



焊接 冶金 原理

陈伯蠡

清华大学出版社

352357

C36

焊接冶金原理

陈伯鑫



清华大学出版社

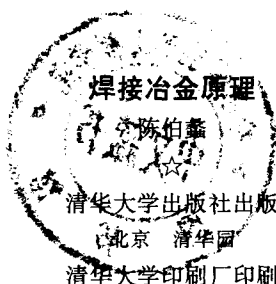
内 容 简 介

《焊接冶金原理》包括焊接化学冶金与焊接物理冶金两方面。书中全面地阐述了与焊接性有关的诸问题,涉及到了各种典型金属材料的焊接性。其中包括焊接热循环特性控制、焊接冶金反应过程、各类焊接材料特性(重点是结构钢焊条)、高强度焊缝强韧化、热影响区性能控制以及各类焊接冶金缺陷(重点是裂纹)。

本书反映了国内外最新科研成果,资料丰富,理论系统,深入浅出,概念清楚,便于自学。各章后均有小结、习题及参考文献,有助于深入学习。

本书可作为工科大专院校焊接专业或材料专业教科书,也可供有关工程技术人员参考。

(京)新登字 158 号



新华书店总店科技发行所发行

☆

开本: 850×1168 1/32 印张: 19.75 字数: 514 千字

1991 年 10 月第 1 版 1991 年 10 月第 1 次印刷

印数: 0001—5000

ISBN7-302-00864-7/TF·1

定价: 6.25 元

前 言

《焊接冶金原理》是焊接专业的重点专业课,本书为该课程的教科书。编写时总结了作者在清华大学从事本课程教学三十余年的经验,同时也总结了作者历年编写教材(其中包括已正式出版的《金属焊接性基础》)的经验。在内容取舍、章节划分及体系安排上,贯彻了“少而精”和“理论联系实际”的原则,强调基本概念,重视学以致用,加强基础理论,避免庞杂繁琐,注意科学性、系统性与实用性的结合。

本书除总结了以往的教学经验,更充分吸收了国内外最新科学研究成果及生产经验,其中包括作者所在单位的科学研究成果(如低合金高强钢的焊接性、焊缝强韧化与焊缝强度匹配理论等),丰富了教材内容,提高了教材的科学水平。特别是在焊接化学冶金和焊接材料方面,作者根据多年的研究心得,早在70年代就提出了“焊接冶金反应过程分区连续反应模式”^{*}用以讨论焊接材料性能,可以一反以往只是抽象写反应式或只是罗列配方,令人有“无的放矢”或“开中药铺”之感的状况,而是有一定规律可循。焊接冶金学的发展为焊接材料的发展以及金属焊接性的改进,提供了必要的理论基础。但焊接冶金学还处在不断发展的过程中,一些认识已经能够从感性上升到理性,一些认识还有待于深入发展,有的则还存在着较大的认识上的分歧,尚须进一步研究。

全书除绪论外共分五章,另加一附录。绪论为全书引子,着重说明焊接冶金问题的提出及金属焊接性的意义。第一章讨论焊接

* 清华大学焊接教研组,《焊接冶金学》,清华大学,1972

传热问题,重点是焊接热循环。第二章讨论焊接材料这一专题。焊接化学冶金过程的分析,均针对具体的焊接材料。研究焊接材料着眼于“少、小、好”的要求,即有害杂质侵入少、有益合金烧损小以及焊接性能好。本章重点为结构钢焊条性能分析。第三章着重讨论高强钢焊缝强韧性问题,实际上是焊缝性能同成分和组织的关系问题。也讨论了异种钢焊接熔合区的特性。第四章分析了焊接热影响区性能的变化,重点是脆化问题。第五章总括了各类焊接裂纹与气孔缺陷的产生与控制问题。全书实际上是对各类典型金属材料的焊接性进行了分析。在附录中列举一些典型裂纹试验方法及生产工艺实例,并列出少量组织和断口图片。各章后均有小结、习题和参考文献,供深入学习之用。

本书可作为工科大专院校焊接专业教科书,也可作为材料专业教学参考书,并可供有关工程技术人员参考。

本书大部分内容曾在清华大学和某些企业部门讲授多次,并受到欢迎;但限于作者水平,在内容和体系上仍会有许多不足之处,一些观点也许尚待斟酌,希读者不吝指正。

作 者

于清华大学机械工程系

1989年12月

本书常用代号

SMAW——手弧焊；
SAW——埋弧焊；
MIG——熔化极氩弧焊；
TIG——钨极氩弧焊；
GMAW——熔化极气体保护焊；
GTAW——钨极气体保护焊；
ESW——电渣焊；
EB——电子束焊；
FCAW——药芯焊丝电弧焊；
BM——母材；
WM——焊缝；
HAZ——热影响区；
WI——焊缝边界(熔合线)；
 E ——焊接线能量；
 T_0 ——预热温度；
 T_p ——峰值加热温度；
 $t_{8/5}$ —— $800^{\circ}\text{C} \rightarrow 500^{\circ}\text{C}$ 的冷却时间；
 ω_c ——冷却速度；
 η ——热效率；粘度；
 I ——焊接电流；
 U ——电弧电压；
 v ——焊接速度；
 h ——板厚；

λ ——导热系数;
 c ——比热容;
 ρ ——密度;
 κ ——电导率;
 μ ——电阻率;合金过渡系数;
 γ ——奥氏体相或 $\gamma\text{-Fe}$;
 α ——二次铁素相或 $\alpha\text{-Fe}$;线膨胀系数;
 δ ——一次铁素体相或 $\delta\text{-Fe}$;延伸率;
 M_s ——马氏体转变开始温度;
 M_f ——马氏体转变终了温度;
HV——维氏硬度;
HRC——洛氏硬度;
HB——布氏硬度;
 σ_t ——强度极限 (代替惯用 σ_b);
 σ_y ——屈服应力 (代替惯用 σ_s);
 $\sigma_{0.2}$ ——名义屈服应力;
 δ_5 ——延伸率(标距与直径之比为 5);
 φ ——断面收缩率;
 vE ——V 形缺口冲击值(夏氏冲击);
 vE_T ——在温度 T 时的 V 形缺口冲击值;
 a_K ——U 形缺冲击值(梅氏冲击);
 a_{KT} ——在温度 T 时的 U 形缺口冲击值;
 vTr ——V 形缺口冲击试验时的脆性转变温度;
 vTr_{15} ——以 15ft-lb 为判据的脆性转变温度;
 vTr_s ——50%纤维断口的脆性转变温度;
 σ ——应力;
 ε ——应变;
 σ_{cr} ——临界应力;

σ_f ——断裂应力；
 H_0 ——扩散氢含量(焊缝刚凝固结束)；
 H_R ——残留扩散氢含量(焊缝冷却一定时间之后)；
 K_0 ——溶质分布系数；
 K_e ——溶质偏析度；
 K_c ——药皮重量系数；
 d ——直径；
 t ——时间；
 l ——距离；
 D ——熔合比；
 D_0 ——扩散系数；
 C_R ——裂纹率；
 L_c ——裂纹长度。

目 录

绪论	1
第一节 焊接接头的形成	1
一、焊接的实质	1
二、焊接接头的特征	2
第二节 金属的焊接性	4
一、焊接冶金问题的提出	4
二、金属焊接性的意义	8
小结	9
参考文献	9
第一章 焊接传热	10
第一节 焊接温度场	10
一、焊接时的热作用特点	10
二、热传导基础方程	11
三、焊接温度场表达式	13
四、温度场的综合图	21
五、影响温度场的因素	23
第二节 焊接热循环	26
一、焊接热循环的意义	26
二、焊接热循环的特征参数	27
三、临界板厚的意义	31
四、影响因素	33
五、多道焊的焊接热循环	37
六、热计算示例	40
小结	50
习题	51

参考文献	52
第二章 焊接材料	53
第一节 焊接材料的类型及功用	53
一、焊接材料的类型	53
二、焊接材料的组成特点	54
三、焊接材料的作用	62
第二节 焊接熔渣	64
一、焊接熔渣的构成	64
二、焊接熔渣碱度	68
三、焊接熔渣形成过程	71
四、焊接熔渣的化学性质	76
五、焊接熔渣的物理性质	93
第三节 焊接冶金反应特性	113
一、焊接冶金反应区特点	114
二、热力学判据的应用	121
三、焊接冶金反应过程	126
四、焊缝化学成分控制问题	165
第四节 焊接材料基本特性	174
一、结构钢焊条	174
二、高合金钢焊条	215
三、铸铁焊条	233
四、堆焊焊条	236
五、药芯焊丝	241
六、焊丝与保护介质的组合	247
小结	253
习题	256
参考文献	258
第三章 焊缝及熔合区性能	261
第一节 焊缝金属的组成	261
一、熔合比的意义	261
二、渣熔率的影响	265

第二节	焊缝金属的凝固	268
	一、焊接熔池特征	268
	二、焊缝凝固特点	269
	三、焊缝的凝固结构形态	276
	四、焊缝的凝固偏析	283
第三节	结构钢焊缝金属的强韧性	289
	一、焊缝金属的强化方式	290
	二、焊缝组织形态对韧性的影响	292
	三、焊缝韧性的控制	300
第四节	焊缝强度匹配问题	319
	一、韧性要求值与强度的关系	319
	二、焊缝对母材的适应性	324
第五节	熔合区的特性	329
	一、熔合区的构成与特征	329
	二、凝固过渡层的特性	337
	三、碳迁移过渡层的特征	345
	小结	354
	习题	355
	参考文献	360
第四章	焊接热影响区特性	362
第一节	焊接热影响区形成特征	362
	一、母材金属的类型与特点	362
	二、无重结晶金属的热影响区特征	365
	三、有重结晶金属的热影响区特征	368
第二节	晶粒粗化现象	373
	一、晶粒长大的一般特点	373
	二、沉淀相的影响	377
	三、焊接热循环的影响	384
第三节	硬化倾向	389
	一、钢的过冷奥氏体转变特点	391
	二、母材成分的影响(碳当量问题)	397

	三、焊接工艺的作用($t_{8/5}$ 的影响问题)	402
第四节	软化现象	408
	一、软化的原因	408
	二、软化的控制	412
第五节	脆化问题	415
	一、近缝区脆化原因	416
	二、两相区脆化原因	423
	三、热应变脆化	424
	四、脆化的控制	426
	小结	439
	习题	441
	参考文献	442
第五章	焊接冶金缺欠	443
第一节	概论	443
	一、接头缺欠问题	443
	二、冶金缺欠形成条件	445
第二节	焊接热裂纹	454
	一、焊接热裂纹的特征	454
	二、凝固裂纹的形成	455
	三、液化裂纹的形成	462
	四、高温失塑裂纹的形成	462
	五、多边化裂纹的形成	464
	六、焊缝热裂纹的控制	466
	七、关于热裂纹的小结	495
第三节	焊接冷裂纹	496
	一、焊接冷裂纹的特征	496
	二、影响冷裂纹的基本因素	502
	三、焊接冷裂纹的控制	518
	四、关于焊接冷裂纹的小结	534
第四节	层状撕裂	536
	一、层状撕裂的特征	536

	二、影响层状撕裂的因素	537
	三、层状撕裂的控制	540
	四、关于层状撕裂的小结	545
第五节	再热裂纹	545
	一、再热裂纹的特征	545
	二、再热裂纹的形成条件	548
	三、再热裂纹的控制	556
	四、关于再热裂纹的小结	559
第六节	应力腐蚀开裂	560
	一、应力腐蚀开裂特征	560
	二、应力腐蚀开裂机理	564
	三、应力腐蚀开裂临界应力	568
	四、应力腐蚀开裂的控制	571
	五、关于 SCC 的小结	577
第七节	焊缝气孔	578
	一、气孔形成的原因	578
	二、气孔的控制	582
	习题	586
参考文献		587
附录		592
附录一	焊接裂纹试验方法	592
附录二	焊接生产工艺实例	601
附录三	典型组织与断口照片	610

绪 论

第一节 焊接接头的形成

一、焊接的实质⁽¹⁾

为了达到焊接的目的,大多数焊接方法都需要借助加热或加压,或同时实施加热和加压,以实现原子结合。具有工程意义的外加热源包括:电弧、电子束、光束(激光)、放热反应(氧-燃料气体,铝热剂等)以及电阻等。加热至熔化状态(一般不加压)以实现焊接的方法,通称熔焊。凡必须施加压力(加热或不加热)以实现焊接的方法,通称压焊。常用的电弧焊、电渣焊、气焊、电子束焊等均属熔焊。电阻焊、摩擦焊、超声波焊等均属压焊。

从冶金的角度来看,可将焊接区分为三大类:液相焊接、固相焊接、固-液相焊接。

利用热源加热待焊部位,使之发生熔化,利用液相的相溶而实现原子间结合,即属液相焊接。熔焊属于最典型的液相焊接。除了被连接的母材(同质或异质),还可填加同质或非同质的填充材料,共同构成统一的液相物质。常用的填充材料就是焊条或焊丝。

电阻点焊、缝焊以及螺柱焊,虽也有液相存在,但却必须同时施加一定压力才可实现焊接。因此常归入压焊范畴。

固相焊接属于典型的压焊方法。因为固相焊接时,必须利用压力使待焊部位的表面在固态下直接紧密接触,并使待焊表面的温度升高(但一般低于母材金属熔点),通过调节温度、压力和时间以

充分进行扩散而实现原子间结合。在预定的温度(利用电阻加热、摩擦加热、超声振荡等)紧密接触时,金属内的原子获得能量、增大活动能力,可跨越待焊界面进行扩散,从而形成固相接合。电阻点焊、摩擦焊、超声波焊属典型的固相焊接。

固-液相焊接,与固相焊接不同之处,就是待焊表面并不直接接触,而是通过两者毛细间隙中的中间液相相联系。于是,在待焊的同质或异质固态母材与中间液相之间必存在两个固-液界面,由于固液相间能更充分进行扩散,可实现很好的原子结合。钎焊即属此类方法。形成中间液相的填充材料称为钎料。显然,钎料的熔点必须低于母材的熔点。

二、焊接接头的特征

焊接接头意指整个焊接区,不仅包括结合区,也包括其周围区域。熔焊时,结合区即为熔化区,熔化区凝固后即成为所谓焊缝(以 WM 表示,如图 0-1 之 1,并参见照片 1)。由于局部加热,结合区邻近区域的母材金属势必也会因热传导而受到热的影响,从而可能引起组织或性能的变化。这一受热影响的区域,称为热影响区(常以 HAZ 表示,如图 0-1 之 3)。焊缝与热影响区的交界面为焊缝边界(以 WI 表示,如图 0-1 之 2),实际为具有一定尺寸的过渡区,常称为熔合区。

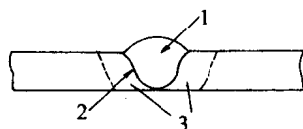


图 0-1 熔焊接头示意

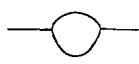
- 1——焊缝 2——熔合区;
3——热影响区

熔焊焊接接头可有多种形式。最常见的典型接头有对接接头、角接或丁字接头、搭接接头等。为使待焊部位满足焊接施工工艺要求以形成优质焊接接头,如为了满足熔透和成形的要求或为了保证焊接电弧

的可达性要求,常需要将待焊部位预加工成一定形状,通称坡口加工。一些典型坡口形式如图 0-2 所示。

由于焊接热源的能量密度特性不同,所形成的熔透区形状特征也就有所不同,如表 0-1 所示,从而对坡口形状的要求也就不会相同,这一点在焊接工艺上必须加以考虑。

表 0-1 焊接热源能量密度与熔透区截面形状⁽²⁾

焊接方法	能量密度/ W/m^2	熔透区截面形状
熔渣保护 电弧焊	$5 \times 10^6 \sim 5 \times 10^8$	
气体保护 电弧焊	$5 \times 10^6 \sim 5 \times 10^8$	正常电流  大电流 
等离子弧焊	$5 \times 10^6 \sim 5 \times 10^{10}$	小电流  大电流 
电子束焊 激光束焊	$10 \times 10^{10} \sim 10 \times 10^{12}$	非聚焦  聚焦 

加工出一定坡口角度进行熔焊时,必须向坡口中填加填充金属(焊条或焊丝)。可以是单道焊,也可以是多道焊或多层焊。此时,焊缝金属是由熔融的母材金属与熔融的填充金属按比例(决定于焊接工艺参数)混合而成。母材在焊缝中所占的比例,一般称为熔

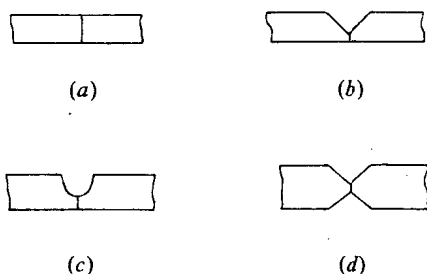


图 0-2 熔焊坡口形式示例

- (a)——I 形坡口 (b)——V 形坡口
(c)——U 形坡口 (d)——X 形坡口

合比。

为得到一定尺寸的焊缝,所必需的熔化金属数量取决于接头的尺寸和形状、焊道数目和焊接方法。从冶金的角度考虑,几乎毫无例外地都希望用最少的能量来实现必要的熔化。热源功率密度越高,就越容易达到这一目的。一般用线能量的概念来衡量热源的热作用。每单位长度焊缝从移动热源(如电弧)输入的能量数量(以 kJ/cm 计)即为线能量。接头尺寸形状不同,所需要的线能量是不同的。

第二节 金属的焊接性

一、焊接冶金问题的提出

冶金厂把矿石原料变成优质金属材料,必须有适当的冶金过程(包括化学冶金与物理冶金),其目的在于清除杂质、合金化以及改善组织,以获得必要的性能。

焊接时,所焊的金属材料在成分、组织和性能上显然已满足了