

机械工业部统编

中级电焊工工艺学

机械工人技术理论培训教材

JIXIE GONGREN JISHU LILUN PEIXUN JIAOCAI



机械工业出版社

机械工人技术理论培训教材

中级电焊工工艺学

机械工业部 统编

机械工业出版社

本书介绍了焊接冶金过程的基本知识以及有关气体保护电弧焊和电渣焊的工艺实质,所用设备的结构原理和使用方法;着重介绍了常用金属材料的焊接性和焊接工艺;并对焊接变形和应力的有关知识作了论述,最后对常用压焊方法和设备也进行了较系统的介绍。

本书由无锡锅炉厂徐初雄、陈宝龄编写,由南京汽轮机厂吕明辉、南京晨光机器厂堵耀庭和南京锅炉厂张洪飞审稿。

图书在版编目(CIP)数据

中级电焊工工艺学/机械工业部统编. —北京:机械工业出版社, 2000

机械工人技术理论培训教材

ISBN 7-111-01158-9

I. 中… II. 机… III. 焊接工艺-技术培训-教材
IV. TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 68710 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:俞逢英 版式设计:罗文莉 责任校对:刘志文

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

北京市密云县印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 8 月第 1 版第 11 次印刷

787mm×1092mm $1/32$ ·11.875 印张·260 千字

233 501—237 500 册

定价:15.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

重 排 说 明

原国家机械工业委员会统编《机械工人技术理论培训教材》(包括配套习题集)自1988年出版发行以来,以其行业针对性、实用性强和职业(工种)覆盖面广等特点深受全国机械行业各级工人培训部门和广大工人的欢迎,一再重印,畅销不衰,为改善和提高机械行业技术工人队伍的技术素质发挥了很好的作用,在全国产生了广泛而深刻的影响。近年来,这套教材又成为不少地区政府部门和社会力量实施再就业工程的首选教材。

由于这套教材出版发行已近10年,一部分教材中使用的技术标准、计量单位、名词术语已经过时,也有一些内容显得陈旧。这些问题尽管所占比例不大,但是为了对社会、对广大读者负责,为了使这套教材能够继续、更好地发挥作用,我们对有上述问题的教材分期分批进行了修改、重排。重排本采用了最新国家标准、法定计量单位和规范的名词术语,删去了陈旧的内容,适当补充了新的内容,从而更加实用。重排本还将教材的封面、内封和版权页上的“国家机械工业委员会统编”改为“机械工业部统编”;配套习题集的封面、内封和版权页上的“国家机械委技工培训教材编审组编”改为“机械工业部技工培训教材编审组编”。

广大读者对重排本有何意见或建议,欢迎给我们提出,以便我们以后改进。

机械工业部技工培训教材编审组

前 言

1981年，原第一机械工业部为贯彻、落实《中共中央、国务院关于加强职工教育工作的决定》，确定对机械工业系统的技术工人按照初、中、高三个阶段进行技术培训。为此，组织制定了30个通用技术工种的《工人初、中级技术理论教学计划、教学大纲（试行）》，编写了相应的教材，有力地推动了“六五”期间机械行业的工人培训工作，初步改变了十年动乱造成的工人队伍文化技术水平低下的状况，取得了比较显著的成绩。

鉴于原机械工业部1985年对《工人技术等级标准（通用部分）》进行了全面修订，原教学计划、教学大纲已不适应新《标准》的要求，而且缺少高级部分；编写的教材，由于时间仓促、经验不足，在内容上存在着偏深、偏多、偏难等脱离实际的问题。为此，原机械工业部根据新《标准》，重新制定了33个通用技术工种的《机械工人技术理论培训计划、培训大纲》（初、中、高级），于1987年3月由国家机械工业委员会颁发，并根据培训计划、大纲的要求，编写了配套教材149种。

这套新教材的编写，体现了《国家教育委员会关于改革和发展成人教育的决定》中对“技术工人要按岗位要求开展技术等级培训”的有关精神，坚持了文化课为技术基础课服务，技术基础课为专业课服务，专业课为提高操作技能和解决生产实际问题的能力服务的原则。在内容上，力求以基本概念和原理为主，突出针对性和实用性，着重讲授基本知识，注重能力培养，并从当前机械行业工人队伍素质的实际情况出发，努力做到理论联系实际，通俗易懂，具有工人

培训教材的特色，同时注意了初、中、高三级之间合理的衔接，便于在职技术工人学习运用。

这套教材是国家机械工业委员会委托上海、江苏、四川、沈阳等地机械工业管理部门和上海材料研究所、湘潭电机厂、长春第一汽车制造厂、济南第二机床厂等单位，组织了200多个企业、院校和科研单位的近千名从事职工教育的同志、工程技术人员、教师、科技工作者及富有生产经验的老工人，在调查研究和认真汲取“六五”期间工人教材建设工作经验教训的基础上编写的。在新教材行将出版之际，谨向为此付出艰辛劳动的全体编、审人员，各地的组织领导者，以及积极支持教材编审出版并予以通力合作的各有关单位和机械工业出版社致以深切的谢意！

编好、出好这套教材不容易；教好、学好这些课程更需要广大职教工作者和技术工人的奋发努力。新教材仍难免存在某些缺点和错误，我们恳切地希望同志们在教和学的过程中发现问题，及时提出批评和指正，以便再版时修订，使其更完善，更好地发挥为振兴机械工业服务的作用。

机械工业部
技工培训教材编审组
1987年11月

目 录

重排说明

前言

第一章 焊接冶金过程的基本知识	1
第一节 焊条（或焊丝）的熔化及熔滴过渡	1
第二节 焊接化学冶金过程	9
第三节 焊接结晶过程	23
复习题	36
第二章 气体保护电弧焊及电渣焊	38
第一节 气体保护电弧焊工艺及设备	38
第二节 电渣焊工艺及设备	92
复习题	124
第三章 常用金属材料的焊接	126
第一节 低合金结构钢的焊接	126
第二节 不锈钢的焊接	144
第三节 铸铁的焊接	172
第四节 有色金属的焊接	186
第五节 堆焊	219
复习题	230
第四章 焊接应力和变形	233
第一节 焊接应力和变形的基本概念	233
第二节 焊接残余变形	239
第三节 焊接残余应力	258
复习题	266
第五章 压焊工艺及设备	268
第一节 压焊过程基本理论知识	268
第二节 点焊工艺及设备	280
第三节 缝焊工艺及设备	307

第四节 常用金属材料的点焊和缝焊.....	319
第五节 对焊工艺及设备.....	333
复习题.....	365
附录	366
附录 A 低合金钢焊条牌号 (GB/T5118-1995)	366
附录 B 电阻焊设备代号含义	369

第一章 焊接冶金过程的基本知识

第一节 焊条（或焊丝）的熔化及熔滴过渡

一、焊条（或焊丝）金属的熔化

1. 焊条（或焊丝）金属的加热 熔化极电弧焊时，焊条（或焊丝）具有两个作用：一方面作为电弧的一个极；另一方面向熔池提供填充金属。焊接时，加热并熔化焊条（或焊丝）的热量有：焊接电流通过焊条（或焊丝）所产生的电阻热；焊接电弧传给焊条（或焊丝）端部的电弧热以及化学反应所产生的化学热（在一般情况下仅占1%~3%，常忽略不计）。

(1) 电阻加热 从导电的接触到焊条（或焊丝）末端的长度称为伸出长度，即焊条（或焊丝）上通电部分的长度。当电流在焊条（或焊丝）上通过时，将产生电阻热。

电阻热的大小决定于焊条或焊丝的伸出长度、电流密度和焊条（或焊丝）金属的电阻率。

焊条（或焊丝）伸出长度的长度越大，则通电的时间增加，电阻热加大。电流密度增加，电阻热加大。

焊条（或焊丝）的电阻决定于焊条（或焊丝）金属本身的电阻率和焊条（或焊丝）的直径。如不锈钢焊条的电阻率比低碳钢焊条大，因此在同样电流密度的条件下所产生的电阻热也大。同种材料的焊条（或焊丝），其直径越大，则电阻越小，相对产生的电阻热也就减少。

过高的电阻热将给焊接过程带来不利的影响。焊条电弧

焊（手弧焊）时，过高的电阻热将使焊条药皮在进入熔化区前就发红变质，失去保护和冶金作用；自动焊时，过高的电阻热将使焊丝发生崩断，影响焊接。为了减少过高的电阻热所带来的不利影响，在焊接过程中采取的措施是：

1) 限制焊条（或焊丝）的伸出长度 焊条电弧焊时不能采用过长的焊条，特别是在采用细直径焊条时，更要限制其长度。例如，直径 5mm 的焊条，其最大长度为 450mm；而直径为 2.5mm 的焊条，其最大长度为 300mm。同样直径的不锈钢焊条，其长度还要短一些，如直径 5mm 的不锈钢焊条，长度为 400mm。埋弧焊时焊丝的伸出长度通常限制在 30~50mm 左右。

2) 限制焊条电流密度值 对于一定直径的焊条（或焊丝）在生产中应该根据工艺的要求选用合适的电流值，不能单纯为了提高效率而选用过高的电流值。埋弧焊时，由于焊丝的伸出长度比焊条短得多，所以同样直径的焊丝可以选用比焊条电弧焊大得多的电流，这样就大大地提高了埋弧焊的生产率。不锈钢焊条由于本身的电阻率大，所以同样直径的焊条所选用的电流就要比碳钢焊条小一点。

(2) 电弧加热 电弧产生的热量仅有一部分用来熔化焊条（或焊丝），大部分热量是用来熔化母材、药皮或焊剂，另外还有相当部分的热量消耗在辐射、飞溅和母材金属的传热上。

焊条电弧焊和埋弧焊时电弧的耗热情况，见表 1-1。

表 1-1 焊条电弧焊和埋弧焊耗热的比较 (%)

焊接方法	熔化焊丝	熔化母材	母材传热	熔化药皮或焊剂	辐射	飞溅
焊条电弧焊	23	8	30	7	22	10
埋弧焊	27	45	3	23	1	1

由表 1-1 可知, 埋弧焊时热的辐射散失和飞溅损失极小, 虽然用于熔化焊剂的热量损耗较大, 但用于熔化焊丝和母材的热量仍很高, 因而使焊接速度大大提高。

2. 焊条 (或焊丝) 金属的熔化 焊条 (或焊丝) 金属受到电阻热和电弧热的加热以后, 开始熔化。表示金属熔化特性的主要参数是熔化速度。

在正常焊接参数内, 熔化速度与焊接电流成正比, 即

$$g_m = \frac{G}{t} = a_p I$$

式中 g_m ——焊条 (或焊丝) 金属的熔化速度 (g/h);

G ——熔化的焊丝质量 (g);

t ——电弧燃烧时间 (h);

I ——焊接电流 (A);

a_p ——焊条 (或焊丝) 的熔化系数 [g/(A·h)]。

焊条 (或焊丝) 的熔化系数 a_p 是表示在 1h (小时) 内 1A (安) 电流所能熔化的焊条 (或焊丝) 金属质量, 是表示熔化速度快慢的一个参数。如果忽略电阻热对金属加热的影响, 则当焊条 (或焊丝) 的材料及其直径一定时, 其熔化系数为一常数, 此时熔化速度和电流成线性关系, 见图

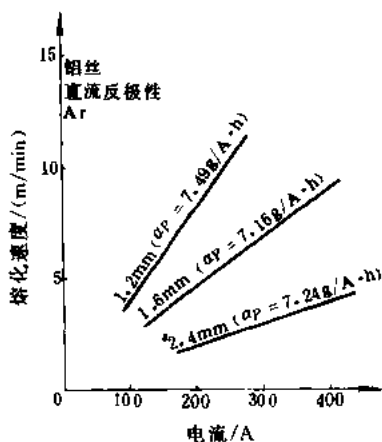
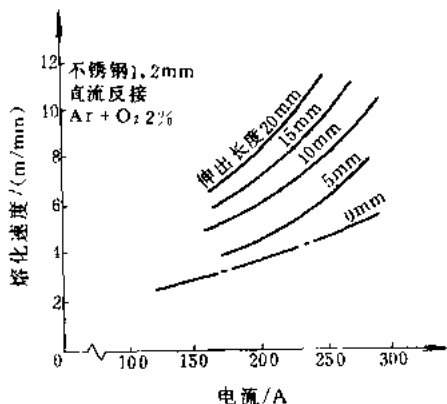


图 1-1 铝合金焊丝熔化速度和电流的关系

1-1。

图1-2表示不锈钢焊丝的熔化速度与电流关系的特性。这种焊丝的熔化速度与电流的关系不是直线，随着电流的增加，熔化速度呈曲线上升，这是因为不锈钢的电阻率较大，伸出长度的电阻热不能忽略不计，熔化系数因电流的增加而增加所致。



二、焊条（或焊丝）金属的熔滴过渡

图1-2 不锈钢焊丝熔化速度和电流关系

电弧焊时，在焊条（或焊丝）端部形成的向熔池过渡的液态金属滴称为熔滴。熔滴通过电弧空间向熔池转移的过程叫熔滴过渡。

1. 熔滴上的作用力 熔滴过渡时在熔滴上作用着多种力，每种力对熔滴的过渡起着不同的影响，并且直接影响到熔滴的大小和过渡的形式。

(1) 重力 任何物体都会由于本身的重力而具有下垂的倾向。平焊时，金属熔滴的重力起了促进熔滴过渡的作用。立焊及仰焊时，熔滴的重力阻碍熔滴向熔池过渡，是一种反向力。

(2) 表面张力 焊条金属熔化后，在表面张力的作用

下形成球滴状。平焊时，它悬挂在焊条末端，在非短路过渡的情况下，只有当其他力克服了表面张力的阻碍作用时，才能促使熔滴过渡到熔池中去。所以在平焊时，表面张力阻碍着熔滴过渡。

表面张力的大小与熔滴的成分、温度及环境气氛有关。由表面张力造成的、阻碍熔滴与焊丝脱离的阻力又与焊条直径几乎成正比。细丝的这种阻力比粗丝小，所以气体保护焊时，用细丝进行焊接要比粗丝焊接时，熔滴过渡较为顺利而稳定。

表面张力与保护气体的性质有关。例如，在氩气中加入少量氧气作为焊接钢的保护气体，比用纯氩时熔滴过渡顺利得多，因为氧能降低熔滴的表面张力。

如果熔滴在没有脱离焊丝以前，就与熔池表面相接触（即短路过渡），这时表面张力的作用恰恰相反，会促使熔滴向熔池过渡。

(3) 电磁压缩力 当两根平行载流导体通过同方向电流时，会产生使导体相吸的电磁力。焊接时，可以把熔滴看成是由许多平行载流导体所组成，这样在熔滴上就受到由四周向中心的电磁力，称为电磁压缩力，见图 1-3。电磁压缩力的大小和电流密度的平方成正比，而电流密度最大的地方是在熔滴的缩颈部分。因此，熔滴的细颈部分受到最大的电

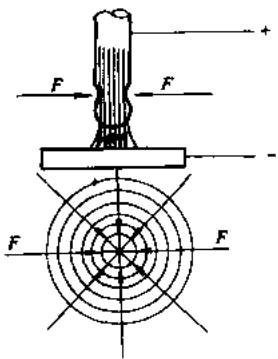


图 1-3 熔滴上的电磁压缩力 F

磁压缩力。在任何焊接位置，电磁压缩力的作用方向都是使熔滴向熔池过渡。

(4) 斑点压力 电弧中的带电质点——电子和阳离子，在电场的作用下向两极运动，撞击在两极的斑点上而产生机械压力，这个力称为斑点压力。

斑点压力的作用方向是阻碍熔滴向熔池过渡。由于阴极的斑点压力较阳极的大，所以正接时的熔滴过渡较反接时困难。

(5) 等离子流力 在电弧中间的气体常呈等离子态。由于焊接电弧是在小断面的焊丝和大断面的焊件之间产生的，所以其形状一般是上细下粗。由于电弧的截面不等，小截面处电磁压缩力大，而大截面处电磁压缩力小，于是在电弧气流的上、下形成压力差，使上部的等离子体迅速向下部流动产生压力，这种压力称为等离子流力。例如，在大电流喷射状态过渡的熔化极气体保护焊时，由于等离子流力的作用，往往在焊缝中心产生很大的熔深，即形成所谓蘑菇状的焊缝断面，见图 1-4。



图 1-4 蘑菇状焊缝断面的形成

a) 等离子流力的作用 b) 焊缝形状

(6) 电弧气体的吹力 焊条末端形成的套管内含大量气体，这些气体被电弧加热到高温时体积急剧膨胀，并顺着套管方向以挺直而稳定的气流冲去，把熔滴“吸”送到熔池中去。不论焊接的空间位置如何，电弧气体的吹力都将有利于熔滴金属的过渡。

2. 熔滴过渡的形态 焊接电弧燃烧的稳定性和焊缝成形的好坏，在很大程度上决定于熔滴过渡的特点，特别在熔

化极气体保护焊时，这问题就更加突出。

熔滴过渡按其形态大致可分为三种类型：粗滴过渡、短路过渡和喷射过渡，见图 1-5。

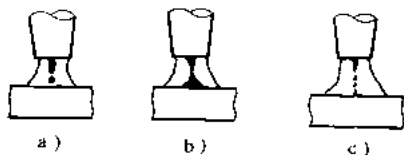


图 1-5 熔滴过渡的形态

a) 粗滴过渡 b) 短路过渡 c) 喷射过渡

(1) 粗滴过渡 熔滴呈粗大颗粒状向熔池自由过渡的形式，见图 1-5a。当电流较小时熔滴主要依靠重力的作用

克服表面张力的束缚面下落，此时熔滴尺寸较大，呈粗滴过渡。粗滴过渡会影响电弧的稳定，因此焊缝成形不好，通常不采用。

(2) 短路过渡 焊条（或焊丝）端部的熔滴与熔池短路接触，由于强烈过热和磁收缩的作用使其爆断，直接向熔池过渡的形式，见图 1-5b。采用小电流焊接的同时降低电弧电压，使弧长小于熔池自由成形时的熔滴直径，即通过熔滴将焊丝和焊条短路，此时熔滴即呈短路过渡。短路过渡时电弧稳定，飞溅小，成形良好，广泛用于薄板焊接和全位置焊接。

(3) 喷射过渡 熔滴呈细小颗粒，并以喷射状态快速通过电弧空间向熔池过渡的形式，见图 1-5c。在氩和富氩保护气体中，当电流增大时，熔滴尺寸逐渐减小，当电流增大到某临界值时，焊丝端部呈铅笔尖状，熔滴如水流从其端部脱落，即呈喷射过渡。熔滴从粗滴过渡转变为喷射过渡时的电流称为临界电流，不同的保护气体和不同的焊丝材料、焊丝直径，其临界电流值各不相同。

3. 熔滴过渡时的飞溅 熔焊过程中，熔化的金属颗粒

和熔渣向周围飞散的现象叫飞溅。这种飞散出的金属颗粒和熔渣习惯上也叫飞溅。

(1) 气体爆炸引起的飞溅 在涂料焊条焊接及活性气体保护焊时，由于冶金反应在液体内部将产生大量 CO 气体。由于气体的析出十分猛烈，尤如爆炸，以致造成液体金属发生粉碎型的细滴飞溅，这种飞溅可能在焊条（或焊丝）端头熔滴处产生，也可能在熔池内产生。

(2) 斑点压力引起的飞溅 焊条（或焊丝）端头的熔滴在斑点压力的作用下，十分不稳定，不断地跳动，有时被顶到焊条（或焊丝）的侧面，甚至使熔滴上翘，最终会飞离焊条（或焊丝）而成为飞溅，见图 1-6。这种

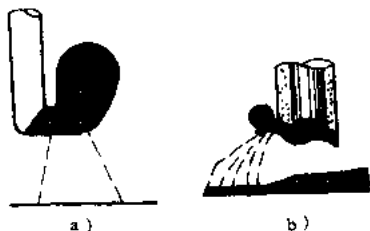


图 1-6 斑点压力引起的飞溅

a) CO_2 气体保护焊 b) 手弧焊

飞溅经常发生在焊条电弧焊和 CO_2 气体保护焊采用直流正接的情况下。

(3) 短路过渡引起的飞溅 CO_2 气体保护焊短路过渡的情况下，在发生短路期间（通常在 $2.5 \sim 5\text{ms}$ ）的最后阶段，如果还继续增大电流，在熔滴同熔池之间发生烧断开路，这时的电磁力使熔滴往上飞去，引起强烈飞溅。

飞溅会影响电弧燃烧的稳定性，飞溅的金属会沾污焊缝附近的金属，焊接不锈钢时还会降低母材金属的耐腐蚀性，所以它是焊接过程中的一种不利因素。

4. 熔滴过渡时的蒸发 蒸发是物质由液态转变为气态的一种方式。液态金属在任何温度下都能够蒸发，但当温度

升高时，蒸发加快。

弧焊时，由于电弧和斑点的高温，电弧空间将产生大量的金属蒸气，在某些情况下这也是一种不利因素，如焊接黄铜时，锌极易蒸发，结果在焊接区域产生一层白色烟雾，这样不但给操作带来困难，而且锌是有毒气体，还直接影响操作者的身体健康。

第二节 焊接化学冶金过程

一、气体与金属的作用

1. 焊接区内的气体 焊接过程中，焊接区内充满大量气体。这些气体不断地与熔化金属发生冶金反应，从而影响焊缝金属的成分和性能。

(1) 气体的来源 焊接区内的气体主要来源于以下几方面：

1) 来自焊接材料 一般焊条药皮中都含有造气剂，如淀粉、木粉、大理石等，这些造气剂在加热时发生分解或燃烧，析出大量气体。用潮湿的焊条或焊剂焊接时将析出水汽。气电焊时，焊接区内的气体主要来自所采用的保护气体。

2) 来自空气 焊接过程中，虽然对焊接区域采取了各种保护措施，但并不能完全排除周围空气的侵入。例如，焊条电弧焊时，堆焊金属中还有体积分数约为 0.025% 的氮（空气是氮的主要来源）。而一般估算，空气在电弧区内占 3% 左右。

3) 来自焊丝和母材表面上的杂质 如油污、铁锈、油漆和吸附的水分等。这些物质受热后将析出气体进入电弧空间。

4) 来自高温蒸发产生的气体 如金属和熔渣的蒸汽。