

低碳钢与低合金高强度钢

焊接材料

唐伯钢 尹士科 王玉荣 编著

机械工业出版社

低碳钢与低合金高强度钢 焊接材料

唐伯钢 尹士科 王玉荣 编著



机械工业出版社

本书比较系统地介绍了低碳钢与低合金高强度钢焊接材料（焊条、焊丝、焊剂和保护气体）的分类、性能、研制、生产和使用情况，反映了近几年来国内外这方面的主要技术进展情况。内容较为丰富和具体，对生产与研制焊接材料比较实用。

读者对象为焊接材料研制与生产单位的技术人员、使用低碳钢和低合金高强度钢焊接材料的各部门技术人员及管理人员，也可供焊接专业师生参考。

低碳钢与低合金高强度钢焊接材料

唐伯钢 尹士科 王玉荣 编著

责任编辑 金晓玲

封面设计 郭景云

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32·印张 16 7/8·插页 1·字数 373 千字

1987年7月北京第一版·1987年7月北京第一次印刷

印数 0,001—5,550·定价：3.75 元

统一书号：15033·6470

前 言

低碳钢与低合金高强度钢焊接材料（焊条、焊丝、焊剂和保护气体）的产量，占我国焊接材料总产量的80~90%，广泛用于国民经济各部门，直接关系到压力容器、管道、船舶、海上采油平台、桥梁、机械、建筑等各类焊接结构的质量和安全生产。因此这类焊接材料的性能、品种、质量状态和进展，理所当然地受到各行各业的极大关注。

本书从低碳钢与低合金高强度钢焊接材料的生产和使用实际出发，叙述了焊接材料冶金的基本概念，阐述了焊条、焊丝、焊剂和保护气体的分类与性能，较为详细地介绍了近几年来国内外焊条、焊丝、焊剂新品种的发展情况。由于国外这方面的研究成果，90%以上首先发表于专利文献中，因此书中较多地引用了国外的专利文献，这对于我们开拓技术思路，了解国外焊接材料新产品的研究动向，赶超国外先进水平无疑有所裨益。书中还介绍了低碳钢和低合金钢焊接材料的保管和选用，希望有助于在实际工作中根据钢材和结构的情况，正确使用焊条、焊丝、焊剂和保护气体。

本书承蒙天津大学张炳范副教授审核，吴乃莹同志协助收集了部分国外文献资料，在此向他们，并向书中所引用文献的作者们，一并致以衷心的感谢！

近年来，国内外焊接材料都在不断更新换代，新成果新产品层出不穷，加之我们水平有限，因此遗漏和错误之处在所难免。敬请广大读者批评指正。

编著者

1985年1月

目 录

前 言

第一章 有关焊接材料的冶金基础.....	1
第一节 焊接材料的作用和类型	1
一、焊接材料的作用	1
二、焊接材料的类型	2
第二节 焊接电弧和熔滴过渡	4
一、焊接电弧的产生	4
二、影响焊接电弧稳定性的因素	6
三、熔滴过渡的形式和特点	8
第三节 焊接熔渣的作用和物理化学性质	13
一、焊接熔渣的作用	13
二、焊接熔渣的结构模型	14
三、焊接熔渣的化学性质	17
四、焊接熔渣的物理性质	24
第四节 焊接冶金过程中的基本反应	39
一、电弧焊化学冶金过程特点	39
二、基本冶金反应	42
第五节 焊缝成分与性能	52
一、氧、氮、氢含量对性能的影响	52
二、合金元素对焊缝性能的影响	69
参考文献	88
第二章 焊条.....	91
第一节 焊条的组成、制造、分类和研制	92
一、焊条的组成和药皮原材料	92
二、焊条制造工艺和质量检验	101

三、国家标准对低碳钢和低合金高强度钢焊条的分类 及性能指标	113
四、焊条的发展趋势及研制步骤	124
第二节 常用焊条	128
一、结422焊条的配方与性能	128
二、结423焊条的配方与性能	140
三、结421、结424、结425焊条的配方与性能	145
四、结507焊条的配方与性能	148
五、改进常用低氢型焊条的交流稳弧性和脱渣性的途径	152
六、常用低氢型焊条引弧性的改进和消除引弧点 气孔的途径	159
第三节 超低氢型焊条	161
一、降低药皮含水量的途径	161
二、提高焊接冶金过程去氢能力的途径	171
三、超低氢型焊条的含义和性能	186
第四节 改进工艺性能与提高施焊效率的专用焊条	194
一、底层焊条	194
二、立向下焊条	199
三、管接头全位置下行焊条	209
四、高效铁粉焊条	217
五、重力焊条	231
六、躺焊焊条	238
第五节 低尘低毒焊条	241
一、焊接烟尘的性质和危害	242
二、国内外低尘低毒焊条的研制现状	249
三、低尘低毒焊条的改进方向和研制途径	250
第六节 高强度钢焊条和高韧性焊条	269
一、屈服强度为490~790MPa的高强度钢用低氢型焊条	269
二、改善角焊缝成形提高疲劳强度的低氢型焊条	282

三、COD值优良的高韧性焊条	286
第七节 提高焊条耐潮性能	293
一、焊条的吸潮和耐潮性	293
二、提高药皮耐潮性能的途径	295
参考文献	308
第三章 焊丝与保护气体	317
第一节 焊丝的分类、生产和表面质量	317
一、焊丝的分类和生产	317
二、焊丝的表面质量和表面处理	322
第二节 埋弧焊焊丝	325
一、实芯焊丝	325
二、药芯焊丝	327
第三节 CO_2 焊焊丝	328
一、实芯焊丝	329
二、活性焊丝	337
三、药芯焊丝	341
第四节 自保护焊丝	347
一、实芯焊丝	347
二、药芯焊丝	348
第五节 氩弧焊、电渣焊和气电立焊焊丝	369
一、钨极氩弧焊焊丝	369
二、熔化极氩弧焊焊丝	372
三、电渣焊焊丝	372
四、气电立焊焊丝	372
第六节 保护气体	375
一、 CO_2 气	375
二、Ar气	377
三、混合气体	378
参考文献	382

第四章 焊剂	386
第一节 焊剂的分类	386
一、按制造方法分类	386
二、按化学成分分类	388
三、按熔渣的碱度分类	394
四、焊剂与焊丝的组合表示	396
第二节 焊剂的制造与检验	399
一、熔炼焊剂	399
二、烧结焊剂	410
第三节 常用熔炼焊剂	413
一、高锰焊剂	419
二、中锰焊剂	422
三、低锰焊剂	423
四、无锰焊剂	424
第四节 低氢高韧性熔炼焊剂	426
一、降低焊缝中扩散氢的措施	427
二、提高焊缝韧性的措施	440
第五节 高效焊接用熔炼焊剂	449
一、高速焊接用浮石状焊剂	449
二、大线能量焊接用焊剂	453
三、大间距双丝焊接用渣壳导电焊剂	455
四、单面焊双面成形用衬垫焊剂	458
第六节 烧结焊剂	461
一、抗潮焊剂	462
二、抗锈性焊剂	469
三、高碱度焊剂	470
四、双丝焊接用渣壳导电焊剂	473
五、横向埋弧焊用焊剂	475
六、国外烧结焊剂产品举例	476

第七节 电渣焊焊剂	481
参考文献	491
第五章 焊接材料的选用与管理	495
第一节 焊接材料的选用	495
一、选用原则	495
二、压力容器、船舶、海洋平台的焊接材料选用	507
第二节 焊接材料的使用管理	516
一、吸潮量对焊接材料性能的影响	516
二、焊接材料的烘焙	518
三、焊接材料的贮存保管	522
四、焊接材料使用现场的管理	523
参考文献	528

第一章 有关焊接材料的冶金基础

研究熔焊冶金规律的理论——焊接化学冶金学，从三十年代应用化学热力学研究冶金反应开始，半个世纪来有了较快的进展，已成为一个学科分支。它包括过程的热力学（反应方向）、动力学（反应机理与反应速度）、高温熔体（包括液态金属和熔渣）结构及其物化性能、结晶理论等内容，是研制焊接材料的理论基础。本书二至四章所介绍的许多改进焊条、焊丝和焊剂性能的技术途径与创新思路，就是对上述理论的应用和发展。但对焊接化学冶金的系统论述，不是本书的任务，请参见国内外有关文献^[1~9]。本章仅从低碳钢和低合金高强度钢焊接材料的角度出发，对其中的某些问题，作一概要阐述。

第一节 焊接材料的作用和类型

一、焊接材料的作用

本世纪初期出现的药皮焊条，标志着熔焊技术的一个重大进步。从那时开始，熔焊技术迅速走向实用化。三十年代推广药皮焊条手弧焊，四十年代推广埋弧自动焊，五十年代推广气体保护焊和电渣焊，迄今这几种焊接方法在低碳钢和低合金高强度钢焊接中仍占主导地位，应用最为广泛。它们的共同特点是以焊接材料作为焊缝填充金属的来源，依靠焊接材料来完成熔焊过程对液态金属的保护作用和冶金作用，以取得优质的焊缝金属。

（本章节内容仅供参考，不作为法律依据）

这几种焊接方法，如不采用合适的焊接材料，就根本不能在实际工程中应用。以电弧焊为例，如在空气中用裸焊丝焊接，将产生以下问题：

① 合金元素严重烧损。焊丝中的C、Mn、Si等元素将烧损30~70%，只有一部分能过渡到焊缝中去。

② 气体杂质大量侵入熔池。使焊缝中的含氧量可达0.15~0.3%，含氮0.10~0.20%，均比镇静钢的氧、氮含量高十倍以上，造成焊缝金属变脆。

③ 焊缝中产生大量气孔等焊接缺陷。

④ 电弧不稳，导致冶金过程不稳，焊缝金属成形极差。

由此可见，焊接材料的质量对保证药皮焊条手弧焊、埋弧焊、CO₂气体保护焊和电渣焊等熔焊过程的稳定性和获得优质焊缝金属，起着决定性作用。

归纳起来，焊接材料应具有以下作用：

① 对电弧焊保证电弧稳定燃烧和熔滴过渡顺利进行。对电渣焊保证电渣过程稳定。

② 焊接中保护液态熔池，防止空气侵入。

③ 进行冶金反应和过渡合金元素，按预期要求控制和调整焊缝金属的成分与性能。

④ 防止气孔和裂纹等焊接缺陷的产生。

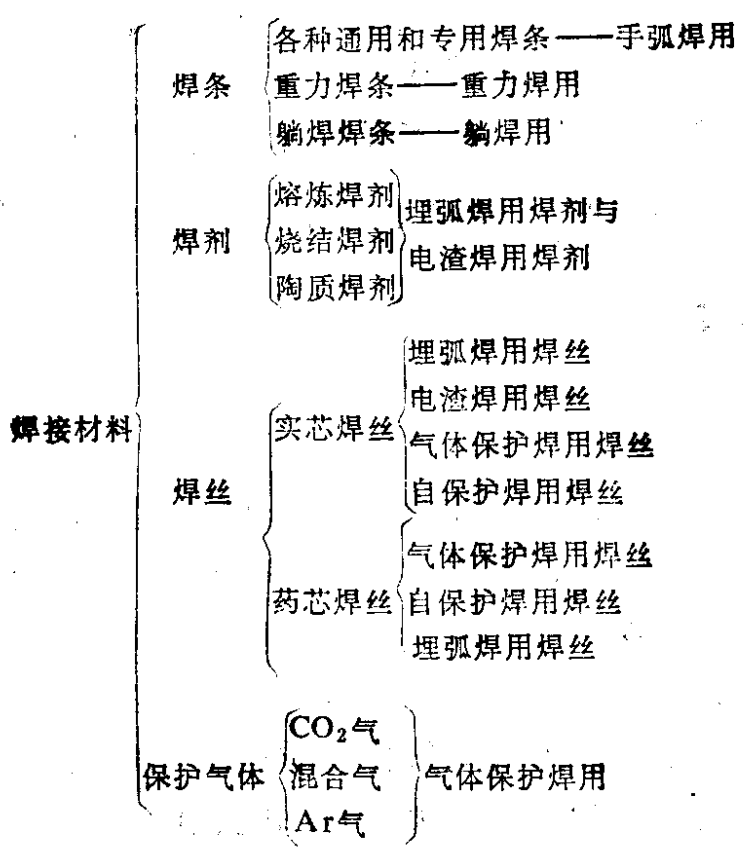
⑤ 改善施焊工艺性能和劳动卫生条件。

⑥ 在保证焊接质量的前提下尽可能提高焊接效率。

几十年来人们对焊接材料的改进和发展，都是致力于使焊接材料更好地发挥上述作用。

二、焊接材料的类型

低碳钢和低合金高强度钢常用焊接材料主要为焊条、焊剂、焊丝和保护气体四类；



这四类焊接材料的性能和应用范围将在本书后面几章中详细阐述。

焊接材料的比生产量（即每吨钢所需的焊接材料），1980年时日本为3.3kg/t，西德为3.4kg/t，法国为3.7kg/t，美国为4.1kg/t。所以各国焊接材料的产量随钢产量变化而波动。值得指出的是，由于焊条一般用于手弧焊，焊丝用于自动焊和半自动焊，因此各国焊条和焊丝产量的比例，在一定意义上可以表示该国电弧焊的自动化水平。近年来国外焊丝生产的增长速度较快。目前美、英、法、日等工业发达的国家，大体上焊条产量占60%，焊丝产量占40%，并正向各占50%的趋势发展。

我国当前焊条产量占焊接材料总产量的70~80%左右。今后，为提高焊接自动化的程度，要迅速发展焊丝、焊剂和

保护气体的生产。同时要努力提高焊条的质量,大力增加品种,不断进行产品的更新换代,以满足国民经济各部门对焊接材料日益增长的需要,为实现四个现代化作出贡献。

第二节 焊接电弧和熔滴过渡

一、焊接电弧的产生

电弧是所有电弧焊接方法的能源。它对电弧焊时的冶金过程有很大的影响。

在两个电极之间的气体介质中,强烈的自持气体放电现象叫作电弧。电弧的温度可达 $5000\sim 30000\text{K}$,是一种能量比较集中的局部热源。

在正常状况下,气体是不导电的,为了在气体中产生电弧,就必须使两电极间的气体介质连续不断地产生足够多的带电粒子(电子和正、负离子)。电弧中的带电粒子,主要依靠极间的气体电离和电极的电子发射两个过程来产生。

中性气体分子或原子分离为正离子与电子的现象称为电离。气体分子或原子在正常状态下是由数量相等的正电荷(原子核)和负电荷(电子)构成的一个稳定系统,要使其电离,即要破坏这种稳定系统,需要对这个系统施加外来的能量。使中性气体粒子电离所需的最低能量叫“电离势”,通常以电子伏特为单位。各种气体的电离势不同。只有当外加能量达到或超过电离势后,才能使该气体产生电离。

使阴极表面向外发射电子,也需给予足够的外加能量(如加热阴极和电场力的吸引)。使一个电子由阴极表面飞出所需的最低能量称为逸出功。各种材料的逸出功不同。

电弧焊时,为在两电极间的气体介质中连续产生带电粒子所需的外加能量,是由电焊机供给的。为了引燃电弧,一

般首先使焊条或焊丝端部与焊件接触而形成短路。由于接触表面不平整，实际上只有少数几个点真正接触，强大的短路电流从这些点通过，产生大量的电阻热，使焊条或焊丝末端和焊件接触部分迅速加热到熔化状态，甚至部分蒸发。当稍微提起焊条或焊丝使离开焊件时，焊机的空载电压加在焊条或焊丝端部与焊件之间，此时一方面阴极表面由于急剧加热和强电场吸引，产生了强烈的电子发射；另一方面两极间的气体（特别是易电离的金属蒸气），由于强烈加热和受到电子撞击而电离。这些带电粒子在电场作用下迅速运动，即形成了电弧。随后在电弧电压的作用下，这种过程不断反复进行，就形成了连续燃烧的焊接电弧。

焊接电弧，由三个电场强度不同的区域构成（图1-1）。阳极附近的区域为阳极区，阴极附近的区域为阴极区，中间部分为弧柱区。由于阳极不发射电子，不消耗发射电子所需能量，而只接受高速电子撞击给予的能量，因此阳极的发热量和温度高于阴极。在一般情况下阳极区产生的热量约占电弧总热量的43%，阴极区约占电弧总热量的36%。

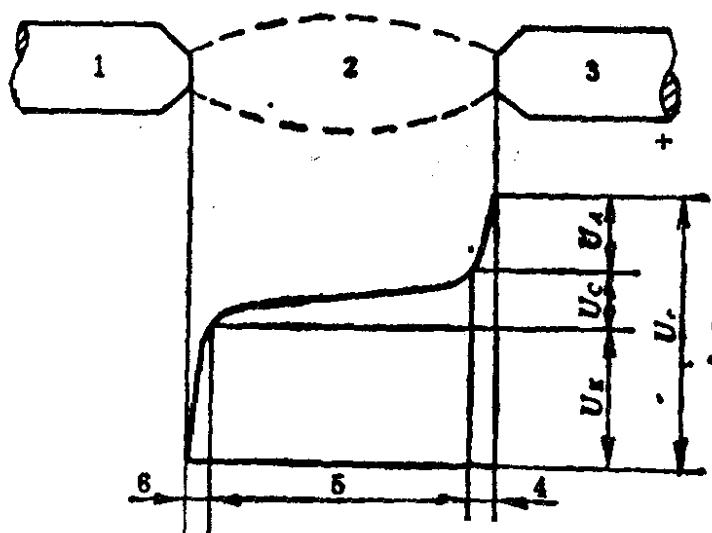


图1-1 电弧各区域的电压分布示意图

U_A —阳极电压降 U_C —阴极电压降 U_o —弧柱电压降 U_e —电弧电压

1—阴极 2—电弧 3—阳极 4—阳极压降区 5—弧柱区 6—阴极压降区

焊接电弧两极的温度受电极材料沸点的限制，故其温度大致在电极材料沸点左右。不同电极材料的电弧两极温度如表1-1所示。

表1-1 不同电极材料的电弧两极温度

电极材料	气体介质 (1atm①)	阴极温度 (K)	阳极温度 (K)	电极材料沸点 (K)
碳	空气	3500	4200	4830
铁	空气	2400	2600	3000
铜	空气	2200	2450	2595
镍	空气	2370	2450	2730
钨	空气	3640	4250	5930

① 1 atm = 101325 Pa 下同。

二、影响焊接电弧稳定性的因素

焊接电弧的稳定性，直接决定焊接过程能否连续顺利地进行并影响焊缝质量。电弧不稳易使焊缝与母材熔合不良、成形不好、产生气孔与夹渣等焊接缺陷。

除焊接参数等工艺因素对电弧稳定性有一定影响外，影响焊接电弧稳定性的主要因素，是焊接材料的性能和焊接电源的特性与种类。

众所周知，除焊接电源的外特性、调节特性、动特性和空载电压均影响电弧稳定性外，直流电源的稳弧性明显优于交流电源。因为用交流电施焊时，焊接电流每秒有50次正负极变换，电流每秒有100次通过零点，电流在每次通过零点时，电弧将瞬时熄灭。这样将使电子发射和气体电离减弱，易造成电弧不稳。如果在焊条药皮或焊剂中不含稳弧剂，则焊接电源的空载电压须大于100V，才能得到稳定的交流电弧。这显然是不安全的，应通过改善焊接材料的性能来解决这个问题。

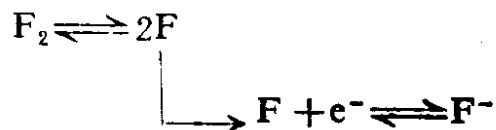
焊接材料的稳弧性取决于它的化学成分。前面已经述及，不同元素的电离势不同，见表1-2。电离势越小则越易电离。如所含易电离的元素及其化合物愈多，则电弧稳定性愈好。

酸性焊条药皮中，含有较多的云母、长石、钛铁矿或金红石及钾钠水玻璃等易电离的物质，因此一般电弧稳定性都不成问题，可在60V空载电压下用交流施焊。

表1-2 一些元素的电离势

元 素	$V_{\text{离}}(\text{eV})$	元 素	$V_{\text{离}}(\text{eV})$	元 素	$V_{\text{离}}(\text{eV})$
Cs	3.86	Yb	6.2	Si	8.15
K	4.34	Y	6.38	C	11.26
Na	5.14	Cr	6.76	H	13.6
Ba	5.21	Ti	6.82	O	13.61
Li	5.39	Mo	7.10	Co	14.01
Nd	5.51	Mn	7.43	N	14.53
Ce	5.60	Ni	7.63	Ar	15.76
Sm	5.60	Mg	7.64	F	17.42
Al	5.95	Cu	7.72	He	24.58
Ca	6.11	Fe	7.87		
Er	6.08	W	7.98		

碱性低氢型焊条和高氟型焊剂，一般只能采用直流焊接，交流稳弧性较差。这是由于药皮或焊剂中含有较多的氟化物（如 CaF_2 ），氟不仅电离势高，而且与电子的亲合力很大，能夺取电弧中的电子，形成负离子，减少电子的数量，从而降低电弧的稳定性。如



因此称氟化物为反电离物质。为提高碱性低氢型焊条与高氟型焊剂的交流稳弧性，应适当调整配方并加入强的稳弧剂，

将在后面章节中详述。

三、熔滴过渡的形式和特点

电弧焊时熔滴过渡的形式不但影响电弧的稳定性，而且影响焊接效率、飞溅率、焊缝成形和冶金过程。

电弧焊熔滴过渡形式比较复杂，按其形态可分为自由过渡、接触过渡和壁面过渡三类。自由过渡是指熔滴通过电弧空间进行的过渡，包括滴状过渡、喷射过渡和爆炸过渡。接触过渡是指悬垂在焊条或焊丝端部的熔滴通过和熔池接触而进行的过渡，主要为短路过渡。壁面过渡是指埋弧焊时熔滴沿渣壳内表面进行的过渡(渣壁过渡)和焊条熔滴沿套筒壁进行的过渡(附壁过渡)。不同焊接方法,其熔滴过渡有不同的特点,分述如下。

1. 药皮焊条手弧焊

关于焊条熔滴过渡的形式，各国研究工作者曾提出一些不同的意见。日本安藤弘平将其归结为喷射过渡、粗熔滴过渡和爆炸过渡^[10]，认为日本的钛型(D4313)焊条为喷射过渡、低氢型(D4316)焊条为粗熔滴过渡。苏联И.К.Походня将其划分为粗熔滴过渡、爆炸过渡和细熔滴过渡^[11]，认为苏联的大理石-萤石类型的焊条为粗熔滴过渡、氧化矿物型焊条为爆炸过渡、金红石型焊条为细熔滴过渡。

我国陆文雄等通过研究和测试归纳，认为宜将焊条熔滴过渡划分为粗熔滴短路过渡、附壁过渡、喷射过渡和爆炸过渡四种主要形式^[12]：

粗熔滴短路过渡 熔滴的颗粒度一般接近或超过焊芯的直径，过渡时伴随有搭桥短路过程。一般结507焊条以此种过渡形式为主。

附壁过渡 熔滴沿着焊条套筒壁，向熔池过渡。它与粗