

实用工程材料焊接技术丛书

异种金属 焊接技术

YIZHONG JINSHU
HANJIE JISHU

张义 张初琳 刘奕明 张景林 陈晗 编著

实用工程材料焊接技术丛书

异种金属焊接技术

张 义 张初琳 刘奕明 张景林 陈 晗 编著



机械工业出版社

本书是一本系统介绍异种金属组合的焊接性及焊接工艺的图书。全书共5章,第1章概述异种金属组合的焊接性特点、影响因素及对焊接方法的选择原则,讨论各种焊接方法工艺特点及其对异种金属焊接的适应性,第2~第5章分别着重介绍了异种钢铁材料组合的焊接、钢与有色金属组合的焊接、异种有色金属组合的焊接,以及复合钢的焊接等。书中还以较大篇幅列举了相关工程焊接应用实例,供读者借鉴。

本书可供中、高级焊工,焊工技师以及从事相关专业的中级以上的工程和技术人员使用,也可作为职业技术学院以及大专院校焊接专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

异种金属焊接技术/张义等编著. —北京:机械工业出版社,2016.7
(实用工程材料焊接技术丛书)
ISBN 978-7-111-53889-9

I. ①异… II. ①张… III. ①异种金属焊接 IV. ①TG457.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第113928号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:俞逢英 责任编辑:俞逢英

责任校对:张晓蓉 封面设计:马精明

责任印制:常天培

唐山三艺印务有限公司印刷

2016年9月第1版第1次印刷

169mm×239mm·20.5印张·453千字

0 001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-53889-9

定价:49.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前言

随着科学技术的不断进步，人们对各类工程机械构件的性能，如强度、硬度、导电性、耐磨性、耐蚀性、低温韧性、高温持久强度等，都提出了更高的要求。但任何一种单一金属材料都无法同时满足这些不同的服役要求，即使某种金属比较理想，也往往因稀缺昂贵而使成本太高，无法应用。所以，采用焊接方法来制造各种异种金属构件备受人们的关注。异种金属的焊件不仅能充分利用各组成材料的优异性能，而且可大大降低生产成本，显著提高效益，因此，在石油化工、航空航天、交通运输、电站锅炉及工程机械等行业中得到了广泛的应用。鉴于此，特编写了《异种金属焊接技术》一书。

本书系统地介绍了异种金属组合的焊接性及焊接工艺，主要内容包括异种金属的焊接技术概述、异种钢铁材料组合的焊接、钢与有色金属组合的焊接、异种有色金属组合的焊接和复合钢的焊接。本书具有较强的系统性、实用性和时效性，为介绍各种金属组合的焊接性及焊接工艺，书中还提供了大量的数据，并以较大篇幅列举了焊接工程的应用实例，供读者参考。

本书由张义、张初琳、刘奕明、张景林及陈晗编著，张瀚文审稿。本书在编写过程中还得到了诸多朋友的支持和帮助，在此一并表示感谢。

由于作者能力有限，书中难免存在不足和谬误之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 异种金属的焊接技术概述	1
1.1 异种金属的焊接及其特点	1
1.1.1 异种金属的焊接技术和焊接性	1
1.1.2 异种金属焊接性的影响因素	2
1.1.3 异种金属焊接的工艺特殊性	9
1.2 常用熔焊方法对异种金属焊接的适应性	17
1.2.1 异种金属组合的弧焊	17
1.2.2 异种金属组合的高能密度焊	29
1.3 常用压焊方法对异种金属焊接的适应性	37
1.3.1 异种金属组合的冷压焊	37
1.3.2 异种金属组合的扩散焊	44
1.3.3 异种金属组合的电阻焊	53
1.3.4 异种金属组合的摩擦焊	58
1.3.5 异种金属组合的爆炸焊	68
第 2 章 异种钢铁材料组合的焊接	74
2.1 钢铁材料的焊接性	74
2.1.1 概述	74
2.1.2 碳钢的焊接性	75
2.1.3 低合金钢的应用及其焊接性	77
2.1.4 不锈钢的分类及性能	86
2.1.5 不锈钢的焊接性及其工艺要点	94
2.2 异种钢组合的焊接	103
2.2.1 异种珠光体钢组合的焊接	103
2.2.2 异种珠光体钢组合的焊接应用实例	119
2.2.3 异种高铬钢（马氏体/铁素体）组合的焊接	120
2.2.4 异种奥氏体型不锈钢组合的焊接	123
2.2.5 奥氏体型不锈钢与珠光体钢组合的焊接	131

2.2.6 奥氏体型不锈钢与珠光体钢及耐热钢组合的焊接应用实例	146
2.2.7 珠光体钢与高铬钢组合的焊接	149
2.2.8 珠光体钢与马氏体型不锈钢、耐热钢组合的焊接应用实例	156
2.2.9 奥氏体型不锈钢与高铬钢组合的焊接	159
第3章 钢与有色金属组合的焊接	165
3.1 钢与铝及铝合金组合的焊接	168
3.1.1 铝及铝合金同种金属的焊接性	168
3.1.2 钢与铝及铝合金异种金属的焊接性	171
3.1.3 碳钢与铝及铝合金组合的 TIG 焊	175
3.1.4 不锈钢与铝及铝合金组合的 TIG 焊	176
3.1.5 渗铝钢管与铝及铝合金管组合的 TIG 焊	177
3.1.6 镀锌钢板与铝板组合的搭接 TIG 焊和激光 - MIG 复合焊	177
3.1.7 钢与铝及铝合金组合的扩散焊	179
3.2 钢与铜及铜合金组合的焊接	180
3.2.1 铜及铜合金的性能	181
3.2.2 铜及铜合金的同种金属熔焊的焊接性特点	184
3.2.3 钢与纯铜组合的熔焊焊接性分析	189
3.2.4 钢与纯铜组合的熔焊焊接方法选择与工艺	190
3.2.5 钢与铜合金组合的熔焊焊接性及焊接工艺选择	198
3.3 钢与钛及钛合金组合的焊接	201
3.3.1 钛及钛合金同种金属的焊接性	206
3.3.2 钢与钛及钛合金组合的熔焊焊接性分析	210
3.3.3 钢与钛及钛合金组合的间接熔焊法	211
3.3.4 钢与钛及钛合金组合的间接熔焊工艺	213
3.3.5 钢与钛及钛合金组合的扩散焊	217
3.4 钢与镍及镍合金组合的焊接	218
3.4.1 镍及镍基合金简介	218
3.4.2 镍基高温合金的性能	221
3.4.3 镍基耐蚀合金的性能	226
3.4.4 镍基高温合金的焊接性评价	235
3.4.5 镍基耐蚀合金的焊接性评价	241
3.4.6 钢与镍基高温合金组合的焊接	254
3.4.7 钢与镍基耐蚀合金组合的焊接	259
第4章 异种有色金属组合的焊接	261
4.1 铜与铝组合的焊接	261
4.1.1 概述	261

4.1.2	铜与铝组合的焊接性分析	262
4.1.3	铜与铝组合的熔焊方法选择及焊接工艺	263
4.1.4	铜与铝组合的压焊方法选择及焊接工艺	267
4.1.5	铜与铝组合的压焊应用实例	270
4.2	铜与钛组合的焊接	272
4.2.1	铜与钛组合的焊接性分析	272
4.2.2	铜与钛组合的焊接方法选择及焊接工艺	275
4.3	铝与钛组合的焊接	278
4.3.1	铝与钛组合的焊接性分析	278
4.3.2	铝与钛组合的焊接方法选择及焊接工艺	279
4.4	铜与镍组合的焊接	282
4.4.1	铜与镍组合的焊接性分析	282
4.4.2	铜与镍组合的焊接方法选择及焊接工艺	283
第5章	复合钢的焊接	285
5.1	复合钢的性能、分类	285
5.1.1	概述	285
5.1.2	各种复合钢的性能和应用范围	287
5.2	复合钢的焊接	291
5.2.1	不锈钢复合钢板的焊接	291
5.2.2	铜复合钢板的焊接	302
5.2.3	镍复合钢板的焊接	305
5.2.4	钛复合钢板的焊接	309
5.2.5	渗铝钢的焊接	311
5.2.6	渗铝钢的焊接应用实例	315
5.2.7	镀铝钢板的焊接	318
参考文献		320



异种金属的焊接技术概述

1.1 异种金属的焊接及其特点

1.1.1 异种金属的焊接技术和焊接性

1. 异种金属的焊接技术及其应用

异种金属焊接是指将两种不同性能的金属或合金通过焊接技术形成接头，使之成为一体并能满足使用要求的过程。异种金属的焊接技术是异种金属焊接过程中所采用的焊接工艺措施。这些工艺措施是指焊接方法、焊接材料、焊接参数及其他特殊的工艺处理等手段的选择。这些选择是由两种不同金属材料的同种金属的焊接性等级，两种不同金属（或合金）的性能差异，接头形式和焊接构件的使用要求等所决定的。熟知各种焊接方法的特点及两种金属本身的焊接性，是制定异种金属焊接技术的基础。

焊接生产中，焊接结构的不同构件要求承受各种不相同的工作条件。所谓工作条件是指构件的受力状态、工作介质和所处环境等，如不同的强度、硬度、耐磨性、导电性、耐蚀性、高温持久强度或低温韧性等。实际上没有任何一种金属能够同时满足这些不同的工作条件。即使某种金属比较理想，也往往因为稀贵提高制造成本而无法采用。采用不同的金属材料组成复合结构或构件，则既可以满足结构或构件不同的使用要求，又能物尽其用降低成本，这才是最合理的优化设计。异种金属焊接技术就是实现这种优化设计的一项应用技术。目前，异种金属组合结构的焊接在电力、化工、锅炉、造船、航空航天等制造领域的应用已属常态化。

2. 异种金属的焊接性

异种金属材料的焊接性是指不同化学成分、不同组织性能的两两种或两种以上金属，在限定的施工条件下焊接成设计要求的构件，并能满足预定服役要求的能力。

异种金属的焊接性包括工艺焊接性和使用焊接性。异种金属的工艺焊接性是指两种不同性质金属的组合，在焊接过程中对焊接方法的适应性。异种金属组合的使用焊接性与同种金属材料的使用焊接性概念完全相同。异种金属的工艺焊接性和使用焊接性两者也不一定是一致的，有时工艺焊接性满足要求，而使用焊接性可能不符合技术条件的具体要求。当使用焊接性符合技术要求的情况下，工艺焊接性可能不能满足要求。因此，异种金属的焊接性应该从工艺焊接性和使用焊接性两方面综合评价。异种金属焊接性的评定方法与同种金属的焊接性评定方法基本相同。

1.1.2 异种金属焊接性的影响因素

影响异种金属焊接性的因素应从两个方面分析：其一是异种金属组合中两种金属或合金的诸多性能差异，包括物理、化学性能差异，力学性能差异及两种金属材料的金相组织的差异；其二是焊接方法的选择，即不同的焊接方法在异种金属焊接的共同接头上发生的热过程的差异，不同的热输入及热循环对接头产生缺陷的敏感性及接头质量恶化程度不同，这些会直接影响产品使用的力学性能。其中，焊接缺陷不仅指的是冷热裂纹、气孔、夹渣、未焊透，还包括焊缝中产生金属间脆性化合物。接头性能恶化主要指的是接头或结构的力学性能指标下降。

影响异种金属焊接性的因素十分复杂，任何一条影响规律都带有多种边界条件，几乎没有独立参数。

1. 物理性能的差异

异种金属或合金的组合中，两种金属材料的物理性能差异越大，在相同的边界条件下其焊接性越差。表 1-1 显示的是几种常用金属材料的热物理性能参数。

表 1-1 几种常用金属材料的热物理性能

特性参数 金属	密度 /(g/cm ³)	电导率 (% IACS) ^①	热导率 /[W/(m·K)]	线胀系数 /(×10 ⁻⁶ /K)	比热容 /[J/(kg·K)]	熔点 /℃
铝	2700	62	222	23.6	940	660
铜	8925	100	394	16.5	376	1083
65/35 黄铜	8430	27	117	20.3	368	930
低碳钢	7800	10	46	12.6	496	1350
304 不锈钢	7880	2	21	16.2	490	1426
镁	1740	38	159	25.8	1022	651

① 电导率的单位中，IACS 是指国际退火铜标准，该栏数据可视为铜的允许电流通过能力为 100 时的相对电导率。

金属元素或金属及其合金的物理性能也称做热物理性能，因为表 1-1 所列参数都是和焊接时的加热与散热有关的参数。这些热物理性能都会直接影响焊接热过程，而焊接热过程会直接影响焊接质量与焊接生产率。

异种金属焊接时，两种不同金属的热物理性能差别越大，其焊接性就越差、越复杂，即异种金属的焊接能力就越小，焊接难度越大。

当低碳钢和铝合金焊接时，这种组合其热物理性能的诸参数相差很大，采用任何熔焊方法焊接都十分困难，工艺焊接性极差。原因之一是，由于熔点相差 2 倍多，熔焊时铝已经熔化，而低碳钢 (Fe) 仍处于固相状态；原因之二是线胀系数相差 2 倍，焊接过程中会产生很大的热应力，增加了裂纹倾向；原因之三是导热性与比热容不同，会产生不对称的温度场，所以接头两侧的结晶条件不同。但对于压焊（电阻焊、摩擦焊等）低碳钢和铝的组合却有着较好的压焊工艺焊接性。因为影响异种金属组合焊接性的因素不止是热物理性能的差异，还有其他影响因素，如力学性能等。

2. 力学性能的差异

一般情况下，同类金属材料中的异种金属材料的力学性能差异越接近，其熔焊或压

焊的焊接性越好，反之亦然。同类金属材料指的是金属材料的大类，即黑色金属（钢铁材料）和有色金属（非钢铁材料）。黑色金属中的低碳钢与不锈钢的组合就是同类异种金属材料；低碳钢与铝（及其合金）的组合则是非同类异种金属材料。非同类异种金属材料即使力学性能相近，也不一定有良好的焊接性，部分金属材料的力学性能见表 1-2。

表 1-2 部分金属材料的力学性能

材料名称	σ_b /MPa		σ_s /MPa		δ_5 (%)		HBW		备 注
	软	硬	软	硬	软	硬	软	硬	
H59	390	500	150	200	44	10	—	163	硬态为变形率 50% , 软态为退火状态
B19	400	800	100	600	35	3	70	120	
2A02 (LY2)	490		$\sigma_{0.2}$ 330		20		115		淬火并人工时效的挤压产品 T6
5A05 (LF5)	420		$\sigma_{0.2}$ 320		10		100		冷作硬化的 HX8
2A70 (LD7)	440		$\sigma_{0.2}$ 330		12		120		淬火并人工时效的 T6
ZnAl10 - 1	400 ~ 460		—		8 ~ 12		90 ~ 110		加工锌合金
NiCu28 - 2.5 - 1.5	450 ~ 500	600 ~ 850	240	630 ~ 800	25 ~ 40	2 ~ 3	135	210	蒙乃尔合金 (镍基合金之一)
Q235	325 ~ 500		185 ~ 235		21 ~ 26		—		Q235A、B、C、D

注：金属材料力学性能新符号见国家标准 GB/T 228.1—2010，其部分新旧符号对照为：抗拉强度 R_m (σ_b)，抗压强度 R_{mc} (σ_{bc})，伸长率 $A(\delta)$ ，断面收缩率 $Z(\psi)$ ……由于新旧标准符号许多不对应，全面贯彻新标准目前还不具备，故本书仍沿用旧标准符号，请读者见谅。

无论熔焊或压焊，例如常用碳素结构钢（简称碳钢）Q235 与有色金属防腐铝 5A05 (LF5)、硬铝合金 2A02 (LY2) 等都有相接近的力学性能，但其组合的焊接性（熔焊和压焊）极差，因为不是同类金属。而 Q235 和蒙乃尔合金的组合，其力学性能差异较大，但有较好的熔焊焊接性。此外，影响异种金属焊接性的因素不是孤立的，不止是异种金属组合中的物理性能差异和力学性能差异，还有其他影响因素。不同的组织状态及不同的热处理方式都会影响金属材料的力学性能及其焊接性。异种钢焊接时，金相组织相同的金属有相近的物理性能，可以实施相同的工艺原则。表 1-3 是钢铁材料按其室温金相组织的分类方法。

3. 化学成分的差异

化学成分的差异越大，同类异种金属组合的焊接能力越差。因为金属或合金的化学成分和热物理状态，决定了这种金属或合金的金相组织和力学性能。以碳钢为例，碳钢是 Fe 和 C 的合金，其化学成分中含碳量的不同，会有低碳钢、中碳钢及高碳钢之分。低、中、高碳钢因为化学成分不同，而且是仅仅一种化学成分碳的含量不同，则会有不同的金相组织状态和力学性能。表 1-3 同时也是常用于异种钢焊接的结构钢钢种，从中可以看出不同化学成分的牌号供应状态对应的金相组织。至于合金结构钢（低合金及

中合金), 则因为多种合金元素的含量不同会有不同的组织与力学性能也是必然的。除了碳之外的合金元素对合金的金相组织、力学性能及焊接过程中脆硬、冷裂及脆化等的影响十分复杂。为了定性及定量分析方便, 因而出现了一个众所周知的“碳当量”的概念。这里说的金相组织指的是待焊的金属材料的供应状态条件下, 可能是属于铁素体钢、珠光体钢和奥氏体钢等, 而不是焊接接头形成过程中因为热循环在焊缝及热影响出现的不同金相组织或金属间化合物。同类异种金属材料的化学成分的差异会直接影响异种金属组合中两种金属的力学性能的差异, 同时也会通过焊接热过程间接影响接头的金相组织的变化、焊接缺陷发生的种类和几率, 又进一步影响异种金属焊接接头的力学性能。接头的力学性能则是异种金属组合的使用焊接性的主要评价指标。

表 1-3 钢铁材料按其室温金相组织的分类

金相组织	钢类	钢牌号
P	低碳钢	Q195、Q215、Q235、Q255 ^① 、08、10、15、20、ZG25、Q245g (20g)、25g、Q245R (20R)、20HP
	中碳钢	Q275 ^① 、30、35、ZG35、40、45、50、55、15Mn、20Mn、25Mn、30Mn、35Mn、40Mn、45Mn、50Mn
	低合金钢	20Mn2、30Mn2、35Mn2、40Mn2、45Mn2、50Mn2、20MnV、30Mn2MoW、27SiMn、20SiMn2MoV、25SiMn2MoV、40MnB、20Mn2B、15MnVB、20MnVB、20CrMnSi、30CrMnSi、15Cr、20Cr、30Cr、40Cr、45Cr、50Cr、12CrNi2、12CrNi3、20CrV、40CrV、Q295、(09MnV、09MnNb、09Mn2)、Q345 (18Nb、09MnCuPTi、10MnSiCu、12MnV、14MnNb、16Mn、16MnRE)、Q390 (10MnPnNbRE、15MnV、15MnTi、16MnNb)、Q420 (14MnVTiRE、15MnVN)
	耐热钢	12CrMo、15CrMo、20CrMo、30CrMo、35CrMo、38CrMoAlA、1Cr5Mo、12CrMoV、20Cr3MoWVA、18CrNiW、12Cr1MoV、25CrMoV
F, F-M	高铬不锈钢	06Cr13、12Cr13、20Cr13、30Cr13
	高铬耐酸耐热钢	10Cr17、12Cr17Ti、14Cr17Ni2
	高铬热强钢	15Cr12WMoV、14Cr11MoV
A, A-F	奥氏体耐酸钢	06Cr18Ni10N、06Cr19Ni10、12Cr18Ni9、17Cr18Ni9、06Cr18Ni11Nb、12Cr18Ni12、06Cr17Ni12Mo2Ti
	奥氏体耐热钢和奥氏体热强钢	14Cr23Ni18、06Cr16Ni18、16Cr23Ni13、45Cr14Ni14W2Mo
	A-F耐酸钢	12Cr21Ni5Ti、06Cr17Ni12Mo2Ti

① Q255、Q275 牌号在 GB/T 700—2006 标准中已取消, 但目前有些工程中仍有应用的, 下同。

4. 异种金属的冶金相容性

不同金属材料冶金相容性是影响异种金属熔焊焊接性的重要因素, 所谓冶金相容性是指两种金属在液态和固态时互为溶质和溶剂的溶解性能。这里会有如下三种情况:

其一是熔焊时在液态下两种金属或合金互不相容, 这类异种金属或合金的组合从熔化到凝固过程极易分层脱离而使焊接失败。如铁与镁、铁与铅、铅与铜等的组合。

其二是在液态和固态都具有良好的互溶性 (即无限互溶) 的组合, 因而能够形成连续固溶体的异种金属材料, 具有良好的熔焊焊接性。所谓连续固溶指的是液态和固态条件下溶解度没有发生变化。常见金属形成连续固溶体的组合有以下几种:

铁的组合： $\text{Fe}(\gamma) - \text{Co}(\beta)$ ， $\text{Fe} - \text{V}$ (1234℃以上)， $\text{Fe} - \text{Cr}$ (920℃以上)。

钛的组合： $\text{Ti} - \text{Zr}$ ， $\text{Ti}(\beta) - \text{W}$ ， $\text{Ti}(\beta) - \text{V}$ ， $\text{Ti}(\beta) - \text{Ta}$ ， $\text{Ti}(\beta) - \text{Mo}$ ， $\text{Ti}(\beta) - \text{Nb}$ 。

镍的组合： $\text{Ni} - \text{W}$ ， $\text{Ni} - \text{Mn}(\gamma)$ ， $\text{Ni} - \text{Cu}$ ， $\text{Ni} - \text{Co}$ 。

铬的组合： $\text{Cr} - \text{Ti}(\beta)$ (1350℃以上)， $\text{Cr} - \text{Mo}$ ， $\text{Cr} - \text{V}$ ， $\text{Cr} - \text{W}$ 。

锰的组合： $\text{Mn}(\gamma) - \text{Cu}$ ， $\text{Mn}(\gamma) - \text{Co}(\beta)$ 。

铌的组合： $\text{Nb} - \text{Mo}$ ， $\text{Nb} - \text{Ta}$ ， $\text{Nb} - \text{W}$ 。

钼的组合： $\text{Mo} - \text{Ta}$ ， $\text{Mo} - \text{W}$ 。

钨的组合： $\text{W} - \text{Ta}$ 。

决定异种金属合金相容性的因素是金属元素的化学性能，表 1-4 列出了常见金属的化学性能。

表 1-4 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($\alpha - \text{Fe}$) 面心立方($\gamma - \text{Fe}$) 体心立方($\delta - \text{Fe}$)	$a_\alpha = 2.860$ $a_\gamma = 3.668$	ⅧB
铜(Cu)	29	63.54	1.28	1	面心立方	$a = 3.6147$	ⅠB
铝(Al)	13	26.98	1.43	1	面心立方	$a = 4.0496$	ⅢA
镍(Ni)	28	58.71	1.24	2	面心立方	$a = 3.5236$	ⅧB
钛(Ti)	22	47.90	1.47	2	密集六方	$a = 3.5236$ $c = 4.6788$	ⅣB
钼(Mo)	42	95.94	1.40	1	体心立方	$a = 3.1468$	ⅥB
钨(W)	74	183.2	1.41	2	体心立方($\alpha - \text{W}$) 复杂立方($\gamma - \text{W}$)	$a = 3.1650$	ⅥB
锆(Zr)	40	91.22	1.58	1	体心立方($\alpha - \text{Zr}$) 密集六方($\beta - \text{Zr}$)	$a = 3.231$ $a_\beta = 3.609$ $c = 5.148$	ⅣB
铍(Be)	4	9.012	1.13	2	密集六方	$a = 2.2856$ $c = 3.5832$	ⅡA
铅(Pb)	82	207.2	1.74	2	面心立方	—	ⅣA
镁(Mg)	12	24.305	1.364	2	密集六方	$a = 3.2094$ $c = 5.2105$	ⅡA
锰(Mn)	25	54.94	1.31	2	复杂立方($\alpha - \text{Mn}$) 复杂立方($\beta - \text{Mn}$) 面心立方($\gamma - \text{Mn}$) 面心立方($\delta - \text{Mn}$)	—	ⅥB
铌(Nb)	41	92.906	1.429		体心立方	$a = 3.3010$	ⅤB

(续)

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
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
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

一般来说,当两种金属的晶格类型相同,晶格常数、原子半径相差不超过 10% ~ 15%,电化学性能的差异不太大时,溶质原子能够连续固溶于溶剂,形成连续固溶体。能够形成连续固溶体的异种材料具有良好的熔焊工艺焊接性,否则易形成金属间化合物,使焊缝性能大幅度地降低。

由表 1-4 找出下列的铁 (Fe)、铅 (Pb)、铜 (Cu)、镁 (Mg) 金属的晶格常数、原子半径及晶格类型的数据,可以解释上述铁与镁、铁与铅、铅与铜的组合为什么没有熔焊焊接性的原因。

实际上表 1-4 所列的金属化学性能对判断不同类的黑色金属 (钢铁材料) 与有色金属 (非铁材料) 的异种金属组合的熔焊焊接性具有一定的参考价值和指导意义。对于黑色金属大类中异种金属组合 (异种钢铁材料) 的熔焊焊接性的判断,表 1-4 所示的化学性能的指导意义却不是那么明显而且要复杂的多。

其三,异种金属组合中两种金属或合金具有有限的互溶性,即两种金属的化学性能 (原子半径、晶格常数、晶格类型) 有一定的差异条件下,两种金属互溶的溶解度有限,在液态和固态时的溶解度相同或者液态冷却结晶时溶解度降低,则会因固态时的溶质金属过饱和而析出,无论析出的形式是金属间化合物,还是晶粒间的残存物,都会使接头力学性能降低并增加产生焊接裂纹的倾向。

当熔焊时采取的冶金措施和工艺措施不足以克服因互溶性差造成的焊接难度大时,则这种组合的熔焊焊接性就会变得很差。

表 1-5 是常见金属元素固态下相互作用的特性,显示了作为溶剂的金属元素在固态时能形成无限固溶和有限固溶的溶质元素,特别有助于对异种金属的熔焊工艺焊接性的分析。

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					
Co	1485	417	α - 密排六方	1. 248	2. 501 4. 066	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
			β - 面心立方		3. 548					
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

(续)

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			
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、Zr、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
Mn	1245	α - β :742 β - γ :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	—	—

具有有限互溶性的异种金属组合及可能生成的金属间化合物,焊接过程中它们只能在溶解度范围内进行扩散运动。能否生成金属间化合物是有条件的,这个条件是温度和时间。压焊方法一般不会生成金属间化合物,熔焊方法可能生成金属间化合物,但如果采用高能密度焊,由于热循环时间极短,小于生成金属间化合物的孕育时间,也不会生成金属间化合物。所以,焊接方法的选择十分重要,焊接方法强烈地制约此类异种金属的焊接性。

综上所述,从冶金相容性分析,异种金属的组合大体分为互不相容、无限互溶、有限互溶三大类。实际上异种金属焊接工程中经常遇到的是具有冶金有限互溶的异种金属材料焊接,其余两种是极端情况。所以,从某一方面来说,异种金属的焊接技术也是冶金相容性较差的有限互溶的异种金属材料的焊接技术。

影响异种金属焊接性的因素中,冶金相容性对异种金属焊接性起决定性的作用。合金相图是判断异种金属冶金相容性的首选工具。只有在合金相图中能够形成无限或有限固溶体的异种金属材料,才具备冶金相容性,才具备有熔焊焊接性。判断压焊工艺的焊接性,主要是考察异种金属的塑性,特别是高温塑性的差异及接头形式等。

1.1.3 异种金属焊接的工艺特殊性

1. 异种金属焊接技术的主要难度

异种金属焊接技术是异种金属焊接过程中所采用的焊接工艺措施。与同种金属的焊接技术一样,焊接技术包括了金属焊接性的分析判断和焊接方法的选择,然后才有工艺措施的实施,才能构成异种金属的焊接技术。

异种金属焊接技术受到焊接方法的制约,比同种金属焊接性受到焊接方法的制约更为强烈。例如,铝及铝合金的同种金属焊接,无论采用熔焊方法(TIG焊或MIG焊)还是采用压焊(电阻焊或摩擦焊等),都会得到没有焊接缺陷、符合要求的接头。铜的同种金属焊接也是如此。不同焊接方法、不同的工艺措施制约同种金属的焊接性。但是铜-铝作为异种金属焊接的组合,采用熔焊方法很难甚至不能获得良好的焊接接头。而采用压焊方法,采用合适的工艺措施很容易获得良好的铜-铝接头。因而异种金属的焊接性对焊接方法的适应能力更具有相对性。任何一种焊接方法的问世都是为满足同种金属材料焊接技术的特殊需要而诞生。很少有一种焊接方法是专用于异种金属焊接技术的。异种金属的焊接技术可根据各种焊接方法的特点去选择,焊接方法则以自身的特点去适应或制约。因而不同性质的两种金属材料构成的异种金属组合的焊接难度远远高于同种金属的焊接。异种金属组合的焊接技术要比同种金属组合焊接技术复杂得多也是必然的。

焊接接头的不均匀性、焊接技术的复杂性及接头产生焊接缺陷有较高的可能性,是异种金属熔焊的三大特征。

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,与同种金属材料的焊接相比,异种金属材料的焊接无论从焊接机理和操作技术上都比同种金属材料复杂得多。异种金属材料焊接中存在的主要问题如下:

1) 异种金属材料的熔点相差越大,越难进行焊接。这是因为熔点低的金属材料达

到熔化状态时，熔点高的金属材料仍呈固体状态，这时熔化的金属材料容易渗入过热区的晶界，会造成低熔点金属材料的流失、合金元素烧损或蒸发，使焊接接头难以熔合。例如，焊接铁与铅时（熔点相差很大），不仅两种金属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) 异种金属材料的线胀系数相差越大，越难进行焊接。线胀系数越大的金属材料，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) 异种金属材料的热导率和比热容相差越大，越难进行焊接。金属材料的热导率和比热容会使焊缝金属的结晶变坏，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) 异种金属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。

5) 异种金属材料在焊接过程中，由于焊接区金相组织的变化或新的生成组织，使焊接接头的性能恶化，给焊接带来很大的难度。接头熔合区和热影响区的力学性能较差，特别是塑性、韧性比母材明显下降。由于接头塑性、韧性的下降以及焊接应力的存在，异种金属材料的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。

6) 异种金属材料的氧化性越强，越难进行焊接。若用熔焊方法焊接铜和铝时，熔池中极易生成铜和铝的氧化物（ CuO 、 Cu_2O 和 Al_2O_3 ）。冷却结晶时，存在于晶粒边界的氧化物能使金属间结合力降低。 CuO 和 Cu_2O 均能与铜形成熔点低的共晶体（ $\text{Cu} + \text{CuO}$ 和 $\text{Cu} + \text{Cu}_2\text{O}$ ），使焊缝产生夹杂和裂纹。铜与铝形成的 CuAl_2 和 Cu_2Al 脆性化合物，能明显地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的难度相当大。

7) 异种金属材料焊接时，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。常用异种金属材料组合及焊接时存在的主要问题见表 1-6。

表 1-6 常用异种金属材料组合及焊接时存在的主要问题

异种金属材料组合	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
马氏体型不锈钢、铁素体型不锈钢与 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