

焊接材料选用

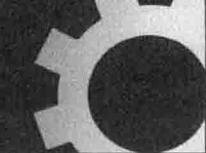
HANJIE
CAILIAO
XUANYONG



李亚江 等编著



化学工业出版社



焊接材料选用

**HANJIE
CAILIAO
XUANYONG**

李亚江 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

焊接材料选用/李亚江等编著. —北京: 化学工业出版社, 2014. 11

ISBN 978-7-122-21953-4

I. ①焊… II. ①李… III. ①焊接材料-基本知识
IV. ①TG42

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 228338 号

责任编辑: 周 红
责任校对: 陶燕华

文字编辑: 项 激
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 北京云浩印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张 22½ 字数 585 千字 2015 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 79.00 元

版权所有 违者必究

FOREWORD

前言

焊接技术是现代工业生产中不可缺少的加工方法。焊接材料是发展焊接技术的一个重要分支,涉及的范围十分广泛,能正确地选择和应用并非易事。随着科学技术的发展,焊接材料的品种和数量也在不断增加,并受到各行各业(机械、冶金、建筑、锅炉及压力容器、电力、桥梁、船舶、车辆、航空航天和核动力工程等)的极大关注。

焊接材料种类繁多,在工程应用中容易引起混乱。特别是我国制造业与国际接轨以后,焊接材料的型号已逐步向相关国际标准靠拢并正在逐步完善。为了更好地了解 and 掌握各种焊接材料的分类、特性和选用,在工程实践中需要一本指导焊接材料选用及应用的书籍。本书针对焊接结构中用量最大的一些焊接材料的特点,从实用性角度对焊接材料的选用等做了简明阐述,特别是根据工程结构及工艺特点,突出了各种焊接材料(焊条、焊丝、焊剂、保护气体、钎剂钎料、合金粉末等)的特点、选用及应用等,可以指导焊接生产中焊材的选用。本书特点在于简明扼要、层次分明、直观易懂、系统性强,并力求突出新颖性、实用性和先进性等特色。为读者掌握各种焊接材料的特点及选用提供理论基础和生产实践中成功的经验。本书在内容选择上以实用性为原则,书中采用新的国家标准和技术资料,力求概念清楚、数据可靠、便于查阅和有较强的实用性,反映了当前焊接材料的应用现状。

本书由李亚江等编著,其他编写人员还有:张永喜、王娟、马群双、刘坤、许红、刘鹏、陈茂爱、孙俊生、高进强、刘如伟、马海军、沈孝芹、蒋庆磊、夏春智、吴娜、张永兰、魏守征、黄万群、刘强、杜红燕等。

本书的出版旨在期望能对读者正确选择和使用各类焊接材料有所帮助,供从事与制造业、材料加工和焊接技术相关的工程技术人员、采购和管理人员使用,也可供高等院校师生、科研和企事业单位的科技人员使用和参考。

限于作者水平,书中难免存在不当之处,敬请读者批评指正。

编著者

CONTENTS

目录

1

第1章 概述

1.1 焊接材料的作用	1
1.1.1 焊条、焊丝和焊剂的作用	2
1.1.2 熔渣在焊接过程中的作用	3
1.1.3 焊缝金属的合金化	5
1.2 合金元素和有害杂质	8
1.2.1 合金元素对焊接性能的影响	8
1.2.2 有害元素及含量控制	9
1.3 焊接材料的发展现状	13
1.3.1 焊接材料的历史发展	13
1.3.2 钢材发展对焊材的影响	13
1.3.3 我国焊接材料的发展现状	15
1.3.4 焊材发展中应注意的问题	18

19

第2章 电焊条

2.1 电焊条的分类	19
2.1.1 按用途分类	19
2.1.2 按熔渣的酸碱性分类	20
2.1.3 按药皮主要成分分类	20
2.1.4 按焊条性能分类	22
2.2 电焊条的组成	22
2.2.1 焊芯	22
2.2.2 药皮	25
2.3 电焊条的型号和牌号	28
2.3.1 电焊条的型号	28
2.3.2 电焊条的牌号	63

2.4 焊条制造及药皮配方设计	69
2.4.1 焊条的制造工艺流程	69
2.4.2 焊条设计原则、依据和方法	70
2.4.3 焊条药皮设计步骤	70
2.4.4 典型焊条药皮的配方设计	73
2.5 电焊条的选用	77
2.5.1 焊条的选用原则	77
2.5.2 碳钢和低合金钢焊条的选用	78
2.5.3 不锈钢焊条的选用	131
2.5.4 铸铁及堆焊焊条的选用	131
2.5.5 有色金属焊条的选用	132
2.6 电焊条检验技术	133
2.6.1 焊条原材料的检验	133
2.6.2 焊条生产过程中的技术检验	135
2.6.3 焊条成品的检验	137
2.6.4 焊条熔敷金属理化性能试验	142

146

第3章 焊丝

3.1 焊丝的分类及特点	146
3.1.1 实芯焊丝的分类及特点	146
3.1.2 药芯焊丝的分类及特点	147
3.2 焊丝的型号与牌号	150
3.2.1 实芯焊丝的型号与牌号	150
3.2.2 药芯焊丝的型号与牌号	152
3.3 焊丝的成分、性能和用途	159
3.3.1 实芯焊丝的成分、性能和用途	159
3.3.2 药芯焊丝的成分、性能和用途	174
3.4 焊丝的选用	176
3.4.1 焊丝选用的要点	176
3.4.2 实芯焊丝的选用	176
3.4.3 药芯焊丝的选用	185
3.4.4 自保护药芯焊丝	185

188

第4章 焊剂

4.1 焊剂的分类及特点	188
4.1.1 按制造方法分类	188
4.1.2 按化学成分或渣系分类	189
4.1.3 按焊剂的化学性质分类	190

4.1.4 按熔渣的碱度分类	191
4.1.5 按焊剂的用途分类	191
4.2 焊剂的型号与牌号	191
4.2.1 焊剂的型号	192
4.2.2 焊剂的牌号	194
4.3 焊剂的组成、性能及应用特点	197
4.3.1 焊剂的组成	197
4.3.2 焊剂的工艺特点及用途	200
4.4 焊剂与焊丝的选配	213
4.4.1 对焊剂工艺性能及质量的要求	213
4.4.2 低碳钢埋弧焊焊剂与焊丝的选配	214
4.4.3 低合金钢埋弧焊焊剂与焊丝的选配	215
4.4.4 不锈钢埋弧焊焊剂与焊丝的选配	217
4.4.5 其他高合金钢埋弧焊焊剂与焊丝的选配	219
4.4.6 有色金属埋弧焊焊剂与焊丝的选配	220
4.4.7 电渣焊焊剂及焊丝的选配	221

223

第5章 焊接用气体

5.1 焊接用气体的分类	223
5.1.1 保护气体	223
5.1.2 气焊、切割用气体	224
5.2 焊接用气体的特性	225
5.2.1 二氧化碳气体 (CO_2)	225
5.2.2 氩气 (Ar)	229
5.2.3 氦气 (He)	230
5.2.4 氧气 (O_2)	232
5.2.5 可燃气体 (C_2H_2 、 C_3H_8 、 C_3H_6 、 CH_4 、 H_2)	235
5.2.6 氮气 (N_2)	240
5.3 焊接用气体的选用	240
5.3.1 根据焊接方法选用气体	241
5.3.2 根据被焊材料选用气体	241
5.3.3 混合气体的性质及选用	244
5.3.4 激光焊用保护气体	246

248

第6章 钎剂与钎料

6.1 钎焊方法的分类	248
6.2 钎剂的分类及特点	250
6.2.1 对钎剂的基本要求	250

6.2.2	钎剂的分类	251
6.2.3	钎剂的型号与牌号	256
6.3	钎料的分类及特点	258
6.3.1	对钎料的基本要求	258
6.3.2	钎料的分类	258
6.3.3	钎料的型号与牌号	259
6.3.4	常用钎料的成分及熔化温度	260
6.4	钎料的选用及钎焊工艺	274
6.4.1	钎料的选用原则	274
6.4.2	钎剂的选用	275
6.4.3	常用钎料的特性及用途	276
6.4.4	钎焊工艺及参数	281

286

第7章 热喷涂材料

7.1	热喷涂材料的分类	286
7.1.1	按材料形状分类	286
7.1.2	按材料成分分类	286
7.1.3	按材料性质分类	288
7.2	热喷涂丝材的成分与特性	290
7.2.1	金属及合金热喷涂丝材	290
7.2.2	复合热喷涂丝材	293
7.3	热喷涂合金粉末的成分与特性	293
7.3.1	喷涂合金粉末	293
7.3.2	喷熔合金粉末	296
7.3.3	陶瓷及复合材料合金粉末	298
7.3.4	喷涂塑料粉末	300
7.4	热喷涂材料的选用	301
7.4.1	根据热喷涂工艺方法选用	302
7.4.2	根据被喷涂工件的使用要求选用	302
7.4.3	热喷涂气体的选用	303

306

第8章 气焊熔剂和 A-TIG 活性剂

8.1	气焊熔剂的分类、成分及使用方法	306
8.1.1	气焊熔剂的分类	306
8.1.2	气焊熔剂的成分及用途	307
8.1.3	对气焊熔剂的要求及使用方法	309
8.2	气焊熔剂的选用	309
8.2.1	镍及镍合金气焊熔剂	310

8.2.2	镁及镁合金气焊熔剂	310
8.2.3	铜及铜合金气焊熔剂	310
8.2.4	铝及铝合金气焊熔剂	311
8.3	氩弧焊用活性剂	312
8.3.1	A-TIG 焊活性剂的特点	312
8.3.2	碳钢 A-TIG 焊活性剂	313
8.3.3	不锈钢 A-TIG 焊活性剂	313
8.3.4	铝合金 A-TIG 焊活性剂	314

315

第9章 焊接用电极材料

9.1	钨极氩弧焊及等离子弧焊用电极	315
9.1.1	钨极的种类及特点	315
9.1.2	钨极承载电流的能力	316
9.1.3	钨极的表面质量和形状尺寸	317
9.1.4	氩弧焊钨极的选用	318
9.2	电阻焊用电极	319
9.2.1	电阻焊用电极的功能及损坏形式	319
9.2.2	电阻焊用铜电极材料	320
9.2.3	电阻焊用电极材料的选用要点	325
9.3	碳弧气刨用电极	327
9.3.1	圆炭棒和矩形炭棒	327
9.3.2	炭棒的选用及特殊炭棒	328

329

第10章 焊接材料的使用及保管

10.1	电焊条的烘干、储存和用量计算	329
10.1.1	电焊条的烘干	329
10.1.2	电焊条的储存及保管	332
10.1.3	电焊条需用量的计算	333
10.2	焊丝的使用及保管	338
10.2.1	焊丝的吸潮性	338
10.2.2	焊丝的保管及质量管理	338
10.2.3	焊丝需用量的计算	339
10.3	焊接用气体的使用及保管	342
10.3.1	气瓶的使用及保管	342
10.3.2	氧气的使用及保管	343
10.3.3	乙炔的使用及保管	344
10.3.4	其他气体的使用及保管	345
10.4	焊剂及钎焊材料的使用及保管	345

10.4.1	焊剂的使用及保管	345
10.4.2	钎焊材料的使用及保管	347
10.4.3	钎料、钎剂的安全注意事项	347

349

参考文献

第1章

概述



焊接过程中的各种填充金属及为了提高焊接质量而附加的保护物质统称为焊接材料。随着焊接技术的迅速发展,焊接材料的应用范围日益扩大。焊接材料在造船、石油化工、车辆、电力、核反应堆等领域中起着非常重要的作用。而且,焊接技术的发展对焊接材料在品种和产量方面都提出了越来越高的要求。焊接材料种类繁多,在应用中容易引起混乱。特别是中国加入 WTO 以后,许多焊接材料已逐步向国际标准靠拢,了解各种焊接材料的特点对正确选用焊接材料具有十分重要的意义。

1.1 焊接材料的作用

焊接过程中用以进行焊接连接的消耗材料统称为焊接材料。焊接生产中广泛使用的焊接材料主要包括焊条、焊丝、焊剂、保护气体和钎剂、钎料等。不同焊接工艺条件下采用的焊接材料见表 1.1。

表 1.1 不同焊接工艺条件下采用的焊接材料

焊接工艺	焊接材料
气焊	气焊熔剂(焊粉)
焊条电弧焊	电焊条(普通焊条、专用焊条、自动盘状焊条)
气体保护焊	焊丝(实芯焊丝、药芯焊丝)+保护气体(活性气体、惰性气体、混合气体)
埋弧焊、电渣焊	焊丝、带极+焊剂(熔炼焊剂、非熔炼焊剂)
钎焊	钎剂、钎料
堆焊	焊条、焊丝、带极、焊剂
热喷涂	丝极、带极、合金粉末(打底面粉末、工作面粉末)
其他	保护气体、衬垫、熔嘴

上述几种焊接工艺方法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焊接过程对液态熔池的保护作用和冶金作用,以获得优质的焊缝金属。焊条、焊丝、焊剂以及保护气体等,是进行必要的焊接冶金反应和保证焊接质量所必需的,因此焊接材料不仅影响焊接过程的稳定性、焊接接头质量及使用性能,同时也影响着焊接生产率。

各国焊条和焊丝产量的比例,在一定程度上反映了该国的焊接自动化水平。我国目前焊条产量约占焊材总产量的 50%,气体保护焊焊丝产量占 30%~40%,低于欧、美等工业发达国家的自动化水平。我国生产的低碳钢焊条以钛钙型焊条为主,低合金高强度钢焊



条以低氢型焊条为主，钛钙型和低氢型焊条约占焊条总量的 90%。

焊接材料的质量对保证焊接过程的稳定和获得满足使用要求的焊缝金属起着决定性的作用。归纳起来，焊接材料应具有以下作用。

① 保证电弧稳定燃烧和焊接熔滴金属容易过渡。

② 在焊接电弧的周围造成一种还原性或中性的气氛，保护液态熔池金属，以防止空气中氧、氮等侵入熔敷金属。

③ 进行冶金反应和过渡合金元素，调整和控制焊缝金属的成分与性能。

④ 生成的熔渣均匀覆盖在焊缝金属表面，防止气孔、裂纹等焊接缺陷产生，并获得良好的焊缝外形。

⑤ 改善焊接工艺性能，在保证焊接质量的前提下尽可能提高焊接效率。

此外，在焊条药皮、焊剂中加入一定量的铁粉，可以改善焊接工艺性能或提高熔敷效率。

1.1.1 焊条、焊丝和焊剂的作用

焊条、焊丝是焊接回路中的一个组成部分。在焊接过程中，焊芯和焊丝不仅可以传导电流，而且作为与焊件产生电弧的一个电极。同时，焊芯和焊丝还起着填充金属的作用。焊接时用于加热和熔化焊条（或焊丝）的热能有电阻热、电弧热和化学反应热（一般情况下化学反应热仅占 1%~3%）。在焊接热源作用下，焊芯或焊丝受热熔化，以熔滴的形式进入熔池，并与熔化了母材共同组成焊缝。

埋弧焊和电渣焊所使用的焊接材料是焊剂和焊丝（或带极）。焊丝的作用相当于焊条中的焊芯，焊剂的作用相当于药皮。在焊接过程中焊剂的作用是隔离空气、保护焊接区金属，使其不受空气的侵害，以及进行冶金处理作用。因此，焊丝与焊剂配合使用是决定焊缝金属化学成分和力学性能的重要因素。

用低碳钢光焊丝在空气中无保护焊接时，焊缝金属的成分和性能与母材和焊丝比较，发生了很大的变化。由于熔化金属与周围空气的相互作用，使焊缝金属中氧、氮、氢的含量显著增加。氮含量可达 0.105%~0.218%，比焊丝中氮含量高 20~45 倍；氧含量可达 0.14%~0.72%，比焊丝中氧含量高 7~35 倍。同时锰、碳等合金元素因烧损和蒸发而减少。这时焊缝金属的塑性和韧性急剧下降，但是由于氮的强化作用，焊缝强度变化比较小。

用光焊丝焊接时，电弧不稳定，焊缝中产生大量气孔。光焊丝无保护焊接，没有实用价值，但在光焊丝表层涂覆电离薄层的自保护焊丝有应用前景。焊条药皮、焊剂和保护气体的作用是对焊接区内的金属加强保护，以免受空气的有害影响。为了提高焊缝金属的质量和性能，采用熔焊方法用于制造重要金属结构时，须尽量减少焊缝金属中有害杂质的含量和合金元素的损失，使焊缝金属得到合适的化学成分。大多数熔焊方法都是基于加强保护的思路发展和完善起来的。熔化焊接方法的保护方式见表 1.2。

表 1.2 熔化焊接方法的保护方式

保护方式	焊接方法
熔渣	焊条电弧焊、埋弧焊、电渣焊、药芯焊丝气体保护焊
气体	气焊、CO ₂ 气体保护焊、氩弧焊(TIG、MIG)、混合气体保护焊(MAG)
熔渣和气体	具有造气成分的焊条电弧焊、药芯焊丝气体保护焊
真空	真空电子束焊
自保护	用含有脱氧剂的自保护焊丝的焊接

各种保护方式的保护效果是不同的。埋弧焊是利用焊剂及其熔化以后形成的熔渣隔离空气保护焊接区域的,焊剂的保护效果取决于焊剂的组成和粒度。气体保护焊的保护效果取决于保护气体的性质与纯度。一般说来,惰性气体(氩、氦等)的保护效果比较好,适用于焊接合金钢和化学活性金属及其合金。

焊条药皮和焊丝药芯一般由造气剂、造渣剂和铁合金等组成,这些物质在焊接过程中能形成渣-气联合保护。造渣剂熔化以后形成熔渣,覆盖在熔滴和熔池的表面上将空气隔开。熔渣凝固以后,在焊缝上面形成渣壳,可以防止处于高温的焊缝金属与空气接触。造气剂受热后分解,析出大量气体,将焊接区与空气隔离开。焊条和药芯焊丝的保护效果,取决于其中保护材料的含量、熔渣的性质和焊接工艺参数等。

自保护焊是利用特制的实芯或药芯光焊丝在空气中焊接的一种方法。自保护焊不是利用机械隔离空气的办法来保护金属,而是在焊丝或药芯中加入脱氧剂和脱氮剂,使由空气进入熔化金属中的氧和氮进入熔渣中,故称自保护。实芯自保护焊丝的保护效果欠佳,焊缝金属的塑性和韧性偏低,多用于耐磨堆焊。

1.1.2 熔渣在焊接过程中的作用

焊条药皮、焊剂和药芯焊丝中的药芯,在焊接过程中受热熔化后经过一系列化学冶金变化形成覆盖于焊缝表面的非金属物质,称为焊接熔渣。焊接熔渣在焊接冶金过程中具有十分重要的作用。

① 机械保护作用 焊条药皮受热析出气体并形成熔渣,把液态金属与空气隔离开,对液态熔池起保护作用,防止氮气等有害气体侵入焊接区域。熔渣凝固后形成的渣壳覆盖在焊缝表面,可以防止处于高温的焊缝金属被氧化,并可减慢焊缝金属的冷却速度。

② 冶金处理作用 焊条药皮(或焊剂)熔化形成的熔渣与液态金属发生一系列冶金反应,对焊接熔池的化学成分有重要的影响。熔渣与焊芯配合,通过化学冶金反应可以去除熔融焊缝中的有害杂质(如O、N、H、S、P等),保护或渗入有益的合金元素,使焊缝金属具有较强的抗气孔能力、抗裂性以及满足使用要求的力学性能。

③ 改善焊接工艺性能 良好的焊接工艺性能是保证焊接化学冶金反应顺利进行和获得优质焊缝的重要条件。焊条药皮中一般含有易电离物质,形成成分、性能适宜的熔渣,使电弧容易引燃,保证焊接电弧稳定燃烧、飞溅小、焊缝成形美观、易于脱渣、适于各种空间位置的焊接等。

焊接熔渣在一定条件下也可能产生不利的作用,如烧损焊缝金属中的合金元素、产生气孔、夹渣等焊接缺陷、造成脱渣困难而影响焊接生产率等。为了使焊接熔渣起到预期的良好作用,关键在于通过调整和控制熔渣的化学成分和质量分数,使其具有合适的物理化学性质。

(1) 焊接熔渣的分类及特点

焊接熔渣根据成分的不同可分为三大类。常用药皮焊接熔渣的化学成分见表1.3。

表 1.3 常用药皮焊接熔渣的化学成分

药皮类型	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	CaF ₂	碱度	熔渣类型
钛铁矿型	29.2	14.0	1.1	15.6	26.5	8.7	1.3	1.4	1.1	—	1.26	氧化物型
钛型	23.4	37.7	10.0	6.9	11.7	3.7	0.5	2.2	2.9	—	0.45	氧化物型
钛钙型	25.1	30.2	3.5	9.5	13.7	8.8	5.2	1.7	2.3	—	0.74	氧化物型
纤维素型	34.7	17.5	5.5	11.9	14.4	2.1	5.8	3.8	4.3	—	0.81	氧化物型



续表

药皮类型	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	CaF ₂	碱度	熔渣类型
氧化铁型	40.4	1.3	4.5	22.7	19.3	1.3	4.6	1.8	1.5	—	1.22	氧化物型
低氢型	24.1	7.0	1.5	4.0	3.5	35.8	—	0.8	0.8	20.3	1.44	盐-氧化物型

注：碱度计算公式为

$$BL = 6.05CaO + 4.8MnO + 4.0MgO + 3.4FeO - 6.31SiO_2 - 4.97TiO_2 - 0.2Al_2O_3。$$

① 盐型熔渣 主要由金属的氟酸盐、氯酸盐和不含氧的化合物组成，如 CaF_2 -NaF、 CaF_2 -BaCl₂-NaF、KCl-NaCl-Na₃AlF₆、 BaF_2 -MgF₂- CaF_2 -LiF 等渣系。这类熔渣的氧化性很小，主要用于焊接铝、钛和其他化学活性金属及合金，有时也可用于焊接含活性元素的高合金钢。

② 盐-氧化物型熔渣 主要由氟化物和强金属氧化物组成，如常用的 CaF_2 -CaO- Al_2O_3 、 CaF_2 -CaO-SiO₂、 CaF_2 -CaO- Al_2O_3 -SiO₂、 CaF_2 -CaO-MgO- Al_2O_3 等渣系。因为这类熔渣的氧化性比较小，主要用于焊接高合金钢及其合金。

③ 氧化物型熔渣 主要由金属氧化物组成，如应用很广泛的 MnO-SiO₂、FeO-MnO-SiO₂、CaO-TiO₂-SiO₂ 等渣系。这类渣系的熔渣主要用于焊接低碳钢和低合金钢。

焊剂和药芯焊丝所形成的熔渣，可以按碱度区分为酸性渣和碱性渣两大类。这种由于碱度不同而具有不同结构的熔渣，反映在熔渣的物理化学性质上也有所不同，对焊接工艺性能带来明显的影响。

根据对固态熔渣断口状态的观察发现，碱度大小对熔渣固态下的断口状态有重要影响。碱性熔渣断口呈明显的结晶状或石头状，酸性熔渣断口呈明显的玻璃状，中性熔渣断口则是结晶状与玻璃状混合，以玻璃状为主。

(2) 熔渣中主要化合物的熔点和密度

焊接熔渣的熔点和密度直接影响焊条的工艺性能，对焊接冶金过程也有重要的影响。焊条药皮的熔化温度称为造渣温度，它不同于熔渣的熔点，比熔渣的熔点高 100~200℃。一般要求药皮的造渣温度比焊芯的熔点低 100~250℃。熔渣的熔点取决于熔渣的化学成分，焊接熔渣中几种主要化合物的熔点和密度见表 1.4。

表 1.4 焊接熔渣中几种主要化合物的熔点和密度

化合物	熔点/℃	密度/g·cm ⁻³	化合物	熔点/℃	密度/g·cm ⁻³
CaO	2924	3.32	B ₂ O ₃	450	3.33
CaF ₂	1418	2.80	ZrO ₂	2700	5.56
CaS	—	2.80	BaO	1925	—
MgO	2800	3.50	KF	857	—
MgF ₂	1260	—	Na ₂ O	920	2.27
Al ₂ O ₃	2050	3.37	NaF	997	—
Cu ₂ O	2230	6.00	NbO	1935	—
CuO	1447	—	NbO ₂	2083	—
FeO	1370	5.90	P ₂ O ₅	680	2.39
Fe ₂ O ₃	1560	5.20	V ₂ O ₃	2000	4.87
Fe ₃ O ₄	1597	—	V ₂ O ₅	670	—
FeS	1193	4.60	WO ₂	1573	—

续表

化合物	熔点/℃	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	化合物	熔点/℃	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
MnO	1585	5.11	La_2O_3	—	6.51
MnO_2	1650	—	BeO	—	3.03
MnS	1620	—	CeO_2	—	7.13
SiO_2	1713	2.26	PbO	—	9.21
TiO_2	1825	4.24	$\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	1540	—
TiO_4	1920	—	$(\text{CaO})_2 \cdot \text{SiO}_2$	1540	—
Cr_2O_3	2297	5.21	$\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$	1270	3.60
NiO	1960	—	$(\text{MnO})_2 \cdot \text{SiO}_2$	1326	4.10
MoO_3	795	—	$(\text{FeO})_2 \cdot \text{SiO}_2$	1250	4.30
ZnO	2075	5.47			

1.1.3 焊缝金属的合金化

焊接材料（焊条、焊丝、焊剂）的成分对焊缝金属的化学成分、组织和性能有重要的影响。为了使焊缝金属具有所要求的成分与性能，必须保证焊接材料中有益合金元素的含量和严格控制有害杂质的含量。

(1) 焊缝合金化的方式

焊缝金属的合金化就是把所需的合金元素通过焊材过渡到焊缝金属（或堆焊金属）中去。焊接中合金化的目的是补偿焊接过程中由于蒸发、氧化等原因造成的合金元素的损失，消除焊接缺陷（裂纹、气孔等）和改善焊缝金属的组织 and 力学性能，或者是获得具有特殊性能的堆焊金属。

对金属焊接性影响较大的合金元素主要有：C、Mn、Si、Cr、Ni、Mo、Ti、V、Nb、Cu、B等；低合金钢焊接中提高热影响区淬硬倾向的元素有：C、Mn、Cr、Mo、V、W、Si等；降低淬硬倾向的元素有：Ti、Nb、Ta等。还应特别注意一些微量元素的作用，如B、N、RE等。

焊接中常用的合金化方式有以下几种。

① 应用合金焊丝或带极 把所需要的合金元素加入焊丝、带极或板极内，配合碱性药皮或低氧、无氧焊剂进行焊接或堆焊，把合金元素过渡到焊缝或堆焊层中去。这种合金化方式的优点是可靠，焊缝成分均匀、稳定，合金损失少；缺点是制造工艺复杂，成本高。对于脆性材料，如硬质合金不能轧制、拔丝，故不能采用这种方式。

② 应用合金药皮或非熔炼焊剂 把所需要的合金元素以铁合金或纯金属的形式加入药皮或非熔炼焊剂中，配合普通焊丝使用。这种合金化方式的优点是简单方便，制造容易，成本低。但由于氧化损失较大，并有一部分合金元素残留在渣中，故合金利用率较低，合金成分不够稳定、均匀。

③ 应用药芯焊丝或药芯焊条 药芯焊丝的截面形状是各式各样的，最简单的是具有圆形断面的，外皮可用低碳钢或其他合金钢卷制而成，里面填满需要的铁合金及铁粉等物质。用这种药芯焊丝可进行埋弧焊、气体保护焊和自保护焊，也可以在药芯焊丝表面涂上碱性药皮，制成药芯焊条。这种合金过渡方式的优点是药芯中合金成分的配比可以任意调整，因此可得到任意成分的堆焊金属，合金的损失较少。缺点是不易制造，成本较高。

④ 应用合金粉末 将需要的合金元素按比例配制成具有一定粒度的合金粉末，把它



输送到焊接区，或直接涂覆在焊件表面或坡口内。合金粉末在热源作用下与母材熔合后就形成合金化的堆焊金属。这种合金过渡的优点是合金成分的比例调配方便，不必经过轧制、拔丝等工序，合金损失小。缺点是合金成分的均匀性较差，制粉工艺较复杂。

还可通过从金属氧化物中还原金属元素的方式来合金化，如硅、锰还原反应。但这种方式的合金化的程度是有限的，还会造成焊缝增氧。

在实际生产中可根据具体条件和要求选择合金化方式。焊接材料中的合金成分是决定焊缝成分的主要因素。改进和研制焊条、焊丝、焊剂时，必须根据焊接接头工作条件设计焊缝金属的最佳化学成分，以保证焊缝性能满足使用要求。

(2) 熔合比及合金过渡系数

① 熔合比 焊缝金属一般由填充金属和局部熔化的母材组成。在焊缝金属中局部熔化的母材所占的比例称为熔合比，可通过试验的方法测得。熔合比取决于焊接方法、母材性质、接头形式和板厚、工艺参数、焊接材料种类等因素。焊接工艺条件对低碳钢熔合比的影响如表 1.5 所示。

表 1.5 焊接工艺条件对低碳钢熔合比的影响

焊接方法	接头形式	工件厚度 /mm	熔合比 θ
焊条电弧焊	对接, 不开坡口	2~4	0.4~0.5
		10	0.5~0.6
	对接, 开 V 形坡口	4	0.25~0.5
		6	0.2~0.4
		10~20	0.2~0.3
	角接及搭接	2~4	0.3~0.4
		5~20	0.2~0.3
	堆焊	—	0.1~0.3
埋弧焊	对接	10~30	0.3~0.6
熔化极气体保护焊	对接	10~30	0.2~0.3
非熔化极气体保护焊	对接	10~30	0.2~0.8

熔合比随着焊接电流的增大而增加，随着电弧电压和焊接速度的增加而减小。为了减小熔合比，应选用熔深小的焊接工艺。同一种焊接方法，采取不同的工艺措施，熔合比可在较大范围变化，如图 1.1 所示。因为焊接热输入、弧长、坡口形状和尺寸、焊丝摆动、熔滴过渡形式等都对熔深有影响。焊条电弧焊的熔合比可达 30%；熔化极气体保护焊在 20%~30% 范围，其中喷射过渡的熔合比最大，短路过渡时最小；埋弧焊熔深较大，熔合比在 20%~60% 范围。应尽可能把熔合比控制到最小且均匀。母材的热物理性能对熔合比影响也很大。在同样的焊接条件下，热导率小的材料比热导率大的材料的熔合比要大一些。

当母材和填充金属的成分不同时，熔合比对焊缝金属的成分有很大影响。焊缝金属中的合金元素浓度称为原始浓度，它与熔合比 θ 的关系为

$$C_0 = \theta C_b + (1 - \theta) C_e \quad (1-1)$$

式中 C_0 ——某元素在焊缝金属中的原始含量，%；

C_b ——该元素在母材中的含量，%；

C_e ——该元素在焊条中的含量，%；

θ ——熔合比。

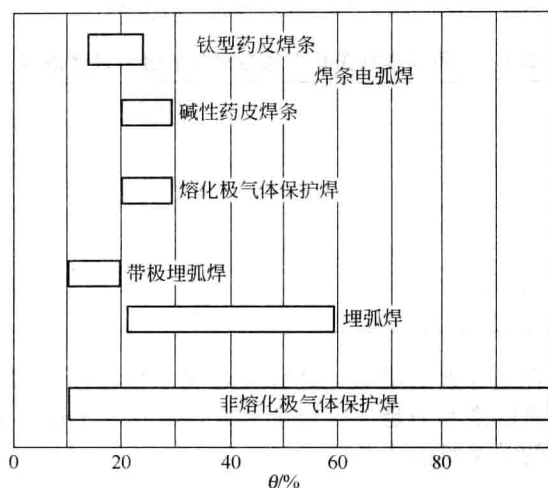


图 1.1 焊接方法对熔合比的影响

实际上,焊条中的合金元素在焊接过程中是有损失的,而母材中的合金元素几乎全部过渡到焊缝金属中。这样,焊缝金属中合金元素的实际浓度 C_w 为

$$C_w = \theta C_b + (1 - \theta) C_d \quad (1-2)$$

式中 C_d ——熔敷金属(焊接得到的没有母材成分的金属)中元素的实际含量, %。

C_b , C_d , θ 可由技术资料中查得或用化学分析和试验的方法得到。

式(1-2)表明,通过改变熔合比可以改变焊缝金属的化学成分。因此保证焊缝金属成分和性能的稳定性,必须严格控制焊接工艺条件,使熔合比稳定、合理。在堆焊时,可以调整焊接工艺参数使熔合比尽可能小,以减少母材成分对堆焊层性能的影响。

② 合金过渡系数 焊缝中合金元素的过渡系数 η 等于熔敷金属中的实际含量与它的原始含量之比,即

$$\eta = \frac{C_d}{C_e} = \frac{C_d}{C_{cw} + K_b C_{co}} \quad (1-3)$$

式中 C_d ——合金元素在熔敷金属中的含量, %;

C_e ——合金元素的原始含量, %;

K_b ——药条重量系数, %;

C_{co} ——合金元素在药皮中的含量, %;

C_{cw} ——合金元素在焊芯中的含量, %。

若已知 η 值及有关数据,则可利用上式计算出合金元素在熔敷金属中的含量 C_d 。根据熔合比可计算出合金元素在焊缝中的含量。同样,根据对熔敷金属成分的要求,可计算出焊条药皮中应具有的合金元素含量 C_{co} ,然后再通过试验加以校正。

式(1-3)是总的合金过渡系数,它不能说明合金元素由焊丝和药皮每一方面过渡的情况。这两种情况下的合金过渡系数是不相等的,尤其是当药皮氧化性较强时更为明显。只有在药皮氧化性很小,而且残留损失不大的情况下,它们的合金过渡系数才接近相等。一般情况下,通过焊丝过渡时合金过渡系数大,而通过药皮过渡时合金过渡系数较小。

不同焊接条件下通过焊丝的合金过渡系数见表 1.6。

当几种合金元素同时向焊缝中过渡时,其中对氧亲和力大的元素依靠自身的氧化可减少其他元素的氧化,提高它们的合金过渡系数。例如,在碱性药皮中加入 Al 和 Ti,可提高 Si 和 Mn 的合金过渡系数。1600℃ 各种合金元素对氧亲和力由小到大的顺序为: Cu、