

摩 擦 焊

第 一 輯

冶金工业部建筑研究院 編

冶金工业出版社



100

100

100

100

100

摩 擦 焊

第 一 輯

冶金工业部建筑研究院 編

冶 金 工 业 出 版 社

38.38

本小冊子是冶金建築研究院將摩擦焊自創造以來的部份初步研究結果匯集而成，着重在焊接工藝方面的研究，並有實際操作資料，還附有 EGH—MI 型摩擦對焊機施工圖。

本書適用於建築、機械製造及其他工業部門中從事焊接工作的工程技術人員和工人，作為推廣摩擦焊參考之用。

摩擦焊 (第一輯)

冶金工業部建築研究院 編

編輯：黃錫爵 設計：董鵬程、魯芝芳 校對：趙鳳方

1958年10月第一版

1958年10月北京第一次印刷 10,000 冊

787×1092•1/16•61,000字•印張 $3\frac{11}{16}$ •插頁 12•定價 0.80 元

冶金工業出版社印刷廠印

新华書店發行

書號1190

冶金工業出版社出版 (地址：北京市灯市口甲45号)

北京市書刊出版業營業許可證出字第093号

前 言

摩擦焊法研究成功，是我国科学研究工作在党的正确领导下，取得的一系列重大成就之一。这个方法，是马景云同志在党的支持，哈尔滨工业大学陈定华先生的帮助和其他兄弟单位（尤其是电装四公司）的人力、物力支援下，结合自己所见的汽车“烧轴”现象的启发而制造成功的。到目前为止，还不到一年的时间里，这种方法已经开始应用到生产中去，为生产上解决了很大的问题，在社会主义建设中起了一定的作用。电气安装部门已经采用它来焊接轴-铜、轴-铜母锥及导线，为国家节约了大量的黄铜与金属材料及投资；沈阳机床二厂首先采用它来进行焊接45号钢高速钢（如钻头），为国家节约了大量的高速钢，降低了产品成本；建筑部门采用它来焊接钢筋；化工部门采用它来焊接塑料等等。这说明了这种方法具有重大的技术经济意义。

总之，由于摩擦焊接头质量优良，可焊各种不同性质的金属，设备成本低、制造简单、生产率高、操作容易，不需要填充金属和焊剂等优点，生产单位及研究单位对这一方法也进行了研

究工作，如有的已制造成功了“闭式”中间摩擦焊机，及进行了中间摩擦片的研究等。

为了及时地将这种方法运用到生产中去和满足广大读者的要求，我们把到目前为止的研究成果的一部份，汇编成这本小册子，供大家参考，来共同推动摩擦焊的研究工作和应用到生产中去。这里所收集的几篇文章有的是目前的研究结果，有的是过去在杂志上已发表过的，但又做了修改和补充。由于我们所收集的内容还不够丰富，远不能满足形势发展的要求，因此仅作第一辑出版，以后再陆续出版各辑。

由于整理人员水平有限及研究工作还是刚刚开始，因此难免有错误，请读者们提出宝贵意见，批评和指导。 荣信清寄：北京学院西路冶金工业部建筑研究院焊接组。

冶金工业部建筑研究院工程结构室焊接组
1952年8月于北京

目 录

前言

一、鉛銅導線、母線的摩擦焊.....	1
二、金屬摩擦焊.....	10
三、高強度鋼絲摩擦焊的初步試驗.....	18
四、高強度鋼筋和它與45號鋼的焊接試驗.....	22
五、鋼與螺旋鋼筋摩擦焊接頭的耐疲強度初步試驗.....	24
六、摩擦焊設備.....	25
七、結束語.....	34
八、附錄.....	35
(一) EGH—M1 型摩擦對焊机說明書.....	35
(二) EGH—M1 型摩擦對焊机施工圖.....	36
(三) 標準模子圖.....	55

一、鋁銅導線、母線的摩擦焊

隨着工業生產的發展，對導線材料的需要量將日益增加。推廣鉛導線不僅可以節約資金，而且還可以為國家節約大量純銅。在採用鉛導線時，首先就牽涉到鋁銅導線接頭的連接問題和鉛導線與電氣設備銅端的連接問題。因為這些接頭無論是採用機械、鉗焊或熔焊等方法連接，不是難以得到滿意的接頭，就是操作比較困難。鉛導線與銅導線之間用機械方法連接時會發生電化腐蝕，它嚴重地影響了接頭導電的性能。應用普通鉗焊銅線的方法焊接鋁銅導線，不僅操作困難，而且很難得到滿意的質量。利用普通電弧焊來解決銅導線與鉛導線的焊接，則操作比較困難，而且接頭在熔焊焊接過程中極易生成脆性脆裂的鋁銅金屬化合物，不能滿足接頭的技术要求。近年來，在工業先進的國家，如蘇聯，在解決銅鋁焊接接頭質量上認為比較滿意的的方法是閃光接觸焊法。但採用這種方法要求有自動控制裝置和功率較大的接觸焊机，消耗電能很大，顯然，接頭成本較高，不經濟。此外有冷壓焊接的方法，但它還只適用於較小断面（10公厘²）鋁銅導線的焊接，對大断面鋁銅導線的焊接，因其夾壓設備複雜而難以廣泛採用。因此，尋找一種簡單適用的焊接方法是當前推廣鉛導線代銅導線的關鍵問題之一。

摩擦焊是一種新的焊接方法，是馬景雲同志根據金屬摩擦生熱塑性增加的原理，在內燃機的曲軸與軸套因摩擦而發生銅鋼焊合現象的启发下研究成功的。研究結果證明，摩擦焊接工藝不僅操作簡單，而且容易得到質量滿意的接頭。

（一）摩擦焊接工藝

鋁銅導線摩擦焊接工藝上的主要困難是鉛導線強度較小，在摩擦和頂壓時難以承受壓力，稍一加壓，鉛導線就會彎曲變形

（圖1-1）。同時鉛和銅的導熱性能十分良好，很快將摩擦生成的熱量傳走，加上銅與鉛的硬度相差較大，摩擦中常造成鉛的大量磨損或被銅切削鑽孔的現象。以上這些因素都使得一般的摩擦焊接法在焊接鉛銅導線時不能直接採用。為了克服這一困難，根據壓力焊接原理採取了帶模封閉加壓的措施。試驗結果證明，這種措施可圓滿地解決鉛銅導線的對焊問題。

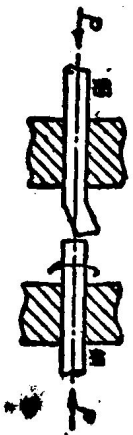


圖 1-1 鋁銅導線加壓變形情況

封閉加壓過程是利用模子和 $r_{cu} \geq r_{Al}$ 這兩個條件實現的（圖1-2）。 r_{cu} 和 r_{Al} 分別指銅導線和鉛導線在模口外的半徑。

加壓中，銅線稍微變形後，其外圓即可卡在模子的口外。在頂壓過程中，由於銅封閉了鉛的出口，阻止了鉛的旁向流動，為壓力焊接創造了良好條件（銅本身的變形較小旁向流動小）。摩擦過程中，由於工件彼此摩擦產生一定的熱能，頂壓時金屬變形過程中，金屬內部摩擦也產生一部份熱量。熱量與壓力給焊接面上原子結合與擴散造成有利條件。這種焊接方法對銅、鉛導線表面氧化膜的清除比冷壓焊徹底，摩擦所產生的熱能使金屬原子的擴散比冷壓焊順利，因此接頭質量比冷壓焊可靠，另一方面，由於採取封

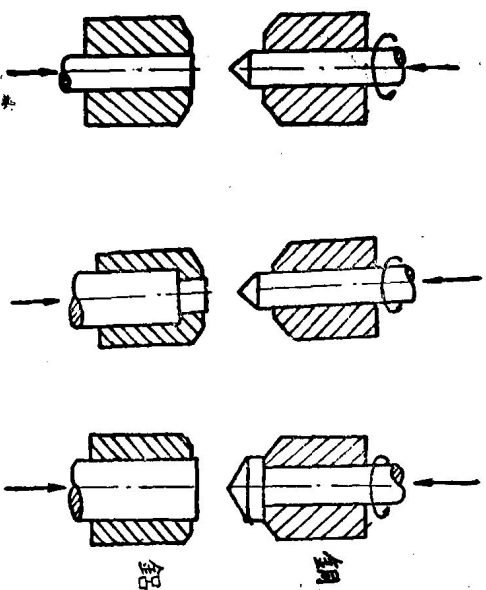


图 1—2 当铝与铜直径不同或相同时封闭摩擦示意图

闭加压使金属强烈变形的措施减少了金属的旁向流动，为铝铜原子的互相接近和结合上创造了比一般摩擦焊接更好的条件，因此不需要将接头摩擦到很高的温度。同时，由于铝线的端头最后全部被压模所包围，铝线不能承受较大压力的困难也得到解决。

25 公厘² 以内的铝铜导线焊接的试验是在小型压床上进行的。用模具将铜线固定在钳夹上，铝线用模具夹紧并固定在工作台上，如图 1—3 所示。两根导线的中心对正后即可开始施焊。焊后接头其外观如图 1—4。

用大型立钳可以焊断面达 50 公厘² 的铝铜接头 (图 1—5)。

图 1—3 小压床上焊接用模具外观

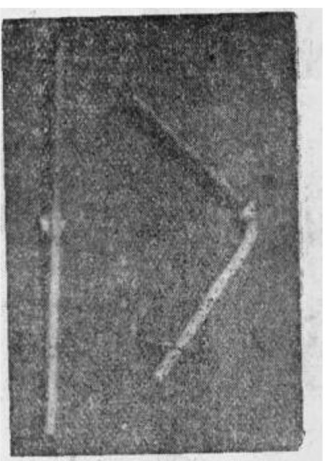


图 1—4 10公厘² 铝铜摩擦焊接头
锥角高度 $h + 3$ 公厘；

铝导线在模口外端长度 $l_{A1} = 0 \sim 3$ 公厘；

专门的摩擦焊机
上焊接的 (图 1—6)。

根据试验结果，采用下列规范能得到质量优良的接头。

铜导线在模口
外端长度 $l_{A2} =$ 铜

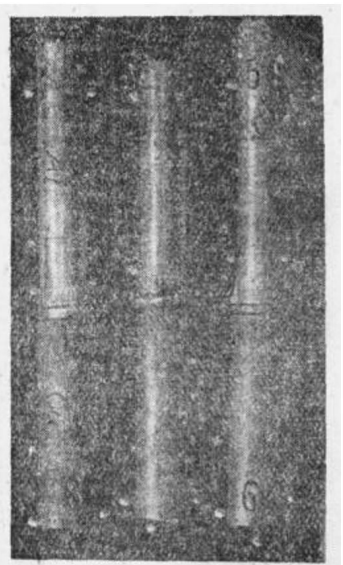


图 1—5 50公厘² 铝铜摩擦焊接头

铜导线端头圆锥角度 $\alpha = 90 \sim 120^\circ$ ；

夹紧后楔子对口间隙 $c = 0.1 \sim 0.3$ 公厘；

铜导线旋转速度 $N = 1500$ 转/分；

摩擦时间 $t = 5 \sim 10$ 秒；

顶压压力 $P = 15 \sim 20$ 公斤/公厘²；

摩擦压力 $= 5 \sim 8$ 公斤/公厘²。

铝铜摩擦焊接规范，是焊接工艺中重要问题。不能正确采用时就有能使接头质量变坏，甚至焊不上。铜导线的旋转速度和顶压压力是比较重要的工艺参数。转速太高或太低，均不能得

施以一定的初压进行摩擦，然后将铜端角锥均匀地压入铝工件，待铜端把铝口封住时立即卸去顶压。顶压须保持数秒，以给予金属原子充分完成扩散过程的机会。

在常温下焊接时，小断面焊件摩擦产生的热量较少（但其散热条件却比大断面焊件有利），因而难以得到焊接所需要的温度，造成焊接困难。克服的办法是，可以把楔子预热到 50°C 左右，这样将有助于焊接过程，提高接头质量。但在焊接较大断面的接头时，如对夹楔子热过高，则将加大铝的退火区，致使铝端强度显著降低。

对于多股铝绞线和铜接接头（通称线鼻子）的摩擦焊已试验成功。其焊接工艺主要是将端部已清理过的铝绞线穿在无缝的铝套管内，事先压紧使接近于整体，然后用直径与铝管外径相同或稍粗的铜头以上述方法摩擦，焊接完用模具把铜头压成接头的形状（图1-7）。

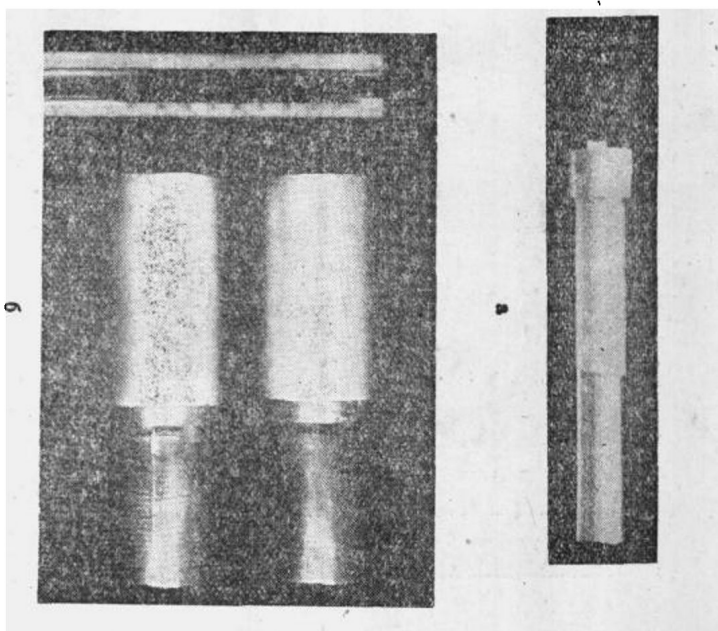


图 1-6 在摩擦焊机上焊成的铝-铜接头

a) ~ 500 公厘²
b) ~ 2000 公厘²

到满意接头。压力小就会因没有足够的塑性变形而使焊接接头质量变低。

铝在模口外长度不宜太长，太长不但会浪费金属，而且由于铝大量的被挤出，影响操作时的观察。铜也不要留得过长，留得太长由于振动或者偏心就会使铜头弯曲，破坏了焊接过程。

两楔子将工件夹紧以后楔子间的缝隙不宜太大。在顶压过程中铝将会通过这个缝隙而变形，间隙太大使铝造成太多的无用变形，却减少了焊接面上的压力与变形，影响质量。

为了使铜导线易于变形，焊接前可将铜线退火。铜线端头圆锥在鑽床或摩擦焊机开动中用锉刀锉净。

焊接方法：先开动鑽床或焊机使铜端旋转，接触铝的端面并

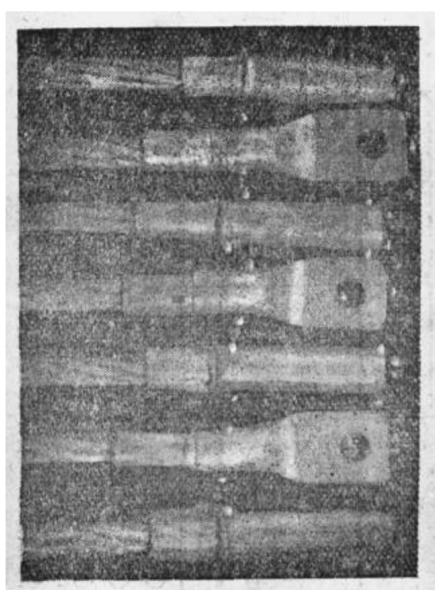


图 1-7 铝铜接接头摩擦对焊焊件外形

铝套管的长度为 $2\sim 3$ 倍于绞线外径，套管壁厚为 $2\sim 3$ 公厘。

操作过程中，无论是摩擦时或是最后顶压时应保证加压均匀，特别是最后顶压，如采用手动式加压，此时不可换手，因此

要求要事先调整好加压速度及始与终顶压的圈数。设计摩擦焊机时也应考虑这一点。

(二) 摩擦焊的接头质量

试验结果表明，如能正确按照前述焊接规范进行铝铜摩擦焊，是能够得到优良的接头质量的。

经过精确测量所得之电阻是很小的，完全满足了工程上的要求。经过反复升高温度试验、腐蚀试验后证明接头电阻仍很滿意 (表1—1)。

表1—1
摩擦焊接头电阻、反复升温 (干燥与潮湿)
接头电阻、腐蚀后接头电阻

序 号	开始时电阻值 (20°C) Ω /公厘 $\times 10^{-7}$	当导线100°C时接头电阻值, Ω /公厘 $\times 10^{-7}$			
		开 始 时	干燥运行后	潮湿运行后	腐 蚀 后
27	3.0	3.7	4.8	3.7	3.7
28	3.1	3.8	3.5	4.1	4.1
35	3.2	3.8	3.6	3.7	3.7
26	3.8	4.4	4.2	4.7	4.8
平均	3.275	3.925	4.025	4.05	4.075

附注: (1) 干燥运行33天, 每天5次;

(2) 潮湿运行30天 (湿度100%), 每天三次;

(3) 腐蚀运行7天, 运行方式同潮湿运行, 隔天用3%盐水喷雾一次。

接头的强度, 如指形成铝铜合金层的强度来说, 还难以正确地得出它的数据。在所有合格的接头拉力试件中, 断裂都出现在铝的方面 (图1—8)。顶压力、旋转速度及摩擦时间对接头强度的影响见表1—2。

摩擦时间在一定范围内, 对强度的影响并不明显。从表1—2可以看出, 当压力继续增加, 强度就稍有增加, 这是因为接头形成铝铜, 压力作用到退火区域, 造成退火地区冷加工硬化的精

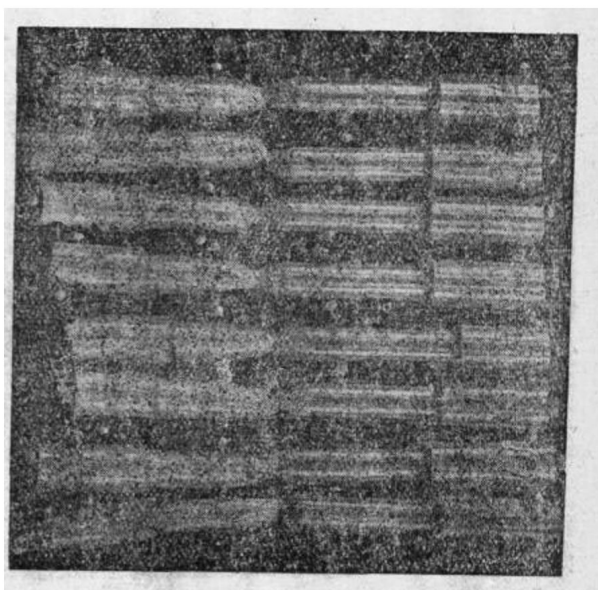


图1—8 铝铜接头拉伸的试件

果。而顶压力小于15公斤/公厘²时, 所形成的接头强度较小。在这种情况下, 接头强度一般都是在焊缝边缘附近破坏, 在少数试样的焊缝上发现有稍微离开的现象。如果顶压力继续减小, 则在接头结合面中的锥角尖端有未焊合的区域; 如顶压力再减小, 则不能焊合。

试验证明, 摩擦焊接的铝铜接头完全可以锻造加工, 即使使用压力或冲压使其变形达90%以上, 整个接头质量仍不受任何影响 (图1—9)。

冷锻及热锻变形后的对接焊缝并没有发生任何破裂现象。从表1—3可看出, 冷锻变形的拉力试件强度已达到冷加工的强度 (15公斤/公厘²)。经过热锻变形的拉力试件虽然受到退火的影响, 但焊接区仍没有任何损坏情况 (图1—10)。

摩擦焊接头的冷弯可达到180°。弯曲时, 由于铜硬铝软, 而且接头的形成是铜以 α 角度鑽入铝中接合的, 因而在弯曲时, 接头就和橡皮中有金属条一样, 使铝在接近焊接区域的变形要比铜的

大。从图1—11中可以看到，接头的弯曲性能良好。

根据金相的观察，从宏观组织（图1—12）来看，接头是以角度锥面而结合的（顶压过程中稍有变形），显然这样的接合面

表 1—2

压力强度与摩擦时间对接头机械性能的影响

试样号	顶压力 (公斤)	压力强度 (公斤/公厘 ²)	摩擦 时间 (秒)	拉伸强度 (公斤/公厘 ²)	断裂情况	备 注
777	900	17.0	15	13.6	焊缝以外	
870	"	"	20	13.4	"	
740	"	"	26	12.5	"	
35	850	16.0	16	12.2	"	
47	"	"	17	12.0	"	
39	"	"	50	12.0	"	
60	650	12.3	6	11.8	"	
54	"	"	9	10.5	接近焊缝	
57	"	"	12	10.3	"	
6560	"	"	21	10.0	"	
15	1000	18.8	9	12.6	焊缝	夹模预热至 50—60°C
12	"	"	10	11.6	"	
16	"	"	12	12.2	"	

注：1. 试样直径均为8.2公厘；2. 摩擦压力300公斤；3. 钢号按转速 1300转/分

要比它的横截面大。

试验证明，这样的接头形式无论在导电性能或在强度上都是非常可靠的。从微观上（图1—13、1—14）可以看出，接头有极薄的过渡合金的层。

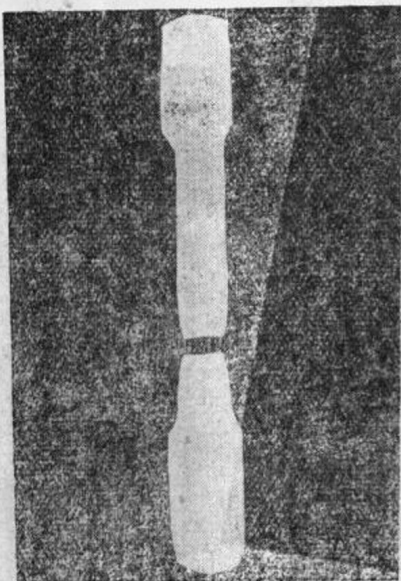
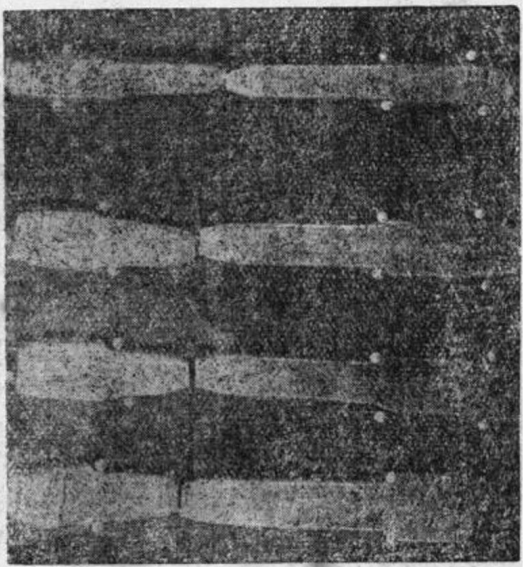


图 1—10 铝铜接头经压后拉伸破坏情况
原直径：8—8.2公厘；6—20公厘



图 1—9 铝铜接头在冷锻后的情况（变形度90%）
（一次锻打成型）

表 1-3

鍛壓對接頭性能的影的

試件 號	焊接 規範	壓 方 法	鍛 下 率 $\frac{(D_0-\delta)}{D_0}(\%)$	拉伸 強度 (公斤/公厘 ²)	備 註
33	與 740 同	冷壓	28	15.0	壓完後溫度在 100°C 以上 " "
48	與 57 同	熱壓	43	13.0	
28	與 740 同	熱壓	45	10.0	
21	與 870 同	熱壓	54.5	11.3	

註: D₀—鍛前直徑; δ—鍛後厚度。



圖 1-12 鋁銅導試宏觀組織

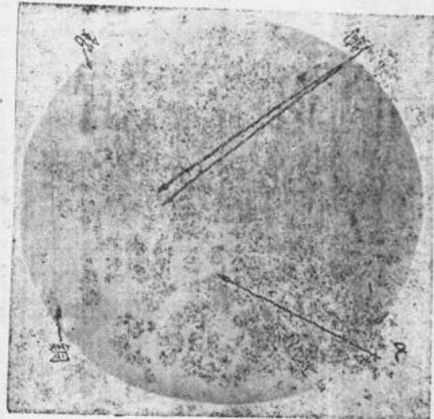


圖 1-13 鋁銅接頭的显微組織

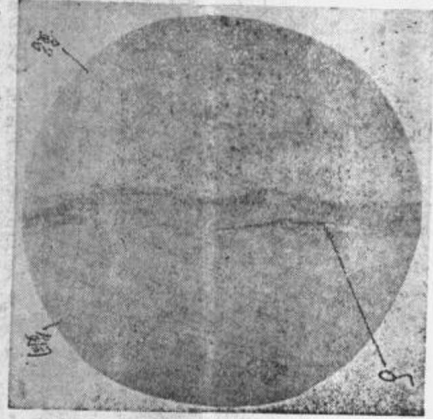


圖 1-14 熱處理後鋁銅接頭的显微組織

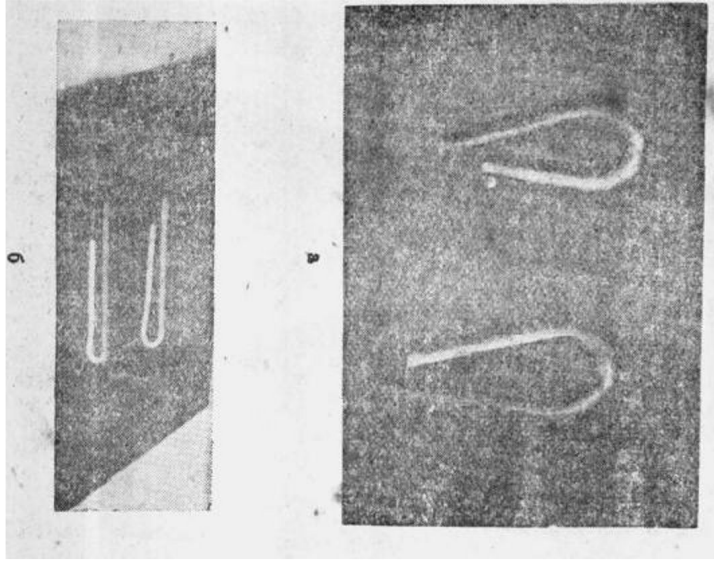


圖 1-11 鋁銅接頭的冷彎試件
原直徑: a—8.2公厘; 6—20公厘

經過 50 次的反复升溫（溫度在 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ ）后再進行強度試驗，其性能仍然很好。拉伸試驗仍斷在鋁處，彎曲角度仍為 180° 。

不論經過反复升溫后進行鍛造，還是鍛造后進行反复升溫試驗，接頭機械性能都是很好的（圖 1—15、1—16、1—17）。

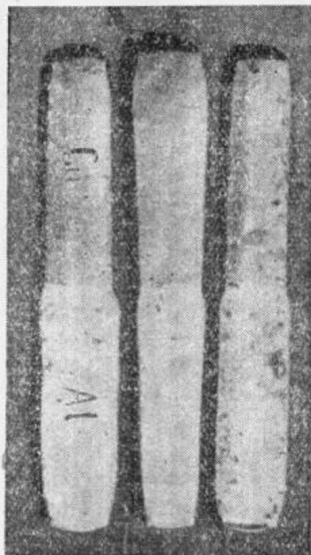


圖 1—15 鋁銅摩擦焊接頭反复升溫試驗后再進行鍛造之試件

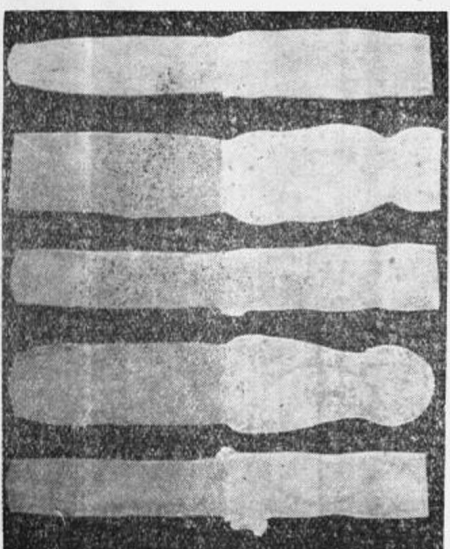


圖 1—16 接頭先鍛造再反复升溫試件

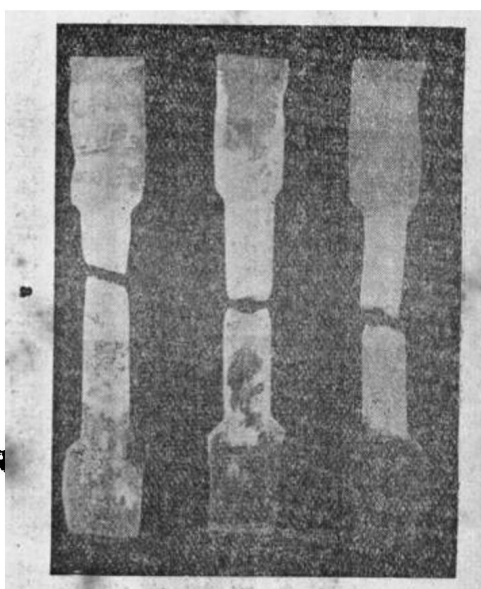
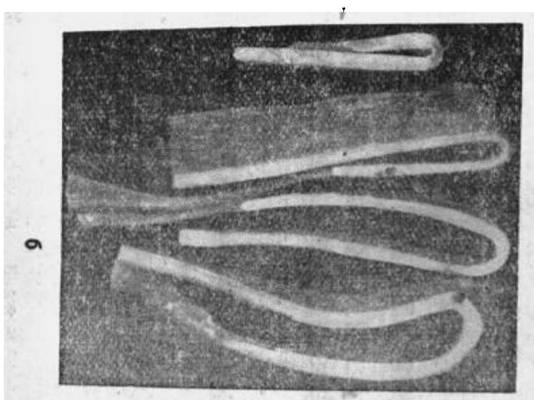


圖 1—17 先鍛造再反复升溫之試件

2—拉伸試件（鋁斷）；
6—彎曲試件（ 180° ）



至于銅接綫頭的摩擦焊接質量，由于鋁管把多股綫纖压紧的結果，使綫纖每股之間的空隙大大減少近似于整體，从而基本上与整體接頭沒有区别。当靠近接頭處的每股導綫上尚有氧化物未除尽时，在焊缝中会多少有些杂质存在。如果使用的是清刷干净的綫纜，根据試驗結果看，可以得到良好的接頭。

(三) 摩擦焊原理的探討

焊接的本質是焊件結合面上的金屬原子互直接接觸、互相結合與滲透而形成共同晶體的結果。

摩擦焊也是這個原理。摩擦使金屬焊接表面氧化膜或其他雜質的薄膜遭到破壞和清除，造成純金屬之間的接觸，同時摩擦產生的熱量又使金屬的塑性變形和原子擴散等能力增強，因而在一定壓力作用下，原子與原子間達到一定距離成最大引力時互相结合形成接頭。

鋁與銅在摩擦焊接過程中之所以能破壞和清除氧化物的主要原因是：

1. 相互之間的摩擦；
2. 金屬的塑性變形。

由於鋁銅焊件的摩擦是在相互封閉的條件下進行的，空氣很難進入，因此，這一摩擦基本上消滅了摩擦面上金屬的繼續氧化。又由於金屬磨損的結果，使新的純淨表面不斷出現。這些因素對壓力焊接特別有利。

工件高速旋轉進行摩擦的過程就是機械能直接變為熱能的過程，所產生的熱量構成了焊接主要的能源。這種金屬局部產生的熱量是比較集中而有效的，其中大部分熱量是有效地被結合面本身所利用，另一部份熱量無效地傳導到接頭兩旁的基本金屬和模子內。但與閃光接觸焊接方法比較，摩擦焊的熱能利用要有效得多，這可從焊接比功率的比較中得到證明。閃光焊所用之電能要比摩擦焊大 $10 \sim 15$ 倍。

從摩擦焊的溫度分布曲線來看，焊熱源是集中的（圖1—18）。

必須注意，焊件旋轉時，摩擦斷面上每一点的綫速度不同，因此斷面上各點所產生的熱量也不同（圖1—19）。為了創造接頭上的等溫分布的條件，採取了對銅工件的端部加工出一定角度

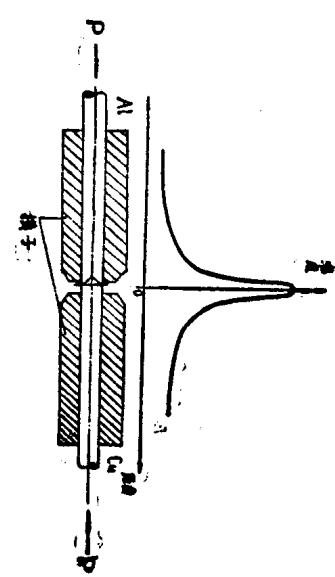


圖 1—18 鋁銅摩擦焊軸向溫度分布曲線

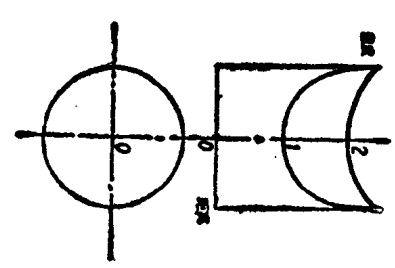


圖 1—19 摩擦面上的溫度分布曲線
1—平頭的工作摩擦溫度的分布曲線；
2—有圓錐的工作摩擦溫度分布曲線

的圓錐的辦法，使綫速度較小的各點相對地延長了摩擦時間，從而使曲綫趨於平坦。

由於壓力的作用，使金屬摩擦面的接觸更為緊密，並且在工件旋轉運動過程中，很可能在這兩種純金屬接觸面上和接觸面間的微粒上產生一部分活潑的原子，這些活潑原子在壓力的作用下，成為滲透過程中形成固溶體的極為有利的因素。

在鉛銅摩擦面之間存在有極薄的合金過渡層，其形成過程是在封閉摩擦的條件下進行的。這種合金的形成是在固溶體相中進行的，同時它又是在旋轉條件下進行的，故部份晶格互相之間已結合，但因旋轉仍在進行而又扭斷。這樣不斷進行的結果在工作結合面上形成了極薄的合金層。合金層是以銅為基礎而生成的，因為銅鉛合金的強度要比純鉛的高，扭斷必然是發生在鉛面上。在正在生成的銅鉛合金層上，由於鉛原子的擴散仍在繼續進行和不斷的補充，合金層的外層組織逐漸過渡而接近於鉛的成分。摩擦焊最後階段之所以只需較小的壓力，可以認為是已接近於鉛—鉛摩擦焊的結果。但為了使銅也能變形，故所加壓力仍需較摩擦鉛鉛的壓力為大。

關於鉛銅焊變為鉛鉛焊的概念，可以由實際觀察得到證明。如果摩擦後不施加頂壓（即不使其焊合）而把銅件拔出時，可以明顯地看到有鉛銅合金或鉛鍍在銅的角縫上，而且隨着摩擦時間的增長而變厚，但當鍍在最外層的金屬逐漸趨于純鉛時，這

層合金的厚度就不易再增長了，因為這時它們之間的強度差別很小。

需要指出的是，摩擦所需施加于焊件每單位面積上的頂壓力遠小於冷壓焊時需要的壓力。這是因為除了摩擦發熱的因素外，帶模封閉加壓和銅端加工成錐體的這兩個措施也起了重要的作用。

帶模封閉加壓能減少頂壓在旁向流動變形上的無謂消耗。而銅端加工成錐體後，當其壓入銅端時，就如起楔子的作用一樣，放大了圓錐接合面上的頂壓力，同時亦有助於金屬進行反向流動，這種流動破壞了氧化膜，使純金屬互相接觸和焊合。如將以上措施配合起來使用，則不僅接頭質量比冷壓焊高，而且也降低了完成接頭焊接所需的頂壓力。

試驗結果說明，在適宜的規範下接頭形成的溫度在 450°C 左右。這個溫度低於鉛銅共晶液溫度（ 543°C ），如接頭形成溫度過高，就會產生脆性的 CuAl 金屬化合物，而降低質量。

二、金屬摩擦焊

摩擦焊接法是我國最近新創造的一種金屬焊接方法。摩擦焊接方法的研究，最初是馬景云同志從研究鋁和銅的焊接問題開始的。在他試驗過程中得到了不少兄弟單位人力物力的支援，尤其是哈工大和電裝四公司，終於在1957年9月研究成功銅鋁摩擦焊接的方法。

以後，馬景云同志又和該院焊接組全體同志一道在研究銅鐵摩擦焊的基礎上，又研究成功了各種黑色金屬和有色金屬的焊接。有碳素鋼、高速鋼、不銹鋼、銅、黃銅、鋁、杜拉鋁、鋁鎳合金等金屬的焊接。其中出色的是目前許多國家認為不能焊接或難以焊接的金屬，如鋁與銅、鋁與鋼、銅與高鉛鋼等也用摩擦焊接按成功了。因此，摩擦焊研究成功對促進我國多快好省的社會主義建設，具有重大的政治經濟意義。我國今後就可以用產量多的、價格低的金屬來代替或部分代替那些產量少的、價格貴的金屬，給國家節省大量的資源和財富。

摩擦焊接法研究成功是焊接技術的一個重大革新，也是我國科學研究工作正確領導下取得一系列重大成就之一。

根據最近國外文獻資料，蘇聯和捷克也在進行摩擦焊接技術的研究。傑出的生產革新者、鉗工阿烈克塞·丘吉科夫在蘇聯首先研究成功兩根鋼棒用摩擦焊焊接在一起。以後他的創造性的研究成果繼續在全蘇電焊設備科學研究所（ВНИИЭСО）進行，有了很大的發展，成功地焊接了碳素鋼、合金鋼、鑄鐵、銅、鋁、鈦、黃銅及其它金屬合金等。目前蘇聯和捷克等國對摩擦焊給予很高的評價，並積極組織進行研究和在生產中推廣應用。

同時某些資本主義國家也開始注意這種焊接新技術的發展。本文就冶金部建築研究院焊接組最近以來，對幾種黑色金屬和有色金屬的摩擦焊接研究的初步結果，加以整理，對摩擦焊接基本原理、焊接質量、工藝方法和應用作試驗性的分析和概括的介紹，期與讀者共同研討充實。

（一）摩擦焊接原理

一般原理

摩擦焊接是利用金屬工件之間旋轉摩擦和軸向加壓，使金屬表面原子相互接近、結合、擴散而形成共同晶體的过程。

焊接時，一端金屬工件旋轉，另一端金屬工件做軸向運動，並以一定的頂壓力和旋轉工件端面頂端而相對摩擦。金屬間摩擦使金屬接觸面的氧化膜或其他吸附雜質遭到破壞和清除，使金屬間形成了純淨金屬間的接觸和摩擦運動。由於金屬工件的摩擦是在相互封閉的條件下進行的，空氣很難進入，因而給摩擦焊接帶來有利條件。一方面摩擦面上金屬不會產生氧化作用，另一方面，在隔絕外界大氣條件下的金屬摩擦運動，其摩擦力和摩擦系數要比在普通條件下增長很多。

同時，工件高速旋轉摩擦產生熱量，這些熱量是直接由機械能轉變而來的，構成摩擦焊接主要的能源。這部分熱能的產生比較集中，而且直接作用於被焊接的金屬工件表面上，所以它被最大程度有效地利用了。這也就是摩擦焊所以比接觸焊利用能量經濟的原因。

摩擦產生的熱量作用於金屬表面，使金屬表面的機械性能發生顯著的變化。如摩擦表面溫度增高，剛度系數減小，塑性增加。因之隨一定的頂壓力或增大頂壓力，會使金屬真實接觸的點和面積大為增加。雖然由於溫度增高，摩擦系數稍有降低的趨勢，但由於金屬表面塑性增加使接觸面積增大，結果总的摩擦力增大了。

金屬在摩擦溫度和軸向頂壓力作用下，塑性變形流動能力大

为增强。伴随塑性变形可使部分表面氧化物及杂质破坏而排除了，而且接触面的金属由于真正的接触而发生“焊合”。“焊合”点和面积的增多、增大是随着压力和温度之增大增高而变化的。但由于工件之间的旋转惯性，使接触面之间不断发生“焊合”“扭断”。同时，金属相互接触面的表面原子在温度和压力条件下作用下，也非常活跃起来。他们彼此接近、交换（渗透）。在焊接最后的一瞬间，停止旋转工件的运转，同时施以相当的顶压力，接头部位的金屬組織就在已經渗透、扩散的基础上形成共同晶体而焊合。

異类金屬焊接原理

以上是摩擦焊接的一般原理，可以作为同类金属（如铜-铜、铜-铜）焊接过程的一段解释。但对異类金属如铝-铜，铝-铜的焊接过程解释是不够充分的。異类金属焊接的特点，是两种金属的硬度、塑性和熔点都不同，甚至相差甚大，如果和同类金属一样地摩擦焊接，就会发生困难。例如铝和铜平头对接摩擦焊接时，由于铝硬度小，塑性大，极易造成铝的大量磨损或铝被铜切削制屑孔等现象。更主要的是，铝的塑性变形能力较强，平头直接摩擦，铝会产生自由塑性变形而达不到铝铜焊接的效果。因此无论在焊接过程和工艺方法上，異类金属之间的摩擦焊接和同类金属都有许多不同之处。

为了克服異类金属之间摩擦焊接困难，我们采取了模子控制金属变形的措施。经过多次研究证明，这种方法对焊接不同硬度的異类金属，收到满意的效果。我们可以举铜铝焊接为例，来说明異类金属之间摩擦焊接过程的实质。

带模控制变形措施的目的是使金属塑性变形受到一定方向的控制，从而使接头达到良好焊合。異类金属的摩擦焊如铝与铜焊接时，铜工件端部有一定的锥度，其角度介于 $90^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 间，铝工件端面是平的。焊接时铜端部锥角插入铝端面内，铝在摩擦挤压过程中发生塑性变形，由于铜硬，变形小，因此它和模口对铝控制变形起了封闭作用（见图2—1）。使在加压时铝铜接触面

造成很大压力，这样就给铝铜接合面全面压焊创造良好条件。

铜铝摩擦压力焊接过程，最初是两种金属原子在摩擦热和压力作用下，相互渗透扩散在接头表面形成各自金属的固溶体合金。这种固溶体合金和原来金属性能有很大的不同，如塑性降低、强度增高。在摩擦运动

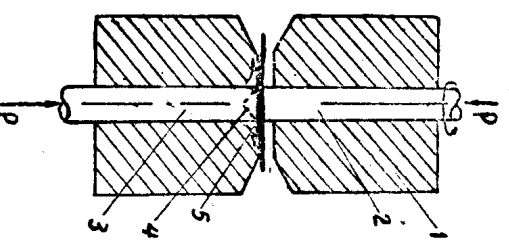


图2—1 铜-铝带模控制摩擦焊接示意图
1—压模；2—铜工件；3—铝工件；4—铜工件端部锥度 α ；5—模口箭头表示铝塑性变形流动的方向

压力，即把铜件拔出，可以明显地看到在铜件锥角上镀有极薄的一层含铜的铝合金。这层合金随摩擦时间的增长而变厚，并逐渐趋于纯铝，这时合金的厚度就不易再增长了。因为这时它们之间的强度差别很小。

焊接温度

摩擦焊接温度或热量对形成接头组织有着重要影响。摩擦焊接接炭素钢的温度约为 $950 \sim 1200^{\circ}\text{C}$ 。高于和低于这个温度都对接头性能起不良的影响。

我们认为異类金属之间如铜铝焊接，焊接时温度尤其重要。如果温度过高，金属原子相互渗透、扩散就会加剧。固溶体合金在较高温度和压力作用下，也有可能发生由量到质的变化。开始