

H 焊接施工工艺与操作系列丛书

HANJIESHIGONGGONGYIYU
CAOZUOXILIECONGSHU


异种金属的焊接

YIZHONGJINSHUDEHANJIE

杨海明 主 编
王同生 副主编



TG457.1
16

 辽宁科学技术出版社

014044182

TG457.1
16

焊接施工工艺与操作系列丛书

异种金属的焊接

杨海明 主编
王同生 副主编



辽宁科学技术出版社

沈阳



北航

C1732167

TG 457.1

16



北航

C1732167 号

异种金属的焊接/杨海明主编. —沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2014.5

(焊接施工工艺与操作系列丛书)

ISBN 978-7-5381-8497-6

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第034155号

出版发行: 辽宁科学技术出版社

(地址: 沈阳市和平区十一纬路29号 邮编: 110003)

印刷者: 沈阳百江印刷有限公司

经销者: 各地新华书店

幅面尺寸: 140mm × 203mm

印 张: 4.75

字 数: 150千字

印 数: 1 ~ 3000

出版时间: 2014年5月第1版

印刷时间: 2014年5月第1次印刷

责任编辑: 高 鹏

封面设计: 杜 江

版式设计: 于 浪

责任校对: 刘 庶

书 号: ISBN 978-7-5381-8497-6

定 价: 19.80元

联系电话: 024-23284062

邮购热线: 024-23284502

E-mail: lnkj1107@126.com

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

本社法律顾问: 陈光律师

咨询电话: 13940289230

前 言

随着现代工业和科学技术的快速发展，焊接技术在国民经济发展和现代制造业中起着越来越重要的作用，它广泛应用于汽车、机械工程、船舶、航空航天、石油化工、重型机械、锅炉、压力容器等领域。要掌握对于各种金属材料的焊接技能，就必须了解各种金属材料的性能，掌握其相应的焊接工艺和必要的操作要领。借鉴成熟的经验，遵循合理的工艺和采用良好的操作手段进行施工生产，是控制焊接质量的必要条件。

为此，我们编写了《焊接施工工艺与操作系列丛书》，包括《碳素钢与低合金钢的焊接》、《不锈钢与特殊用途钢的焊接》、《有色金属的焊接》、《铸铁与堆焊材料的焊接》和《异种金属的焊接》等，希望丛书能对焊接技术技能人才专业技能水平的提高提供一定的帮助。

本丛书是根据焊接生产施工实际情况，结合作者多年从事生产和教学的经验，介绍了常用金属材料的焊接施工工艺与操作技法。内容以注重生产实用性、实用技术为主，以理论知识为辅，特别注重各项技能技巧的编写。本册介绍了各类异种金属焊接的种类、牌号、用途、焊接性、焊接材料、焊接方法和相应工艺、操作要领，以及各类异种金属的焊接缺陷防止措施、工程实际应用等。力求做到通俗、易读、紧贴实际应用，适合生产一线工人和技术人员以及职业院校师生等读者群使用参考。

本书由江苏省常州技师学院杨海明主编，王同生副主编，勾容、季炼平、钱金华、杭明峰、曾鹏参编。

本书引用了大量的参考文献，在此向所引用文献的作者表示感谢。由于编者水平有限，本书中误漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第1章 异种金属的材料及其焊接性	1
1.1 异种钢焊接的材料种类及其焊接性	1
1.2 异种有色金属焊接的材料种类及其焊接性	8
1.3 钢与有色金属焊接的材料种类及其焊接性	12
第2章 异种金属焊接的焊接材料	17
2.1 异种钢焊接的焊接材料	17
2.2 异种有色金属的焊接材料	21
2.3 钢与有色金属的焊接材料	22
第3章 异种金属的焊接工艺	25
3.1 异种钢焊接的工艺原则	25
3.2 异种珠光体钢的焊接工艺	30
3.3 异种铁素体-马氏体钢的焊接以及异种奥氏体钢 焊接的焊接工艺	36
3.4 奥氏体钢与珠光体钢的焊接工艺	39
3.5 奥氏体钢与铁素体钢、马氏体钢的焊接工艺	44
3.6 珠光体钢与马氏体钢及铁素体钢的焊接工艺	47
3.7 铸铁与钢的焊接工艺	50
3.8 铜与铝、钛及镍的焊接工艺	54
3.9 铝与钛及镁的焊接工艺	60
3.10 铜与钢的焊接工艺	64
3.11 铝与钢的焊接工艺	68
3.12 钢与镍的焊接工艺	72

第4章 异种金属的焊接操作	76
4.1 异种钢的焊接操作	76
4.2 异种有色金属的焊接操作	84
4.3 钢与有色金属的焊接操作	86
第5章 异种金属的焊接实例	93
5.1 异种钢焊接实例	93
5.2 异种有色金属焊接实例	107
5.3 钢与有色金属焊接实例	113
第6章 异种金属焊接的质量控制	124
6.1 异种金属焊接的工艺措施及质量控制	124
6.2 焊接接头力学性能试验方法	130
6.3 焊接接头理化试验方法	139
6.4 焊接容器的密封性试验方法	144
参考文献	147

第1章

异种金属的材料及其焊接性

1.1 异种钢焊接的材料种类及其焊接性

1.1.1 异种钢焊接常用的钢种

由于异种钢的焊接结构既可以满足耐高温、耐腐蚀和耐磨损的要求，同时还可以节省大量的合金钢，因此在异种金属焊接中，异种钢焊接结构应用非常广泛。目前，用于异种钢焊接结构的钢种相当多，根据金相组织可分为珠光体钢、铁素体钢及铁素体-马氏体钢、奥氏体钢及奥氏体-铁素体钢三大类，表1-1列出了上述一些常用的钢种。按钢种的力学性能、使用性能、焊接性及工程应用等，又将上述三类钢种分成若干类别。对于同类组织、不同类别的钢种来说，尽管它们的组织相同，但由于化学成分与性能存在较大差异，因此工程中把它们之间的组合归属于异种钢的焊接。这样，异种钢的焊接就包括金相组织相同和金相组织不同两种情况。常见组合为异种珠光体钢的焊接、异种奥氏体钢的焊接、珠光体钢和奥氏体钢的焊接、珠光体钢和马氏体钢的焊接及奥氏体钢与铁素体钢的焊接等。

表1-1 常用于异种钢焊接结构的钢种

组织类型	类别	钢号
珠光体钢	I	低碳钢: Q195、Q215、Q235、Q255、08、10、15、20、25 破冰船用低温钢: 锅炉钢20g、22g、20R
	II	中碳钢和低合金钢: Q275、Q345、16Mn、20Mn、25Mn、30Mn、30、09MnV、15MnV、14MnNb、15MnVNR、15MnTi、18MnSi、14MnMoV、18MnMoNbR、18CrMnTi、20MnSi、20MnMo、15Cr、20Cr、30V、10Mn2、10CrV、20CrV
	III	船用特殊低合金钢: AK25 ^① 、AK27 ^① 、AK28 ^① 、AJ15 ^① 、901钢、902钢
	IV	高强度中碳钢和中碳低合金钢: 35、40、45、50、55、35Mn、40Mn、45Mn、50Mn、40Cr、45Cr、50Cr、35Mn2、40Mn2、50Mn2、30CrMnTi、40CrMn、35CrMn2、35CrMn、40CrMo、38CrMoAlA、2.25Cr-1Mo

续表

组织类型	类别	钢号
珠光体钢	V	铬钼耐热钢: 12CrMo、12Cr2Mo、12Cr2Mo1R、15CrMo、15CrMoR、20CrMo、30CrMo、35CrMo、38CrMoAlA、2.25Cr-1Mo
	VI	铬钼钒、铬钼钨耐热钢: 20Cr3MoWVA、12Cr1MoV、25CrMoV、12Cr2MoWVTiB
马氏体、铁素体钢	VII	高铬不锈钢: 0Cr13、1Cr14、1Cr13、2Cr13、3Cr13
	VIII	高铬耐酸耐热钢: Cr17、Cr17Ti、Cr25、1Cr28、1Cr17Ni2
	IX	高铬热强钢: Cr5Mo、Cr9Mo1NbV、1Cr11MoNbV、1Cr12WNiMoV ^① 、1Cr11MoV ^① 、X20CrMoV121 ^②
奥氏体及奥氏体、铁素体钢	X	奥氏体耐酸钢: 00Cr18Ni10、0Cr18Ni9、1Cr18Ni9、2Cr18Ni9、0Cr18NiTi、1Cr18Ni9Ti、1Cr18Ni11Nb、Cr18Ni12Mo2Ti、0Cr18Ni12TiV、Cr18Ni22W2Ti2
	XI	奥氏体耐热钢: 0Cr23Ni18、Cr18Ni18、Cr23Ni13、0Cr20Ni14Si2、Cr20Ni14Si2、TP304 ^③ 、P347H ^③ 、4Cr14Ni14W2Mo
	XII	无镍或少量镍的铬锰氮奥氏体钢和无铬镍奥氏体钢: 3Cr18Mn12Si2N、2Cr20Mn9Ni2Si2N、2Mn18Al15SiMoTi
	XIII	奥氏体-铁素体高强度耐酸钢: 0Cr21Ni5Ti ^① 、0Cr21Ni6MoTi ^① 、1Cr22Ni5Ti ^①

注: ①为苏联钢号; ②为德国钢号; ③为美国钢号。

1.1.2 异种钢的焊接特点

(1) 化学成分的不均匀性。

异种钢焊接时两种母材的化学成分往往有很大的差异, 而焊缝金属的成分是由两种母材和填充金属的成分混合而成。焊接接头化学成分的不均匀性主要表现在三个方面。第一, 随着焊缝形状、母材厚度、焊接方法的不同, 母材的熔化量也将有很大的不同, 因此焊缝的成分也有所不同; 第二, 异种钢焊接接头中不仅焊缝与母材成分不同, 而且焊缝本身成分也是不均匀的 (例如在多层焊时第一层熔入母材的量最多, 其他各层熔入母材的量逐渐减少); 第三, 在焊缝与母材交界的过渡区 (熔合区), 其成分常常既不同于焊缝, 也不同于母材。这种成分的不均匀, 对异种钢焊接接头的性能有很重要影响 (特别是当两种母材的化学成分相差很大时), 在选择焊接方法、填充材料及制定焊接工艺时, 应充分考虑其影响的后果。

事实上, 化学成分的不均匀性在很大程度上取决于焊接时熔

化的母材对焊缝金属的稀释程度，即母材金属的稀释率（或熔合比） θ ，如图1-1所示。

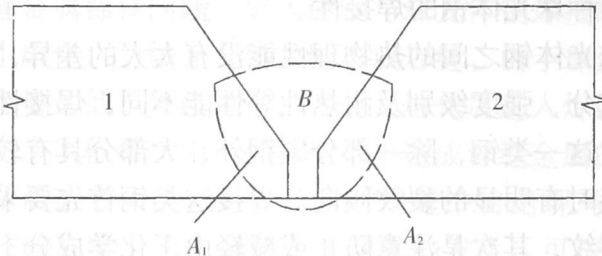


图1-1 焊道稀释率 θ 示意图

$$\theta = A / (A+B) = (A_1+A_2) / (A_1+A_2+B)$$

式中： B ——填充金属的熔入量；

A ——母材的熔入量， $A=A_1+A_2$ ；

A_1 ——母材1的熔入量；

A_2 ——母材2的熔入量。

(2) 组织的不均匀性。

由于成分的不均匀而导致焊接接头上组织的不均匀。如低碳钢与奥氏体不锈钢焊接时，低碳钢一侧母材组织为铁素体加珠光体组织，不锈钢一侧为奥氏体组织，而焊缝和低碳钢一侧的熔合区，则由于低碳钢的稀释作用而使其铬、镍含量降低，于是产生一定量的马氏体组织。

(3) 力学性能的不均匀。

焊接接头各区域化学成分和组织的不均匀性，带来了焊接接头各区域力学性能的不同，特别是当两种母材的成分和组织相差很大时，沿接头各区域的室温强度、塑性、韧性都有很大的差别。高温下的蠕变极限和持久强度也会相差悬殊。

如果两种母材的线胀系数和热导率存在很大差别，将影响接头在高温下的使用性能。

(4) 应力场分布的不均匀。

焊接接头中各区域塑性的不同、线胀系数的不同和组织结构的不均匀，都将引起接头上焊接残余应力分布不均匀，甚至出现

应力集中，从而成为焊接接头断裂的重要原因。

1.1.3 各类型异种钢的焊接性

(1) 异种珠光体钢的焊接性。

异种珠光体钢之间的热物理性能没有太大的差异，但由于它们的化学成分、强度级别及耐热性等性能不同，焊接性能也有较大的差异。这一类钢，除一部分碳钢外，大部分具有较大的淬硬倾向，焊接时有明显的裂纹倾向。焊接这类钢首先要采取措施防止近缝区裂纹，其次是注意防止或减轻由于化学成分不同，特别是碳及碳化物形成元素含量不同所引起的界面组织和力学性能的不稳定和劣化。

为了防止淬火钢近缝区产生裂纹，应采取预热或后热的焊接工艺，形成缓冷的条件，使近缝区在温度接近被焊钢材的马氏体转变点时，促使马氏体转变发生，同时尽量消除熔池中溶解的氢。焊接接头在低于马氏体转变点后的缓慢冷却，可以促使马氏体转变。此外，预热及缓冷还可以消除或减小焊接应力。在某些情况下，可采用奥氏体焊条或堆焊隔离层来提高金属的塑性和减小氢向热影响区的富集。

(2) 异种铁素体-马氏体钢的焊接性。

铁素体-马氏体钢中含有易强烈形成碳化物的元素铬，因此在熔化区中不会有明显的扩散层存在。但由于铁素体钢焊接时，存在热影响区晶粒长大导致韧性严重降低的弊端，而马氏体钢焊接时，在热影响区容易出现脆性组织，导致塑性下降，并可能产生焊接裂纹，因此在异种铁素体-马氏体钢的焊接时，要采取必要的措施防止接头近缝区产生裂纹或塑性及韧性的降低。

(3) 异种奥氏体钢的焊接性。

异种奥氏体钢焊接时，容易出现的问题是焊缝及热影响区出现焊接裂纹、焊缝出现晶间腐蚀和脆化等，因此必须考虑奥氏体钢本身的焊接特点而选用合适的焊接材料，并采取相应的工艺措施。

(4) 奥氏体钢与珠光体钢的焊接性。

由于奥氏体钢与珠光体钢在化学成分、金相组织、物理性能

及力学性能等方面有很大的差异，这些差异造成奥氏体钢与珠光体钢的焊接变得困难，为保证焊接质量必须考虑下列问题。

①焊缝金属稀释问题。奥氏体钢与珠光体钢焊接时，两种母材都要发生熔化，与填充金属共同形成焊缝。由于珠光体钢中的合金元素含量远低于奥氏体钢，因此其熔化后进入焊缝，会对整个焊缝金属产生稀释作用。稀释的结果造成焊缝金属的成分和组织与母材金属有很大的差异，严重时焊缝中将出现马氏体组织，有产生裂纹的危险。为了避免上述问题的发生，可根据熔合比，计算出焊缝金属的铬当量和镍当量，然后根据舍夫勒组织图（图1-2），估算出焊缝的组织状态。如奥氏体不锈钢和低碳钢焊件，当稀释率小于13%时，焊缝金属可保持奥氏体-铁素体组织；当熔入的低碳钢母材超过20%时，焊缝金属为奥氏体-马氏体组织，故焊件时最好采用铬镍含量高的焊条。由舍夫勒组织图可知，在焊接材料和焊接工艺不合适时，焊缝中必将出现马氏体组织，这在焊接时必须设法克服。

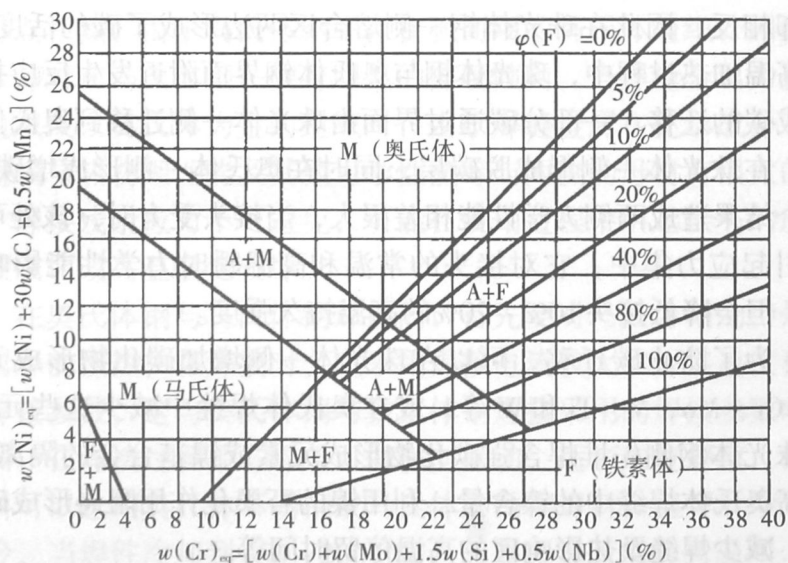


图1-2 舍夫勒组织图

②熔合区过渡层的形成。在珠光体钢与奥氏体钢焊接时，在焊接熔池边缘，由于液态金属温度较低，流动性较差，在液态停

留时间较短,珠光体钢与奥氏体钢填充金属材料的成分有较大差异,熔化的母材金属在熔池边缘上与填充金属不能很好地熔合,使得靠近珠光体母材的一个狭窄的区域内,形成和焊缝金属内成分不同、宽度为0.2~0.6mm的过渡层。对照舍夫勒组织图,可推测出这一区域很可能是高硬度的马氏体或奥氏体加马氏体组织,而这种淬硬组织正是导致焊接裂纹的主要原因之一。一般来说,离熔合线越近,珠光体的稀释作用越强,过渡层中含铬和镍的量也越少。

为了减小过渡区中脆性层的宽度,可以提高焊缝金属中奥氏体形成元素镍的含量和控制高温停留时间等。选用奥氏体化能力很强的焊接材料,可以减小脆性层的宽度。由于多数异种钢接头具有奥氏体焊缝,因此目前主要采用镍含量高的焊接材料来改善异种钢的熔合区质量。

③熔合区中碳扩散层的形成。当珠光体钢和奥氏体钢焊接时,由于珠光体钢的含碳量较高,而且合金元素较少,而奥氏体钢却相反,因此在珠光体钢一侧熔合区两边形成了碳的活度差。在高温加热过程中,珠光体钢与奥氏体钢界面附近发生反应扩散造成碳的迁移。一部分碳通过界面由珠光体一侧迁移到奥氏体一侧,在珠光体一侧形成脱碳层,同时在奥氏体一侧形成增碳层。这个结果造成两侧力学性能相差很大,当接头受力时,该处可能会引起应力集中,它对接头的常温和高温瞬时力学性能影响不大,但会降低接头10%~20%的高温持久强度。

为了防止碳迁移,可以在珠光体一侧增加碳化物形成元素(如Cr、Mo、V、Ti和W等)或在奥氏体焊缝中减少这些元素;在珠光体钢侧先堆焊含强碳化物形成元素或镍基合金的隔离层;提高奥氏体焊缝中的镍含量,利用镍的石墨化作用阻碍形成碳化物;减少焊缝及热影响区的高温停留时间等。

④残余应力。由于奥氏体钢与珠光体钢的线胀系数相差较大,且奥氏体钢的导热能力差,仅为珠光体的50%,因此焊后在焊缝和熔合线附近产生较大的焊接残余应力。与同种金属的焊接

有很大的不同，这种残余应力无法靠焊后热处理方法消除。这种接头若在交变温度条件下工作，就可能出现熔合区珠光体钢侧的热疲劳裂纹，使接头过早断裂。为防止这种现象的出现，可采用如下措施：优先选用与珠光体钢线胀系数相近且塑性好的镍基材料作为填充金属，可使焊接应力集中在焊缝与塑性变形能力强的奥氏体钢一侧；严格控制冷却速度，焊后缓冷；尽量避免珠光体钢与奥氏体钢焊接接头在温度剧烈变化的条件下工作。

(5) 奥氏体钢与铁素体钢的焊接性。

奥氏体钢与铁素体钢焊接时，由于焊接接头中碳的迁移和合金元素的扩散，容易在铁素体钢一侧产生脱碳带，焊缝中心部位碳含量增加，而奥氏体钢侧的合金元素降低。脱碳带不仅是低温冲击韧度的低值区，而且往往是裂纹的起始和延展的区带，容易引起焊缝熔合线低温冲击韧度的降低并产生裂纹。

(6) 奥氏体钢与马氏体钢的焊接性。

奥氏体钢与马氏体钢的焊接特点与珠光体钢和马氏体钢的焊接特点相似，由于马氏体钢中存在脆而硬的马氏体组织，因此焊后冷却时在马氏体钢一侧有明显的淬硬倾向。当焊缝金属为奥氏体组织或以奥氏体为主的组织时，由于焊缝金属在化学成分、金相组织与热物理性能及其他力学性能等与两侧的母材有很大的差异，焊接残余应力不可避免，可能在使用过程中引起接头的应力腐蚀破坏或高温蠕变破坏。

在奥氏体钢与马氏体钢焊接前，首先要对马氏体钢的待焊处金属焊前预热；在焊接时，宜采用焊接电流较大和焊接速度稍慢的焊接参数，这与奥氏体钢与铁素体钢焊接采用的焊接参数略有不同。在焊接过程中，焊条可做横向摆动，适当加宽焊道。焊接材料可以选用奥氏体不锈钢或马氏体不锈钢焊材，但焊后应立即缓冷，当焊件冷却到 $150 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 时，需要进行适当的高温回火。

(7) 珠光体钢与马氏体钢的焊接性。

由于珠光体钢常温下的组织为淬硬的马氏体，造成其焊接性能较差，因此珠光体钢与马氏体钢的焊接性主要取决于马氏体钢。

①焊件接头裂纹的产生。多数珠光体钢焊后容易产生淬硬组织，因此焊后冷却时出现淬硬组织是产生冷裂纹的根本原因。特别是在焊后冷却时，氢来不及逸出而聚集，同时由于珠光体钢和马氏体钢线胀系数相差较大而引起较大的残余应力，这都会造成冷裂纹的产生。此外，大量实践也表明，珠光体钢与马氏体钢结构越厚，接头的拘束度越大，焊后产生冷裂纹的倾向就越大。

②焊接接头脆化现象的出现。马氏体钢有较大的晶粒粗化倾向，在珠光体钢与马氏体钢焊接后，在马氏体钢侧的近缝区容易出现使焊缝金属塑性降低、脆性增大的粗大铁素体和碳化物组织。特别是当马氏体中铬含量较高、焊件在 550°C 左右进行焊后热处理时，容易出现回火脆性。当马氏体中铬的含量超过15%时，若在 $350\sim 500^{\circ}\text{C}$ 进行较长时间的加热并缓慢冷却后，也会有脆化现象出现。

(8) 珠光体钢与铁素体钢的焊接性。

珠光体钢与铁素体钢焊接时，应注意的主要问题是铁素体钢一侧热影响区的晶粒急剧长大而引起的脆化问题。一般来说，铁素体钢的含铬量越高、高温停留时间越长，焊接接头的脆化倾向越严重，室温下的韧性也降低。

1.2 异种有色金属焊接的材料种类及其焊接性

1.2.1 异种有色金属焊接的材料种类

(1) 铜与铝的焊接。

铜与铝都是制造导电体的材料，铝的密度是铜的 $1/3$ ，因此铜与铝的连接件可以降低成本，减轻构件的重量以及发挥各自的优点。但由于铝表面极易氧化，形成的氧化膜十分牢固，且电阻很大，采用机械连接是不可靠的。

电工产品以铝代替铜后，突出的问题是接头的连接问题。采用机械方法连接（如螺栓连接）是电工产品中常用的方法，但机械方法用于铝/铜连接后，在产品运行过程中接点的接触不稳定，常发生冒烟、放爆等现象，并会由此引起事故和造成火灾。

实践证明,铝与铜用机械方法连接的电工产品在负荷较大的情况下,是极不可靠的。

铝是十分活泼的金属,在大气中,铝表面覆盖着一层坚固的氧化膜,这层氧化膜是电和热的绝缘介质。当铝与铜采用机械方法连接时,由于铝表面氧化膜的绝缘作用,连接处的接触电阻很大,在负荷较大的情况下接点处的温度升高,引起铝本身的蠕变。接点处的铝在室温下可以承受机械压力而不会产生塑性变形,但蠕变后的铝则可能在压力下发生“流动”,导致接点处温度继续升高,直至引起电弧放电,把接头烧坏。

铜的屈服强度较高,没有氧化膜的绝缘问题,因此铜与铜采用机械方法连接是可行的。在负荷较小的线路中,铝采用合理的机械连接并不是完全不可行。但在负荷较大的线路中,铝与铜应采用焊接方法连接。例如,电工产品的引出线或配电板上,为了保证连接处有良好的导电性能,可靠的办法是在铝导线的端部焊接一段铜导线,以便于铜导线之间用机械方法连接。

由于铝比铜轻、价格低、资源丰富,在制造导线和母线时,经常以铝代铜。生产中应用焊接方法连接铜与铝,以提高铜与铝连接件的综合性能。

(2) 铜与钛的焊接。

钛及钛合金是一种优良的轻质结构材料,具有密度小、比强度高、耐热耐蚀好、可加工性较好等特点,钛与铜形成异质连接结构可应用于航空航天、化工、造船、冶金、仪表等领域。钛与铜由于物理化学性能上有较大的差异,焊接时易形成致密的氧化膜,给焊接带来了很大困难。

(3) 铜与镍的焊接。

由于镍及镍合金强度高、韧性好,在高温和低温时能保持良好的塑性,在冷、热状态下具有优良的加工性能,化学活泼性低,在大气中抗腐蚀性能好,因此在焊接结构中经常遇到铜或铜合金与镍及镍合金的焊接。特别是铜与镍的原子半径、晶格类型、密度、比热容等性能接近,由铜-镍二元相图可知,铜与镍

在固态液态都能形成无限互溶，生成塑性好的固溶体组织。

(4) 铝与钛的焊接。

钛及其合金具有熔点高、线胀系数大和弹性模量小、耐腐蚀性好、强度大、比强度高特点，在工业及民用事业上的应用日益广泛。铝及其合金由于优良的导电性、导热性及耐腐蚀性、较高的性价比、密度小、塑性高及适宜的强度，应用十分广泛。所以在工业上也难免遇到铝-钛之间的连接问题。

(5) 铝与镁的焊接。

铝与镁都具有熔点低、密度小、塑性好等优点，被广泛应用于汽车、航空航天、电子等工业部门。由于镁和铝应用的广泛性和交叉性，针对某些特殊性能的要求，将镁与铝连接形成复合结构，可以降低结构重量，节约材料。

1.2.2 异种有色金属的焊接性

(1) 铜与铝的焊接性。

铜与铝的物理性能有很多的相同点，例如导电性好；但也有不同点，例如熔点相差 423°C 。因此，他们很难同时熔化，铝在高温下强烈氧化，需要采取措施才能防止氧化和去除熔池中的氧化物。铝和铜在高温时相互无限固溶，随着温度的下降，铝在铜中的溶解度逐渐下降。到固态时为有限固溶。铝和铜能形成多种以金属化合物为主的固溶体相，其中包括 AlCu_2 、 Al_2Cu_3 、 AlCu 、 Al_2Cu 等。铜含量在12%以下时的铝铜合金综合性能最好，或者采用铝基合金，以提高接头的强度、塑性，尽量减少液态铝和固相铜接触的时间。

(2) 铜与钛的焊接性。

钛和铁一样，都是同素异构元素，钛在 880°C 以上为 β 钛，低于 880°C 为 α 钛。钛与铜能形成 Ti_2Cu 、 TiCu 、 TiCu_4 等多种金属间化合物。另外，还可以形成多种共晶体，其熔点最低点只有 860°C ，钛与铜焊接的主要问题是脆性化合物和低熔点共晶。

(3) 铜与镍的焊接性。

铜与镍可以无限固溶，因此铜-镍的焊接性是比较好的。

由于铜与氧的亲合力较大，易于被氧化形成氧化膜，易出现夹杂，加之镍的熔点较高，易于形成未熔合。严重时，可能导致焊接过程难以进行。

由于镍的导热性差（热导率为 $0.22\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ），熔点较高，因而铜-镍的焊接容易造成镍不熔化；大量的焊接热在镍母材侧不易散失，使其过热而长晶；而镍熔化时，铜被加热过热，使之黏度降低，易溢出而流失。由于过热而长晶，导致接头抗拉强度下降。

在铜侧或铜焊缝中易形成 $\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$ 、 $\text{Cu}+\text{Bi}$ 、 $\text{Cu}+\text{Pb}$ 的低熔点共晶体；在镍侧容易形成 $\text{Ni}+\text{S}$ 、 $\text{Ni}+\text{P}$ 、 $\text{Ni}+\text{As}$ 的低熔点共晶体，从而易于产生结晶裂纹。

(4) 铝与钛的焊接性。

铝与钛在物理、化学和力学性能方面都有所不同，其结构和原子半径等有明显的差异，所以焊接性很差。铝的熔点比钛低 1160°C 。在室温下钛在铝中的溶解度仅为 0.07% ，在不同的温度下分别形成 TiAl 和 TiAl_3 型化合物。由试验可知，在 $700\sim 800^\circ\text{C}$ 下保温 15s ，液态铝熔池不会产生 TiAl_3 ，如温度超过 900°C 或长时间保温就会形成 TiAl_3 。所以，采用熔焊-钎焊法使钛不熔化，且使铝的温度保持在 $800\sim 850^\circ\text{C}$ 范围内。

(5) 铝与镁的焊接性。

铝与镁的焊接特点主要有以下几方面。

① 铝与镁极易氧化。铝与镁均属于活泼金属，很容易与氧结合形成 Al_2O_3 和 MgO 氧化膜，尤其是 Al_2O_3 结构致密且熔点很高（ 2050°C ），很难将其去除。这不仅阻碍两种金属的连接，而且使接头区很容易产生夹杂、裂纹等缺陷，使接头结合性能变差。

② 铝与镁液态时相互溶解度小，高温时气体溶解度大。由镁-铝合金状态图可知，镁与铝在低温时彼此溶解度很小，因为镁为密排六方结构，晶体结构的不同是镁与铝间相互溶解度差的原因之一。较低的相互溶解度使两种金属形成熔合区十分困难，难以形成有效的结合。