

毛主席语录

学习外国的东西，是为了研究和发展中国的东西。

要采用先进技术，必须发挥我国人民的聪明才智，大搞科学实验。外国一切好的经验，好的技术，都要吸收过来，为我所用。学习外国必须同独创精神相结合。采用新技术必须同群众性的技术革新和技术革命运动相结合。

自力更生为主，争取外援为辅，破除迷信，独立自主地干工业、干农业，干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，埋葬教条主义，认真学习外国的好经验，也一定研究外国的坏经验——引以为戒，这就是我们的路线。

目 录

铜铝焊接.....	(1)
冷压对接焊.....	(21)
铝铜带的冷焊.....	(28)
铝薄膜同铜连接的一些问题.....	(33)
热老化对铜铝冷压对接焊焊接接头的机械性能和电艺性能的影响.....	(38)
WLS-40型冷压对接焊机及其应用展望.....	(44)
WLS-4 型冷压对接焊机	(49)
铝铜熔焊的表面现象.....	(52)
铝铜熔焊时焊缝结构的特点.....	(55)
金属间层对铜铝焊接接头静荷强度和疲劳强度的影响.....	(57)
铝铜焊剂自动焊的工艺特点.....	(59)
钨弧焊和电阻焊铝、铜线的强度和组织.....	(61)
氩弧焊铝铜接头的电气特性.....	(67)
铜铝闪光对焊.....	(68)
铜铜接头对焊用的 MC-2006型接触焊机.....	(70)
异金属的电子束焊接.....	(71)
论铝-铜的电子束焊接	(75)
异金属的摩擦焊.....	(80)
金属扩散焊的方法和工艺.....	(84)
爆炸焊接.....	(91)

铜 铝 焊 接

在电气工程中，特别是在导线和母线的制造中正越来越多地以铝代铜。铜铝的永久接头可以采用压力焊、熔焊、或两者兼用的方法来制作。在国外，目前主要采用压力焊。

压力焊及其物理实质

压力焊是在构成永久接头时或多或少需要一定压力的一种连接方法，压力的大小同材料的种类，所处温度，焊接环境和介质有关。形成接头所需的压力可以是静压力、冲击压力或爆炸。压力焊虽是一种较老的焊接方法，但它对铜-铝、钢制另件、其它非铁金属零件以及铁与非铁金属零件的搭接和对接很有前途。

为了产生压力焊焊缝，被连接金属的表面应彼此靠拢，使一种金属的原子与另一种金属原子的距离达到晶格常数的距离，也即达到原子键吸引力作用范围内并视结晶金属中原子键的种类不同而异，通常小于 $10\text{\AA}$ 。只要使焊缝部位的金属熔化并同时施加压力就能达到这一点。然而压力焊连接过程，被焊金属达到液相是罕见的。多半只是处于固相或塑性状态。压力的作用之一是在足够大的面积内使被焊接的金属的原子相互接近并使接头的强度能达到被焊接两种金属中的一种或两种金属的相应强度。

清洁的金属表面的原子的靠近是键力作用的条件，所谓清洁的金属表面，就是表面没有吸附气体、有机物质及其它不洁物，主要是氧化膜。金属在空气中(除极少数的例外)一般都覆盖着一层氧化膜，在常温下其厚度为 10 至 $50\text{\AA}$ 。

清除焊接截面表面的氧化膜和其它不洁物的方法可以是多种多样的，视压力焊方法，材料和进行压力焊时的温度而异，并总是同接头部位的温度、压力、变形甚至和若干场合下的其它因素(超声波焊时的摩擦，钢钎焊时的熔剂)有关。

压力焊的一些方法

传统的压力焊有锻焊，水煤气焊、照明煤气焊和传统的电阻焊。

原子弹和氢弹、火箭、远程导弹、人造卫星、宇

宙飞船和现代化飞机的发展，高参数原子能电站和热电站的建设和半导体产品的蓬勃发展标志着许多技术领域已有相当大的进展。开始大量采用铝、铌、钛、钒、锆、钽及其合金，采用原有的焊接方法焊接这些金属和合金已不能获得满意的结果，因此在最近二十多年来一直在寻求研制和采用这些金属及其组合的一系列新的焊接方法[1—7]。在这种情况下，一些新的压力焊方法就应运而生。

属于较新的压力焊法有冷压焊，加热压力焊、扩散焊、超声波焊、爆炸焊、摩擦焊、高频电流感应加热电阻焊、冲击电阻焊、磁脉冲焊等。

冷 压 焊

冷压焊是连接铝、铜及其他塑性金属(铝、铅、镉、锌、钛、银、镍、金、锡)及这些金属的组合(如铝与铜)的一种连接方法，焊接借助压力和由压力所引起的变形的作用而不需任何热源。这是一种两千多年前就已出现的老方法，然而1948年才开始得到工业上的应用[8—14]。

冷压焊自从得到工业应用以来，虽然引起世界各国的注意和大力研究，但到目前为止对其原理解释仍处于假说阶段，还没有最后作定论，正如其它学科一样，冷压焊接实践是先于理论的。这也没有什么奇怪的，伟大领袖毛主席教导我们：“一个正确的认识，往往需要经过由物质到精神，由精神到物质，即由实践到认识，由认识到实践这样多次的反复，才能完成”。因此冷压焊技术经验和原理许多问题尚待深入探讨。目前对冷压焊原理解释一般有“薄膜”、“再结晶”、“扩散”、“动能”四种假说。较有代表性而又能令人信服的是“薄膜”假说：即冷压焊时，铜铝两种金属在顶锻压力作用下产生变形，接触面的氧化膜破裂，并连同其它不洁物被塑性变形的金属带出接头，露出纯洁金属而相互接触，由于压力的作用，两种金属的原子达到晶格常数的距离，也即达到原子键引力作用的范围内， $4-6 \times 10^{-8}$ 厘米，即小于 $10\text{\AA}$ ，从而形成共同的电子层。于是，被焊金属便牢固的压接在一起。

冷压焊时的最重要工序之一是焊前表面的清洁，

旨在除去被焊接零件表面所吸附的气体和附着的有机物以及其它不洁物，并为清除氧化膜创造最有利的条件。只要金属上存在着这些不洁物和比基本金属还硬的氧化物，就要将其从表面清除掉，直至焊接过程本身，也即通过连接部位上的变形效应加以清除。两个覆盖有氧化物和有硬化层（它也可以是人为的镀层，如：镀镍层、铬层和阳极氧化层）的表面实际上仅仅是在不平部位的顶点上相接触。在适当的压力及随压力相应而生的变形作用下，在顶点上的硬而又脆的表面氧化膜被压破裂，并被挤出，从而露出纯洁的基本金属使得有可能连接。氧化物的清除是通过塑性变形而实现的，塑性变形将被破碎的氧化物从连接部位带出。如果氧化物不比母材更硬和更脆，那么在变形时就会被挤入母材，不会破裂也不会露出纯洁的金属，这样就不可能焊接。有机物质、其它不洁物和吸附的气体也有与氧化膜相同的影响。

国外多次地试验研究和实践证明，采用钢丝直径0.2至0.3毫米，圆周速1000至2000米/分的脱脂的旋转钢丝刷清洁被焊接表面是质量最好的焊前准备方法。根据国外已发表的专利说明书或已获得的专利来看，虽然还有很多其它清洁方法或准备方式，但与这种方法相比都有些逊色，因为在相同的变形情况下，所焊成的焊缝的强度较低，所制成的对接头的塑性也较差。只经过清洗或在溶剂中清洗的另件在焊接时，并不能获得满意的效果。零件在清洁后不能再弄脏，甚至不能用手触摸。如果能保证清洁过的表面不会再弄脏（如落尘、沾油脂、受潮湿），则清洁后到焊接之间的时间的长短对焊缝的质量影响较小。然而这些条件在生产过程中是难以保持的，因此通常总是清洁后就尽快地焊接为好，也即总是力求在一班内做完另件的准备和焊接工作[15]

冷压焊的另一有决定意义的参数是变形，变形的大小以不同的比例数字表示。在搭接焊时（图1a, b, 2a, b)有以下比例数字：

$$D_p = \frac{2s - H}{2s} \times 100\%$$

式中s为材料的厚度，
H为焊缝剩下的厚度。

在对接焊时（图6a, b)则以下列比例表示：

$$D_t = \frac{2h_0 - 2h}{2h_0} \times 100\%$$

式中 h_0 , h 分别代表开始和最终的伸出长度。冷压焊时所需的变形在大多数场合下是比较大的，实际上大于70%。根据索夫特尔的研究，获得最大强度接头的点焊所需的变形见于表1。变形的速度与焊缝质量

的关系不大。冷压焊根据接头产生的进程可分为下列数种：

冷压搭接焊（图1至5）

零件在连接部位清洁并彼此重迭放好。通过工具的中介作用以正常的压力垂直作用于接触平面上，使接触部位的材料发生塑性变形，从而焊接在一起。焊接压力为20至450公斤/毫米²，视材料种类、材料状态和焊接工艺方案而定。

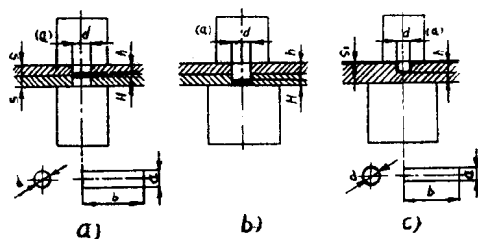


图1 冷压搭接点焊

a——双面变形点焊；b——单面变形点焊；
c——另件厚度相差悬殊的单面变形点焊。

表1 冷压点焊时的最小变形

金 属	变 形 [%]	金 属	变 形 [%]
铝	60	铜	86
工业纯铝	70	镍	89
镉	84	锌	92
铅	84	银	94

搭接焊可以有列工艺变化：

a)点焊零件系点式连接（图1a, b, c)。点的基本形状为圆形或矩形。采用各种型号的冲头焊接，双面变形（图1a)或单面变形（图1b)。

通常点的尺寸如下（图1a, 1b)：

圆形点…… $d = 1$ 至 $1.5s$,

矩形点…… $a = 1$ 至 $1.5s$, $b = 5$ 至 $6a$ 。

s为被焊接材料的厚度

最小变形值由表1中的数据规定。

厚度相差悬殊的两种材料的焊接从较薄(较硬)材料这一面以单面变形的方法进行焊接（图1c)。

在这种场合下点的尺寸（图1c)为：

圆形点…… $d = 2s_1$,

矩形点…… $a = 2s_1$, $b = 5a$ 。

铝和铜的最小变形值为：

对于Al+Al来说…… $h = 1.5$ 至 $2s_1$ ，
 Cu+Cu…… $h = 2$ 至 $3s_1$ ，
 Al+Cu…… $h = 2$ 至 $3s_1$ 。
 s_1 为较薄材料，或铜(铜常常也是较薄者)的厚度。

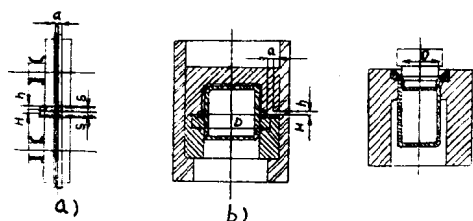


图2 冷压搭接缝焊

a——用滚轮滚压缝焊；b——压棒缝焊；
 c——套合式焊缝缝焊。

b)缝焊(图2a, b, c)。零件以无限长的平面的，各种曲线形的和封闭的焊缝连接。通过转动的滚轮的突出部分逐步挤压(图2a)或在整个截面上同时压棒(图2b)而产生双面变形或单面变形而实现焊接。突出部分的宽度选择为 $a = 1.5s$ 。也可以用套合式焊缝进行缝焊(图2c)。最小的变形值由点焊的数据规定之。

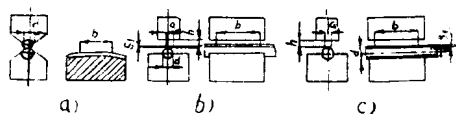


图3 导线和金属丝的冷压搭接焊

a——金属线的搭接；b——导线和金属丝焊到金属板上；c——导线和金属丝焊到管子上。

c)金属线的搭接(图3a)。金属线置于阴模的槽沟中。压力作用于阴模上，金属线的接触面产生变形并焊接在一起。搭接长度选择为 $b = 3$ 至 $5d$ 。最小的变形值在Al+Al焊缝中约为50%，在Cu+Cu焊缝中约为70%，在Al+Cu焊缝中约为60%。

d)导线和金属线搭接到金属板和管子上(图3b, c)。将金属线或导线插入管子中(图3c)或是在金属线或导线上放上金属板(图3b)。矩形冲头通过管壁或从板的一面进行压棒。冲头的宽度选择如下：

$a = \frac{d}{2}$ ，冲头的长度 $b = 5a$ 。变形大小的选择和不等厚度材料单面变形点焊时一样。

e)金属箔和带的焊接和引出线的焊(图4a, b, c)。金属箔的连接通常采用单面变形，同时采用数目较多的焊缝(图4b, c)。采用冲头压棒或滚轮滚压一行或数行而焊接之。冲头的宽度 a 选择为 $\geq 3s$ ，长

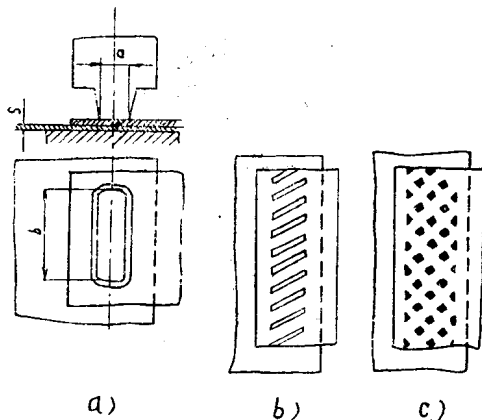


图4 金属箔的冷压焊

比宽大数倍(图4a)。所需的变形为50至70%。在焊着引出线时和焊金属线相似，将长约10毫米的导线端压棒成厚0.15至0.25毫米的平面，然后将其焊着到金属箔上。利用这种方法借助碾压薄的线端可以使相当细的金属线(直径0.6毫米以上)彼此焊接。焊好的接头装上软管，以防损坏。阳极氧化处理的金属箔或氧化处理和着色的金属箔焊前不必清洁。

在铝箔和铜的连接方面，有人主张采用一中间金属层，使之不仅和铜而且也能和铝良好连接。这种钎焊层可由各种敷涂于铜上的金属，例如银、锌、锡或锡铅等组成。

在参考文献[27]中曾研究试验了涂有2微米厚锌合金层和Sn60Pb40合金层的捣扁的铜线和铝箔直接压焊。压焊时，铜的一侧使用直径1毫米的针状钨电极，在铝箔的一侧使用平板钨极。试验证明，采用钎焊层的热压焊能得到较好的效果，因为焊接时热是按照导热原理向焊接部位传送的，因此有可能自劫地和可靠的加以控制。

可是参考文献[28]认为，在焊接铜带和铝带或铜箔与铝箔一类电导体时，采用冷压焊最理想。采用这种方法既能焊接一般铝带与铜带，也能焊接阳极化的铝带和铜带，而焊接接头不会生成脆性中间金属相。为使接头有最大的强度，铜的表面和一般铝的表面都应当经过刮刷，但阳极化铝在交货状态即能进行焊接。

这种方法可使铝带线组或电缆用的铝屏蔽带接地接头有低的电阻。

用冷压焊也可以将薄铜片与铝母线焊接，用作电气接线端头。铜片可以焊于薄断面，也可焊于厚断面，还可以彼此夹着条材，在后一种情况下能连同铜

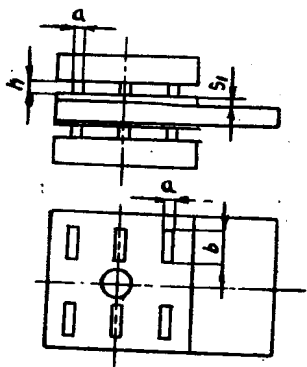


图5 利用冷压焊以铜镶铝

片一次焊在一起。

以铜镶铝(图5)。采用单面变形的冷压焊在线圈引出线或汇流排的端部的一面或双面焊上厚度 $S_1 = 1$ 至1.5毫米的垫片。以矩形点焊焊接。点的尺寸和变形的大小同不等厚度材料单面变形点焊时一样。

冷压焊不仅能焊接带材和箔材,并且能以各种形式用于半导体器件的封装,液体容器的密封,线材、棒材和带材的对焊等。

冷压对接焊 (图6a,b,c)

被连接的两棒状另件弄平直,端面清洁并夹紧在对开的夹线模中,防止另件滑动并从夹线模中伸出一定长度(图6a)。沿轴向施加约为150—200公斤/毫米² (1470—1960 牛顿/毫米²) 的压力[8], 在棒的伸出部分相互接触面上产生塑性变形,从而焊接在一起(图6b, c)。对于变形过程一直持续到两夹线模彼此接触或将近接触的对接焊,变形函数可以用基本伸出长度 h_0 来代替,其值通常为0.6至3d,或a。d或a越小,所需的相对伸出长度就越大,也就越难焊接。实

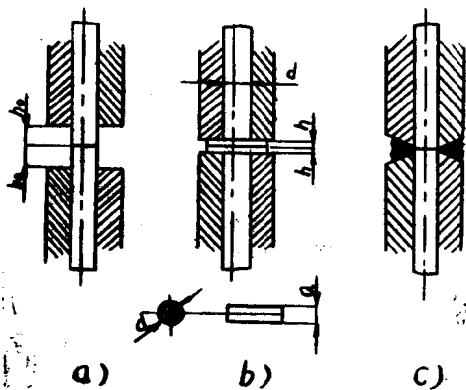


图6 冷压对接焊

际焊接中的最小伸出长度为1.2d。参考文献[16]中建议在焊接铝线和铜线时,以取铝线的伸出长度等于其直径,而取铜线的伸出长度等于其直径的1.3倍为宜。在需要较大的伸出长度场合下,可以采用多次顶锻(挤压)来焊接。焊接压力颇大,在70至380公斤/毫米²范围内,视材料种类、材料状态、变形的大小和变形的的方式以及夹线模的形状而定。在冷压对接焊的条件下铜-铝接头中实际上并不产生扩散过程。在用铜板镶母线时,在镶铜的平面上应形成8—10公斤/毫米² (78.4—98 牛顿/毫米²) 的压力[9]。

在冷焊过程的基础上制取铝-铜双金属板(包复金属法)。在冷态包复金属关系到要一次锻缩到75%的问题[19]。为此需要大功轧制设备。为了减少轧制设备的功率提出了冷轧和热轧结合的制造铝-铜双金属板的工艺。

冷压钎焊 (图7)

塑性较差的材料而又要冷压焊,则可以在这种材料的端面之间加一由塑性金属(Al, Pb, Sn)。制成的经过清洁的垫片,在轴向压力作用下,首先是塑性垫片开始变形并从而强化。一旦达到被连接金属的强度,被连接的金属也开始变形并达到永久连接。接头的强度与强化的塑性金属垫片等强,垫片的厚度应大于1毫米。

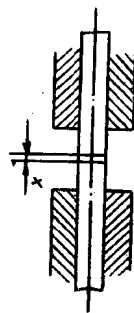


图7 冷压钎焊

冷压焊设备

国外冷压焊机的最大吨位为120吨,系液压传动的,最大焊接截面铜-铝和铜-铜为1000毫米²。苏联1973年介绍的MCXC-120-2型冷压对焊机就属此类型,系供铝-铜扁线冷压焊用的。每小时焊接60个接头。1970年介绍的MCXC-8002型冷对焊机也是液压传动的,系供焊接矩形截面的铜环或其它有色金属环用

的功率10瓩，顶锻力（在油压50公斤/厘米²时）为80吨。能焊接的最大铜环截面为600毫米²，生产率每小时120个接头，外形尺寸1560×1170×1700毫米，重量2700公斤。此外还有CHC-3焊机〔12〕、MCXC-0.8、MCXC-5、MCXC-5-3、MCXC-20-3和MCXC-35型等焊机。其中MCXC-0.8型有气动传动装置，系供在制作绕组时焊接同种导线或将铜引出线焊接到铝绕组的端头上。涂有磁漆膜的导线不必预先清除绝缘

就能施焊。MCXC-5-3型焊机也为气动的，适用于制造变压器的铝绕组，能焊接扁导线和圆导线。MCXC-20-3型焊机为半自动焊机，液压传动。适用于制作绕组，也适用于电缆厂，还能用于定点和在线路条件下焊接铜滑接线。MCXC-120-2型适用于焊接铝绕组的铜引出线或在电气安装工程中用于制造铜-铝过渡接头〔126〕。

这四种焊机的主要技术数据列于表2：

表2 MCXC系列焊机的主要技术数据

被焊导线和零件的截面(毫米 ²)	MCXC-0.8	MCXC-5-3	MCXC-20-3	MCXC-120-2
铝	0.5—7.0	2—30	20—200	100—1500
铜-铝	0.5—4.0	2—20	20—120	100—1000
铜	0.5—4.0	2—20	20—120	100—1000
生产率(每小时焊成接头数)	150	200	200	60
传动装置	气 动		液 压	
电源电压, 伏	—	—	380	380
额定电功率(瓩)	—	—	5.5	17
网路的压力(大气压)	4	4	—	—
外廓尺寸(毫米)	420×320×320	485×320×300	1000×920×1440	1670×1350×1700
重 量(公斤)	35	62	700	2,700

用铜镶铝时采用MXCA-50和MXCA-120型焊机。

目前日本可以焊接的最大截面为110毫米²，使用的焊机为BA-6型（压力20吨）。日本标准型的冷压焊

日本现有冷压焊机型号

接头型式	品 名	型 号	焊 接 能 力 (单位: 毫米)	
对 接	手动对接焊机	KB-14	φ2.3~1.6	φ3.2~1.6
		KB-14B	φ1.6~1.2	φ1.6~1.2
	台式对焊机	KBM-1	φ2.9~1.6	φ3.2~1.2
		KBM-1-B	φ1.6~1.2	φ1.6~1.2
接	台式细线对焊机	KBM-2	φ1.2~0.8	φ1.2~0.8
	油压式对焊机	KBH	φ4.5~2.9	φ6.0~2.9
		KBH-2	φ9.0~4.5	φ12.0~4.5
搭 接	手动搭接焊机	KL-10	厚度 1.0 毫米以下 厚度 0.2 毫米以下	
		KL-8		
接	气动搭接焊机	KP-6	厚度 3 毫米以下	

捷克斯洛伐克已成批生产的定型冷压焊机有两种：WLS-4（手扳）；WLS-40（液压）。前者能焊接 $\phi 2$ 至7毫米的铝线， $\phi 2$ 至5毫米的铜和 $\phi 2$ 至6毫米的铜-铝线；后者最大顶锻压力约45吨，能焊接截面20至400毫米²的铝、20至150毫米²的铜和20至250毫米²的铜-铝导线。

冷压焊在交通运输和电气工程中的实际利用见参考文献[122、123]。

冷压焊在所有电气设备的生产中，制冷工业和密封技术中尤其有意义。在坚持以铝代铜和节约焊料的场合，在由于冶金原因采用传统焊接方法完全不能焊接或有困难的一些塑性材料的焊接时和在硬化的塑性材料不容许焊缝有焊接软化区时，在所有这些场合下都可以采用冷压焊。冷压焊也许是生产没有温升的高强度接头的唯一焊接方法。由于接头系在室温下焊成，故没有热影响区，也不会产生脆性中间金属相。同时，由于它不用填充材料，从而能节约大量的用作焊料的稀有有色金属，主要是铜和锡。然而这种方法的充分利用还有待于技术条件和产品结构的改进。因为在许多场合下，现有产品的结构有碍于这种方法的机械化应用。

热 压 焊(图8a, b)

热压焊（也称较高温度下的压力焊）时另件在持续加压情况下加热并在接头处产生塑性变形。这和在一定温度下（一般高于被焊接材料的再结晶温度）进行冷压焊相似，加热于产生压力接头的机构对不同材料有不同的结果。在较高的温度下若干金属，如铜、银、铁等的氧化物会溶于基本金属中，从而使其更易焊接，也即在这种场合下可以降低为达到优质连接所

需的塑性变形程度。与此相反，另一些金属，如铝，其氧化物并不溶于基本金属中，因为其熔点比基本金属的熔点高得多。在这种场合下应当采用和冷压焊时相同的方法来清除氧化物，也即只能通过变形来排除。焊接铝时，温度的影响如图8a所示。即由于变形相同时，被焊另件在热压焊时的接触面积比冷压焊时显著增加，因此，热压焊在变形小得多时，接头就已有一定的强度。然而，为获得优质的焊缝，就需要将氧化物从焊缝中清除出去，所以要求变形要和冷压焊时一样大。压力焊时加热的另一目的在于防止焊缝部位的表面强化，以消除焊缝的脆性，从而降低了为达到相同变形所需的压力。焊接高强度和高硬度的材料时，焊缝中不会和冷压焊时那样产生应力和拉应力。压力焊时较高的温度使焊缝部位能够相互扩散和再结晶并从而连接在一起。

这种焊接方法在各工业部门中用于搭接和对接。起初是在液压机或偏心压力机上借助工具和压模进行焊接的。为了进行对接焊，通常设计了专用的焊机。在搭焊较小另件时，通常加热工具，再由工具将被连接另件加热到所需的温度。有时焊接所需的压力是程序化的——在另件加热时压力低于焊接时的压力。焊接时间取决于材料加热到所需温度的时间。工具应由耐热钢制成，200℃以内采用电加热，200℃以上最好采用火焰加热工具。在高的焊接温度下为防止另件焊着到工具上，工具应撒上粉末或以专用润滑剂润滑，可以用滑石或石墨作润滑剂的基[4，21]。

在不能采用传统的焊接方法的场合下，采用这种方法能解决一系列接头的焊接问题。近年来在专业文献中介绍了搭接焊实用的一系列例子，现将其中一些介绍如下：

(1) 由0.4毫米厚的Al-Mg-Si合金板制的热交换器的焊接：

合金板焊前经过清洗和刷净。把加工成交换器外形的对开钢制压模加热到450℃。以50至70%的变形值焊接之。焊后在压模中以压缩空气使交换器成形[4]。

(2) 将粗0.005至0.25毫米的金丝焊到锗或硅半导体元件上（图8b）：

在200至300℃温度下焊接，所用压力为3.5至7公斤/毫米²，变形10至30%。采用相同的方法能将金线、银线或铝线焊着到半导体上[5，7]。

(3) 在适当的温度下焊接展性小和强度高的Al合金和Mg合金：

在230℃温度下以约12%变形，在15秒内焊成的Al-Cu-Zn-Mg合金，其接头强度达到母材强度的90至100%[5]。

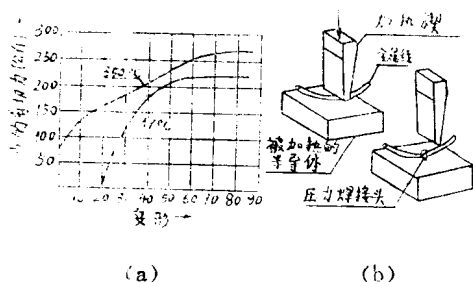


图8 加热压力焊

a——在17℃和350℃温度下铝99.99焊点抗剪强度与变形的关系[4]；b——将铝线焊到半导体元件上的原理（根据O. L. 安德列逊，贝尔实验室记录）。

在若干场合下那些在较高的温度下能按二元系统形成共晶合金的金属偶的焊接可以认为是热压焊的一种特殊情况。在这个原理的基础上发展成楔形焊接法和Alcoa R260铝焊接法。

楔形焊(图9)

楔形焊用于电气工程供较大截面铝-铜另件的对焊。就其原理而言,是借助在548℃温度下形成的共晶合金使铝和铜连接起来的。焊前将圆截面铜线修成顶锥角30°至45°的尖端,若系扁线则将线端斜切,使形成15°至20°角的楔形。这种共晶体是在加热548℃

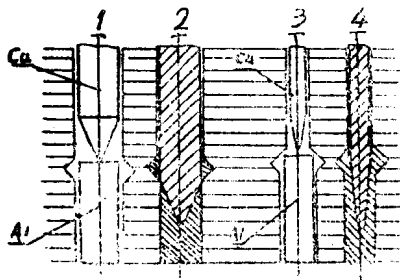


图9 楔形焊

1—焊前圆导线的相互位置 2—焊后圆导线的相互位置 3—焊前扁线的相互位置 4—焊后扁线的相互位置



图10 楔形焊焊成的铝-铜接头[24]

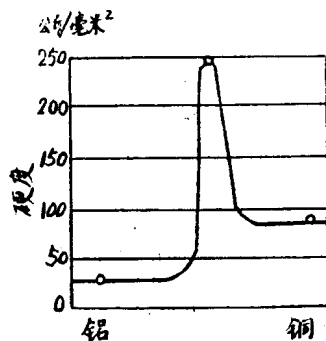


图11 铜-铝接头中硬度的分布情况

以上情况下将铜线压入铝线时产生的。在这一过程中接头中形成的AlCu共晶合金,在压力的作用下被压出,同时也将不洁物和氧化物带出,从而形成接头(图10)。在对接头中只留下一层硬度较基本金属高的不厚的中间层(图11)。被焊接的铝棒和铜棒不需要清洁,在对开的模中预热至约560℃[22]。焊接所需的压力可以是均匀的压力或冲击压力[23, 24]。采用楔形加压焊能收到与摩擦焊相同的效果[25]。

B. 戈弗曼等[24]同时将两根母线和夹具在炉中预热的情况下进行了楔形焊。而参考文献[26]所介绍的经验指出:这样的预热是不合理的,可以将冷态的铜直接压入预热的铝中。

楔形焊可以在预热温度低于548℃的情况下进行。这时可在铜的表面涂一层银以防止氧化或是在氮气中进行焊接[42]。

Alcoa R260焊法

Alcoa R260焊法也是基于在接头中形成AlCu共晶合金并将其从接头中压出这一原理上。这种方法用于铝+铝的搭接或对接[46]。

搭接焊时,在铝线之间放入一铜箔,接头在碳质模块中加热到约550℃,并施加约1.5公斤/毫米²的平稳压力。在加热期间,铝和铜箔在接头上形成液态共晶体,共晶体在加大压力后从接头流出来。较长的加热过程中,接头在压力作用下产生塑性变形,因此在焊后并经进一步加工,接头的尺寸能和焊前的导线一样。

钎焊模采用电阻加热,电压9至13伏,电流密度为4至6安/毫米²,按具体搭接的截面选用。焊接时间与正确的温度有关,温度应能控制,以限制母材的熔化。建议焊前将铝和铜在有机溶剂中清洗,然而不浸蚀和不经刷擦或锉削。铜箔的厚度根据被焊接导线的厚薄分为下列几级:

铝厚约6毫米……铜箔厚度0.75至0.125毫米

铝厚约3毫米……铜箔厚度0.025至0.075毫米

铝厚约1.5毫米……铜箔厚度0.025及更薄些。

焊接过程持续的时间要直至铜箔完全耗尽。多余的铜会使接头质量恶化。

采用相同的方法也可以焊接对接接头。

这种方法大量地用于铝导线的搭接,在绕各种电机的线圈时焊接导线和供薄壁管子的密封用。对接接头用于圆铝棒和有棱角铝棒的连接,或这些棒材与板材的连接。

磁 脉 冲 焊

磁脉冲焊的实质在于,利用感应加热和电磁加压使被焊接两制件相向快速运动并彼此碰击而连接在一起。它是热压焊的一种。电磁加压是理想的冲击加压形式。这种方法的原理与爆炸焊接的原理颇相似。

焊接时,所形成的电磁场将套筒压向套在心轴上的两管端,或将两管端压向用螺母收紧的套筒上。这两种方法的选择取决于管子的直径。在这两种场合下都要用同冷压焊时相同的压力来压套筒或管端[128]。

磁脉冲焊装置由能贮存高达6000焦耳能量的电容器组供电,并能通过磁场线圈形成持续10—20微秒的高达4000公斤/厘米²的电磁压力。

焊接感应器的机构示于图12[129]。

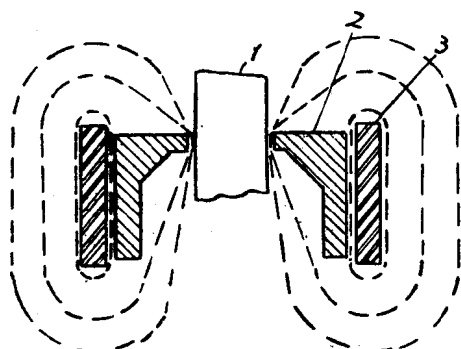


图12 磁脉冲焊原理: 铝管; 2——磁通聚集器; 3——电感器。

高强度磁场的脉冲在套于心轴上的导体制件中感应出电流。所产生的电流阻碍着圆筒体制件中磁场的产生,从而形成有质动力的力,其大小与磁场强度的平方成正比并构成施于制件表面的压力。

待焊表面进行化学清洁:用三氯乙烯脱脂,用苛性钠浸蚀,用冷水清洗,用重铬酸钾浸蚀,用冷水清洗,然后用甲醇清洗,用热空气干燥。

接头形成的机理可作如下解释:即被焊接两零件在相互碰击瞬间由于力的作用而引起接触表面滑移(图13[129])。

为了弄清容器壁与盖子的侧表面之间的角度对滑移过程和焊接质量的影响,曾进行过一些试验。试验证明,在2—6°范围内能获得最好的效果。同时,碰击能的变化与容器壁和盖子之间的间隙大小有关并随

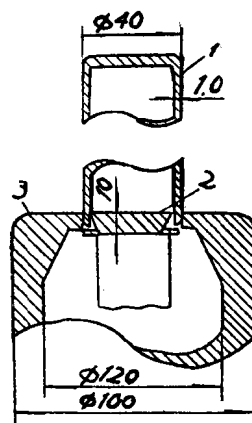


图13 采用磁脉冲焊焊接铝容器盖: 1——铝管; 2——盖子; 3——磁通聚集器。

着圆筒体与磁场之间间隙的缩小而增加。间隙最小可达到0.25毫米。

接头的质量检验证明,在间隙约1.0毫米时焊成的接头最好,没有未焊透现象。当间隙缩小到0.125毫米时,接头的强度较差并为断续连接;当间隙为2.1毫米时,除在聚集器间隙旁边有未焊透区外,接头很好。在金属的破裂试验时,除以0.125毫米间隙焊成的试样外,断裂总是发生于容器筒体金属上。

用氦探漏器对接头进行气密试验得到满意的效果。

金相研究表明,焊接区中在磁通聚集器缝隙附近有一双环形区带。在这一区带内壁厚的减薄不超过10%。

采用磁脉冲焊能将电缆接头焊接到电缆的端部上[130]。西德则用这种方法焊接管子[128、131]。

近年,磁脉冲焊所取得的主要成果是:可以在车间条件下进行焊接,而不需要专门的安全防护措施;可以焊接用其它方法难以焊接的材料。在要求焊接接头的组织和机械性能接近于母材的场合下,采用磁脉冲焊尤为合理。

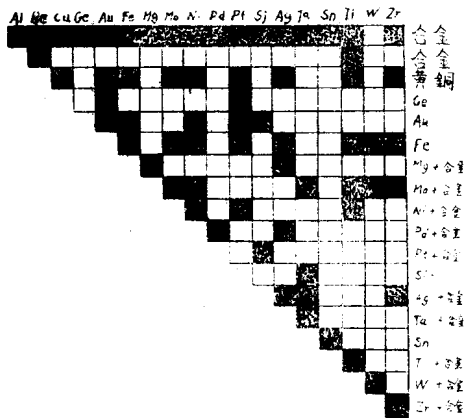
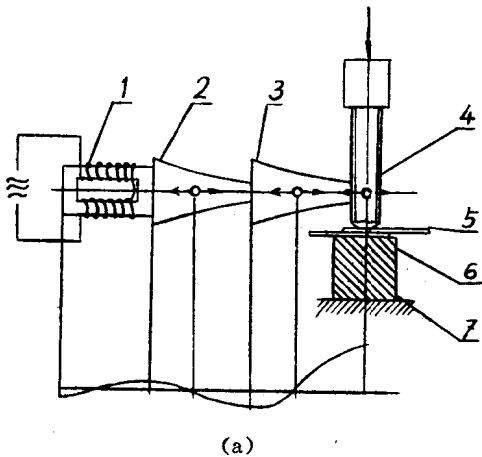
磁脉冲焊可以搭焊铜-铝、铝-不锈钢、锆-不锈钢等异种金属。也可以焊接尺寸不相等的铜、铝件等。

磁脉冲焊的优点是:加热温度不高,不影响金属的组织 and 性能;由于焊接而引起的制件壁厚减薄也不大;焊接效率高,数秒钟就能焊一个制件。其缺点是:被连接金属应有良好的电导率,同时制件应有高的强度并能承受焊接过程中的高压。此外,由于设备较复杂、笨重、故只宜室内定点使用。

超声波焊接

超声波焊接是连接钢和非铁金属及其组合的一种压力焊接方法,焊接时焊缝部位不需要直接加热,焊件同时处于压力和与连接面平行的机械振动的作用下。因而每台超声波焊接设备的作用是激发有一定频率和振幅的高频机械振动并将其传到焊接部位,同时施加必要的压力[47, 48]。

图14a所示为设备原理图。由电子高频发生器产生频率15至60千周/秒的电流,借助磁致伸缩换能器1转换成机械振动。因换能器铁心的振幅较小,通常用机械方法通过传送元件2和3放大到百分之几毫米。再由传送元件将振动传至电声极4,而电声极则以一



(b)

图14 超声波焊接: a—设备原理图, b—截至1961年为止已知的能进行超声波焊接的各金属组合(根据 Sonobond Inc公司资料)

定的压力将较薄的焊接零件5和另一被焊接零件6压在铁墩7上。为获得最佳效率,应适当选择换能器铁心和传送元件,使系统本身的频率与发生器所产生的振动频率一致。

超声波焊接的进程如下:

在焊接过程的第一阶段,压力及与它同时施加的平行于连接面的机械振动,破坏了接头部位上的氧化物,并连同不洁物被挤向边缘。随后,在压力的作用下被连接零件以清洁的不平坦金属表面顶点相互接触,从而实现焊接。然而在同时有振动的情况下,也借助剪切力而实现连接。焊缝的焊接和重复承受剪应力是反复不断进行的,从而使被焊零件由不平坦变平坦,随着局部变形的产生,零件彼此越来越接近,并在越来越大的面积上实现焊接。摩擦生的热,加热接头,虽未达到被连接金属的熔点,却有助于焊缝中的扩散和再结晶。然而扩散只达到一定程度,在焊接两种金属(金属偶)时不致产生像熔焊时使焊缝机械性能恶化的金属间相。由此可见,超声波焊不必象传统冷压焊那样必需严格遵守三个主要条件:

- 被焊截面不要求像冷压焊那样清洁;
- 焊接铝时变形从70%降低到10%而不会影响焊缝的质量;
- 焊接压力也降低到被连接材料的强度水平。

其次超声波焊的特点是能用于制作许多种机械强度高和导电性能良好的双金属连接。截至1961年为止可以采用超声波焊的已知的金属组合列于图14b中[47]。在两种金属不能用超声波焊焊接时,为了形成焊缝,可以在被焊接金属之间加一能与两被焊接金属焊接的金属箔(如在焊接镍和银时,中间加一铝箔)。

最适于超声波焊的是铝。根据文献资料,4千瓦的超声波焊接装置能焊接厚度2.3毫米以内的铝,这也是截至1965年用超声波所能焊的最大厚度[48]。焊接其它的材料就要薄得多。这只能对被焊接的较薄零件而言,而另一零件的厚度可以是任意的。

以搭点焊或缝焊焊接。每一焊点所需焊接时间0.5至3秒。这主要对半导体元件生产中焊接较小的零件和焊接薄片有意义。

用超声波焊也可以获得没有脆性中间层的铜-铝接头[49, 50]。超声波振动破坏氧化膜,并保证形成金属连接[51]。

M. 别客尔特和N. 伏达拉[52]利用超声波焊焊接截面 0.4×1000 毫米的铝板和铜板。待焊试件的表面经过专门的准备。最佳焊接规范为:接触点上的压力为45—105公斤(441—1029牛顿),焊接时间为0.5

—2.0秒。作者们认为，超声波焊接最适用于焊接厚度小的铜和铝[52]。焊成的薄带状铜铝导体适用于制造变压器的线圈元件[53]。

超声波焊的缺点是：设备昂贵、复杂、易损坏，同时要求电工维护人员有熟练的水平。

摩 擦 焊

近年来，国外对摩擦焊作了大量的研究工作，现已广泛地应用在汽车、拖拉机、发动机、电气工程及工具生产等部门。

目前国外应用摩擦焊最广泛的是日本和苏联，西德和英国次之。美国在这方面也在逐年增长。据1970年国际摩擦焊焊接会议调查，日本已投产的摩擦焊机有400多台；苏联有400台，但其中一半还是试验性的；西德约有35台，其中11台是试验性的；英国有20—25台。由此可见五年前，摩擦焊在国外还处于试用摸索阶段，并未达到全面成熟和广泛应用的程度。

摩擦焊的实质是借助工件间相对旋转摩擦所产生的热能，在顶锻力作用下实现连接的焊接方法。

它有制动式和飞轮式两种，对异种金属焊接而言，两种方式各有利弊。需根据具体情况加以选择。

铜、铝这两种金属的接头也越来越多地采用摩擦焊。在连接实心圆柱形和管状截面的铝件与铜件时可采用摩擦焊[197]。其特点是铝件端部要仔细清洁，铜件要退火和清洁，此外还要求高的顶锻压力[108]。用以破坏脆性相并将其挤出。参考文献[20]曾对铜—铝的摩擦焊作过试验。试件材料是AlB1与CuB2—H，原材料为直径20毫米的棒料，接合面经机械加工。焊接时，铜的一侧不产生烧融，因此为防止氧化，加工后应立刻焊接。在焊接时由于提高摩擦压力，焊接时间便缩短，被挤出的熔融物质也增多，从而便能防止生成中间合金层。摩擦焊时转速以1000转/分以下为宜，视直径大小而定，压力取16公斤/毫米²左右，总留量最好是15毫米左右。摩擦焊时，只要正确选择焊接规范就能获得优质的接头，试样破裂都发生于铝母材上。

近年来在主轴上用飞轮储能的脉冲摩擦焊(或称储能摩擦焊)得到很大的发展。由于采用飞轮储能而使焊机发挥更大的功率，即可用较大的摩擦压力和顶锻压力进行焊接；还由于摩擦焊接金属面的加热、变形和扩散过程成为脉冲形式，从而大大减少焊接能量的消耗，缩短摩擦加热时间，提高焊接接头质量。这种方法特别适用于焊接大截面工件和异种金属接头。

储能摩擦焊的主要工艺规范参数为：飞轮转动惯量，飞轮转速和顶锻压力。焊接有两种形式：一种是顶压焊接时飞轮释放出其储存的全部能量，自行停止旋转；另一种是顶压焊接时飞轮尚储存一定的能量，还在旋转，这时应使其和主轴脱开，然后制动主轴，或同时制动飞轮和主轴。储能摩擦焊能量为一般摩擦焊的1/5，加热时间为一般摩擦焊的1/20。

摩擦焊的发展方向是采用数控装置。

扩 散 焊

扩散焊实际上是一种没有塑性变形的压力连接方法。焊接时被焊零件在小的压力作用下加热到再结晶温度(常常是接近熔点)，并在这些条件下两被焊零件在一起保持较长的时间(数分钟至数小时)。在焊缝中材料没有熔化和发生大的变形。而是借助在较高温度下两被焊接零件的原子相互扩散，形成永久连接。因此，这种方法的利用是以被连接两种材料相互可溶性为条件的。所施的压力只要使被焊零件形成直接接触并不必造成塑性变形，其值不大。

为了达到扩散，总需要一定的溶解度。彼此不能互相溶解的两种金属，在扩散焊前应镀上一层彼此能溶解的镀层，而扩散就在这两层镀层之间进行。

为了成功地进行扩散焊，要求焊前对零件进行表面准备，最好是磨削，以使被焊接平面清洁并有良好的接触。此外，在焊接前经过加工的表面要用丙酮、酒精或三氯乙烯进行脱脂处理，但在新氧化膜生成时要进行腐蚀处理。

为了限制在焊接温度下形成氧化物，可在真空或保护气体中焊接。一般情况下真空室压力为 10^{-3} — 10^{-6} 毫米水银柱。为了减少每次焊接用在抽真空方面的费用，目前倾向于采用保护气体扩散焊。保护气体可用氩、氮等惰性气体或氢、氮和二氧化碳等双原子气体，也可以用混合气体(含7%氢的氩气或含3%氧的二氧化碳)[29]。保护气体压力为1.2—1.5公斤/厘米²。

由于冶金方面的原因，两种金属不能直接焊接时，可以通过连接表面之间加入隔离金属层的办法来解决。金属层可以是一种也可以是由两种不同材料组合而成。它可以是薄膜或金属丝网并以粉末状或糊状置于焊接表面之间，或以电镀层或喷涂层形式涂敷在接触面上。厚度几微米至几百微米。

涂层的作用是：使接触面具有必要的塑性蠕变，从而达到要求的扩散和缩短焊接时间；在接头区内防止粗晶生长；在焊接异种材料时避免生成脆性中间金

属相。

各国扩散焊机的发展情况见参考文献[29]。美国在改装和改进现有设备的基础上制成扩散焊机[30—37]。苏联和西德与这种发展相反,倾向于研制专用的扩散焊机。值得注意的是:苏联在1963年制成了既能在真空中也能在保护气体中进行扩散焊的联用设备[38],1965年又制成了在 CO_2 气体中进行焊接的专用焊机[39]。苏联在这方面的进一步发展情况见参考文献[40、41]。

扩散焊的主要优点是:能焊接由于几何形状或冶金原因用现有的焊接方法无法焊接的零件或组合材料,且可以焊接型面工件的整个接触面。真空扩散焊可以用来制作铜-铝接头。焊接时加热至 520°C ,压力1公斤/毫米²(9.8牛顿/毫米²),焊接持续时间10分钟[43]。在采用这种方法焊接铝和其它金属时,真空度应达到 10^{-6} 毫米水银柱[44]。应当指出的是,即使在这种条件下形成氧化膜也是不能避免的,因为铝即使处于高真空中其表面也容易形成氧化膜[45]。

由于扩散焊的工艺复杂,费用昂贵,因此应用范围不广,迄今仅应用于喷气技术、制冷技术、飞机制造、火箭制造、鱼雷制造和人造卫星制造方面以及电子工业中。

实际上,扩散焊的进一步应用还受到如下限制:焊接时间和抽真空时间较长,焊件尺寸也受到焊接腔室尺寸的限制。故近来的发展趋势是着重研究保护气体扩散焊,采用这种方法能大大提高经济性能和扩大应用范围。

爆 炸 焊 接

爆炸焊接是利用爆炸物爆炸时产生的压力使材料连接起来的一种压力焊方法。它是1958年美国在进行水下爆炸成型加工时,由于铝制另件被粘到钢质模具上而偶然发现的。随后美国即从事这方面的研究,并已于六十年代初期研究成功,这是一种全新的焊接方法,已在航空和宇宙航行业中得到广泛地应用[54—62]。

爆炸焊接有两种基本方案:1)爆炸压力作用于彼此紧贴着的被焊零件上;2)爆炸压力作用于彼此形成一小夹角的焊件上。后一种方案又可分为达文波特法和佩阿尔逊法两个主要方法。详见参考文献[125]。

爆炸焊接规范有下列参数:

- 1)原始倾角角度;
- 2)零件的碰击速度;

3)原始倾角角尖两另件之间的间隙;

4)真空度;

5)炸药装放部位与焊件的距离;

6)炸药的种类。

此外,应适当考虑的焊接规范的其它一些参数例如:被焊接材料的厚度、其物理特性、缓冲材料的物理特性及炸药的尺寸等。

采用爆炸焊接能焊接大面积焊件,焊缝中没有热影响区,因此特别适用于焊接铜-铝和其它异种金属。用这种方法焊接异种金属时,所产生的扩散层厚度微不足道。因为整个焊接过程仅持续数微秒,两种金属根本就来不及产生相互扩散,这样焊缝中就不存在中间化学成分,因此不必采用中间衬件就能焊接异种金属。待焊另件表面也不用严格清洁,能焊接直接从仓库拿来的铝材。而且能焊接用一般方法不能焊的材料。焊接设备也比较简单、轻便也不昂贵。此外,在正确使用炸药的情况下,被焊材料不会变形,同时也无飞边或毛刺,不需要进一步加工,从而既节约材料,也适用于焊后不能进行机械加工的场合。

爆炸焊接的唯一缺点是,生产时间较长,因此,不适用于成批生产。然而在小批生产或用一般方法无法或很难生产的场合下采用爆炸焊接能大大地降低生产费用。

目前,爆炸焊接除了能成功地焊接铝、铜等有色金属外,还能焊接锆、锰、铝、铍、不锈钢、塑料、陶瓷和金属陶瓷材料。在各种金属的组合方面,除能焊接铜和铝以外,还能焊接铝与低碳钢、不锈钢、锆及镍合金,其次还能焊接钢和锆、钨、铜,甚至能焊不锈钢和镍合金、镍和钛等。

直径6毫米和壁厚2毫米的铝管与铜管的爆炸焊接时在非常短的焊接时间下(0.03—0.03秒)施加的压力为17.6公斤/毫米²(172.48牛顿/毫米²) [13]。这时接触部位在焊接时温度升高到 $137-147^\circ\text{C}$ 。作者认为,是由于形成宽0.026毫米的均匀扩散区而实现连接的。然而参考文献[14]及一系列其它文献都否认在所有铜铝冷焊方法中有扩散过程。

爆炸焊接在机、电、交通运输和低温技术中的实际应用参看文献[13、124]。

爆炸焊接是以爆炸压力成型工艺为依据的,因此,爆炸压力成型加工的一般规程[56]也多少适用于爆炸焊接。

更值得指出的是,爆炸焊接和爆炸压力成型加工连用是很有前途的。由于两道工序合为一道,只需要一套模具,能降低工时和生产费用。

爆炸冷压焊

前面已经说过,冷压焊时,变形的速度与焊缝的质量关系不大。在爆炸焊接时,由于采用炸药作能源,从而使焊接时间(即焊接接头的变形速度)降低到0.03至0.5秒,然而获得的焊缝的机械性能与冷压焊缝没有什么差别。根据这个原理,冷压焊完全可以与爆炸焊接连用。

冷压焊与爆炸焊接连用就是爆炸冷压焊。其压力不是采用手动、气动或液压产生,而是采用弹药。这时原则上是用弹药来加速冲头,冲头能达到高达1000米/秒的速度。焊接原理示于图15中。由装弹药室中弹药燃烧而产生的工作气体的能量被传到活塞,活塞就降落到工具的顶部,工具顶部就朝着相对处于静止的底座移动。气体的爆炸能转变为压力并使被焊接零件在接头部位产生塑性变形。变形的大小和方式取决于工具的结构。

接头形成的机理和冷压焊时相似。这种方法在捷

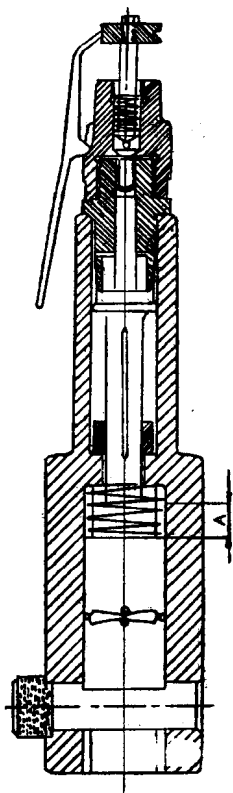


图15 爆炸焊接——采用弹药的爆炸焊接用的爆炸压力机(射击式压力机)。

克斯洛伐克的实践中已卓有成效的研究成冷焊的若干方案。通常用于将电缆接头焊到实心导线和缆线上,主要是在安装的情况下用。

在采用高能炸药,爆炸物时,炸药在数微秒内转变为爆炸能。爆炸压力在 1 至 3×10^{15} 公斤/厘米²范围内,并且冲击波的最初扩散速度达9000米/秒。在焊接时采用硝酸胺基工业炸药和胶凝炸药。

由于以弹药爆炸为能源,故为大大缩小冷压焊设备,尤其是大截面冷压焊设备的尺寸和重量开辟了新的途径。

熔 焊

在国外,电气工程中用的铜铝接头目前主要是采用压力焊来制作。然而在安装条件下采用压力焊是有困难的,在个别的一些场合下,由于零件的结构特点根本就不可能采用压力焊。此外,为焊接大截面的铜铝母线(700—1000毫米²以上)需要很笨重的焊接设备。在这些场合下采用熔焊是合理的,然而必须采取特定工艺,以确保进入焊缝的铜量最少。

电 弧 焊

由于铜铝各自的物理特性不同,所以铜铝熔焊有一定的困难。采用电弧焊时,由于需要使进入铝焊缝中的铜量保持最少而使工艺复杂化。为此必须使铝熔化而熔点较高的铜不熔化〔4〕。在金属极自动电弧焊情况下,由于采用焊剂和铝填充焊丝,或者在氩弧焊情况下,由于在铜坡口上涂上易熔涂层,铜被液态铝熔池润湿情况就有所改善〔60〕〔68〕。

KCl-NaCl-Na₃AlF₆系统的焊剂在焊接铝时有很好的工艺性能〔69〕。这些焊剂也能用于铜铝电弧焊。在焊剂中最好应含有30—40%的冰晶石。

KCl-NaCl-Na₃AlF₆系统的焊剂和易熔的电镀涂层对铝湿润铜都有良好的作用。

试验证明,在银、锌、锡、镍、镍锌等涂层中,以银镀层和锌镀层的工艺性能最好。从经济角度考虑,铜铝氩弧焊采用锌镀层为宜。

铜铝氩弧焊时,锌镀层的作用主要是在热循环作用下,能在铜坡口的表面生成一层薄薄的湿润液层,从而保证熔融铝在铜上能很好的漫流〔70〕。

其次,焊接工艺规范对铜铝焊接接头的性能有决定性的影响,因为基本金属加热温度、铜与液态铝和固态铝相互作用时间和金属的氧化强度取决于电流大

小的变化、焊接速度、焊丝相对于焊接接头的移动速度等。因此研究铜铝焊接时的温度-时间条件及其对焊接接头性能的影响,对于选择铜铝电弧焊时的最佳规范有特别的意义。

参考文献[67]曾采用金属极自动电弧焊焊接铜M1和铝A5,设备是TC-33型焊机,焊接电源是ПC-500和ПCМ-1000,焊丝和填充焊丝为AД1铝线,采用AH-A1焊剂。待焊的铝线和铝板用一般工艺进行焊前处理。铜边缘用机械修光。

主要是以 $\delta=10$ 毫米的金属进行试验的。焊丝直径与电流的大小有一定关系。每种直径的焊丝的送丝速度是根据电弧燃烧稳定性和焊缝的成形质量来选择的。试验表明,在焊接电流380—400安,焊丝直径为2.5毫米时,焊接电压38—40伏,焊接速度为21.5—24.8米/小时,焊缝成形满意,质量良好,焊接接头有最好的性能。同时焊丝在铜的一侧与接头的距离为5—7毫米时,所得接头的强度最稳定并且最高,其接触电阻也最小。

各种厚度的铜铝金属极自动电弧焊的最佳焊接规范参看参考文献[67]。

有人认为有脆性中间金属层的异种金属焊接接头不能用于动载场合。参考文献[72]证明氩弧焊铜铝接头的疲劳强度和铝接头的疲劳强度相同。认为中间金属层实际上不影响异种金属接头的静载强度的肯定说法也日益增多。但是试验[61、52]证明,这些接头的静载强度正是取决于由金属间化合物所构成的过渡区厚度。参考文献[71]也指出,熔焊焊接接头的机械性能取决于中间金属相的厚度。接头的静载强度随着中间金属层厚度的增大而下降。特别是当金属间化合物处于致密层状($\delta=3-5$ 微米)时尤为明显。因此,铜铝熔焊时必须尽量使中间金属过渡层厚度最小。

在铜铝熔焊的最佳规范情况下[68],中间金属层厚度的变化范围很大,约3—30微米。在厚达30微米的情况下,氩弧焊铜铝接头的静载强度仍处于基本金属(铝)的水平。铜铝接头内其接合面积等于基本金属横截面时,在金属间化合物以 $\delta=2-5$ 微米致密层形式分布时,其强度和塑性就显著下降,在铜修K形坡口(坡口角 60°)时,由于铜铝的接合面积大于被焊接金属的横截面,对焊接接头的强度和塑性有良好的影响,接头的强度高而稳定[72][68]。用氩弧焊焊成的这种铜铝接头在进行静载抗拉试验时,通常是沿基本金属发生断裂(铝A5, $\sigma_B=7-10$ 公斤/毫米²),氩弧焊铜铝接头的电气性能符合电机和变压器技术条件标准[68]。

此外,根据参考文献[73]报导,在铜铝熔焊时,



图16 借助电铆钉焊成的铝和其它金属焊接接头的宏观组织。

修高脚酒杯形坡口能使焊缝中铜的含量降低到10%并显著地提高焊接接头的强度。随着铜含量的降低,中间金属层的厚度也减少到0.8—1微米,个别情况下减少到20微米。

铜铝熔焊时,焊缝结构的特点见参考文献[71]。

此外,国外还有一些文献报导利用电弧焊焊接铜铝接头的资料,在参考文献[96、97]中叙述了采用氩弧点焊焊接铝和其它金属的方法。这种方法的实质在于零件专门装配并采用铝或铜电铆钉以熔化极或非熔化极氩气保护焊焊接(图16)。在这种情况下仅仅在电铆钉的周围区段上形成金属间化合物,对接头的机械性能和电气性能影响不大。其抗扭强度较低[98]。为了提高铜板接头的可靠性,采用电镀法在铜板上镀上一层铝[99]。当上面的板厚超过0.8毫米时,建议在板上钻孔供电铆焊用[100]。

在前面已分析过的参考文献[22]中,介绍了一种预先在铜上镀一锡层的铜-铝氩弧焊。另一种方法[101]是在铜的坡口上涂上一层 $\delta=0.8$ 毫米的银焊料层。焊料成份为:50%银,16.5%锌,15.5%铜和18%镉。经过这样处理后,就用熔化铝电极进行氩弧焊。带中间隔离层的铝-铜接头并没有形成大量的金属间相。在焊接铝管、铜管及铝合金管和铜合金管时也建议涂上这种涂层[102]。在铜表面上镀一铝层以代替银焊料的方法已取得专利[103]。

在铜-铝直接电弧焊时可以采用所谓锁式接头[104]。在这种情况下采用碳极以正极性直流电焊接截面 29×250 毫米的铝母线和截面 10×100 毫米的铜母线。采用铸铝棒为填充材料。铜母线2(图17)沿周

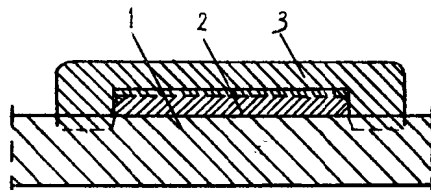


图17 锁式接头[47]:

1—铝母线; 2—铜母线; 3—堆焊金属。

边被焊到铝母线1上,然后再焊上一堆焊层3,将缝连接起来。

也还有采用铸焊[105]和铝热焊[105]来制作永久性铜-铝接头的。

采用上述熔焊方法焊成的铜铝接头的机械性能和导电率不高。这与接头中存在着较大量的脆性金属间相有关。预先在铜的表面上涂一层银焊料的焊接方法能保证有较高的性能。然而银系稀有金属,使这种方法的优点显得逊色。

电 子 束 焊

采用低压电子束焊焊接铜铝对接接头,其抗拉强度只达到母材的65%,这是由于接头中形成脆性合金中间层的结果。若以银作为中间层则所得接头的强度达到铝母材(Al100P)的90%。据报导,采用锌作中间层来焊接铜铝接头也能收到一定效果[75]。然而在焊接时锌的剧烈蒸发带来了很大的困难。因此必须采用对焊缝发生横向振动的连续电子束。这样可使端面从边缘上部熔化。不振动的话,由于电子束的功率密度很大,只有锌发生蒸发,并未能使两零件焊接在一起[76]。

接 触 焊

为了焊接铜和铝广泛地采用闪光对焊和电阻对焊。应当指出的是,铜铝各自的物理性能及其差别,也给接触焊带来了困难。因此,在制定铜铝接触焊的工艺过程和研制相应的焊接设备时应考虑到铜和铝的一些特点。

闪 光 焊

由于铜和铝的热传导性好和电阻低,因此,在铜铝闪光焊时,所采用的电流密度(500安/毫米²)要比铜闪光焊时的电流密度(10—50安/毫米²)大得多。

铝极易氧化,因此闪光焊时烧化必然非常强烈,而顶锻也应很迅速,这就必须使铜坯端面保持在充分的热状态下。

毕竟铜铝闪光焊时,在接头处难免要形成氧化物和脆性中间合金层。因此要求有够高的顶锻压力,使处于半熔融状态的金属能连同氧化物和其它不洁物一起挤出接头,并使与接头直接毗连的区域金属产生

塑性变形。为了便于顶锻并减少氧化的危险,应有带电顶锻,然而其持续时间不应超过1—2周,以免过热。

由于铝的熔点较铜的低得多,因此铜铝闪光焊时,主要是铝零件烧化,因此铝件的整定长度应大些。

应当注意的是,采用普通对焊工艺时在铝铜接头中会形成大量的脆性化合物。为了排除这种混合物,E.施乃德马德尔建议在闪光焊时采用顺序两次顶锻:一次是直接在烧化之后和一次是在铝冷却之后。

电 阻 焊

在电阻焊时建议在铝与铜之间加入锌以达到同一目的[78]。铜铝接触点焊时,铜件的表面也预先镀锌[91]。还有一取得专利的电阻焊方法,其原理是预先在铜上镀一铝层[79]。为了增加连接部位的过渡电阻,建议在被焊接的铝零件和铜零件之间加入一 $\delta = 0.1$ 毫米的铜箔或铝箔[80]。金属箔可以由专用的机械化装置供给[81]。利用接触对焊完成实心管和管状截面的接头。在焊接瞬间以0.25个气压的余压的空气通过管子能减少被焊接的铝管和铜管内壁的毛刺[82]。为达到这一目的,采用氮气更合理[83]。

接 触 焊 设 备

铜铝接触对焊是在专用设备上进行的[86]。苏联1973年介绍的MC-2006型接触焊机系供焊接TAM型接头用的,采用连续烧化冲击顶锻方法焊接。该焊机为气动传动,额定电压380伏,额定频率50赫,功率为160千伏安以内,额定焊接电流20000安,最大夹紧力4000公斤,在压缩空气压力为4.5公斤/厘米²时的额定顶锻力1600公斤,每小时能焊接300个TAM-5.4接头或150个TAM-22接头。该焊机的特点是采用电磁离合器,在烧化过程终了之后使圆柱齿轮涡轮减速机脱离电动机[127]。此外,在苏联铜铝接触对焊使用的焊机还有下列型号:MCK-0.1, MCL-25, MCHT-150[87]和MCKH-150等[88]。在参考文献[89、90]中建议采用改装过的MCMY-150型焊机来对焊铜-铝母线。

在以(电阻)对焊完成的铜铝接头的组织中总是有一定数量的在顶锻时未能完全被挤出的脆性相[84]。

在上面提到的参考文献[77—81]中的试样为平板试样。参考文献[85]中研究了端面磨成140°角的铝-铜试样的接触焊。

无中间隔离金属层的 熔焊和接触焊试验

国外的一些文献,经常断言,铜-铝熔焊没有中间过渡层是不可能的。它会在接头中形成脆性中间合金,从而使焊缝的机械强度恶化。根据上述有关文献记载,要得到满意的结果,只有在铜侧预先镀上一层约0.8毫米厚的银焊料层,然后再用铝硅填充焊丝焊接。

当前对熔焊研究的结果,清楚地说明,由于铜铝接头部位形成金属中间相,所以其强度值可能很小。然而,采用无任何填充材料的钨极惰性气体保护焊方法的熔焊却是成功的。这种方法在电气工程中那些承受较小机械应力的场合下可能得到应用。这就启发人们研究不用中间镀层或垫片的铜铝熔焊和接触焊方法。下面就叙述这方面的一些研究结果。

参考文献[74]曾在不采用任何镀层的情况下对纯铝+纯铝、用钛镇定的铝+用钛镇定的铝、电解铜+电解铜、纯铝+电解铜、用钛镇定的铝+电解铜线材进行过焊接试验。试验结果如下:

用WIG法,以氩气为保护气体时,焊接铜-铜没有什么困难。对以钛镇定的铝来说,采用WIG法时,只有使用氦为保护气体时,才能获得良好的效果。这时的电流强度大约只需为钨极氩弧焊时的一半。焊缝底部必须用氦气冲刷,所用流量为0.7升/分。焊接部位焊前要用机械方法清洁并注意保持清洁。

铜和用钛镇定的铝的焊接试验出现了些困难。研究结果:采用WIG焊时,以氩、氦混合气体为保护气体,并且用微量的氦气进行下部冲刷,其流量为0.7升/分。焊枪必须保持在铜材的最外边,并且在铜快熔化之前移向铝。曾应用各种添加剂作为降低发脆现象的试验,但没有取得值得一提的效果。等离子体焊接也没有取得令人满意的结果。

在电阻焊试验时,采用20千伏安的对焊机,焊接电流强度20安,焊件的通流长度在焊接铜-铝时为4毫米,在焊接铜-用钛镇定的铝时为6毫米。

在焊接铜和用钛镇定的铝件时,经常把材料夹在端头模具中能获得满意的结果。焊接接头的机械性能试验参看参考文献[74]。

总而言之,用电阻焊焊成的铜铝接头的机械性能要比用WIG方法焊成的接头的好些。其静力机械性能良好,动力机械性能仅达到可用的数值。铜铝焊缝的

导电率在44—51 Ω 毫米²(毫西门子/毫米²)。

此外,铜铝电阻焊可以不采用中间过渡层。

电 容 焊

铝线、铝母线与铜线、铜母线的连接可以采用电容焊[92]。铝线与铜线电容对焊的焊按规范列于表中[83]。

导线的直径 毫米	电容器 电 容 微法	电容器 电 压 伏	零件之间最初的距离 毫米	顶 锻 力 公斤(牛顿)
2.5	256	1100	14	150(1471)
3.5	550	1500	12	160(1569)
5.0	1000	1500	14	175(1716)

在有铜铝接头结构的使用中应当限制对接头部的加热温度。高于一定温度就能形成脆性的金属间化合物[93]。

参考文献[94]指出,铜-铝接头在500—550℃温度下加热4—5分钟其强度就降低到原强度值的50—60%。在400℃以内加热不超过6分钟实际对强度没有影响。

C. K. 斯里澳兹贝尔葛等[95]建议将铜-铝接头的加热温度限制在250—275℃以内。这些数据适用于采用冷焊和接触对焊焊成的接头。

其 它

除了上述焊接方法外,在电气工程中,一般需要轻易拆开的接头,在采用铜铝双金属衬件的情况下,还可以采用机械连接。

在采用双金属衬件时,由于在铜铝这两种金属之间没有电介质,故电化腐蚀极微少,而且能轻而易举地利用涂漆或涂凡士林来防护。

在电气工程中最常用的是标号7030的单面包复电解铜的铜铝双金属板(即70%铝,30%铜),其比重为4.5,平均电阻为0.0252欧姆/毫米²/米,而导电性能则比纯铝还好。由于连接紧密,因此铝层和铜层之间的过渡电阻微不足道,而且变化也很小。

在采用铜铝双金属衬件时,选择比接头本身的面积更大的接触面是合理的。同时在使用时,总是使铝的一面对铝线,而铜的一面对铜线。铜铝双金属板可以弯曲也可以钻孔,还可以制成垫圈、垫片和管子等衬件,以便用于铜线和铝线或铝线和接线端子的机械连接。