

289534

基本甜藏

高等学校交流讲义

焊接冶金基础

天津大学焊接教研室編著

只限学校内部使用



中国工业出版社

6
9

高等学校交流讲义



焊接冶金基础

天津大学焊接教研室编著

中国工业出版社

本书是高等学校焊接专业〔焊接原理〕课程的试用教科书。书中较全面而系统地叙述了焊接冶金过程和金属相变过程方面的基本理论问题；引用了国内外熔化焊接理论方面的最新研究成果和生产经验。

本书不仅可作为高等学校学生的教科书，亦可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

焊 接 冶 金 基 础

天津大学焊接教研室编著

*

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

机工印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $17 \frac{5}{8}$ · 插页 1 · 字数 396,000

1961年9月北京第一版·1961年9月北京第一次印刷

印数 00,001—02,437 · 定价（10—6）2.10 元

统一书号：15165·888（—Ⅲ—200）

前 言

我国社会主义建設以空前的速度向前发展，焊接事业也得到了飞快的跃进。特别是一九五八年大跃进以来，焊接方面不論是理論研究、各种先进工艺和先进設備，以及教育工作，在党的正确方針指导下，都取得了巨大的成就。为使我国的焊接事业的技术水平和理論水平不断提高，就必须充分了解焊接过程中各个方面的基本理論問題。

焊接冶金基础是从事焊接工作的同志一門必不可少的基础知識，是焊接专业教学中一門重要的課程。过去这方面的书籍不多，远远满足不了国内焊接工作同志的迫切需要，特别是給教学工作也带来了不少困难。因此，在全国焊接专业教材編审會議上，确定了焊接冶金基础一书的編写任务。我們深知这一任务是艰巨的，但又十分重要，因而我們大胆地担任了本教材的編写工作。

本书是在天津大学焊接原理讲义的基础上，根据哈尔滨工业大学一九五九年制訂的焊接原理指导性教学大綱（草案）編写的，本书内容是收集了国内外熔化焊接理論方面的最新研究成果和生产經驗，比較全面地討論焊接过程中一系列的基本理論問題，如焊接冶金过程、焊条焊剂的配制原則，电渣焊和碳酸气下焊接时的冶金反应特点，焊接与钎焊过程的本质和金屬可焊性，焊缝金屬的結晶过程，焊缝中化学成分分布的不均匀性，以及焊缝中的气孔問題和焊接时的裂縫問題等。此外，根据最新科学成就还在有关章节中介绍了放射性同位素在焊接冶金和焊接金屬学上的应用。

本书中第四章全部、第六章中的第五节和第七章中的第三节是由清华大学陈伯鑫同志編写的，其余各章是由天津大学張文鉞同志編写的，其中焊条、焊剂两章和第五章第三节是分別参照清华大学和西安交通大学焊接原理讲义編写的。

在編写过程中得到哈尔滨工业大学陈定华同志的宝贵意見，并与哈尔滨工业大学、清华大学、西安交通大学、大連工学院、山东工学院等有关同志一起討論和制定了編写大綱，还提供了若干資料。在整理稿件过程中由天津大学焊接實驗室有关同志参加了大量的抄写和描图工作。以上这些都是編写工作能够顺利完成的重要因素。

焊接冶金基础是一門很年輕的科学，而焊接过程中的各种变化又极其复杂，牽涉到冶金、化学、金屬学、物理以及傳热学等方面許多問題，其内容远非某一单位和少数人員所能全面了解和掌握。几年来我們在教学过程中虽然已經积累了一些不完整的資料，但对不少問題仍是了解不够，許多現象和事物的运动規律也还没有提高到理論水平。因此我們深知这部书的内容一定会有不少問題，并且由于我們的理論水平低，缺乏实际工作經驗，缺点和錯誤之处一定不少，希望讀者批評指正。

天津大学 焊接教研室

一九六一年五月

目次

前言	3
绪论	5
一、焊接冶金基础(或焊接原理)的内容及其任务	5
二、学习焊接冶金基础的方法	6
三、焊接分类	6
第一編 焊接冶金学	
第一章 焊接冶金过程的特点	14
一、焊接冶金的特殊性[1, 2, 4, 5]	14
二、焊条金属的熔滴过渡	17
三、焊接熔池形成的过程	18
第二章 熔化金属与气相间的相互作用	21
一、焊接过程中的气体及其来源	21
二、电弧中几种主要气体的物理化学反应过程	22
三、金属的氧化及其影响	26
四、焊缝金属的氮化及其影响	29
五、氢对焊缝金属的作用	33
六、焊接过程中金属元素的蒸发	36
第三章 熔化金属、熔渣与气体间的相互作用	40
一、概述	40
二、焊接时熔渣的物理性能及其对焊缝的影响	43
三、焊接时熔渣的化学性能及其对焊缝的影响	55
四、焊接熔渣的断面情况	85
第四章 焊缝金属的熔合金	86
一、焊缝金属熔合金之目的及方式	86
二、常用合金剂的特性	89
三、合金过渡系数的意义	92
四、影响合金过渡系数的因素及提高合金过渡系数的方向	95
第五章 几种主要焊接方法的冶金特点	97
一、薄皮焊条熔化焊接时的冶金反应(包括光焊条)	97
二、有气体保护熔化焊接时的冶金反应	98
三、焊剂层下自动焊的冶金反应	105
四、电渣焊的冶金过程	118
第六章 厚皮焊条的性能及一般配方	

原则	124
一、概述	124
二、焊丝和药皮原料在焊接过程中的影响	127
三、药皮性能的比較	133
四、焊条药皮的配方及计算	135
五、焊条制造工艺	139
第七章 焊剂的性能及一般配方原则	157
一、焊剂的性能及对焊剂的要求	158
二、焊剂的分类及应用情况	159
三、焊剂制造工艺	167
第二編 焊接金属学	
第八章 焊接与钎焊过程的本质及金属的可焊性	175
一、焊接过程的本质	176
二、钎焊过程的本质	179
三、金属的可焊性及可钎焊性	181
第九章 熔池金属的结晶及焊接接头的金相組織	184
一、熔池金属的一次结晶	185
二、焊缝中化学成分分布的不均匀性(焊缝中的偏析现象)	189
三、利用放射性同位素对焊缝金属结晶构造及化学成分不均匀的研究	191
四、焊缝金属中的夹杂物	195
五、焊缝金属的二次结晶及焊接接头的显微組織	199
六、电渣焊接时的结晶过程	204
第十章 焊缝中的气孔	210
一、焊缝中生成气孔的过程	211
二、影响焊缝中形成气孔的因素	215
三、防止生成气孔的方法	225
第十一章 焊接时的裂纹問題	226
一、概述	226
二、热裂纹产生的原因	228
三、冷裂纹产生的原因	240
四、防止裂纹的措施	247
第十二章 焊接接头性能的改善	248
一、焊接接头的热处理	248
二、多层焊法及坡口表面锤击	252
三、振动结晶	253
附录	260

緒 論

一、焊接冶金基础(或焊接原理)的內容及其任务

焊接原理这門科学在最近的二十年来才形成为一門独立的学科。它是随着解决焊接生产的实际問題而不断丰富起来的。因此,这門科学虽是一門理論学科,但同时又是一門实际的学科。近年来随着焊接工艺的新发展,焊接过程的理論也相应地发展起来。焊接电弧,焊接热过程,焊接冶金,焊接金屬学以及焊接接头强度等方面的理論問題,已逐渐各自形成了独立的体系。

但必須指出,由于近几十年来熔化电极的电弧焊接在生产实际中得到了广泛的应用,因此,对这种焊接方法的有关理論問題就研究的較多。所以,焊接原理的內容亦多偏重于熔化电极的电弧焊。当然,对于气焊、电阻焊、钎焊等方面的理論問題也进行了不少研究,特别是近年来出現了不少新的焊接方法及焊接工艺,如电渣焊、碳酸气下保护焊接、摩擦焊、冷焊、以及超声波焊接和真空电子束焊接等,并且也都作了很多研究工作。不过在这方面还缺乏系統的总结,某些資料还不够完整。有待今后进一步的研究。

另一方面,熔化电极电弧焊的过程中所产生的一系列有关問題,可以作为一般熔化焊接的典型資料。因为其他焊接方法(如气焊,电渣焊,保护气体焊等)所涉及的各种理論問題,都可以参照熔化电极电弧焊所討論的內容进行分析比較。

經驗也証明,这在实际应用上可以得到滿意的結果。但应指出,必須根据具体的条件加以分析。

本书主要將探討以下两方面問題:

1. 焊接冶金問題 包括焊接冶金的特点,金屬、气体及熔渣的相互作用,焊接时的氧化及还原,硫、磷反应, CO_2 保护焊接和电渣焊的冶金反应,以及焊条焊剂等方面的問題。此外,还适当討論放射性同位素在焊接冶金上的应用。

2. 焊接金屬学 包括焊接与钎焊过程的本质,焊接时的一次及二次結晶,焊接过程中产生气孔和裂縫的机构,焊縫中的偏析及夹杂等問題。

內容中本应包括焊接傳热过程的有关問題,但考虑到雷卡林(Н. Н. Рыкалин)所著[焊接热过程計算]一书已全面探討了焊接傳热过程的基本理論,学生可以參閱,为了减少不必要的篇幅,这里只对焊接冶金問題和焊接金屬学問題作系統地討論。

至于有关其他焊接方面的理論問題,如电弧理論,焊接过程中的应力变形及强度理論,以及某些特种工艺的有关理論問題等(真空电子束焊接,等离子焊接,超声波焊接等),因限于篇幅此地就不进行討論了。

由上所述,我們可以清楚地看出:焊接冶金基础是研究各种熔焊工艺中有关焊接冶金和焊接金屬学的普遍規律的一門科学。因此,通过本門課程的学习应掌握熔焊过程的基本理論,为順利地解决和发展各种焊接工艺,焊接材料,以及焊接設備打下必要的基础,它是每个从事焊接工作同志必不可少的基础知識。

二、学习焊接冶金基础的方法

学习焊接冶金基础同其他科学一样，必须要用唯物的观点和辩证的思想方法才能学好，因为焊接原理这门科学是在物理化学、冶金学、金属学，以及数学物理的基础之上发展起来的。而在这些科学的领域中，很久以来就进行着唯物观点与唯心观点学说上的斗争。随着科学的发展，荒谬不稽的唯心观点已渐渐地失去了它们的阵地，然而代之而起的各种与唯心论有着联系的观点，都以暧昧的或不明显的形式混进科学中来。例如十九世纪的「热的死亡论」，十九世纪末二十世纪初的「经验批判论」，以及近几年来「共振论」等都是以一种隐蔽的方式在科学领域中窃取阵地。然而这些唯心学派的陈旧观念，都在辩证唯物论的反驳之下遭到彻底的粉碎。

在本书中所涉及的任何定理、法则，只是不同程度上反映客观存在的真像，而不能操纵客观存在。自然界的一切规律，不断地被人类发现，人类的智慧也逐步深入地了解着大自然的一切秘密，一些理论经常为另一些理论所代替，因为后者总是更正确地反映了客观存在。因此，在焊接冶金基础的研究中，当我们发现一些新的事实与我们已知理论相矛盾的时候，不要以为这些理论已经是绝对的真理，而应当重视这些新的事实。但应当注意，在分析这些新的事实的时候，不是盲目的主观的，而是根据具体的条件寻找事物内部的规律。正如毛主席在实践论中所说的：将丰富的感觉材料加以去粗取精，去伪存真，由此及彼，由表及里的改造制作工夫，造成概念和理论的系统……只有感觉材料十分丰富（不是零碎不全）和合于实际（不是错觉），才能根据这样的材料，得出正确的概念和理论来。

因此，在学习的过程中应当不断地运用毛主席思想，来作指导。

焊接冶金基础的内容往往涉及的因素十分繁多，因此，必须善于在许多可变因素中，找出最主要的关键问题，这样才能正确地得出结论，从而及时地解决生产问题。毛主席在矛盾论中明确地指出：任何过程如果有多数矛盾存在的话，其中必定有一个是主要的，起着领导的、决定的作用，其他则处于次要的和服从的地位。因此，研究任何过程，如果是存在着两个以上的复杂过程的话，就要用全力找出它的主要矛盾，捉住了这个主要矛盾，一切问题就迎刃而解了。

对于焊接过程中所遇到的问题，也同样要集中主要力量去找关键性的矛盾。

三、焊接分类

焊接分类的方法很多，特别是近年来出现了很多新的焊接方法。因此，焊接分类可以根据不同的角度和需要来加以划分。下面仅按熔焊及压焊进行分类，以作参考。至于其他焊接方法的详细分类，将在各工艺课中作细致的讨论。

1 熔 焊

1) 熔化电极手工电弧焊

这是目前应用最广泛的焊接方法，如图1所示。工件1，焊条2，焊钳4及导线5和6构成了一个回路而产生电弧3，即发生焊接过程。电极为金属丝，为提高焊接质量起见，而在金属丝上涂上一层特殊的涂料，这种金属极，我们称之为焊条。所涂的涂料，称

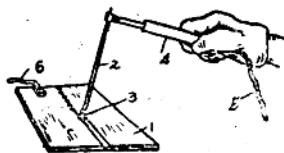
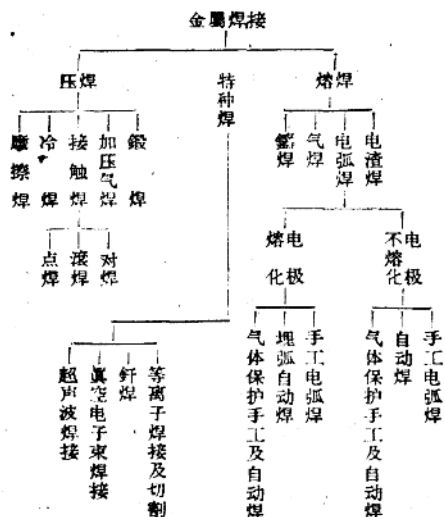


圖1 熔化電極手工電弧焊。

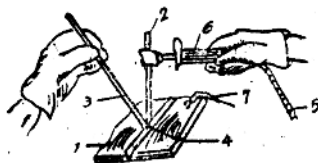


圖2 不熔化電極手工電弧焊。

为焊条药皮。

这种方法的电源可以用直流，亦可用交流。如采用直流电源，焊钳接于阳极时，则称此种接法为反接极。

2) 不熔化电极手工电弧焊

不熔化电极的手工电弧焊主要是指碳弧焊而言，如图2所示1为工件，2为碳极，因碳极不熔化，则必须要有填充金属3经过导线5，焊钳6，碳极2，工件1及接工件之导线7构成一个电的回路，于是即产生电弧发生焊接过程。这种方法的特点是用直流电源而且焊钳是阴极，工件是阳极，称此种接法为正接极。

碳弧焊在目前已很少应用。主要应用于焊接铜、铝及堆焊方面。

3) 埋弧自动焊

这种焊接方法在1940年以后，才逐渐完善起来。它最大的优点提高了生产率和改善了质量。电弧1不是在空气中燃烧，而是在焊剂层下熔渣与液体金属之间的空间中燃烧。金属丝上面并不带药皮，而焊剂4是起着焊条药皮的作用，这一点与手工电弧焊有很大的不同。不但如此，焊丝已经不是很短的一根，而是一卷，自动向焊接地点，连续送进，送进机构是一个马达，经过一套减速装置带动一对传递轮6，而在附近又添设一个导电咀8，相当于手工电弧焊接时的焊钳。由于焊丝上没有药皮，导电咀可随意夹在任何位置。撒放焊剂乃是经过一个漏斗漏在焊接地点。为防止散开，有时用一对板隔住。有的自动焊机并设有焊剂回收装置，把未熔化的焊剂吸回重用。

由于自动焊具有很多的优点，目前苏联已大力发展，特别是最近根据七年规划的要求，在机械化和自动化方面七年中要平均增加250%，我国在最近几年来也发展的很快，目

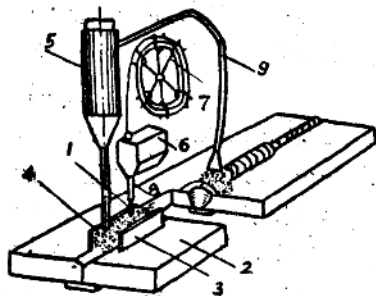


图3 埋弧自动焊示意图：

- 1—在焊剂层下之电弧；2—工件；3—挡板；
4—焊剂；5—焊剂漏斗；6—送丝装置；
7—焊丝盘；8—导电咀；9—焊剂回收装置。

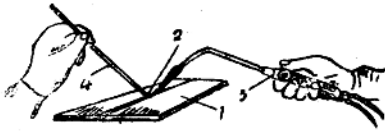


图4 气焊。

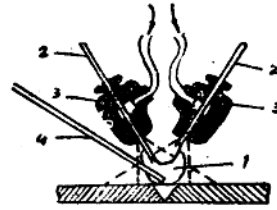


图5 原子氢焊：

1—间接电弧；2—钨极；3—通氢导电嘴；4—填充金属。

前自动焊在起重机，船舶，锅炉的制造中已占有相当的比重。

4) 气焊

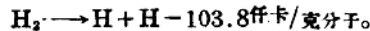
在19世纪的末叶就已经发明了气焊。这种焊接方法虽然在某些方面已被电弧焊所代替，但在薄板的焊接中仍具有它一定的优点。

如图4所示1为焊件，2为焊接火焰，3为焊炬，4为填充金属。在焊炬中通入氧气及某种可燃气体，如乙炔等。这两种气体混合燃烧，即可产生很高温度的火焰。于是焊件被加热至局部熔融状态而被焊接起来。气焊最适于薄件及有色金属及合金。

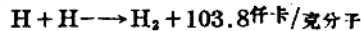
5) 原子氢焊

原子氢焊属于气电联合焊接，这个方法的特点是利用间接作用的电弧，即工件不接入电路，电弧是发生在两个难熔的钨极之间，而且是在原子氢气的保护介质中燃烧的。

原子氢焊的本质是这样，即在通电同时通入氢气，在电弧高温的作用下，分子氢即迅速分解为原子氢：



发生这个反应的同时，要吸收热量。当已经分解了的氢接触到冷工件表面时，则发生相反的反应。



这是放热反应，放出的热量也使工件加热。因此，氢气不仅起着还原保护作用，而且也是一个热的携带者，加速焊缝的形成，提高生产率。

因钨极不熔化，所以必须有填充金属。

原子氢焊适用于薄板的低碳钢及合金钢，但缺点是质量不够可靠，不易于机械化，电弧电压高达50~150伏特，有危险。

6) 氢弧焊

这种焊接方法是用一个钨极，电弧是产生在钨极与工件之间，而且是在氢气(或氮气)中燃烧。

这种焊接方法的优点很多，主要是：焊缝质量高，工件很少发生变形。适用于焊接铝，镁，铜等，也适用于焊接不锈钢及合金钢制的薄板结构及管子，一般多用在航空工业上。目前，原子氢焊在很多地方已经被这种方法所代替了。这种方法主要的缺点是价贵，增加生产成本。

7) CO₂ 保护气体焊接

碳酸气下焊接是近年来在焊接技术方面一项新的成就。在过去认为CO₂不可能用来保

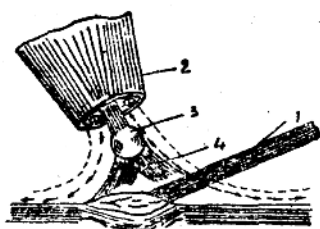
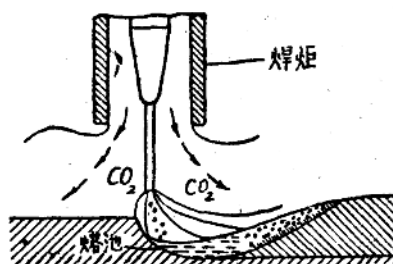


图6 钎弧焊:

1—填加金属; 2—焊炬; 3—钎极;
4—在保护气体中的电弧。

图7 CO₂ 保护气体焊接。

护熔池和熔滴金属, 因为CO₂在高温分解时有氧化作用。但近年来(1950~1954年)世界各国在这方面进行了大量的研究工作, 经过了一系列的探讨和试验之后, 到目前为止已经解决了CO₂保护气体焊接时的主要问题——氧化性强的问题, 从而肯定了CO₂作为保护气体的可能性。这种焊接方法与其他焊接方法比较起来有一系列的优点: a. 降低成本, b. 对锈的敏感性比埋弧自动焊为低; c. 焊接同样厚度的钢板时, 比气焊的生产率高3倍; d. 这种焊接方法的焊接质量还是相当的高。不仅可以焊低碳钢, 同时也可以焊接不锈钢及合金钢。特别是近年来用CO₂与磁性焊剂相配合, 就更进一步提高了焊接质量。

CO₂气体保护焊接时, 电极可以是金属极, 也可以是碳极。目前金属极应用的比较广泛。在现有自动焊机及半自动焊机的条件下, 只要稍加改装即可实现CO₂保护气体的焊接, 如图7所示。

8) 电渣焊

1947年, 涅洛斯凯维奇(Т.З. Волошкевич)同志在E.O. 巴顿院士的指导之下, 发明了一种新型的焊接方法——电渣焊接法。

电渣焊是利用电流通过液态液渣产生的电阻热作为热源, 其过程如图8所示。在两个垂直立放的焊件边缘1及滑块2(挡渣及冷却用)所形成的空间中, 造成一个液体渣池3。

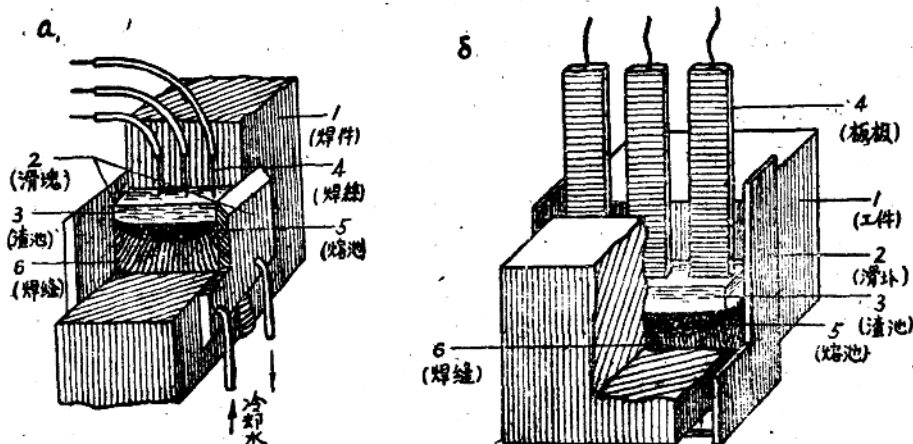


图8 电渣焊示意图:

a—焊丝电渣焊; b—板极电渣焊。

在这个渣池中放入一根或多根金属焊丝4。当电流通过基本金属及焊丝时，便把渣池加热到很高温度。焊丝和基本金属就是靠液态熔渣所指出的热量来熔化。熔化了了的焊丝及基本金属，集聚在渣池的下面而形成金属熔池。金属熔池凝固之后便形成了焊缝。这样就把两块金属联结成一个整体。

这种焊接方法与埋弧自动焊比较可有以下的优点：a. 可焊厚大焊件。单根焊丝的电渣焊接，一次可焊50~200毫米厚的钢板。就目前来讲，这是其他任何焊接方法所不能完成的。至于多根焊丝或板板的电渣焊，在理论上可以焊接无限厚的钢板。6. 电渣焊时，焊剂比埋弧自动焊的消耗要少的多，一般可节省15~20倍。6. 熔化1公斤金属，比埋弧自动焊节省电能1.5~2倍。4. 电渣焊接时，焊件根本不用破口。这样就节省了大量的焊丝金属，并节省了很多工时。2. 由于电渣焊是竖位焊接，所以气体易于从金属熔池中排出，渣渣也易于浮起，因此可使焊缝的致密性大大增加。

由以上看来，电渣焊的出现，对进一步推进焊接事业的发展起了巨大的作用。这种焊接方法在我国已大量采用，并在大跃进的形势之下，已有创造性的成绩。

2 压 焊

在压焊方面，主要有接触焊，锻焊，钎焊，冷焊及摩擦焊等，此外还有加压气焊。

1) 接触焊中的对焊

对焊根据工艺的特点可分为两种：电阻焊和闪光焊。

如图9所示，在电阻焊时，工件1及2夹紧在电极3的下面，并使两工件紧密接触。然后通电，电流通过焊接变压器4，由电极传至工件。于是在接触部分5产生大量的热，而使工件的接触端加热至半熔化塑性状态。马上断电加压而形成焊接接头。通电而产生的热量为

$$Q = 0.24 I^2 R t$$

在闪光对焊时，机构完全相同。只是先通电，而后使工件缓慢接近，并保持端部稍加接触。于是在接触部分即急剧加热至熔融状态，发生大量的闪光火花。当接触端已熔融到一定深度时，即同时断电加压。熔融金属被挤出而形成焊接接头。这种方法多用于管子、棒料的对接。

2) 点焊

如图10所示，工件1、2被压紧之后再通电。而在电极夹压处，即析出大量的热。断电后立即加压，即形成焊点。整个焊缝是由许多焊点组成。这种方法多用于汽车、飞机制

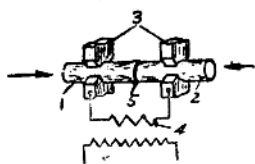


图9 对焊示意图。

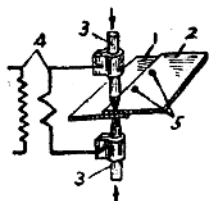


图10 点焊示意图。

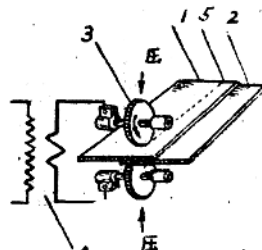


图11 滚焊示意图。

造工业，生产率很高。

3) 滚焊

与点焊的过程完全相似，只是把杆形电极改为圆盘形。当圆盘滚动时，就可以得到連續的焊缝。这种方法适用于封闭的容器（薄板）。

4) 冷焊

冷焊最大的特点是不用电，其原理如下：两个被焊工件1及2的接触面仔細除锈打光之后，置于压力机两个压锤3及4之間，在常温时，加一定压力 P 之后，在被焊金属的表面上即发生原子扩散现象，同时机构能变为热能即造成形成焊接接头的有利条件，于是在5处就形成了焊接接头。这种方法可以焊接铜、铝等有色金属。

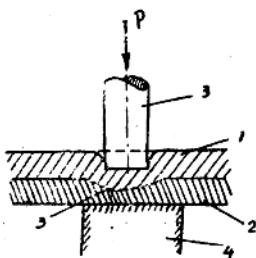


图12 冷焊。

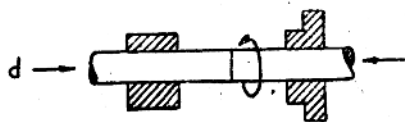


图13 摩擦焊示意图。

5) 摩擦接触焊

按其性质来讲，实质上与电阻接触焊一样，只是加热方法不同。其焊接工艺主要可分为以下两个过程： α ．加热过程：利用摩擦来加热一直到金属接触顶端开始熔化为止； β ．加压过程：包括瞬間的加压及頂压保持時間。

这种焊接方法与电阻接触焊比較有下列优点： α ．利用机械摩擦方法来供給热量，从而节省了大量电能； β ．焊机的构造簡單，制造成本比普通接触焊机便宜的多； γ ．焊件在焊前不需要任何准备，如除锈、磨光等； δ ．可焊接各种不同的金属，同时亦可焊接某些两种完全不同的金属组成焊接接头。

这种焊接方法多用于铜、铝、棒料及鋼棒等，生产率很高。我国在1957年已由冶金工业部研究成功。

6) 加压气焊

在形式上也与接触焊的对焊相似，只是热源不是电能，而是气体火焰的化学能。从图14可以看出，不是一个火焰，而是一个环形的多个火焰（按工件的外形，火焰的形式可有多种多样）。火焰可以在工件的端面加热，亦可侧面加热。一般焊接管子时多为侧面加热。过程如下：工件1、2接触后，用多焰焊炬3、4使接触端加热到塑性或半熔化状态，然后加压，即得焊接接头。

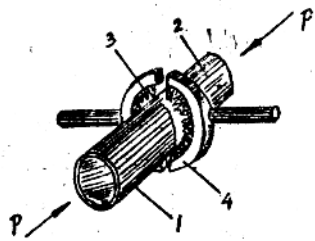


图14 加压气焊。

这种方法生产率很高，适用于鋼管，棒及铁路鋼軌的对焊等。

3 特 种 焊

1) 等离子焊接及切割

在1958~1959年不少国外的杂志报导了等离子焰的焊接与切割。

电弧等离子是在两个电极的电弧放电作用下形成的，放电的位置是在钨电极（阳极）与喷嘴（阴极）之间形成的。喷嘴是用铜制成，并用水冷却。沿着弧柱通以气体，气体在电弧区中发生电离作用，因而带有等离子性质，并从喷嘴中以明亮的火焰射出，焰长约15~20毫米。等离子焰的温度可达15000℃或更高。这样高的温度对焊接和切割特种难熔金属及非金属都是非常有利的。

所通入的气体一般多用氢，氮，氦，二氧化碳及水气等，但最好是用惰性气体。高温时所构成的等离子流形成了物质的第四态，但这些离子在工件表面附近重新再组合成原子时，则会放出大量的热量。利用这部分热量可以焊接和切断最难熔的陶瓷及硬质合金。同时也可以切削最硬的金属。显然，这种方法在特种材料的焊接及加工上，会起着极其重要的作用。

2) 真空电子束焊接

1958~1959年苏联研究成功一种新的焊接方法——真空电子束焊接法，这种方法可以焊难熔的和极活泼的金属，如钨、钼、钽、铝等。

电子束焊接过程的实质，在于真空中金属表面受到高速运动着的电子猛烈冲击，大部分能量转为热能，焊接时就利用这部分热能来熔化金属。

电子束焊接装置的主要部分是由电子枪和真空室所组成，电子枪内用螺旋式的钨丝作为阴极，而工件构成阳极，阴极与阳极之间形成电子束，由于阳极加热而使金属熔化。

为了增加电子束的密度以获得更高度集中的热源，在电子束的通路上安装一个聚焦装置来挤缩电子束，使电子的能量集中于不大的表面上。此外，在电子束的通路上还装有偏转装置，使电子束能在一定范围内沿着焊件移动。

电子枪在20000~100000伏特的电压下射出强大的电子束；真空室的真空度约为 10^{-4} 毫米水银柱；电子束的电流约为10~100毫安。这种焊接方法对于焊接特种金属将有广阔的发展前途。我国在这方面已开始了大量的研究工作，并取得了一定的成就。

3) 超声波焊接

超声波焊接是将频率为15~20千赫左右的机械振动送入焊区，使工件结合的一种焊接方法。

超声波焊接设备一般包括：超声波发生器，振动系统，加压系统及控制系统。

超声波发生器的功用为供给高频电流和直流极化电流，发生器常采用电子式。振动系统是将发生器所供给的电振动变成同频率的机械振动，并将此机械振动传至焊件，进行焊接。振动系统包括：换能器，声极及反射声极等。

加压系统给焊区施加一定压力，可以采用气压或机械加压等型式。控制系统是用来控制加压时间及超声波的作用时间。

超声波焊接的历史大约只有十年，但它的发展速度很快，与一般焊接方法比较，超声波焊接具有一系列优点：a. 不加热到高温，没有熔化和过热现象，所以金属的组织性能变化极小；b. 可以焊接厚度相差很大的焊件；c. 可以焊接不同的金属，也可以焊接轻金属；d. 工件焊前的表面要求不高；e. 节省电功率。

因此，超声波焊接在航空工业及电子工业等方面，将有极广泛的用途。

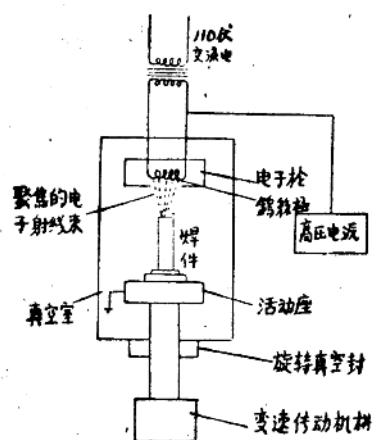


图15 真空电子束示意图。

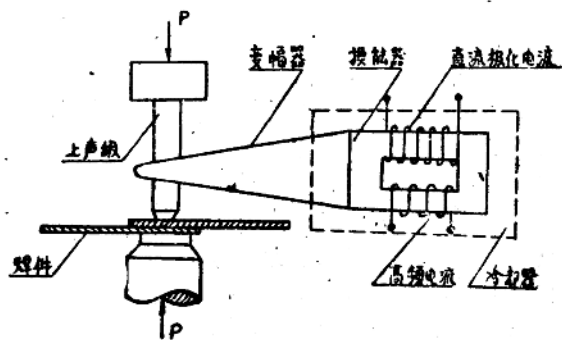


图16 超声波焊接示意图。

第一章 焊接冶金过程的特点

焊接冶金学是焊接理論方面一个极其重要的組成部分，可以这样讲：要想得到优质的焊缝金屬就必须善于利用冶金方面的規律，来控制 and 調整焊缝金屬的性能。很久以来，曾有很多焊接工作者从事这方面的研究工作。特别是苏联学者，如鲍戈金-阿历克謝也夫(Г. И. Погдин-Алексеев)、阿洛夫(А. А. Алов)、巴頓(Е. О. Патон)等人在焊接冶金方面都作出了不少貢獻。此外，如美国的克勞辛(G. E. Claussen)、契普曼(J. Chipman)、英国的罗拉申(E. C. Rollason)、日本的岡田实等人在这方面也提供了不少資料。本章将着重討論焊接冶金的特点，焊接时的熔滴过渡及熔池形成的过程等問題。

一、焊接冶金的特殊性 [1, 2, 4, 5]

在焊接过程中，由于电弧或其他热源的高温作用下，使金屬发生局部熔化所形成的液体金屬，謂之熔池。如图 17 所示，在熔池上部充满着大量气体，熔池中也具有一定量的熔渣，这些气体、熔渣与液体金屬之間不断地进行着复杂的冶金反应，如果这些反应进行的很好，那么焊成的焊缝金屬就具有很好的机械性能和物理性能，如果这些反应进行的很不好，就会在焊缝中产生各种不同的缺陷。因此，大大地影响了焊接接头的质量。如何使冶金的反应按照我們的要求进行？就必须充分的了解焊接时的冶金过程。焊接冶金在一定程度上与一般炼鋼过程相近似，因此有人把焊接冶金称为“小冶金”。虽然如此，但焊接冶金过程有它特殊的地方，可由以下几方面来討論：

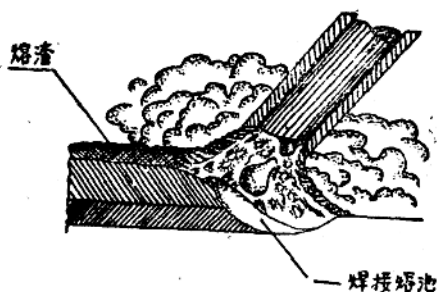


图17 手工电弧焊接时熔池的示意图。

1. 温度高以及温度梯度大

1) 电极輝点的温度很高，輝点温度可达 $3200\sim 3400^{\circ}\text{C}$ 使金屬强烈的蒸发，双原子气体(N_2 , O_2 , H_2 ……)在高温分解程度很大，如97%的氮分子分解为氮原子，各种吸热反应大量进行，分解后的气体原子及离子很容易的溶解在液体金屬中，这些現象在一定程度上改变了冶金反应进行的情况。

2) 熔池温度高，平均温度在 2000°C 以上，而在它的周围被冷却的金屬所包围，两者的温度差相当大，因此在结构上常常产生内应力以及引起翘曲，裂縫等。

在炼鋼时达不到这样高的温度，因此，双原子气体的分解程度較低，溶入金屬中的气体大大减少，这样就降低了金屬凝固后产生气孔的可能性。

熔池温度高，提高了元素化学活泼性，使物理化学反应快速进行是一有利現象，可使 SiO_2 、 MnO 等氧化物还原，而在炼鋼时就不常发生。

2. 熔池体积小

由于液体金属体积很小，手弧焊平均只 2~10 厘米³，自动焊 9~30 厘米³，同时加热及冷却速度很大，由局部金属开始熔化，形成熔池。到结晶完了的全部过程，一般只有几秒钟的时间，达到一分钟的都很少，而温度又在不断的变化，因此整个冶金反应常常达不到平衡，化学成分在很小金属体积内，就有较大的不均性，形成偏析。这种不完全的反应就增加了研究焊接过程的困难。例如，是否能把一般冶金上的平衡定律直接应用在焊接冶金方面？就值得研究。

炼钢过程，是在大型炼钢炉中进行长时间平衡的物理化学反应，如平炉炼钢，每炉钢出来须几小时，化学成分相当均匀和机械性能一致。

3. 熔池金属不断更换

熔池中参加反应的物质经常的改变，不断有新的铁水及熔渣加入到熔池中参加反应（与炼钢不相同，炼钢是一炉固定金属液体），这也就增加了焊接冶金的复杂性，但有人认为每次铁水更换的情况大致相同，影响冶金反应不是很严重的。

4. 铁水是以滴状进入熔池

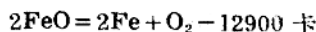
熔滴由焊条顶端滴入熔池的同时，铁水滴子与气体及熔渣的接触面，大大的超过了一般炼钢的情况（焊接弧柱空间，熔滴与熔渣的相对接触面积，比高炉时要大 1000 倍左右），炼钢只在炉中上部发生反应，总的铁水与熔渣接触面较小，接触面加大可以加速反应进行，但同时，气体侵入液体金属中的机会也增多，侵入也比较容易，因而使金属发生氧化、氮化及产生气孔，造成了有利的条件。除此以外，尚有其他方面与一般炼钢不同的地方。例如：焊缝金属化学成分的改变，基本金属组织的改变，电场存在等。此外，焊条摆动的方式，焊接规范，焊接进行的外界条件，也会多多少少地影响到焊接冶金反应进行的情况，因此也就影响了焊缝金属的质量。

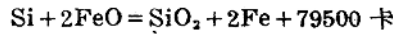
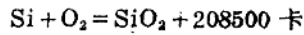
5. 熔池温度经常变化

焊接时金属熔滴的温度，开始时达到最大值，随后在焊缝中冷到常温，熔池温度随时而不断的变化，同时熔滴的尺寸也不一定是一样的，因此在整个焊接过程中，每滴金属的温度循环很难一致，也就使冶金反应不能一致。但也有人不同意这种看法，认为在焊接规范给定的条件下，每个熔滴在进入熔池前后，都经过相同的温度循环，而在将要凝固之前，熔池中的各部分都有一个共同的温度——凝固点，因此，用凝固点来计算反应平衡状态的温度条件是合乎实际情况的。

一般研究冶金反应过程时要讨论：1）反应进行的可能性及方向；2）反应进行的速度；3）反应达到平衡的条件。焊接时同样也要讨论这些问题，但根据对上述焊接冶金特点的讨论，就使得关于反应能否达到平衡的问题存在着不同的看法。

能否达到热力学平衡已成为焊接冶金学中的重要问题之一，无论在理论上或实际上都很大的意义。如系统可以达到平衡时，则不仅可以用计算确定在一定的温度条件及浓度条件下反应进行的方向，而且可以确定在反应时熔渣与金属相置换的数量。但对于不平衡系统，应用一般物理化学法则来进行计算以确定反应进行方向时，必然要带来很大的误差。我们试以硅脱氧的简单反应为例来看一下：





由反应热效应可以一般地断定，升温时反应是向使铁氧化的方向进行。但是只有在升温前系统是平衡的条件下，这个判断才是正确的。否则，在硅与氧化铁过剩时，很显然，在升温时反应还是要向使铁还原的方向进行。

焊接时，有一些因素可以使人们认为反应有可能达到平衡。这些因素就是：1) 高的电弧温度；2) 反应的空间小，且搅拌作用强烈；3) 相对接触面积大。

但也有不利的因素，如：1) 反应各相互相作用的时间短暂性；2) 在反应空间的温度不仅各点不相同，而且随时发生变化。

因此，有一种看法是根据有利的因素，认为反应可以达到平衡，一般冶金过程理论可以应用于焊接冶金过程上。

相反的意见则是：焊接熔池温度不断改变及反应物质的不断更换，以及进行反应的时间短促，反应不可能达到平衡。

其实，这些看法都是仅仅建立在对焊接过程一些特点的分析上，因为一般的实验是很难做的。

近年来，有人用放射性同位素的方法研究焊接过程的反应平衡问题，得到了比较可靠的结果。

对于焊接过程来讲，当金属与熔渣反应达到平衡时，其分配常数 $K = (\text{S})_{\text{熔渣}} / (\text{S})_{\text{金属}}$ 应不再变；此时即无元素向熔渣转移，也无元素向金属转移。根据这种原则有人利用放射性同位素分别放在焊条药皮（或焊剂）及焊丝中来看熔渣与金属的平衡趋势。如放射性物质在渣与金属间的分配常数 K 在两种情况下（即把同位素放在药皮或焊丝中）是相同的，即为平衡状态，否则即为不平衡状态。放射性物质是利用 S^{35} 及 Cr^{51} 。试验的结果证明，无论是硫或铬，在熔渣与金属间的分配并未达到平衡状态（表 1 为试验结果之一）。如果系统中有一个成分的分配不平衡，则整个系统即不能处于平衡状态。

表 1

编 号	焊 接 规 范			焊 条	S^{35} 在药皮中	S^{35} 在焊丝中	比 值
	电 流 (安)	电 压 (伏)	焊 速 (厘米/分)		$K_n = (I_n) / [I_n]$	$K_c = (I_c) / [I_c]$	$\Delta = K_n / K_c$
1	100	25	10	УОНН-13/45 (Φ4)	7.08	1.60	4.43
2	160	25	10		3.57	1.22	2.93
3	200	25	10		3.41	0.86	3.98
4	250	25	10		2.92	1.15	2.53
5	100	25	10	ОММ-5 (Φ4)	6.68	3.26	2.05
6	160	25	10		4.34	2.59	1.68
7	200	25	10		4.21	3.12	1.35
8	250	25	10		3.98	2.81	1.42

试验结果指出，增大单位能（此处增大电流到 250 安）时并能很好的促进平衡趋势。

但我们可以看出，用 ОММ-5 焊条时，分配常数的比值 Δ 比用 УОНН-13/45 时小得多，即更趋近于平衡状态。这个原因可能是 ОММ-5 焊条的熔渣流动性好些，容易进行扩散过程。