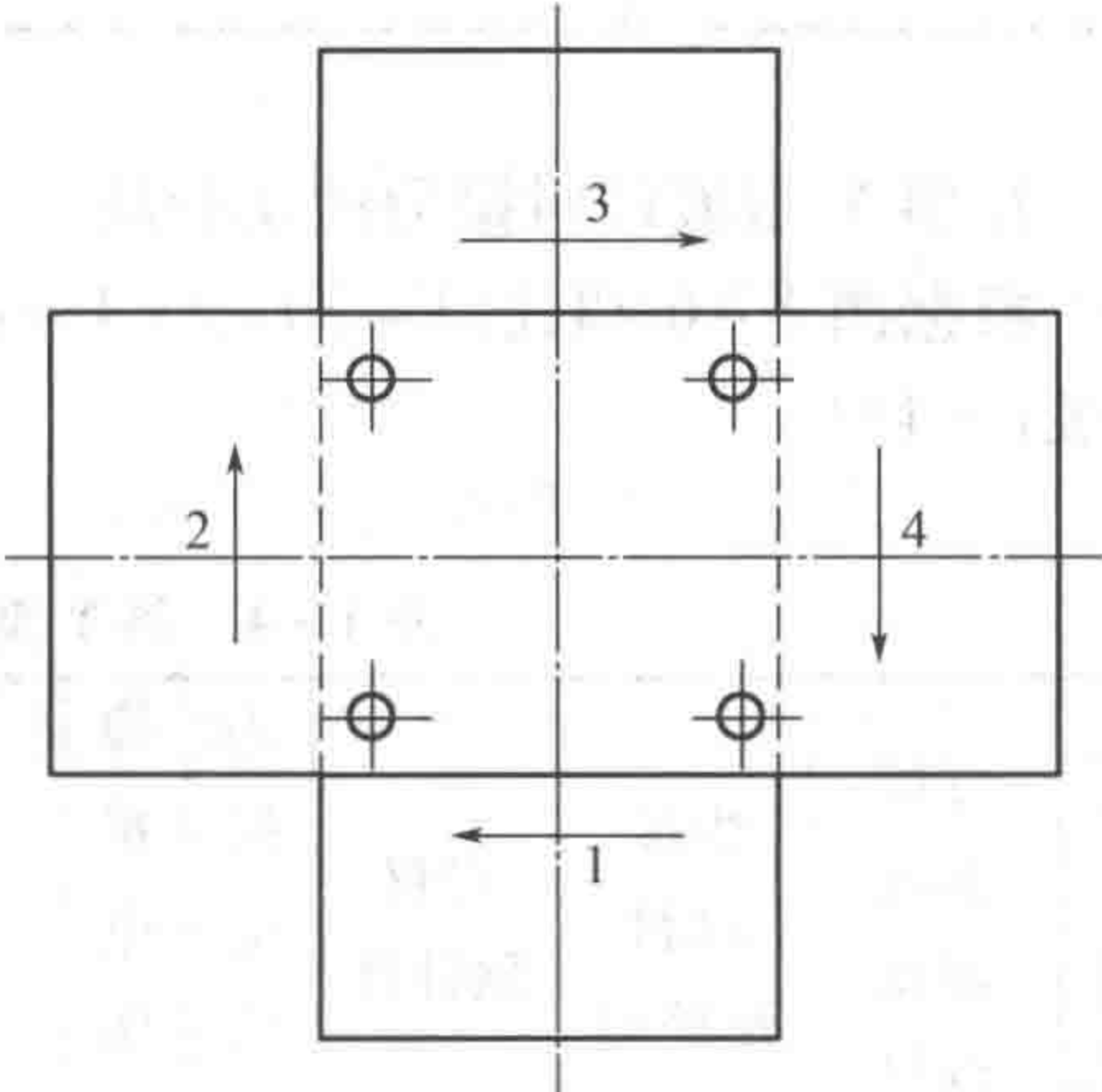


图 1-9 进行装配及施焊顺序

【实验结果处理与分析】

1. 焊缝金属中扩散氢测定

焊接金属中扩散氢测定的相关数据相关数据记录在表 1-3 中。

表 1-3 扩散氢测定实验数据及结果

| 试样<br>编号 | $W_0/\text{g}$ | $W_1/\text{g}$ | 焊接规范               |                    |                       | 实验条件     |                | 焊完<br>至入<br>仪时<br>间/s | 实验<br>室气<br>压/kPa | 收集的<br>气体体<br>积数/mL | 每 100 g 熔<br>敷金属扩<br>散氢含量<br>/(mL) |
|----------|----------------|----------------|--------------------|--------------------|-----------------------|----------|----------------|-----------------------|-------------------|---------------------|------------------------------------|
|          |                |                | 焊接<br>电流<br>/<br>A | 焊接<br>电压<br>/<br>V | 焊接<br>速度<br>/(mm/min) | 焊接<br>方法 | 前期<br>处理<br>状况 |                       |                   |                     |                                    |
| 1        |                |                |                    |                    |                       |          |                |                       |                   |                     |                                    |
| 2        |                |                |                    |                    |                       |          |                |                       |                   |                     |                                    |
| 3        |                |                |                    |                    |                       |          |                |                       |                   |                     |                                    |
| 4        |                |                |                    |                    |                       |          |                |                       |                   |                     |                                    |

表 1-3(续)

| 试样<br>编号 | $W_0/g$ | $W_1/g$ | 焊接规范               |                    |                           | 实验条件     |                | 焊完<br>至入<br>仪时<br>间/s | 实验<br>室气<br>压/kPa | 收集<br>的气体<br>体积<br>数/mL | 每 100 g 熔敷<br>金属扩散<br>氢含量<br>/(mL) |
|----------|---------|---------|--------------------|--------------------|---------------------------|----------|----------------|-----------------------|-------------------|-------------------------|------------------------------------|
|          |         |         | 焊接<br>电流<br>/<br>A | 焊接<br>电压<br>/<br>V | 焊接<br>速度<br>/<br>(mm/min) | 焊接<br>方法 | 前期<br>处理<br>状况 |                       |                   |                         |                                    |
| 5        |         |         |                    |                    |                           |          |                |                       |                   |                         |                                    |
| 6        |         |         |                    |                    |                           |          |                |                       |                   |                         |                                    |
| 7        |         |         |                    |                    |                           |          |                |                       |                   |                         |                                    |
| 8        |         |         |                    |                    |                           |          |                |                       |                   |                         |                                    |

2. 斜 Y 型坡口对接裂纹实验法

根据图 1-6 和式(1-3)、式(1-4)、式(1-5)计算,将所读取的数据并计算结果记录于表1-4中。

表 1-4 斜 Y 型坡口对接裂纹实验法数据记录表

| 试件<br>编号 | 焊接<br>方法<br>焊接<br>母材 | 焊接<br>材料<br>预处理 | 母材<br>预处理 | 焊<br>接<br>电<br>流<br>/A | 焊<br>接<br>电<br>压<br>/V | 焊接<br>速度<br>/<br>(mm/min) | 表面<br>裂纹<br>长度<br>/mm | 断面<br>裂纹<br>长度<br>/mm | 根部<br>裂纹<br>长度<br>/mm | 表面<br>裂纹率 | 断面<br>裂纹率 | 根部<br>裂纹率 |
|----------|----------------------|-----------------|-----------|------------------------|------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|
| 1        |                      |                 |           |                        |                        |                           |                       |                       |                       |           |           |           |
| 2        |                      |                 |           |                        |                        |                           |                       |                       |                       |           |           |           |
| 3        |                      |                 |           |                        |                        |                           |                       |                       |                       |           |           |           |
| 4        |                      |                 |           |                        |                        |                           |                       |                       |                       |           |           |           |
| 5        |                      |                 |           |                        |                        |                           |                       |                       |                       |           |           |           |
| 6        |                      |                 |           |                        |                        |                           |                       |                       |                       |           |           |           |
| 7        |                      |                 |           |                        |                        |                           |                       |                       |                       |           |           |           |
| 8        |                      |                 |           |                        |                        |                           |                       |                       |                       |           |           |           |
| 9        |                      |                 |           |                        |                        |                           |                       |                       |                       |           |           |           |
| 10       |                      |                 |           |                        |                        |                           |                       |                       |                       |           |           |           |
| 11       |                      |                 |           |                        |                        |                           |                       |                       |                       |           |           |           |
| 12       |                      |                 |           |                        |                        |                           |                       |                       |                       |           |           |           |

3. 铝合金结晶裂纹测定

焊后借助放大镜测量裂纹长度,根据式(1-7)计算每块试样的裂纹率。

$$\text{裂纹率} = \frac{\text{裂纹长度}}{\text{焊缝总长}} \times 100\%$$

(1-7)