

焊接电弧现象

(增补版)

〔日〕 安藤弘平 合著
长谷川光雄

机械工业出版社

焊接电弧现象

(增补版)

[日] 安藤 弘 平 合著
长谷川光雄
施雨湘 译
彭日辉 校



机械工业出版社

焊接电弧现象

(增补版)

原书名:《溶接アーク现象》(增补版)

著者:安藤弘平 近畿大学教授・工学博士

长谷川光雄 大阪变压器(株式会社)董事・工学博士

版本:一九七八年十一月五日第六版

发行者:中岛宏

发行所:鹿嶋(株式会社)

* * *

焊接电弧现象

施雨湘 译

彭日辉 校

*

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)

房山县南召印刷厂印刷

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 $48 \frac{1}{2}$ ・插页14・字数1108千字

1985年10月北京第一版・1985年10月北京第一次印刷

印数 0,001—3,305・定价 11.70元

*

统一书号: 15033・5842

卷首插图说明

图1~4表示TIG电弧焊接时母材表面的净化作用。母材作阴极,阴极斑点容易产生于有氧化膜的地方,一旦产生,该处氧化膜便被电弧破坏而露出新鲜的全金属表面。在图3(b)等图中可以清晰地看到阴极斑点,在图2中表示的是电弧下母材表面无氧化膜的燃弧状态。参照文中P.212~215。

图6表示在低气压下喷出的等离子流,其流速超过音速,故在电弧焰中可以看到菱形焰心。

图7是在相互垂直配置的粗直径(阳极)和细直径(阴极)碳电极之间燃烧的碳极电弧,其黑白照片参照卷末PL.20。

图8、9是MIG焊和药皮焊条手工焊的电弧快速摄影照片。其高速摄影照片的数例参照卷末PL.17和PL.4~15。

图10是MIG交流电弧的高速照片。其中1~33幅是焊丝为阳极(R.P.)的半周,其余是焊丝为阴极(S.P.)的半周。使用交流电流是为了观察极性对熔滴脱离焊丝端部现象所带来的差异,从照片可以看到,熔滴是在反极性半周脱离焊丝的。参照P.390~422。PL.17的照片No.85也给出了与图10类似的现象。

图11是TIG交流电弧的高速照片。电弧的粗细形状是随电流瞬时值变化的,在正极性(S.P.)半周可以看到熔化的电极顶端有变尖的倾向。参照图4.2.14。

图12是低气压下在铜母材上燃烧的TIG电弧照片。从照片可以看到,在钨电极(阴极)端部周围存在着一个球状的高亮度区。本书将它称为阴极焰。照片中电弧的弧长 $L=15\text{mm}$,若缩短弧长,阴极焰接触到母材,就会加速母材的熔化。由此又可以反推出阴极焰达到了高温。

若升高气体压力,阴极焰尺寸变小,而在大电流的条件下,由于等离子流的产生,阴极焰向下伸长变成细长状的鸡蛋形。参照P.159关于图3.1.35的叙述。

译者的话

本书根据安藤弘平和长谷川光雄合著的“溶接电弧现象”(一九七八年第六版)一书译出。原书初版于一九六二年,历经多次增补和重印,在日本和国际焊接界是一本有一定影响的专著。

全书共分九章。第一章叙述了为理解电弧物理现象所必需的气体温度,电离、电子发射以及带电粒子的运动等基础知识。第二章叙述了火花放电、辉光放电以及电弧放电的弧柱、阳极和阴极现象。第三章叙述了电弧特性和交流电弧的稳定性等。第四章叙述了一些比较简单的电弧现象,如惰性气体保护焊的阴极净化作用、电弧的磁偏吹、收缩效应和等离子流等,另外还叙述了钨电极特性,为第二章的某些内容作了一些补充。以上四章,并不局限于焊接,叙述的是一般电弧物理现象,因此也可供电气工程、等离子体工程等方面的有关人员参考。

第五章叙述了一些比较复杂的焊接电弧现象,如短路现象、电弧(机械)力、飞溅以及弧坑的形成等。第六章叙述了手工电弧焊的熔滴过渡现象,介绍了焊接电弧的高速摄影方法。第七章叙述了MIG焊(熔化极惰性气体保护电弧焊)、CO₂电弧焊和埋弧焊等自动焊的熔滴过渡现象,介绍了熔滴喷射机构以及低气压或高气压下的电弧现象。第八章叙述了电极和母材的熔化现象,介绍了电极熔化速度、电弧自调节特性,熔滴温度、熔池温度、熔深以及电弧热效率等重要问题。第九章叙述了弧焊电源以及其它一些与电弧现象有关的问题。

本书不仅系统地叙述了著者长期从事电弧物理研究的成果,而且广为介绍了世界上其它研究人员在这方面所进行的创造性工作。由于电弧现象本身比较复杂,影响因素很多,对一些参数的实验测定又比较困难,因此存在的问题不少,而且对某些问题的看法也不一致。本书特点则不是简单地罗列诸家观点,而是直述了著者自己的看法,阐明问题所在及今后的研究方向,供读者思考,以利于进一步探索。

另外,原书将陆续增补的内容全部编排在书末,翻译时已全部归入正文,但增补文献索引仍保留在书末,若在正文中出现则以“*”号标出。

在翻译过程中得到北京钢铁研究总院等单位许多同志的大力支持和帮助,校对、审改和责任编辑更化费不少精力作了详尽的校订加工,在此谨向他(她)们致以深切的谢意。

限于译者水平,错误难免,问题不少,敬希读者给以指正。

一九八二年九月译者

序

本书主要从物理学角度叙述焊接电弧所发生的各种现象。全书共分9章,其中1~4章并不局限于焊接,叙述的是一般电弧物理,故也可以供对电工学、等离子工程学等比较关心的读者参考。

不言而喻,研究电弧焊,无论从冶金学还是从结构力学方面进行研究,在焊接工程学上都是重要的,但是这些工程方面的研究有不少问题都依赖于对焊接电弧所发生的基本现象的明确认识和正确理解。例如弧柱温度高达数千到数万度(K),作为氩弧气体的双原子气体将分解成原子,电极端部的熔化金属正是在这样的气氛中向母材过渡的;又比如软钢的MIG焊(氩弧气体为氩气),有时候熔滴金属达到2600°C左右接近蒸发温度的高温等等。以上列举的以及未加列举的大量实验事实都是对熔敷金属进行冶金学研究所不能忽视的问题。此外,母材熔深也是现场技术人员十分关心的重要问题,但是用电弧为点热源或平面热源所进行的热传导理论分析却不能说明MIG焊所出现的特殊的熔深形状,而只有在了解到电极金属以小颗粒状脱离电极端部,通过弧柱时受到加速,最后以高速撞入熔池的过程之后,才能够作出较好的说明。

本书第一章叙述的基础知识是为了使读者能够更好地理解气体温度、电离、电极表面的电子发射、带电粒子在气体中的运动等电弧物理现象;第二章叙述电弧放电的弧柱、阳极和阴极现象;第三章叙述电弧特性以及交流电弧的稳定性等。

第四章叙述了电弧现象中比较简明的现象,介绍了惰性气体中的阴极净化作用,电弧磁偏吹,收缩效应和等离子流等问题。另外,还对第二章作了某些补充,介绍了钨电极作冷阴极或热阴极时的电极特性。

第五章叙述了一些受电极材料影响的比较复杂的电弧现象,如焊接电弧的短路现象,电弧力,飞溅以及弧坑的形成等。

第六章和第七章叙述了电极金属向母材过渡的熔滴过渡现象。其中第六章是针对药皮焊条的手工电弧焊,第七章是针对用焊丝的自动焊的熔滴过渡现象。第八章叙述了电极的熔化速度和母材的熔化,以及热效率等问题,第九章叙述了弧焊电源及其它一些问题。

大气中的电弧现象往往伴随着超高温的问题,很难通过实际测定来进行研究。尤其是焊接电弧现象,影响因素多而且现象本身也比较复杂。因此,尽管国内外研究人员已经发表了许多有关焊接电弧的研究文献,但其中不少问题,由于后来所发现的新的实验事实而动摇了它们原有的理论依据,也有一些论点不到几年就被推翻。总之尚存许多不明之点,这正是目前研究焊接电弧的现状。何况在焊接界从事研究的人员的专业繁多,有时对电弧现象甚至会发表一些完全意想不到的论点。

本书汇集了国内外研究人员和著者本人在电弧现象方面取得的成果,也包括一些著者研究室最近新发现的尚未在“焊接学会志”上公开发表的一部分内容。另外本书对其他研究人员的论点不是简单地加以罗列介绍,而是同时陈述了著者的观点和见解,这正

是本书的特点。但书中也许存在着因考虑不够成熟而作出的一些主观武断的错误。著者之所以敢于强调独自の见解，目的不是为了独出心裁地著书立说，而完全是想向读者提出问题，以明确今后的研究方向。

本书图表照片的制备和校正等工作多数是由大阪大学的山本、西口和西川先生以及大阪变压器（株式会社）的大桥和松冈先生完成的。本书执笔之初，承蒙冈田教授勉励。本书的出版承蒙“電元社製作所”董事中村孝先生的特别关照。借此机会向以上诸位先生深表谢意。

一九六二年七月 著者

(a) 引弧后 1 秒



(b) 引弧后 5 秒



(c) 引弧后 15 秒



(d) 引弧后 60 秒



图 1 TIG 电弧焊铝时的净化作用(D.C.R.P. 100 A, W 电极直径 $\phi 6.4$ mm)

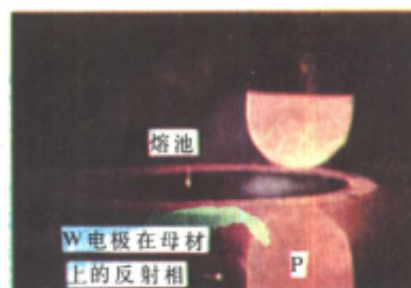


图 2 稳定状态的 TIG 电弧
D.C.R.P. 100A

(a)



(b)



图 3 软钢母材上阴极斑点的形成
(a) 轧制状态, (b) 经打磨
(D.C.R.P. 100A)



图 4 直流正极性 TIG 电弧

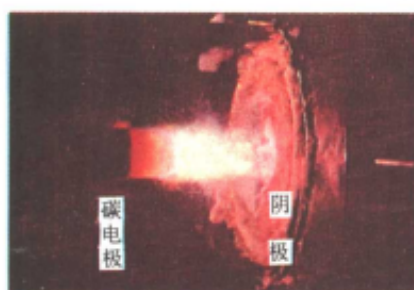


图5 大气中的等离子流80A，
氩气流量45l/min

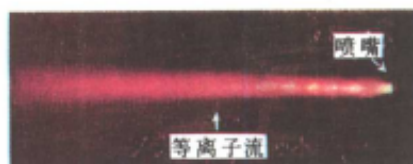
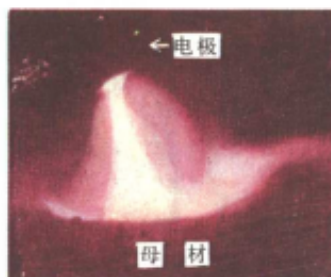


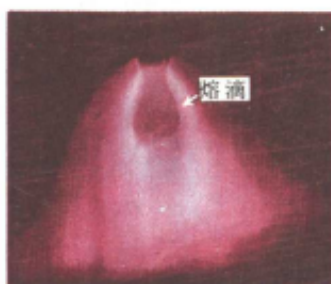
图6 低气压下的等离子流200A，
容器内压力6.5mmHg



(a)
D.C.R.P. 220A
φ1.2mm, 软钢

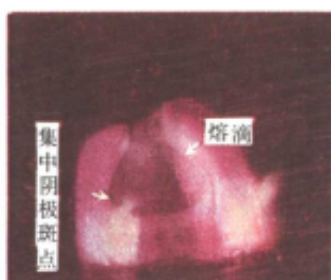
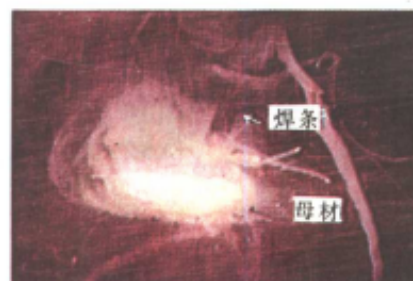


图7 碳极电弧(90A)



(b)
D.C.S.P. 230A
φ2.4mm, 铝

(a)



(c)
D.C.S.P. 300A
φ2.4mm, 不锈钢

(b)



图8 MIG 电弧

图9 药皮焊条手工焊电弧
D.C.R.P. 100A, φ2.3mm 焊条

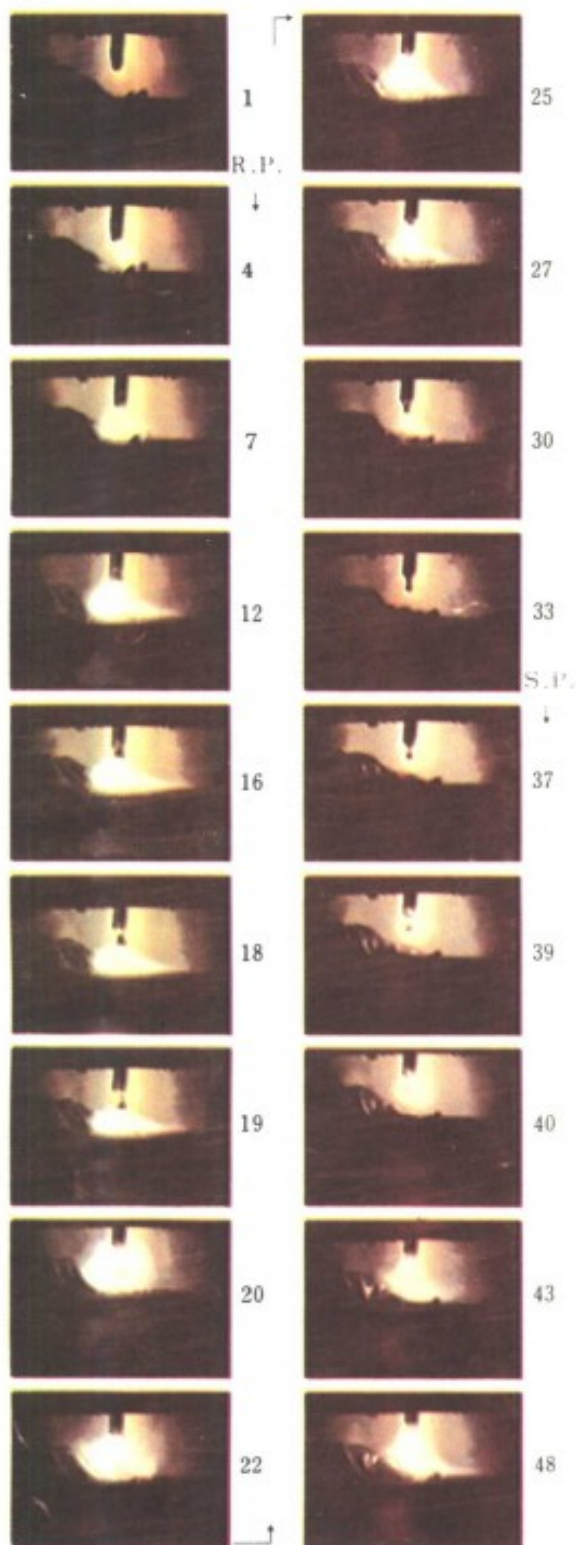


图10 MIG 电弧 (A.C.)
铝电极 $\phi 2.4 \text{ mm}$
48 V 300 A, 3800 幅/秒

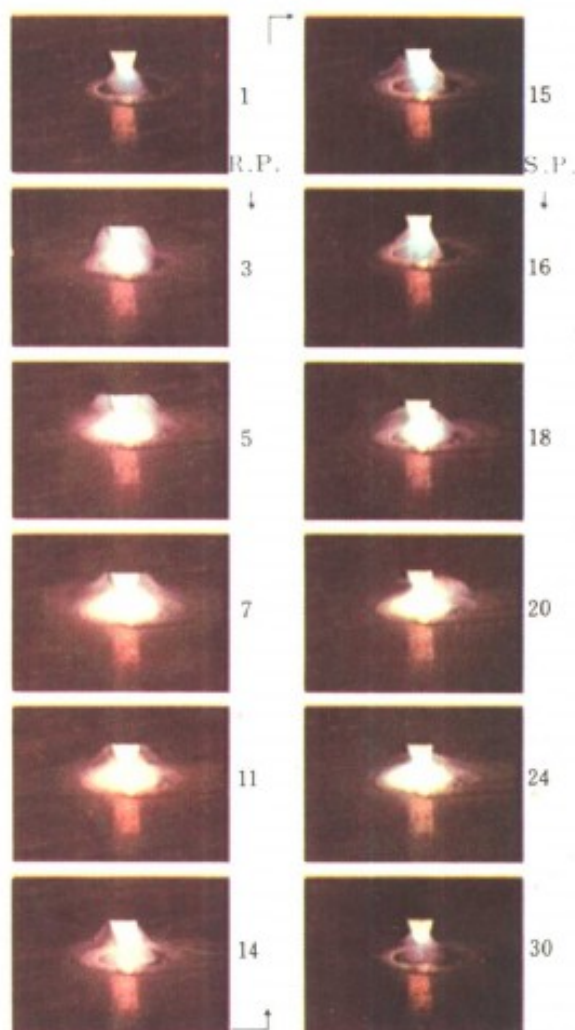


图11 TIG 电弧 (A.C.)
铝母板, 300 A, 电极
 $\phi 4.8 \text{ mm}$, 1800 幅/秒



图12 低压气体中的TIG 电弧 (D.C.S.P.)
P=32mmHg, 水冷铜板, 电极 $\phi 4 \text{ mm}$
弧长15mm, 200 A, 采用滤色镜

目 录

第一章 电离和电子发射等

基础知识	1
第1.1节 气体粒子的运动——温度	1
1.1.1 气体粒子动能和温度的关系	1
1.1.2 麦克斯韦速度分布律	4
1.1.3 单位时间通过单位 面积的粒子数	8
1.1.4 波耳兹曼关系	9
1.1.5 平均自由程	11
1.1.6 自由程的分布	14
1.1.7 扩散	15
1.1.8 气体粒子的碰撞—— 能量交换	17
第1.2节 电离	19
1.2.1 原子壳层	19
1.2.2 电离电位, 激发电位	21
1.2.3 辐射——发光	23
1.2.4 电离的种类	25
1.2.5 热电离, 热分解	27
1.2.6 热电离的沙哈公式	29
1.2.7 阴离子的形成	31
第1.3节 电子发射	32
1.3.1 电子发射——功函数	32
1.3.2 热电子发射	34
1.3.3 复合电极的热电子发射—— 钍钨阴极和氧化物涂层阴极	37
1.3.4 肖脱基效应和自发射	39
1.3.5 其它电子发射	40
1.3.6 接触电位差	41
第1.4节 带电粒子的运动	43
1.4.1 电子在真空中的运动	43
1.4.2 带电粒子在气体中的运动—— 电子温度和中性气体温度	46
1.4.3 迁移率	47
1.4.4 电子温度和气体温度	49
1.4.5 带电粒子的扩散	51
1.4.6 复合	52

第二章 电弧物理

第2.1节 电弧概论	55
2.1.1 电弧	55
2.1.2 弧柱 (电弧等离子体)	56
2.1.3 阳极	57
2.1.4 阴极	59
2.1.5 电弧的各种形态	60
第2.2节 火花放电、辉光放电	62
2.2.1 自持放电	62
2.2.2 火花放电	65
2.2.3 空间电荷的影响	67
2.2.4 辉光放电	68
2.2.5 辉光放电的伏安特性	70
2.2.6 辉光放电的正柱	72
2.2.7 辉光放电向电弧放电的过渡	73
第2.3节 电弧弧柱现象	74
2.3.1 弧柱中的电子流和离子流	75
2.3.2 弧柱热量的输入和耗散	76
2.3.3 弧柱的电流密度	79
2.3.4 弧柱温度	79
2.3.5 弧柱的温度分布	81
2.3.6 气体电弧和蒸气电弧	84
2.3.7 焊接电弧的温度	85
2.3.8 弧柱的电导率和导热率	86
2.3.9 弧柱径向温度分布的考察	88
2.3.10 大电流高温弧柱的特性	90
2.3.11 弧柱径向电场—— 弧柱的扩展	92
2.3.12 最小电压原理	93
2.3.13 铝 MIG 焊的弧柱温度	94
2.3.14 弧柱的输入能量——关于TIG 焊喷嘴气流的探讨	95
第2.4节 探极法	98
2.4.1 探极法原理	98
2.4.2 探极法在大气电弧中的应用	99
第2.5节 阳极现象	101
2.5.1 阳极压降区——场致电离和热	

电离	101	3.1.1 电弧静(伏安)特性	141
2.5.2 阳极压降 V_A	103	3.1.2 大气中铁极电弧的特性曲线	144
2.5.3 以 TIG 电弧伏安特性研究 V_A	105	3.1.3 TIG 焊的电弧特性(之一)	147
2.5.4 阳极斑点及其电流密度	106	3.1.4 惰性气体中 W-W 电极的 电弧特性	150
2.5.5 阳极输入功率	107	3.1.5 惰性气体中熔化电极的电弧 特性——MIG 焊接电弧	152
2.5.6 阳极温度——阳极的 熔化和蒸发	108	3.1.6 W-W 极电弧特性的戈德曼 研究报告	154
2.5.7 阳极斑点的不连续移动	109	3.1.7 阳极材料对电弧特性的影响	157
2.5.8 碳极电弧阳极斑点的收缩 和噓声弧的产生	113	3.1.8 TIG 焊的电弧特性(之二)	158
2.5.9 有芯碳极电弧(贝克电弧) ——阳极焰	113	3.1.9 低气压 TIG 电弧的特性 (非移动电弧)(包括对阴极 压降的研究)	158
2.5.10 影响阳极压降的因素	114	第 3.2 节 氩弧气体对弧柱电位 梯度的影响	163
2.5.11 按阳极瞬间通电产生的 蒸发量推算的阳极温度	115	3.2.1 氩弧气体的影响	163
第 2.6 节 阴极现象	117	3.2.2 原子氢电弧焊	166
2.6.1 阴极区概论	117	3.2.3 惰性气体中的电弧	166
2.6.2 阴极压降	117	3.2.4 电极材料对弧柱电位 梯度的影响	167
2.6.3 阴极斑点及其电流密度	118	3.2.5 气体压力的影响	167
2.6.4 阴极温度	120	3.2.6 器壁的影响	169
2.6.5 热阴极和冷阴极	120	3.2.7 高速气流中的电弧	170
2.6.6 阴极前电子流与阳离子流的 比率	122	第 3.3 节 电弧特性曲线的研究, 阳极 压降、阴极压降和电弧功率	171
2.6.7 阴极产热——阴极的热平衡	125	3.3.1 小电流区的电弧下降特性	171
2.6.8 焊接电弧阴极能量的平衡	126	3.3.2 大电流区的电弧上升特性	172
2.6.9 热场致发射的电流密度	127	3.3.3 利用等离子流(或药皮 焊条产生的气流)现象分析 电弧电压的上升	174
2.6.10 以交流电弧端电压波形 研究阴极压降	129	3.3.4 电弧电压的分布	175
2.6.11 亮点阴极型电弧和热阴极型 电弧	130	3.3.5 电弧功率——弧柱、阳极和 阴极的产热	177
2.6.12 阴极前的收缩区—— 阳离子流理论	132	3.3.6 交流电弧功率	178
2.6.13 阴极区的热电离现象	134	3.3.7 V_A 和 V_K 值	179
2.6.14 阴极斑点的移动——冷阴极	134	3.3.8 热平衡法求得的 TIG 电弧 V_A 、 V_K 值——兰开斯特实验	181
2.6.15 阴极斑点附近的物理状态	135	3.3.9 TIG 电弧铜母材的吸热 ——等离子流加热和阳极 加热的分离——威尔金森- 米尔纳实验	184
2.6.16 阴极表面的薄层	135	3.3.10 热平衡法求 V_A 和 V_K 值的	
2.6.17 氧对电弧现象的影响	136		
2.6.18 阴极焰及其对阴极压降的 影响	138		
2.6.19 阴极物质的熔化与蒸发	139		
第三章 电弧特性曲线及有关现象	141		
第 3.1 节 电弧静(伏安)特性	141		

其它实例	187	4.4 变截面导体的电磁收缩力	254
3.11 热平衡法和探极法求得 V_K 、 V_A 值的分析比较	186	4.4.5 弧柱中的电磁压力——由 电磁压力形成的熔池凹坑	253
第3.4节 交流电弧	189	4.4.6 焊丝端部熔化金属受到的 作用力	257
3.4.1 交流电弧的电压和电流特性	190	第4.5节 等离子流(阴极焰, 阳极焰) 和电弧挺度	260
3.4.2 交流电弧弧柱温度的变化	194	4.5.1 阴极焰, 阳极焰——等 离子流	260
3.4.3 交流电弧的再引弧现象	196	4.5.2 TIG电弧的等离子流现象	262
3.4.4 交流电弧的稳定性	203	4.5.3 MIG电弧的等离子流现象	264
3.4.5 焊接电弧在熄弧后的导电性	205	4.5.4 电弧挺度	265
3.4.6 电极的非对称配置、极性 效应和整流作用	209	第五章 焊接电弧现象(之二)	268
第四章 焊接电弧现象(之一)	212	第5.1节 瞬间短路现象	268
第4.1节 阴极斑点的净化作用	212	5.1.1 概论	269
4.1.1 阴极斑点的净化作用	212	5.1.2 电弧电压和电流的示 波器波形	269
4.1.2 净化作用范围	214	5.1.3 药皮焊条的短路(细滴型和 大滴型过渡)现象	273
4.1.3 阴极表面的电流分布	214	5.1.4 短路和燃弧的交替现象	275
4.1.4 阴极净化机制的探讨	215	5.1.5 裸焊条的两种短路形态 ——A型和B型短路	277
第4.2节 钨电极特性	216	5.1.6 药皮焊条的短路形态 ——C型短路	281
4.2.1 钨电极作冷阴极时的奇异性 ——TIG焊接电弧的引弧现象	217	5.1.7 交流电弧发生短路时的相位	284
4.2.2 电极的电流容量	221	5.1.8 短路频率和电流值的关系	285
4.2.3 电极的异常消耗	225	第5.2节 短路机构及其钢的特殊性	286
4.2.4 钨电极特性的若干补充	229	5.2.1 短路时的弧长变化——CO 气体的产生	287
第4.3节 电弧的磁偏吹	233	5.2.2 电弧作用下熔融钢中的CO 生成量	288
4.3.1 作用于电弧的电磁力方向	234	5.2.3 电弧作用下钢熔化区运动的 特殊性	288
4.3.2 实际焊接中的磁偏吹方向	236	5.2.4 氩弧气体的影响	293
4.3.3 交流电弧的磁偏吹	239	5.2.5 实验结果分析	294
4.3.4 磁偏吹的控制	239	5.2.6 从短路到再引弧机构的实验 研究(手工电弧焊)	296
4.3.5 电弧的磁场驱动	241	第5.3节 电弧的机械力	299
4.3.6 电弧磁偏吹的回复力	242	5.3.1 手工电弧焊的电弧力测定值	301
4.3.7 原子氢焊的电弧偏吹现象	243	5.3.2 惰性气体保护焊的电弧力 测定值	304
4.3.8 电弧偏吹方向的变化	244	5.3.3 高速摄影照片	305
4.3.9 磁场对焊缝成形的改善	245	5.3.4 电弧力的力源	308
4.3.10 熔池的电磁搅拌	247		
4.3.11 外加纵向磁场形成的 圆锥状电弧	247		
第4.4节 收缩效应(电流所产生 电磁力引起的自收缩效应)	249		
4.4.1 收缩效应(等截面时)	249		
4.4.2 焊条与熔池瞬间短路时液 相桥破裂的原因	251		
4.4.3 熔滴金属脱离焊条的力—— $\frac{1}{2}I^2$ 公式适用性探讨	252		

5.3.5 电弧力的电子力源	308	过渡现象	362
5.3.6 电弧力的电磁力源	311	6.2.8 工业用药皮焊条的 过渡现象	364
5.3.7 有关物质运动的反作用力 ——电弧力源	313	6.2.9 药皮焊条熔滴过渡现象的 补充记述——药芯焊条的熔滴 过渡现象	368
5.3.8 电弧力的短路、再引弧时 局部气体膨胀产生的压力力源	315	6.2.10 X射线照相的实验观察	369
5.3.9 焊接电弧的飘移—— 非稳定电弧	316	第6.3节 仰焊的熔滴过渡现象	369
5.3.10 非稳定电弧	317	6.3.1 高速摄影的实验条件	369
第5.4节 飞溅现象	317	6.3.2 裸焊条的过渡现象	370
5.4.1 气泡逸出引起的飞溅	319	6.3.3 颗粒状过渡及其困难	372
5.4.2 柱状隆起体形成机构	321	6.3.4 接触过渡	373
5.4.3 气体爆炸引起的飞溅	324	6.3.5 电弧电压的跃变现象	374
5.4.4 电弧力引起的飞溅	326	第6.4节 关于手工电弧焊熔滴过渡的 其它观点	376
5.4.5 再引弧时生发的飞溅	326	6.4.1 焊条金属以熔化状态为 主的过渡	376
5.4.6 裸焊条的飞溅现象	328	6.4.2 短路过渡	377
5.4.7 MIG焊和CO ₂ 电弧焊的 飞溅现象	330	6.4.3 颗粒状过渡	379
第5.5节 弧坑	331	6.4.4 希尔珀特的高速摄影照片	381
5.5.1 熔池凹坑(弧坑)生成机构	331	6.4.5 过渡现象与收缩效应 (手工电弧焊)	383
5.5.2 电弧挖掘作用	333	6.4.6 实现过渡的原因	384
5.5.3 焊道终端弧坑	334	6.4.7 关于药皮焊条熔滴过渡 现象的石崎报告	386
5.5.4 多恩实验	335	第七章 自动焊的熔滴过渡现象	390
5.5.5 著者的实验	337	第7.1节 MIG焊的熔滴过渡现象	390
5.5.6 焊道终端弧坑生成机构分析	337	7.1.1 焊丝端部熔化金属过渡 形态概述	390
5.5.7 软钢螺柱电弧焊——抑制 CO气体的产生	339	7.1.2 MIG电弧的高速摄影 观察(之一)	391
第六章 手工电弧焊的熔滴 过渡现象	341	7.1.3 颗粒状过渡的临界电流值和 颗粒大小——滴状过渡, 喷射 过渡和短路过渡	394
第6.1节 焊接电弧的高速摄影法	341	7.1.4 临界电流值的影响因素	397
6.1.1 高速摄影的历史	341	7.1.5 MIG电弧的高速摄影 观察(之二)	399
6.1.2 焊接电弧照片的观察要点	343	7.1.6 氧的影响——阴极活化	404
6.1.3 高速摄影装置一例	345	7.1.7 脉冲电流控制的喷射过渡	406
第6.2节 平焊的熔滴过渡现象	348	7.1.8 不同电极材料时的过渡现象	408
6.2.1 高速摄影实验的条件	349	7.1.9 不同氛围气体中的过渡特性	409
6.2.2 渣保护型药皮焊条	351	7.1.10 不同气体压力下的 电弧现象	410
6.2.3 有机物药皮焊条	354		
6.2.4 气保护型药皮焊条	358		
6.2.5 渣保护明弧型药皮焊条和 薄药皮焊条	359		
6.2.6 软钢裸焊条在正常电流下 的过渡现象	360		
6.2.7 软钢裸焊条在大电流下的			

7.1.11 MIG 电弧现象的补充	411	研究报告	468
7.1.12 焊丝和碳电极间电弧的熔 滴过渡现象	413	第八章 电极和母材的熔化	473
第7.2节 熔滴喷射机构	415	第8.1节 焊条药皮和电弧电压的关系	473
7.2.1 熔滴过渡速度的观测 资料	416	8.1.1 焊条药皮和电弧电压	473
7.2.2 熔滴在电弧空间飞行时 所受的力	420	8.1.2 药皮电离电位和电弧电压的 关系	474
7.2.3 熔滴脱离焊丝端部的 一般性分析	422	8.1.3 焊条极性和电弧电压的 关系——第一类和第二类药皮 成分	475
7.2.4 表面张力和重力作用时的 焊丝端部熔滴形态	426	8.1.4 多种成分药皮和电弧电压的 关系	476
7.2.5 格林对过渡系数的研究	428	8.1.5 药皮厚度和电弧电压的 关系	477
7.2.6 等离子流的脱离作用	432	8.1.6 焊芯和电弧电压的关系	478
7.2.7 促进颗粒化的因素	433	第8.2节 焊条的熔化速度	478
7.2.8 阴极活化现象的研究 (CO ₂ 气体)	434	8.2.1 概论——决定熔化速度的 因素	478
7.2.9 兰开斯特对铝焊丝喷射 机构的研究——熔滴顶端达到 沸点温度就发生喷射过渡的 机构	436	8.2.2 弧长、电弧电流和焊条熔化 速度的关系——熔化系数	479
7.2.10 对喷射过渡焊丝端部 形状的考察——热传导、电阻率、 焊丝伸出长度和氛围气体的 影响——喷射机构和熔滴温度	438	8.2.3 熔化速度和弧长、电弧电流 之间关系的研究	483
7.2.11 熔滴脱离机构的补充 和修正	440	8.2.4 电阻热对熔化速度的影响—— 含有机物药皮焊条的过热现象	484
第7.3节 CO ₂ 电弧焊和埋弧焊的熔滴 过渡现象	444	8.2.5 药皮成分和熔化速度的 关系(之一)	488
7.3.1 大电流 CO ₂ 电弧焊的熔滴 过渡现象	444	8.2.6 药皮成分和熔化速度的 关系(之二)	489
7.3.2 关于焊丝端部偏心熔化和 熔滴偏斜现象的分析	448	8.2.7 药皮厚度对熔化速度的影响	492
7.3.3 短路过渡现象	449	8.2.8 裸焊条的熔化速度	493
7.3.4 短路过渡的电源条件和 过渡现象——回路电感的影响	452	8.2.9 焊芯对药皮焊条熔化 速度的影响	495
7.3.5 CO ₂ 电弧焊的飞溅现象	454	8.2.10 熔化速度的波动	495
7.3.6 CO ₂ 电弧焊的焊接规范 (7.3.9小节作了一些补充)	459	8.2.11 在高电流密度下熔化系数 的增大现象	495
7.3.7 埋弧焊的电弧现象——序论	461	8.2.12 交流电弧的焊条熔化速度	497
7.3.8 埋弧焊的电弧现象—— 详细讨论	465	8.2.13 药皮套筒的长度	497
7.3.9 关于CO ₂ 电弧焊的史密斯 研究报告	468	第8.3节 按焊条熔化能推算 V_K 、 V_A 值	498
		8.3.1 小电流裸焊条熔化速度	498
		8.3.2 氧对裸焊条熔化速度的影响	500
		8.3.3 氛围气体对裸焊条熔化 速度的影响	501
		8.3.4 裸焊条熔化金属的蒸发量	502

8.3.5 熔化等效电压——($V_K + V_A$)值的推算	504
8.3.6 阴极压降 V_K 和阳极压降 V_A 的推算	506
8.3.7 药皮焊条的 V_K 和 V_A 值	509
8.3.8 V_K 和 V_A 值推算中存在的问题	509
8.3.9 对 V_A 的分析考察	511
8.3.10 药皮熔化能——铁粉型焊条的熔化系数	512
8.3.11 由熔化速度看药皮焊条的发展	513
8.3.12 熔滴温度	513
第8.4节 MIG焊的焊丝熔化速度	514
8.4.1 电弧热作用下的焊丝端部温度分布	514
8.4.2 电阻热引起的焊丝温升	516
8.4.3 电阻热引起的熔化速度的增大	519
8.4.4 焊丝伸出长度和熔化速度的关系	521
8.4.5 MIG焊铝焊丝的熔化速度	526
8.4.6 MIG焊铜焊丝的熔化速度	528
8.4.7 熔化系数	530
8.4.8 低压气体中铝焊丝的熔化速度	531
8.4.9 焊丝端部温度分布的补充说明	532
第8.5节 按MIG焊焊丝熔化速度考察电弧现象	534
8.5.1 熔滴热含量的测定	534
8.5.2 熔滴温度	536
8.5.3 决定熔滴温度要素的基本概念	537
8.5.4 阳极压降 V_A 的理论分析	538
8.5.5 正极性时熔滴温度和 V_K 值的推算	540
8.5.6 铝熔滴温度和 V_A 值的推算	540
8.5.7 弧长自调节作用	542
8.5.8 弧长固有自调节作用	544
8.5.9 氛围气体和表面状态对熔化速度的影响	551
8.5.10 测定熔滴热含量的补充实验	553

第8.6节 CO_2 电弧焊和埋弧焊的焊丝熔化速度	566
8.6.1 CO_2 电弧焊的焊丝熔化速度	566
8.6.2 埋弧焊的焊丝熔化速度	566
8.6.3 带极堆焊的带极熔化速度	562
第8.7节 电弧热效率、熔敷率和母材熔深	564
8.7.1 焊接电弧的热效率(药皮焊条)	564
8.7.2 熔敷热的分布	566
8.7.3 热效率研究文献简介(药皮焊条)	568
8.7.4 埋弧焊和TIG焊的热效率	576
8.7.5 罗森塔尔热效率理论	571
8.7.6 熔化效率	574
8.7.7 熔敷率	573
8.7.8 比熔敷热	578
8.7.9 母材的熔化——熔深	580
8.7.10 母材熔化现象研究文献简介	584
8.7.11 熔池温度	589
8.7.12 低压气体TIG电弧的母材熔深	589
8.7.13 非移动TIG电弧熔池凹坑和熔深的补充说明	593
8.7.14 移动TIG电弧熔池凹坑和熔深的补充说明	597
第8.8节 熔池温度	601
8.8.1 熔池温度——序论	602
8.8.2 由化学冶金反应推算的熔池温度	603
8.8.3 热电偶测定的熔池温度	607
8.8.4 量热器测定的熔池温度	608
8.8.5 用电弧为移动点热源传导理论计算的熔池温度	616
8.8.6 克里斯坦森等对母材熔深(以及其它熔池尺寸)和温度分布的研究	613
8.8.7 韦尔斯假定电弧为移动线热源的热传导理论对薄板熔化宽度的研究	618
8.8.8 熔化效率的补充说明	619

第九章 弧焊电源及其它622

第9.1节 弧焊电源622

9.1.1 直流电源的外特性622

9.1.2 直流弧焊发电机电特性
和电弧稳定性的关系624

9.1.3 整流器型直流电源626

9.1.4 负载变化时的电流、电压和
电功率6279.1.5 电源特性和焊条粘连现象
——电弧激励特性627

9.1.6 交流电源和电弧稳定性628

9.1.7 非对称交流电弧整流作用
产生的直流分量6309.1.8 自动焊直流电源——电源
自调节特性和送丝方式633

9.1.9 短路过渡型电弧的电源635

9.1.10 熔化电极电弧稳定性的
探讨638

9.1.11 手工焊和自动焊的电源特性640

9.1.12 对平特性的探讨——平特性

交流电源641

第9.2节 串联、并联和多相电弧642

9.2.1 串联电弧焊接法642

9.2.2 双丝（或多丝）焊接法643

9.2.3 并联电弧焊接法644

9.2.4 并联电弧的稳定性646

9.2.5 独立电源的多丝焊接法650

9.2.6 斯柯特接线法的焊接电流和
电压652

第9.3节 杂论654

9.3.1 保护气体的研究历史654

9.3.2 引弧方法656

9.3.3 高频引弧以及电弧的稳定性657

9.3.4 拘束电弧切割法659

9.3.5 水下焊接和切割661

卷末照片 PL. 1~20 的说明662

参考文献663

再版增补部分的参考文献680