

实用焊接技术丛书

异种难焊材料的焊接及应用

李亚江 王娟 刘鹏 编著

化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

异种难焊材料的焊接及应用/李亚江,王娟,刘鹏编
著. —北京:化学工业出版社,2003.12
(实用焊接技术丛书)

ISBN 7-5025-2772-9

I. 异… II. ①李…②王…③刘… III. 异种金属焊接 IV. TG457.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 117937 号

实用焊接技术丛书
异种难焊材料的焊接及应用

李亚江 王娟 刘鹏 编著

责任编辑:任文斗

文字编辑:王清颢

责任校对:凌亚男

封面设计:潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话:(010)64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

北京市彩桥印刷厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 20 $\frac{1}{4}$ 字数 499 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-2772-9/TH·63

定 价:42.00 元

版权所有 违者必究
该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

前 言

现代工业的发展和科学技术的进步，对焊接构件的性能提出了更高、更苛刻的要求，除需满足通常的力学性能之外，还要求满足如高温强度、耐磨性、耐腐蚀性、低温韧性、磁性、导电性、导热性等多方面的性能要求。在这种情况下，任何一种金属材料都不可能完全满足整体焊接结构的使用要求。即使可能有某种金属材料相对比较理想一些，也常常由于十分稀缺、价格昂贵，而不能在工程中实际应用。

现代工程结构中不仅需要同种材料进行焊接，也需要对异种材料进行焊接。异种材料焊接是工业生产中不可缺少的一种先进制造技术，也是现代国民经济的各部门中经常遇到的问题。异种材料焊接构件的特点是能够最大限度地利用材料的各自优点，收到“物尽其用”的效果。但是，焊接异种材料通常要比焊接同种材料困难，因为除了材料本身的物理化学性能对焊接性的影响之外，两种材料性能的差异会在更大程度上影响它们之间的焊接性。例如，低碳钢本身焊接性好，但低碳钢与高合金钢或有色金属焊接则难度很大，需要采用特殊的工艺方法及技术措施。

本书从实用性角度对异种材料焊接及工程应用做了简明地阐述，特别是针对工程结构中异种材料的焊接性特点、焊接材料和焊接工艺要点等进行分析，力求突出新颖性、实用性和先进性等特色。本书突出了不同异种材料焊接组合的工艺特点和应用范围，给出了具体的焊接工艺参数、相关技术数据及针对一些典型异种材料工程结构的焊接应用实例，可以指导焊接生产。本书内容涉及的是生产一线经常遇到的焊接难题，并选用了一些新工艺和成功的经验。为读者掌握异种材料的焊接工艺和工程应用，提供理论基础和实践中成功的经验。本书供从事与材料加工和焊接技术相关的工程技术人员使用，也可供高等院校师生、科研和企业单位的科研人员参考。

书中的数据多选自最新的技术资料，反映了当前异种材料焊接技术的应用现状。向书中所援引文献的作者表示谢意。

参加本书编写的其他人员还有张永喜、陈茂爱、孙俊生、高进强、郭国林、张永兰、刘如伟、吴会强、王芳、赵越、孙宾、黄海啸、张燕、石海玉、周冰、张元金、孟繁军、王强等。

异种材料焊接是一项综合性技术，涉及物理化学、冶金、材料、机械、电子、计算机等多学科的知识。由于作者水平所限，书中疏漏和不当之处，敬请广大读者批评指正。

李亚江
2003 年 10 月 5 日

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 金属材料的基本特性	1
1.1.1 常用金属的物理化学性能	1
1.1.2 常用金属的力学性能	3
1.2 异种材料焊接的特点	4
1.2.1 异种材料焊接存在的问题	4
1.2.2 金属固态下相互作用的特性	5
1.2.3 异种金属焊接缺陷及防止措施	7
第 2 章 异种材料分类及组合	11
2.1 钢铁材料的分类及性能	11
2.1.1 碳钢的分类、成分及性能	11
2.1.2 低合金钢的分类、成分及性能	15
2.1.3 不锈钢的分类、成分及性能	19
2.2 有色金属的分类及性能	25
2.2.1 有色金属材料的分类	25
2.2.2 有色金属的成分及性能	25
2.3 异种材料的焊接组合	36
2.3.1 典型组织钢的组合分类	36
2.3.2 异种材料焊接构件的组合特点	37
2.3.3 异种钢的焊接组合	38
2.3.4 钢与有色金属的焊接组合	38
2.4 异种材料的连接形式及应用	41
2.4.1 异种材料直接连接的形式及特点	41
2.4.2 异种材料间接连接的形式及特点	41
2.4.3 异种焊接结构件的应用	41
第 3 章 异种材料的焊接性	44
3.1 异种材料的焊接性	44
3.1.1 影响异种材料焊接性的因素	44
3.1.2 异种材料焊接的困难	45
3.2 异种材料的焊接方法	46
3.2.1 异种材料熔焊	47
3.2.2 异种材料压焊	50
3.2.3 异种材料钎焊	51
3.2.4 其他焊接方法	51
3.3 异种焊接材料的选用	52

3.3.1	异种焊接材料的选择原则	52
3.3.2	根据接头强度、成分和组织选择焊接材料	53
3.4	异种材料焊接性试验	54
3.4.1	异种材料的工艺焊接性试验	54
3.4.2	异种材料的焊接裂纹试验	55
3.4.3	异种材料的使用焊接性试验	58
第4章	异种材料焊接接头性能检测	61
4.1	异种材料焊接接头力学性能检测	61
4.1.1	异种材料焊接接头拉伸性能检测	61
4.1.2	异种材料焊接接头失效检验	62
4.1.3	异种材料焊接接头塑性检验	63
4.2	异种材料焊接接头成分及组织分析	64
4.2.1	异种材料焊接区的化学成分分析	64
4.2.2	异种材料焊接接头的组织分析方法	65
4.2.3	异种材料焊接接头的微观结构分析方法	66
4.3	异种材料焊接接头耐蚀性检测	67
4.3.1	异种材料焊接接头耐蚀性检测特点	67
4.3.2	异种材料焊接接头耐蚀性检测方法	68
4.3.3	异种材料焊接接头耐蚀性检测实例	68
4.4	异种材料焊接接头应力检测	69
4.4.1	检测方法	69
4.4.2	检测的影响因素	69
第5章	异种钢的焊接	72
5.1	异种珠光体钢的焊接	72
5.1.1	焊接特点	72
5.1.2	焊接材料的选用	72
5.1.3	焊接的工艺参数	75
5.1.4	焊后热处理	79
5.2	异种低合金高强钢的焊接	80
5.2.1	异种普通低合金钢的焊接	80
5.2.2	异种低碳调质钢的焊接	81
5.3	珠光体钢与高铬钢（铁素体钢、马氏体钢）的焊接	87
5.3.1	珠光体钢与高铬钢的焊接特点	87
5.3.2	珠光体钢与铁素体钢的焊接材料	89
5.3.3	焊接工艺及焊后热处理	91
5.3.4	珠光体钢与高铬钢焊接举例	92
5.4	异种奥氏体钢的焊接	93
5.4.1	焊接特点	93
5.4.2	焊接方法	97
5.4.3	焊接材料的选择	99

5.4.4	奥氏体钢与珠光体钢的焊接	104
5.4.5	奥氏体钢与铁素体钢的焊接	111
第6章	铸铁异种材料的焊接	115
6.1	铸铁的种类和性能	115
6.1.1	铸铁的分类	115
6.1.2	影响铸铁性能的因素	118
6.2	铸铁与钢的焊接	119
6.2.1	灰口铸铁与碳钢的焊接	120
6.2.2	可锻铸铁与碳钢的焊接	122
6.2.3	球墨铸铁与碳钢的焊接	123
6.3	铸铁与铜的焊接	125
6.3.1	铸铁与铜的焊接性	125
6.3.2	铸铁与铜的焊接工艺要点	125
6.3.3	铸铁与铜的焊接实例	126
6.4	铸铁与钢的焊接实例	126
6.4.1	灰口铸铁与碳钢的焊接实例	126
6.4.2	可锻铸铁与碳钢的焊接实例	128
6.4.3	球墨铸铁与碳钢的焊接实例	128
6.4.4	铸铁与不锈钢的焊接	128
第7章	复合钢的焊接	130
7.1	复合钢的基本性能	130
7.1.1	复合钢的力学性能	130
7.1.2	不锈钢复合钢的种类与性能	131
7.1.3	复合钢板的接头设计	132
7.2	钛-钢复合板的焊接	134
7.2.1	钛-钢复合板的分类及性能	134
7.2.2	钛-钢复合板焊接工艺特点	135
7.2.3	钛-钢复合板焊接实例	136
7.3	不锈钢复合钢的焊接	136
7.3.1	不锈钢复合钢板的加工特点	136
7.3.2	焊接性特点	137
7.3.3	焊接程序	139
7.3.4	焊后热处理	144
7.4	铜-钢复合钢板的焊接	144
7.4.1	铜-钢复合钢板的焊接特点	144
7.4.2	铜-钢复合钢板焊接工艺	145
7.5	复合渗铝钢的焊接	146
7.5.1	渗铝钢的特性	146
7.5.2	渗铝钢焊接问题及解决措施	147
7.5.3	渗铝钢的焊接工艺	147

7.5.4 渗铝钢的焊接接头性能	148
第8章 钢与高温合金、难熔金属的焊接	152
8.1 高温合金、难熔金属的分类及应用	152
8.1.1 高温合金的分类、性能及应用	152
8.1.2 难熔金属的性能及应用	152
8.2 钢与高温合金、难熔金属的焊接特点	157
8.2.1 钢与高温合金的焊接特点	157
8.2.2 钢与难熔金属的焊接特点	159
8.3 钢与高温合金的焊接	160
8.3.1 钢与高温合金的氩弧焊	160
8.3.2 钢与高温合金的电阻焊	161
8.3.3 钢与高温合金的钎焊	163
8.4 钢与难熔金属的焊接	163
8.4.1 钢与钨的焊接	163
8.4.2 钢与铌的焊接	165
8.4.3 钢与钼的焊接	167
第9章 钢与有色金属的焊接	170
9.1 钢与铝及铝合金的焊接	170
9.1.1 焊接特点	170
9.1.2 钢与铝及铝合金的熔化焊	171
9.1.3 钢与铝及铝合金的压焊	173
9.1.4 钢与铝的焊接实例	175
9.2 钢与铜及铜合金的焊接	175
9.2.1 焊接特点	176
9.2.2 低碳钢与铜的焊接	176
9.2.3 不锈钢与铜的焊接	179
9.3 钢与镍及镍合金的焊接	182
9.3.1 焊接特点	182
9.3.2 焊接工艺	182
9.3.3 焊接实例	183
9.4 钢与钛及钛合金的焊接	185
9.4.1 焊接特点	185
9.4.2 焊接工艺	186
9.5 钢与其他有色金属及其合金的焊接	188
9.5.1 钢与铍及铍合金的焊接	188
9.5.2 钢与锆及锆合金的焊接	190
9.5.3 钢与铅及铅合金的焊接	192
第10章 异种有色金属的焊接	193
10.1 铜与铝及铝合金的焊接.....	193
10.1.1 焊接特点.....	193

10.1.2	铜与铝及铝合金的熔焊	195
10.1.3	铜与铝及铝合金的压焊	196
10.1.4	铜与铝及铝合金的钎焊	200
10.1.5	铜与铝的焊接实例	201
10.2	铜与钛及钛合金的焊接	201
10.2.1	焊接特点	201
10.2.2	铜与钛及钛合金的氩弧焊	202
10.2.3	铜与钛及钛合金的扩散焊	203
10.3	铜与镍及镍合金的焊接	204
10.3.1	焊接特点	204
10.3.2	焊接工艺	205
10.4	铜与钼的焊接	206
10.4.1	铜与钼的焊接特点	206
10.4.2	铜与钼的扩散焊	206
10.5	铝与钛的焊接	207
10.5.1	焊接特点	207
10.5.2	焊接工艺	208
10.6	铝与镁的焊接	210
10.6.1	铝与镁的焊接特点	210
10.6.2	铝与镁的扩散焊	210
第 11 章	金属间化合物异种材料的焊接	212
11.1	金属间化合物的分类及特性	212
11.1.1	金属间化合物的分类	212
11.1.2	金属间化合物的特性	212
11.2	Ti-Al 金属间化合物异种材料的焊接	216
11.2.1	TiAl 与 40Cr 钢的焊接	216
11.2.2	TiAl 与 SiC 陶瓷的焊接	218
11.2.3	Ti-Al 金属间化合物与其他材料的焊接	221
11.3	Ni-Al 金属间化合物异种材料的焊接	221
11.3.1	Ni ₃ Al 与碳钢的焊接	221
11.3.2	Ni ₃ Al 与不锈钢的焊接	223
11.3.3	Ni ₃ Al 与工具钢的焊接	223
11.3.4	NiAl 与 Ni 的焊接	224
11.4	Fe-Al 金属间化合物异种材料的焊接	225
11.4.1	Fe ₃ Al 与低碳钢的焊接	225
11.4.2	Fe ₃ Al 与不锈钢的焊接	229
11.4.3	Fe ₃ Al 在耐热钢上的堆焊	232
第 12 章	硬质合金与钢的焊接	234
12.1	硬质合金的分类、用途及性能	234
12.1.1	硬质合金的分类及用途	234

12.1.2	硬质合金的性能	236
12.2	硬质合金的焊接特点	237
12.2.1	一般焊接性特点	237
12.2.2	基体材料的选择和槽形设计	238
12.3	硬质合金与钢的钎焊	240
12.3.1	硬质合金与钢的钎焊特点	240
12.3.2	硬质合金用钎料与钎剂	242
12.3.3	硬质合金与钢的钎焊工艺	244
12.3.4	钎焊硬质合金的缺陷及防止	246
12.4	硬质合金与钢的焊接实例	248
12.4.1	YT15 合金与 40 钢的火焰钎焊	248
12.4.2	YT05 硬质合金与 40Cr 钢的真空钎焊	249
12.4.3	CW50 钢结硬质合金与 45 钢的焊接	249
12.4.4	印制电路板硬质合金切刀头的真空钎焊	250
12.4.5	硬质合金与钢的真空钎焊实例	251
第 13 章	陶瓷与金属的焊接	252
13.1	陶瓷的分类及性能	252
13.1.1	陶瓷的分类	252
13.1.2	结构陶瓷的性能特点	253
13.1.3	几种常用的结构陶瓷	253
13.2	陶瓷与金属的连接方法及适用材料	256
13.2.1	陶瓷-金属连接的原理及适用材料	256
13.2.2	陶瓷与金属连接的基本要求	258
13.2.3	陶瓷与金属连接存在的问题	259
13.2.4	陶瓷与金属的连接方法	260
13.3	陶瓷-金属异种材料的钎焊	261
13.3.1	陶瓷表面的金属化	261
13.3.2	陶瓷钎焊的钎料	263
13.3.3	陶瓷金属化钎焊工艺	265
13.3.4	陶瓷-金属的活性金属化法钎焊	266
13.3.5	陶瓷与金属钎焊结构应用实例	267
13.4	陶瓷与金属的扩散焊接	268
13.4.1	特点	269
13.4.2	主要工艺参数	269
13.4.3	应用实例	272
13.5	陶瓷与金属的电子束焊接	277
13.5.1	特点	277
13.5.2	工艺过程	277
13.5.3	应用实例	278
第 14 章	异种材料的堆焊	279

14.1	异种材料堆焊的类型及特点	279
14.1.1	异种材料堆焊的类型	279
14.1.2	堆焊合金的使用性能	279
14.1.3	异种材料堆焊的特点	281
14.1.4	异种材料堆焊的用途	281
14.2	堆焊合金的分类及特性	282
14.2.1	堆焊合金的分类	282
14.2.2	堆焊合金的成分及特性	283
14.2.3	堆焊合金的选择	283
14.3	异种材料的堆焊方法	288
14.3.1	堆焊方法的工艺特点	288
14.3.2	堆焊方法的选择	293
14.4	异种材料堆焊工艺及应用	294
14.4.1	铁基合金的堆焊	294
14.4.2	合金铸铁的堆焊	302
14.4.3	其他合金的堆焊	302
14.4.4	异种材料堆焊的应用实例	307
	参考文献	310

第 1 章 概 述

现代工程结构中，不仅需要对大量的同种材料进行焊接，同时也需要对相当数量的异种材料进行焊接。在工程及制造中采用异种材料焊接结构，不仅能满足不同工作条件对材质的不同要求，而且还能节约贵重金属，降低结构整体成本，充分发挥不同材料的性能优势。在某些情况下，异种材料结构的综合性能甚至超过单一金属结构。因此，异种材料的焊接日益受到人们的重视，具有广阔的应用前景，近年来在航空航天、石油化工、电站锅炉、核动力、机械、电子、造船及其他一些领域获得越来越广泛的应用。

1.1 金属材料的基本特性

1.1.1 常用金属的物理化学性能

大多数异种材料组合中，两种材料的物理化学性能不同，有的差别甚至很大，这对于焊接的难易程度、材料的搭配组合以及焊接工艺的合理制定等都有很大影响。金属的物理性能指标主要有密度、熔点、沸点、比热容、热导率及线膨胀系数等。表 1.1 所示为常见金属的主要物理性能。

表 1.1 常见金属的物理性能

金属名称	密度 /g · cm ⁻³	熔点 /℃	沸点 /℃	比热容 /J · kg ⁻¹ · K ⁻¹	热导率 /W · m ⁻¹ · K ⁻¹	线膨胀系数 /10 ⁻⁶ K ⁻¹	电阻系数 /10 ⁻⁸ Ω · m
铁(Fe)	7.87	1537	2857	481.5	66.7	11.76	10.1
铜(Cu)	8.92	1084	2578	376.8	359.2	16.6	1.67
铝(Al)	2.70	660	2327	934.8	206.9	23.8	2.65
镍(Ni)	8.90	1453	2834	456.5	69.6	13.4	7.8
钛(Ti)	4.50	1677	3530	539.1	13.8	8.2	42.1
钼(Mo)	10.22	2610	4827	265.2	123.1	5.44	5.78
钨(W)	19.30	3380	5900	147.8	152.9	4.6	5.1
锆(Zr)	6.45	1852	4415	286.9	21.9	5.05	44.7
铍(Be)	1.85	1283	2477	1847.8	146.2	12.3	4.2
铅(Pb)	11.34	328	1751	130.4	31.9	29.1	22
镁(Mg)	1.74	650	1104	1086.9	144.6	25.8	4.46
锰(Mn)	7.44	1314	2150	500	—	22	185
铌(Nb)	8.55	2497	4927	278.3	48.1	7.5	14.6
金(Au)	19.30	1063	2709	134.8	273.1	14.3	2.44
银(Ag)	10.50	961	2162	243.5	422.8	20.6	1.59
钒(V)	6.11	1857	3377	552.2	26.9	8.3	24.8
锌(Zn)	7.14	420	906	317.4	103.8	29.7	5.75

金属名称	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	熔点 / $^{\circ}\text{C}$	沸点 / $^{\circ}\text{C}$	比热容 / $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	热导率 / $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	线膨胀系数 / 10^{-6}K^{-1}	电阻系数 / $10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$
锡(Sn)	7.28	232	2679	234.8	61.5	23	11.5
钽(Ta)	16.60	2997	5427	156.5	54.5	6.6	13.6
锑(Sb)	6.68	630	1637	217.3	17.3	10.8	39
铬(Cr)	7.20	1903	2665	295.7	61.5	6.2	12.8
钴(Co)	8.90	1495	2877	443.4	63.5	14.2	5.68
铂(Pt)	21.45	1770	3827	139.1	65.4	8.9	10.58

金属的化学性能指标主要有金属的相对原子质量、原子半径、原子外层的电子数目、晶格类型、晶格常数等。化学性能是判定两种材料能否稳定结合的重要依据。常见金属的化学性能见表 1.2。

表 1.2 常见金属的化学性能

金属名称	原子序数	相对原子质量	原子半径 r / 10^{-10}m	原子外层电子数	晶 格 类 型	晶格常数 C / 10^{-10}m	周期表中位置
铁(Fe)	26	55.85	1.27	2	体心立方(α -Fe) 面心立方(γ -Fe) 体心立方(δ -Fe)	$a_{\alpha}=2.860$ $a_{\gamma}=3.668$	Ⅷ B
铜(Cu)	29	63.54	1.28	1	面心立方	$a=3.6147$	I B
铝(Al)	13	26.98	1.43	1	面心立方	$a=4.0496$	Ⅲ A
镍(Ni)	28	58.71	1.24	2	面心立方	$a=3.5236$	Ⅷ B
钛(Ti)	22	47.90	1.47	2	密集六方	$a=3.5236$ $c=4.6788$	IV B
钼(Mo)	42	95.94	1.40	1	体心立方	$a=3.1468$	Ⅵ B
钨(W)	74	183.2	1.41	2	体心立方(α -W) 复杂立方(γ -W)	$a=3.1650$	Ⅵ B
锆(Zr)	40	91.22	1.58	1	体心立方(α -Zr) 密集六方(β -Zr)	$a=3.231$ $a_{\beta}=3.609$ $c=5.148$	IV B
铍(Be)	4	9.012	1.13	2	密集六方	$a=2.2856$ $c=3.5832$	II A
铅(Pb)	82	207.2	1.74	2	面心立方	—	IV A
镁(Mg)	12	24.305	1.364	2	密集六方	$a=3.2094$ $c=5.2105$	II A
锰(Mn)	25	54.94	1.31	2	复杂立方(α -Mn) 复杂立方(β -Mn) 面心立方(γ -Mn) 面心立方(δ -Mn)	—	Ⅵ B
铌(Nb)	41	92.906	1.429		体心立方	$a=3.3010$	V B
金(Au)	79	196.97	1.44	1	面心立方	$a=4.0788$	I B
银(Ag)	47	107.87	1.44	1	面心立方	$a=4.0587$	I B
钒(V)	23	50.942	1.36	2	体心六方	$a=3.0288$	V B
锌(Zn)	30	65.38	1.33	2	密集六方	$a=2.6649$ $c=4.9468$	II B

金属名称	原子 序数	相对原子 质量	原子半径 r $/10^{-10}\text{ m}$	原子外层 电子数	晶 格 类 型	晶格常数 C $/10^{-10}\text{ m}$	周期表 中位置
锡(Sn)	50	118.6	1.58	2	体心四方	—	Ⅳ A
钽(Ta)	73	180.94	1.47	2	体心立方		Ⅴ B
锑(Sb)	51	121.7	1.61	3	菱 形	—	Ⅴ A
铬(Cr)	24	51.99	1.28	1	体心立方(α -Cr) 密集六方(β -Cr)	$a=2.8846$	Ⅵ B
钴(Co)	27	58.93	1.25	2	面心立方(α -Co) 密集六方	$a=2.506$ $c=4.069$	Ⅷ B
铂(Pt)	78	195.09	1.388	2	面心立方	$a=3.9310$	Ⅷ B

1.1.2 常用金属的力学性能

金属的力学性能指标是设计计算、材料选用、工艺评定的主要依据。异种材料焊接接头所形成的复合零部件能否满足工程上的使用要求，很大程度上也依赖于对焊接接头力学性能的评定。常见金属的力学性能见表 1.3。

表 1.3 常见金属的力学性能

名 称	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 σ_s/MPa	伸长率 $\delta/\%$	硬度	弹性模量(拉伸) E/GPa	备 注
银(Ag)	125	35	50	25HBS	71	
铝(Al)	40~50	15~20	50~70	20~35HBS	62	
金(Au)	103	30~40	30~50	18HBS	78	
铍(Be)	228~352	186~262	1~3.5	75~85HBS	275~300	
铋(Bi)	20	—	—	7HBS	32	
铈(Ce)	117	28	22	22HV	30	γ 相
镉(Cd)	71	10	50	16~23HBS	55	
钴(Co)	255	—	5	125HBS	211	
铜(Cu)	209	33.3	60	37HBS	128	
镁(Mg)	165~205	69~105	5~8	35HBS	44	
钼(Mo)	600	450	60	300~400HV	320	
铌(Nb)	275	207	30	80HV	103	退火状态
镍(Ni)	317	59	30	60~80HBS	207	
铅(Pb)	15~18	5~10	50	4~6HBS	15~18	
钯(Pd)	185	32	40	32HBS	114.8	
铂(Pt)	143	37	31	30HBS	150	
铑(Rh)	951	70~100	30~35	55HBS	293	
锑(Sb)	11.4	—	—	30~58HBS	77.759	
锡(Sn)	15~27	12	40~70	5HBS	44.3	
钽(Ta)	392	362	46.5	120HV	186	粉末冶金法
钛(Ti)	235	140	54	60~74HBS	106	
钨(W)	1000~1200	750	—	350~450HV	405~410	
钇(Y)	186	27	17	40HV	63.6	
锌(Zn)	110~150	90~100	40~60	30~42HBS	130	
锆(Zr)	300~500	200~300	15~30	120HBS	99	

两种被焊金属在冶金学上是否相容取决于它们在液态和固态时的互溶性，以及在焊接过程中是否产生金属间化合物（即脆性相）。

常见金属形成连续固溶体的组合有以下几种。

铁的组合 Fe(γ)-Co(β), Fe-Ni, Fe-V (1234 °C 以上), Fe-Cr (920 °C 以上)

钛的组合 Ti-Zr, Ti(β)-W, Ti(β)-V, Ti(β)-Ta, Ti(β)-Mo, Ti(β)-Nb

镍的组合 Ni-W, Ni-Mn (γ), Ni-Cu, Ni-Co

铬的组合 Cr-Ti(β) (1350 °C 以上), Cr-Mo, Cr-V, Cr-W

锰的组合 Mn(γ)-Cu, Mn(γ)-Co(β)

铌的组合 Nb-Mo, Nb-Ta, Nb-W

钼的组合 Mo-Ta, Mo-W

钨的组合 W-Ta

1.2 异种材料焊接的特点

异种材料是指不同元素的金属（如铝、铜等）或从冶金观点看性能（如物理性能、化学性能等）有显著差异的合金构成的结构材料。异种材料可以用作母材、填充金属或焊缝金属。异种材料焊接接头能够充分利用各种材料的优异性能（如强度、塑韧性、耐磨性、耐蚀性、导热性等），而在工程机械、交通运输、石油化工、电站锅炉、航空航天、电子等行业的设备制造和构件中得到广泛应用。

1.2.1 异种材料焊接存在的问题

异种材料的焊接，是指两种或两种以上的不同材料（指化学成分、金相组织及性能等不同）在一定工艺条件下进行焊接加工的过程。把不同的两种金属焊接在一起时，必定会产生一层性能和组织与母材不同的过渡层。由于异种金属在元素性质、物理性能、化学性能等方面有显著差异，与同种材料的焊接相比，异种材料的焊接无论从焊接机理和操作技术上都比同种材料要复杂得多。异种材料焊接中存在的主要问题如下。

① 异种材料的熔点相差越大，越难进行焊接。这是因为熔点低的材料达到熔化状态时，熔点高的材料仍呈固体状态，这时已经熔化的材料容易渗入过热区的晶界，会造成低熔点材料的流失、合金元素烧损或蒸发，使焊接接头难以焊合。例如焊接铁与铅时（熔点相差很大），不仅两种材料在固态时不能相互溶解，而且在液态时彼此之间也不能相互溶解，液态金属呈层状分布，冷却后各自单独进行结晶。

② 异种材料的线膨胀系数相差越大，越难进行焊接。线膨胀系数越大的材料，热膨胀率越大，冷却时收缩也越大，熔池结晶时会产生很大的焊接应力。这种焊接应力不易消除，结果会产生很大的焊接变形。由于焊缝两侧材料承受的应力状态不同，容易导致焊缝及热影响区产生裂纹，甚至导致焊缝金属与母材的剥离。

③ 异种材料的热导率和比热容相差越大，越难进行焊接。材料的热导率和比热容会使焊缝金属的结晶条件变坏，晶粒严重粗化，并影响难熔金属的润湿性能。因此，应选用强力热源进行焊接，焊接时热源的位置要偏向导热性能好的母材一侧。

④ 异种材料的电磁性相差越大，越难进行焊接。因为材料的电磁性相差越大，焊接电弧越不稳定，焊缝越差。

⑤ 异种材料之间形成的金属间化合物越多，越难进行焊接。由于金属间化合物具有较大的脆性，容易导致焊缝产生裂纹、甚至断裂。

⑥ 异种材料焊接过程中，由于焊接区金相组织的变化或新生成的组织，使焊接接头的性能恶化，给焊接带来很大的困难。接头熔合区和热影响区的力学性能较差，特别是塑韧性的明显下降。由于接头塑韧性的下降以及焊接应力的存在，异种材料焊接接头容易产生裂纹，尤其是焊接热影响区更容易产生裂纹，甚至发生断裂。

⑦ 异种材料的氧化性越强，越难进行焊接。如用熔焊方法焊接铜和铝时，熔池中极易形成铜和铝的氧化物（CuO、Cu₂O 和 Al₂O₃）。冷却结晶时，存在于晶粒边界的氧化物能使晶间结合力降低。CuO 和 Cu₂O 均能与铜形成低熔点的共晶体（Cu+CuO 和 Cu+Cu₂O），使焊缝产生夹杂和裂纹。铜与铝形成的 CuAl₂ 和 Cu₂Al 脆性化合物，能显著降低焊缝金属的强度和塑性。因此，采用熔焊方法焊接铜与铝相当困难。

⑧ 异种材料焊接时，焊缝和两种母材金属难以达到等强的要求。这是由于焊接时熔点低的金属元素容易烧损和蒸发，从而使焊缝的化学成分发生变化，力学性能降低。尤其是焊接异种有色金属时更为显著。

常用的异种材料组合及焊接时存在的主要问题见表 1.4。

表 1.4 常用的异种材料组合及焊接时存在的主要问题

异种材料组合	焊接时存在的主要问题
奥氏体不锈钢与碳钢、Cr-Mo 钢	焊缝金属、熔合区塑性降低,熔合比对耐蚀性的影响,消除应力热处理时引起的熔合区塑性降低
高 Cr-Ni 不锈钢、Ni 合金与碳钢、Cr-Mo 钢	熔合区塑性降低,焊缝金属热裂纹,消除应力热处理时引起的熔合区塑性降低,热冲击及补焊时引起的熔合区剥离
马氏体不锈钢、铁素体不锈钢与 Cr-Mo 钢	熔合区塑性降低,氢引起的延迟裂纹,消除应力热处理等引起的焊后热处理裂纹
铜合金与碳钢	熔合比对接头性能的影响,铜合金向钢一侧热影响区晶界渗入,热冲击,补焊时引起熔合区剥离
钴合金钢与钴铬钨合金	预热规范对热裂纹、气孔的影响
铸铁、合金铸件与钢、有色金属	焊缝金属、熔合区裂纹、焊缝金属和填充材料的关系
Al、Mg、Ti、Ta、Be 等有色金属与钢复合材料	焊接方法对接头性能的影响

1.2.2 金属固态下相互作用的特性

表 1.5 为常见金属元素固态下相互作用的特性。一般来说，当两种金属的晶格类型相同，晶格常数、原子半径及负电性均比较接近时，溶质原子能够连续固溶于溶剂；否则易形成金属间化合物，使焊缝性能大幅度降低。能够形成连续固溶体的异种材料具有良好的焊接性。

表 1.5 常见金属元素固态下相互作用的特性

金属元素	温度/℃		晶格类型	原子半径 /10 ⁻¹⁰ m	晶格常数 /10 ⁻¹⁰ m	固溶体		可形成化合物的元素	共晶混合物	不起作用元素
	熔点	晶型转变				无限	有限			
Fe	1536	910	α-体心立方	1.241	2.8608	α-V, α-Cr, γ-Mn, γ-Co, γ-Ni, γ-Pd, γ-Pt	Cu, Au, Al, C, Si, Ti, Zr, Nb, Ta, γ-Cr, γ-V, Mo, α-Ni, (α, δ) Co, (α, δ) Mn, α-Pd, α-Pt, W	Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Co, Ni, Pd, Pt, Al, C, Si, Ge	C	Mg, Ag, Pb
			γ-面心立方		3.564					

金属 元素	温度/℃		晶格类型	原子半径 / 10^{-10} m	晶格常数 / 10^{-10} m	固溶体		可形成化合物的元素	共晶 混合物	不起 作用 元素
	熔点	晶型转变				无限	有限			
Co	1485	417	α -密排六方 β -面心立方	1.248	2.501 4.066 3.548	γ -Mn, γ -Fe, Ni, Pd, Pt	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Au, Al, (α, β) Mn, Cu, α -Fe, C, Si, Ge	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Fe, Ni, Pt, Al, Ge	Ag	Pb
Ni	1453	—	面心立方	1.245	3.517	γ -Mn, γ -Fe, Co, Pd, Pt, Cu, Au	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Al, Si, C, (α, β) Mn, α -Fe	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, C, Mn, Fe, Co, Pt, Cu, Al, Si, Ge	—	Ag, Pb
Al	660	—	面心立方	1.431	4.0414	—	Ti, Zr, Nb, Mn, Cu, Ni, Mg, V, Ta, Cr, Mo, W, Fe, Co, Pd, Pt, Ag, Au, Si, Ge	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, Mn, W, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Cu, Ag, Au, C	Sn	Pb
Mg	650	—	密排六方	1.598	3.203 5.2002	—	Ti, Zr, Nb, Mn, Cu, Ni, Pd, Ag, Au, Al, Si, V	Cu, Ni, Pd, Pt, Ag, Au, Al, C, Si, Pb, Ge	—	Mo, W, Fe
Cu	1083	—	面心立方	1.278	3.6077	Mn, Ni, Pd, Pt	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Cr, Fe, Co, Ag, Al, Si, Mn, Ge	Mg, Ti, Zr, Mn, Ni, Pd, Pt, Au, Al, Si, Ge	—	Ta, Mo, W, Pb
Cr	1875	—	体心立方	1.249	2.885	β -Ti, V, Mo, W, α -Fe	α -Ti, Zr, Nb, Ta, Mn, γ -Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Cu, Ag, Au, Al, Si, Mo	Ti, Zr, Ta, Nb, Mn, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Al, Au, C, Si	Th	Pb, Sn
Mo	2620	—	体心立方	1.36	3.1466	β -Ti, V, Nb, Ta, Zr, W	α -Ti, Zr, Mn, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Au, Al, C, Si, Cr	Zr, Mn, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Al, C, Si, Ge	—	Mg, Cu, Ag
W	3380	—	体心立方	1.367	3.1648	V, Nb, Ta, Cr	Ti, Zr, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, C, Si	Zr, Fe, Ni, Pt, Al, Si, C	Th	Mg, Mo, Cu, Ag, Zn, Pb
Si	1412	—	金刚石型	1.175	5.4198	Ge	Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co, Ni, Pt, Cu, Al	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co, Pt, Cu, Ni, Pd	Mg, Ag, C, Au	Zn

金属元素	温度/℃		晶格类型	原子半径 /10 ⁻¹⁰ m	晶格常数 /10 ⁻¹⁰ m	固溶体		可形成化合物的元素	共晶混合物	不起作用元素
	熔点	晶型转变				无限	有限			
Mn	1245	$\alpha\beta:742$ $\beta\gamma:1095$	α,β 体心立方 γ 面心立方 δ 体心立方	1.12	3.774 3.533 3.72	γ -Fe, γ -Co, γ -Ni,Cu	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, (α,β) Fe, Cr, Mo, (α,β) Co, Pd, Pt, Ag, Au, (α,β) Ni, Al, C, Si	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co, Pt, Cu, Ni, Pd, Ag, Au, C	—	W, Pb
V	1919	—	体心立方	1.316	3.0338	β -Ti, Nb, Mo, Ta, W Cr, α -Fe	Zr, Mn, Cu, Ni, Cr, Pd, Pt, γ -Fe, Al, Au, C, Si, Ge	Cu, Ni, Pd, Pt, Ag, Au, Al, C, Si, Ge, Pb	—	Ag, Hg
Nb	2468	—	体心立方	1.426	3.2941	β -Ti, V, Mo, β -Zr, W, Ta	Mg, Cr, Mn, α -Ti, Fe, Co, Ni, C, α -Zr, Pd, Pt, Cu, Al, Si	Ti, Zr, Ta, Nb, Mn, Fe, Co, Ni, Pd, Au, Al, C, Si	—	—
Ti	1668	882	α -密排六方	1.444	$a=2.9446$ $c=4.6694$	α -Zr, β -V, β -Nb, β -Ta, β -Cr, β -Mn	Mg, α -V, α -Nb, α -Ta, Co, Pd, Fe, Mn, Ni, W, α -Zr, Cu, Pt, Ag, α -Mo, C, Au, Al, Ge, Si, Pb	Mg, Zr, Mn, Ni, Pd, Pt, Au, Al, Si, Ge	—	—

为了改善异种金属焊接性能，对不能形成无限固溶体的异种金属，可在两种被焊金属之间加入过渡层，选择的过渡层金属应与两种金属均能形成无限固溶体。

1.2.3 异种金属焊接缺陷及防止措施

(1) 异种金属焊接缺陷

异种金属的焊接常应用于重要焊接结构，如核反应堆、人造卫星、热交换器、发电设备以及石油化工设备等。这些设备及装置的使用条件通常都很苛刻，对焊接质量有很高的要求。而另一方面，由于异种金属在化学性能、物理性能、力学性能以及金相组织等方面存在着较大差异，与同种金属焊接相比更容易产生焊接缺陷。所以如何控制好异种金属焊接的质量是一个极其重要的问题。

异种金属焊接缺陷（如气孔、裂纹等）的产生原因和防止措施原则上与同种金属焊接时大体相同（详见表 1.6）。

表 1.6 常见异种金属焊接缺陷的产生原因和防止措施

异种金属组合	焊接方法	焊接缺陷	产生原因	防止措施
0Cr18Ni9 + 2.25Cr1Mo	手工电弧焊	熔合区产生裂纹	产生马氏体组织	控制母材金属熔合比,采用过渡层、过渡段
奥氏体不锈钢 + 碳素钢	MIG	焊缝产生气孔,表面硬化	保护气体不纯,母材金属、填充材料受潮,碳的迁移	焊前母材金属、填充材料清理干净,保护气体纯度要高,填充材料要烘干,采用过渡层
Cr-Mo 钢 + 碳素钢	手工电弧焊	熔合区产生裂纹	回火温度不合适	焊前预热,填充材料塑性要好,焊后热处理温度要合适