

异种金属焊接

何康生 曹雄夫 编著



机械工业出版社

异种金属焊接

何康生 曹雄夫 编著



机械工业出版社

序

随着国民经济的迅速发展和科学技术日新月异的进步，新结构、新设备层出不穷，新材料和新工艺的应用日益广泛。从而给异种金属的焊接提出了越来越高的要求和大量的研究课题。

异种金属焊接结构能够充分利用各种材料的优异性能，如强度、比强度、耐腐蚀性、耐高温性、耐磨性、导电性、导热性等，因而给各种新型设备、仪表和结构件的科研设计提供了广阔的前景。异种金属焊接是一门新兴的科学技术，它除了要研究焊接的一般规律外，还要研究许多特殊的规律，如异种金属的物理、化学性能变化，金属间化合物的形成机理，冶金扩散过程，接头性能的检验等，涉及面很广。

近年来，有关异种金属焊接的试验研究和生产应用方面的报道，日渐增多，已引起广大焊接科技人员的极大关注。但目前在国内尚无这方面的专著。即使在国外文献中，也很难找到系统地、全面地论述异种金属焊接各种理论与实践问题的专著。

我们编著《异种金属焊接》一书是在这个领域的一种探索。一方面为了便于工程技术人员在科研、设计和生产中遇到问题时查考；另一方面则希望能把编著者所作的科研试验工作和国内外分散零星的资料以及最新的研究成果和应用情况，加以系统地 and 比较全面地归纳和整理。为促进我国异种金属焊接技术的迅速发展，起一抛砖引玉的作用。使这项新技术能更好地为我国四个现代化事业服务。

本书在编写过程中曾得到航天工业部关中原同志的很大帮助，他对全书内容进行了仔细的审阅，对图表、计算公式和有关数据认真核对，并提出了许多宝贵意见，在此表示由衷感谢。此外，核工业部第二研究设计院焊接实验室的同事们在本书编写过程中提供了有关资料和协助，也在此表示感谢。

由于我们水平有限，容易挂一漏万，书中错误和不当之处在所难免，恳切期望广大读者给予批评指正。

目 录

序

第一章 概论	1
第一节 金属的特性及异种金属组合的焊接性	2
一、常用金属的主要物理性能	2
二、异种金属的焊接性	2
三、控制焊接质量的工艺措施	5
第二节 异种金属焊接构件的分类	6
一、不同金属材料之间的组合	6
二、不同用途的异种金属焊接构件	6
三、异种钢焊接构件	7
第三节 焊接异种金属的方法	7
一、熔焊	16
二、压焊	14
三、熔焊-钎焊	22
四、液相过渡焊	26
第四节 异种金属焊接构件在工业中的应用	28
一、一般用途的异种金属焊接构件	28
二、耐高温的异种金属焊接构件	30
三、耐腐蚀、耐磨的复合钢构件	38
四、电子工业中的异种金属焊接构件	38
五、刀具及内燃机气门等零件	40
第二章 异种金属熔焊的理论基础	43
第一节 焊缝金属的化学不均匀性	44
一、焊缝金属的熔合比	44
二、确定焊缝成分的计算方法	49
三、异种金属熔焊焊缝成分的控制	53
第二节 焊缝金属金相组织的不均匀性	60

一、根据 Schaffler 状态图判断焊缝金属的金相组织	60
二、熔合比对焊缝组织的影响	62
三、应用实验法和状态图确定焊缝中的铬、镍含量	65
第三节 熔合区的形成条件和结构特点	67
一、熔合区的形成过程	67
二、熔合区的结构特点	68
三、熔合区中的过渡层	70
第四节 焊缝成分对近缝区抗裂性能的影响	74
第五节 产生扩散过渡层的条件	76
一、固相与液相之间的互相作用	76
二、碳的扩散及其研究方法	78
三、扩散过渡层中显微硬度的变化	80
四、多组元体系的扩散	81
第六节 脆性层的形成机理	84
一、碳在钢中的活性	85
二、碳的反应扩散过程	85
第七节 相的组成和保温时间对扩散层的影响	87
一、反应扩散对扩散层的影响	87
二、碳含量对扩散层厚度的影响	88
三、热处理规范对扩散层的影响	89
四、热应力和塑性变形对扩散层的影响	91
五、相的组成对扩散层的影响	93
第八节 α 固溶体和 γ 固溶体中形成扩散层的条件	94
第九节 合金成分对扩散过渡层的影响	96
一、铬对扩散过渡层的影响	96
二、碳化物形成元素对扩散层的影响	97
三、镍对扩散层的影响	100
四、减小扩散层的措施	102
五、扩散层厚度的计算	104
第三章 异种金属压焊的理论基础	106
第一节 压焊机理简介	106
一、薄膜学说	106
二、再结晶理论	107

三、位错学说	107
四、扩散理论	108
五、能量学说	108
第二节 焊接过程的三阶段模式	109
一、压焊过程的三个阶段	109
二、压焊的分类	110
第三节 物理接触的形成阶段	116
一、去除表面氧化膜	116
二、物理接触的形成	120
第四节 接触表面的激活阶段	123
一、表面激活的形成	123
二、表面原子间的相互作用	124
第五节 扩散阶段	125
一、压焊第三阶段的特点	125
二、不同金属的第三阶段	126
三、再结晶	127
四、脆性相	128
第六节 变形在压焊接头形成过程中的作用	130
一、变形在不同压焊方法中的影响不同	130
二、变形在扩散焊过程中的作用	130
第七节 异种金属焊接接头中的扩散运动	134
一、扩散过程的基本规律	134
二、压焊时的扩散过程	138
第八节 接触熔化及其在异种金属焊接中的应用	143
一、接触熔化	143
二、利用接触熔化的焊接	144
第四章 异种金属焊接接头中新相的形成及其增大过程	148
第一节 金属元素的相互作用	149
第二节 异种金属焊接接头中新相的形成	158
一、无限固溶异种金属的焊接	158
二、液态互溶、固态无限溶解的异种金属焊接	162
三、液态互溶、固态互不溶解的共晶型及固态形成有限固溶体的	

异种金属焊接	163
四、液态互溶、固态时形成化合物的异种金属焊接	168
第三节 金属间化合物形成和增大过程的一般规律	173
一、反应扩散的概念	173
二、抛物线式增大规律和佯野界面	174
三、扩散的热力学理论	180
四、金属间化合物相的形成	183
五、金属间化合物相的增大	186
第四节 金属间化合物相形成和增大的典型实例	189
一、典型实例的选择和研究方法	189
二、铝-铜系	193
三、铁-铝系	204
第五章 异种钢的焊接	210
第一节 焊接方法的选择	210
第二节 焊接材料的选择	215
一、选择焊接材料的一般原则	215
二、根据机械强度选取焊条	216
三、各种主要的常用焊接材料	218
四、异种钢的分类及其组合	218
第三节 不同珠光体钢的焊接	240
一、珠光体钢的焊接性及其预热温度的计算	240
二、焊接不同珠光体钢的焊条选择	242
三、不同珠光体钢焊后回火规范的选取	245
第四节 不同高铬钢的焊接	247
一、Ⅳ类钢的焊接	248
二、Ⅴ类钢的焊接	249
第五节 不同奥氏体钢的焊接	250
一、奥氏体钢焊接的特点	250
二、奥氏体钢焊接接头的热处理	255
三、焊接材料的选择	256
第六节 珠光体钢与铁素体钢的焊接	259
第七节 珠光体钢与奥氏体钢的焊接	264

一、珠光体钢与奥氏体钢焊接的特点	264
二、珠光体钢与奥氏体钢的焊接工艺	266
第八节 铁素体钢与奥氏体钢的焊接	273
一、焊接材料的选择	273
二、焊前预热和焊后热处理	274
第九节 其它黑色金属的焊接	276
一、普通低合金钢及碳钢的焊接	276
二、铸铁与钢的焊接	276
第十节 复合钢的焊接	280
一、复合钢材料	280
二、复合钢焊接的坡口形式	282
三、复合钢的焊接	282
第十一节 堆焊	287
一、手工电弧堆焊	287
二、氧乙炔堆焊	292
三、埋弧堆焊	292
四、气体保护堆焊	296
五、振动电弧堆焊	296
六、等离子弧堆焊	298
七、电渣堆焊	298
第十二节 异种钢的压焊	300
一、压焊是解决难于熔焊课题的最佳方法	300
二、焊接规范和接头性能	303
第六章 钢与有色金属的焊接	308
第一节 铝与钢的焊接	309
一、铝、铁的性质	309
二、铝与其它金属的相互作用	313
三、铝与钢熔焊特点	315
四、铝、铝合金与钢的熔焊	318
五、铝与钢的压焊	322
第二节 铜与钢的焊接	327
一、铜及铜合金	327

二、铜与钢焊接的特点	330
三、铜、铜合金与钢的焊接	335
四、铜与不锈钢的焊接	337
第三节 镍、镍合金以及高温合金与钢的焊接	339
一、镍及镍合金与钢的焊接	339
二、高温合金与钢的焊接	346
第四节 钛与不锈钢的焊接	360
第五节 难熔金属与钢的焊接	361
一、铌与不锈钢的焊接	364
二、钼与不锈钢的焊接	370
三、钨与不锈钢的焊接	373
第六节 钛与钢的焊接	373
一、钛	373
二、熔焊	375
三、熔焊-钎焊	382
四、压焊	383
五、钛-钢复合板的焊接	391
第七节 锆与不锈钢的焊接	394
一、锆的特性及用途	394
二、锆与不锈钢的焊接方法	396
第七章 异种有色金属的焊接	402
第一节 铝与铜的焊接	402
一、铝与铜的焊接性	402
二、熔焊	404
三、压焊	410
第二节 钛与铝的焊接	414
第三节 钛与铜的焊接	420
第四节 钛与钒、钽、锆的焊接	429
一、钛与钒的焊接	429
二、钛与钽的焊接	430
三、钛与锆的焊接	430
第五节 镍与铜的焊接	432

X

第六节 钼与其它有色金属的焊接	433
一、钼与镍的焊接	434
二、钼与铜的焊接	434
三、钼与钨的焊接	435
四、钼与铌的焊接	436
五、钼与钛的焊接	436
第七节 铌与其它金属的焊接	437
一、铌的性质及焊接特点	437
二、钛与铌的焊接	437
第八节 锆与铌的焊接	439
第八章 异种金属焊接接头的性能及其研究方法	445
第一节 异种金属焊接接头的研究方法	445
第二节 异种金属焊接接头的机械性能	451
第三节 异种金属焊接接头的耐腐蚀性能	457
一、焊接接头的电化学特征	460
二、铝与钢焊接接头的耐腐蚀性能	464
三、铝与铜焊接接头的耐腐蚀性能	466
第四节 异种金属焊接接头中的残余应力	467
第五节 异种金属焊接接头热处理后的残余应力	470
参考文献	474
附录	480

第一章 概 论

现代化动力机械、化工和石油加工设备以及多种仪器的许多零部件，都要在高温、巨大的载荷、强烈浸蚀性介质、电磁场或放射性环境中长期工作。因此，用来制造这些零部件的材料，必须是能满足上述要求的特殊材料，如高合金钢、有色金属以及专用合金等。

显然，如果整个设备和仪器都采用贵重材料制造，不但会使生产工艺过程大为复杂化、显著提高设备和仪器的造价，更重要的是满足不了使用要求。此外，运载火箭、航天器、超音速飞机、现代化的潜艇等部门的发展更与材料性能紧密相关，这些部门要求使用的材料在低温和高温下有很高的比强度，以及在振动和高速运行时，具有足够的强度和寿命，以保证长期工作的可靠性。目前对所有材料（包括最近新研制的材料）的性能分析表明，单独使用任何一种材料都不能同时满足上述的全部要求。

通常，任何一种构件在使用过程中，其各部分所承受的载荷并不一致，一部分零件的工作条件较差，可能接近许用应力的极限值，而另一部分零件的工作条件可能只承受很小的应力。显然，在这种场合下，应用异种金属焊接结构就比较合理。

基于上述理由，在现代化国民经济的各部门中，将不可避免地、经常地会遇到异种金属焊接的构件。异种金属焊接构件的特点是，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。

把异种金属零件连接成一个整体部件，焊接常常是最好的方法。有时也可以采用钎焊，但接头的强度和耐腐蚀等性能往往受到钎料性能的限制，不容易满足较高的使用要求。现有的机械连接法不但连接工艺复杂，而且在使用过程中多半不能满足可靠

性要求。

第一节 金属的特性及异种金属组合的焊接性

一、常用金属的主要物理性能

大多数异种金属组合中，两种材料的熔点、密度、导热性都不同，线膨胀系数、晶格类型和晶格参数等也有所差别，有的差别甚至很大，这对于焊接的难易程度和对材料的搭配组合以及合理选择焊接方法等都有很大影响。表 1-1 列出了一些常用金属的主要物理性能。

二、异种金属的焊接性

焊接异种金属通常要比焊接同种金属困难。因为，除了金属本身的物理化学性能对焊接性的影响之外，两种金属材料性能的差异会在更大程度上影响它们之间的焊接性。

(一) 结晶化学性的差异

结晶化学性的差异主要指晶格的类型、晶格参数、原子半径、原子的外层电子结构等的差异，也就是通常指的“冶金学上的不相容性”。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）。

两种金属或合金在液态下不能互溶时，如纯铅与铜、铁与镁、铁与铅等，一般不能采用熔焊方法进行焊接，因为这类异种金属组合从熔化到冷凝过程中极易产生分层脱离而使焊接失败。因此在选择材料的搭配时必须首先满足互溶性的要求。研究证明，下列各金属组合都能形成连续的固溶体：Fe-Ni、Fe-V（超过 1234℃）、Fe-Cr（超过 920℃）、Fe(γ)-Co(β)、Ni-W、Ni-Mn(γ)、Ni-Cu、Ni-Co、Cr-Ti(β)（超过 1350℃）、Cr-Mo、Cr-V、Cr-W、Mn(γ)-Cu、Mn(γ)-Co(β)、Ti-Zr、Ti(β)-W、Ti(β)-V、Ti(β)-Ta、Ti(β)-Mo、Ti(β)-Nb、Nb-Mo、Nb-Ta、Nb-W、Mo-Ta、Mo-W、W-Ta 等〔3〕。

除满足互溶性要求之外，两种被焊金属还应当具有同一类型

表1-1 一些常用金属的主要物理性能

金属	密度 (20°C) (公斤/ 米 ³)	熔点(°C)	比电阻 (28°C) (10 ⁻⁸ 欧·米)	线膨胀 系数 (0~100 °C) (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	导热系数 (0~500 °C) (瓦/ 米·K)	热容量 (0~500 °C) (焦/ 公斤·K)	晶格类型	晶格参数 (20°C) (10 ⁻⁶ 米)
Al	2700	660	2.6	24.0	204	880	面心立方	4.040
V	6000	1735	26	8.3	30		体心立方	3.033
W	19300	3410	5.5	4.0	164	525	体心立方	3.158
Fe	7800	1539	9.7	11.9	78	460	体心立方	2.860
Co	8900	1495	6.2	12.5	69	453	稠密六方	2.502 4.061
Cu	8900	1083	1.6	16.5	390	380	面心立方	3.608
Mo	10200	2625	5.1	5.1	152	268	体心立方	3.140
Ni	8900	1455	6.8	13.5	58	444	面心立方	3.516
Nb	8500	2415	13.1①	6.2	52	284	体心立方	3.294 5.819
Sn	7300	232	11.5	21.0	64	230	正方晶格	3.175
Pb	11300	327	20.6	29.5	35	130	面心立方	4.493
Ag	10500	960	1.6	18.9	420	210	面心立方	4.077
Ta	16600	2996	12.4	6.6	56	146	体心立方	3.295 2.953
Ti	4500	1820	80②	4.5	13	578	稠密六方	4.729 2.639
Zn	7100	419	5.9	30.0	112	370	稠密六方	4.935
Zr	6500	1750	41②	(5.4~ 5.8)	17	289	稠密六方	3.223 5.123

① 18°C时的电阻。

② 0°C时的电阻。

的晶格，形成固溶体金属的原子半径相差不超过10~15%，电化学性能的差异不能太大，否则容易形成金属间化合物。对于化学元素周期表中的同族或相邻族元素都能满足这一要求。

焊接互溶性有限制的两种金属或合金时，能否防止裂纹的产生主要取决于结晶条件、相变的性质和受力状态。因此，当采取的冶金措施和焊接工艺措施尚不足以克服因互溶性差造成的焊接困难时，就会影响这类金属的焊接性。有限的溶解度有时会形成金属间化合物和使过饱和固溶体的剩余成分析出，从而降低接头的性能。

多晶金属和合金在固溶体冷却过程中产生的相变和组织转变会造成冷裂纹。这类转变还伴随有晶格的明显畸变和体积的变

化（如珠光体钢和马氏体钢中的马氏体转变，钛和钛合金中氢化物的转变）。焊接异种金属时，金属线膨胀系数的差异和相变临界点位置的差别都对受力状态有明显的影响。

（二）物理性能的差异

两种金属物理性能的差异主要是指熔化温度、膨胀系数、导热系数和比电阻等的差异。它们将影响焊接的热循环过程和结晶条件，增加焊接应力，降低接头质量。当两种被焊金属的熔点和沸点相差太悬殊（如铁与锌、钨与铅等），焊接时就会产生困难。

（三）金属的表面状态

经电子显微镜观察和其它仪器测试发现，金属表面状态是很复杂的；有氧化层（通常称为氧化膜）、结晶受到破坏的表面层、吸附的氧离子和空气分子、水、油、尘埃等杂质和脏物。图 1-1 示出了金属表面状态的示意图。不论是同种金属焊接还是异种金属焊接，都必须对金属的表面状态给予充分的重视，在生产实践中，往往由于金属表面氧化膜和其它吸附物的存在给焊接带来极大的困难。

（四）异种金属焊接的主要问题

引起异种金属焊接困难的主要原因是基体金属之间物理和化学性能的不同。此外，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。因而，异种金属焊接时，经常会遇到如下问题：

（1）两种基体金属之间不

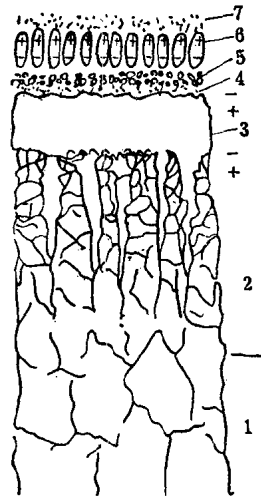


图1-1 金属表面状态示意图

- 1—未经塑性变形的金属层
- 2—含有氧化物、结晶已破坏的表面层
- 3—具有极性（内和外）界限的氧化层，上层的极性用符号±表示
- 4—氧离子和中性空气分子吸附层
- 5—水分子层
- 6—油分子层
- 7—电离了的尘埃

能形成合金；

(2) 焊接过程中金相组织的变化或产生新的组织而使接头的性能变差；

(3) 熔合区及热影响区的机械性能，特别是塑性的降低；

(4) 由于基体金属热膨胀系数不同而引起热应力，而且这种热应力不能消除；

(5) 因塑性变差和应力增加往往容易引起裂纹。

表 1-2 列出了目前常用的异种金属组合及其焊接时存在的主要问题。

表 1-2 焊接常用异种金属时存在的主要问题

异种金属组合	焊接时存在的主要问题
奥氏体类不锈钢同碳钢、Cr-Mo 钢	焊缝金属、熔合区塑性降低，稀释率对耐腐蚀性的影响，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合金同碳钢、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线剥离
马氏体类不锈钢、铁素体类不锈钢同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
铜合金同碳钢	稀释率对接头性能的影响，铜合金向钢一侧热影响区晶界渗入，热冲击，补焊时引起熔合线剥离
钎合金钢同钴铬钨合金	热裂纹，气孔和预热规范的关系问题
铸铁、合金铸件同钢、有色合金	焊缝金属、熔合区裂纹、焊缝金属和填充材料的关系问题
Al、Mg、Ti、Ta、Be等有色金属同钢复合材料	焊接方法对接头性能的影响

三、控制焊接质量的工艺措施

质量优良的异种金属焊接接头除了在设计 and 结构上必须合理以外，接头本身还应满足多种要求，例如强度、真空致密性、热稳定性、耐磨性、耐腐蚀性、导电性和尺寸精度等。为了获得优

质的异种金属焊接接头，通常可以采取下列一些工艺措施：

(1) 尽量缩短被焊金属在液态下相互接触的时间，以防止或减少生成金属间化合物。熔焊时，被焊材料的加热和接触时间可以利用热源偏向被焊件一方（通常偏向熔点高的工件）的方法来调节；电阻焊时，可以采用截面和尺寸不同的电极，或者采用快速加热等方法调节。

(2) 熔焊时要很好地保护被焊金属，防止金属与周围空气的相互作用。

(3) 采用与两种被焊金属都能很好焊接的中间层或堆焊中间过渡层，以防止生成金属间化合物。

(4) 在焊缝中加入某些合金元素，以阻止金属间化合物相的产生和增长。

第二节 异种金属焊接构件的分类

可以组成异种金属构件的材料是多种多样的，实际上包括绝大部分可焊的金属和合金。异种金属焊接构件的分类方法也同样是多种多样的。

一、不同金属材料之间的组合

异种金属焊接构件的分类最常见的是按金属材料组合进行分类。在本书以后各章节阐述具体的焊接工艺时，亦将按照这种分类法的顺序进行介绍。按组合材料分类，异种金属构件可分为：(1) 异种黑色金属的焊接构件；(2) 异种有色金属的焊接构件；(3) 有色金属与黑色金属的焊接构件。

二、不同用途的异种金属焊接构件

(一) 用于耐磨的异种金属焊接构件

如高碳钢、各种合金钢、超合金、碳化钨等硬质合金，这类材料主要用于制造建筑机械、发动机、炼钢机械、刀具等。

(二) 用于耐热的异种金属焊接构件

如铬钼钢、不锈钢、耐热钢、镍基合金、钴基合金等各种耐热超合金、钽、铌、钼合金等各种超高温材料、复合材料，这

类材料主要用于制造锅炉、发动机、炼钢、机械、汽轮机等。

(三) 用于耐腐蚀的异种金属焊接构件

如各种不锈钢、镍、铜、铝、钛、钽等及其合金，这类材料可用于制造化工、原子能、海洋设备及医疗器械等。

(四) 用于减轻设备重量的异种金属焊接构件

如钛、铝等及其合金，主要用于火箭、运输设备。

(五) 提高电磁性能的异种金属焊接构件

如银、铜、铍等及其合金，主要用于制造电子工业零件。

三、异种钢焊接构件

各种类型的钢是现代工业中应用最广的金属材料，所以对钢的焊接，其中包括异种钢的焊接研究比较深入，资料比较成熟。对异种钢焊接构件的分类也较系统、完善，具体见图 1-2。

(一) 母材相同，但焊缝与母材钢型号不同的焊接构件

这一类构件实际上属于同种钢焊接构件，其母材大多为马氏体、奥氏体和铁素体钢。当采用的焊接材料与母材成分有较大差异时，也会产生类似于异种金属焊接中存在的问题。

(二) 复合钢构件

这类构件是用低碳钢或低合金钢做基材，用合金钢或有色金属做包覆材料。按使用条件要求，包覆材料一般由耐磨、耐侵蚀性介质的材料制成。

(三) 不同金相组织的异种钢焊接构件

这类构件主要分下面两种情况：

(1) 金相组织相同而合金化程度不同的异种钢焊接构件，例如低碳钢与铬钼钢、1Cr18Ni9Ti 与高镍奥氏体钢之间的焊接构件都属于这一类；

(2) 金相组织不同的异种钢焊接构件，最常见的有珠光体钢与铬镍奥氏体钢、珠光体钢与高铬马氏体-铁素体钢的焊接构件。

第三节 焊接异种金属的方法

焊接异种金属的方法很多，各种方法都有其各自的特点，在