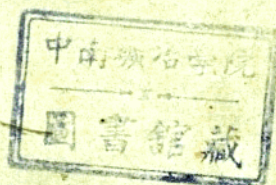


航空材料的釐焊

(譯文集)

庄鴻壽等編譯



新材料研究室
情資發展組
資料專用章



國防工業出版社

空 材 料 的 鈎 焊

(譯 文 集)

庄鴻壽等編譯



國防工業出版社

1964

出版者的話

本譯文集共有十六篇文章，主要敘述鈎焊技術在國外航空工業應用中的一些最新情況。其中，介紹了幾種在國外已被相當重視的新型高溫鈎料的生产方法及性能方面的研究成果，銀基鈎料和自鈎劑鈎料的应用，并对有关真空鈎焊，在保护气氛中的鈎焊和一些新型的鈎焊方法作了論述。

本文集可供航空工厂及航空科研、教學單位閱讀參考，也適合于从事焊接及鈎焊的工程技術人員參考。

航空材料的鈎焊

庄鴻壽等編譯

*

國防·華品出版社 出版

北京市書刊出版業營業許可証出字第 074 号

國防工業出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

*

850×1168 $1/32$ 印張 7 $5/8$ 插頁 17 223 千字

1964 年 5 月第一版 1964 年 5 月第一次印刷 印數: 0,001—2,500 册

統一書号: 15034·765 定价: (科八-1)2.20 元

目 录

1. 钎焊技术在国外航空工业中的应用	5
2. 高温钎料纯度的重要性	19
3. 某些高温钎料的基本性能	34
4. Ni-Cr-B 和 Au-18Ni 钎料的进一步评价	64
5. 新型高温锰基钎料	85
6. 薄壁 Rene' 41 蜂窝结构的钎焊	98
7. 钎焊不锈钢薄件用的钎料	114
8. 防空气的自钎剂钎料的新进展	138
9. 关于不锈钢钎料的活化问题	155
10. 控制气氛钎焊和真空钎焊	164
11. 航空用合金的真空钎焊	179
12. 真空钎焊的生产规模	191
13. 高温使用的“大间隙”钎焊	208
14. 放热反应钎焊	226
15. 用敏扩散结合高温合金	238
16. 不锈钢和镍基合金的钎焊	262

钎焊技术在国外航空工业中的应用

近几年来，随着航空工业、电子工业、原子能工业和火箭导弹技术的迅速发展，钎焊技术也相应地得到发展。在制造蜂窝壁板，喷气发动机上的各组合件，以及制造火箭导弹时都广泛使用了钎焊技术。钎焊技术的发展之所以如此迅速，是由于它具有如下优点：

(1) 钎焊时只有钎料熔化，基体金属不熔化，故只需较低的加热温度，因此对基体金属的物理化学性能不会发生影响，或者影响很小。

(2) 在钎焊过程中工件的变形小，尤其在均匀加热（如炉中钎焊）的钎焊过程中，工件的变形最小，因而容易确保工件的精密尺寸。

(3) 利用钎焊可以制造形状复杂的工件，借钎焊技术一次可焊成几十条，甚至几百条钎缝，因此大大提高了劳动生产率和产品质量。

(4) 可连接异种合金。

很多航空组合件的结构极其复杂，制造要求又非常高，利用钎焊方法能很好地满足要求。下面就扼要地介绍一下钎焊技术在航空工业中的应用情况。

蜂窝结构的强-重比高，刚性好，表面光滑，而且绝热性亦好，所以在飞机结构中获得愈来愈广泛的应用。当飞机的飞行速度在 $M = 2.5$ 以下时，用胶接方法来连接铝合金蜂窝结构是一种既经济而又有效的连接方法。但是，随着飞行速度的提高，当 M 数超过 2.5 左右时，蒙皮表面的温度超过铝合金的上限工作温度，

因而胶接的铝合金蜂窝结构已不能满足使用要求，必须使用不锈钢（如 17-7PH，PH15-7Mo）或钛合金的蜂窝壁板。这些材料在 482°C 以下工作时，具有优良的机械性能。温度更高时，可采用由超级合金制成的蜂窝壁板。在制造这些需要在较高温度下工作的不锈钢或超级合金蜂窝壁板时，由于高温胶接剂的发展不能满足要求，故钎焊是最合适的连接方法。

例如，在美国制造的 B-58 轰炸机上约有 80 平方米的钎焊蜂窝壁板（图 1）。虽然钎焊蜂窝壁板为数不多，但由于它们在高温下工作，所以非常重要。发动机短舱、机翼后缘和副翼总共有 230 块钎焊蜂窝壁板，它们必须承受由发动机发出的高达 427°C

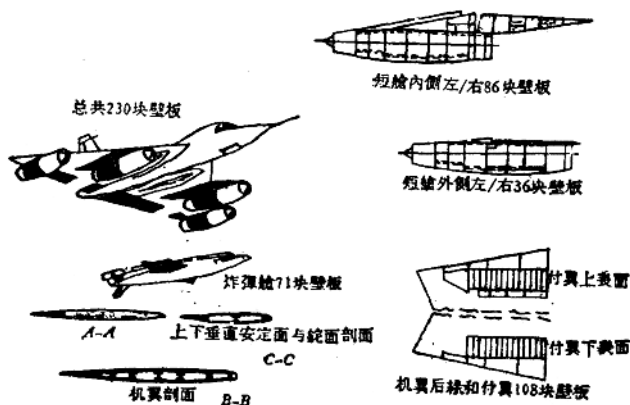


图 1 在飞机上应用的一些蜂窝壁板。

的气流和辐射热。此外机翼和炸弹舱操纵面的 71 块蜂窝壁板（20 平方米）也必须承受因高速飞行蒙皮摩擦而引起的高热。钎焊蜂窝壁板的最高工作温度为 482°C 。

B-58 轰炸机上的钎焊蜂窝壁板的形状基本上有四种：楔形的、平的、特形的和翼剖面形的。副翼后缘的三大块壁板是典型的楔形壁板，两面都暴露在空气流中，其中最大的一块壁板的尺寸约

1220×1520 毫米。平壁板用于副翼匣前部上下支承面,平均尺寸约为 1000×400×9.5 毫米。特形壁板起初用于发动机短舱后部。其形状一般多呈尖锐的曲面,典型壁板的尺寸为 815×965 毫米,厚 16 毫米,曲率半径为 60 毫米。

蜂窝壁板基本上由加工至规定外形与尺寸的蜂窝夹层和钎焊在夹层两面的上下蒙皮组成。为了提高硬度和刚度,壁板周围负载最大的地方,于蒙皮和密封边条之间衬入平板条或角形板条的垫片。图 2 表示钎焊平壁板的典型结构。

B-58 轰炸机的钎焊蜂窝壁板的所有元件均由 17-7PH 不锈钢制成,夹层采用 0.04 毫米厚的箔片制成 4.8 毫米见方的格子,其上钻有小孔,结点用点焊焊成。外蒙皮的厚度随壁板的位置及用途不同而异。暴露于空气流中的蒙皮厚度一般等于 0.2~0.3 毫米,但如短舱支座等承受大负载的壁板,其厚度可达 1.5 毫米,不暴露在气流中的蒙皮厚度为 0.1~0.2 毫米。钎焊用钎料成分如下: 92.3% 银, 7.5% 铜, 0.2% 锂。

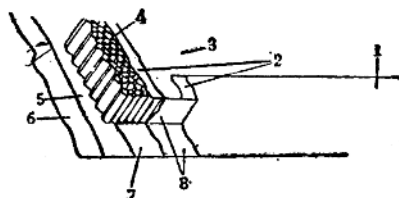


图 2 钎焊的蜂窝壁板典型结构:

- 1—Z 形边条; 2—钎料; 3—内蒙皮; 4—夹层;
5—钎料; 6—外蒙皮; 7—垫片; 8—钎料。

美国最新制造的 B-70 研究机大量采用了钎焊蜂窝壁板。B-70 研究机的飞行高度为 21000 米,最大飞行速度为 3200 公里/时。在上述飞行高度和速度下,飞机蒙皮的温度将达到 250~350°C。因此 B-70 研究机主要采用不锈钢和钛合金作为机体的结构材料。为了满足气密、绝热和高的强-重比等要求, B-70 研究机的钎焊蜂窝结构约占飞机表面面积的 75%。

蒙皮和夹层的材料是 PH15-7Mo 不锈钢。蒙皮厚度为 0.15~2.54 毫米,夹层是用 0.019~0.1 毫米厚的不锈钢箔。蜂窝格子是四方的,边长为 3.175~6.35 毫米。典型的钎焊蜂窝壁板的尺

寸如下: 1.8×3.7 米和 1.8×7.3 米的机翼翼盒, 1.5×1.5 米的升降副翼, 1.15×1.8 米的刹车板, 1.18×1.4 米的进气道和 3×6 米的平的和小曲度的壁板。后一种壁板是美国制造的最大钎焊蜂窝壁板。

钎焊 PH15-7Mo 不锈鋼壁板时使用銀基钎料: 其成分是 84.6% 銀, 5.5% 錳, 2.2% 鈹, 7.5% 銅和 0.2% 鋰。钎料中的錳起减少钎料导热性的作用, 加鈹的目的是提高钎焊温度, 以便在钎焊时同时完成第一阶段的热处理。

装配前, 蜂窝壁板的所有元件和钎料必須除油和化学清洗, 以便去除工件表面的髒物。典型壁板的装配过程如下:

(1) 放置下蒙皮;

(2) 然后放钎料, 在钎焊 17-7PH 蜂窝壁板时, 钎料厚度通常为 0.05 毫米的箔片。厚度超过 25 毫米的壁板, 則用 0.1 毫米的钎料;

(3) 放上垫片和边条, 并用定位焊焊在蒙皮上;

(4) 放蜂窝夹层, 并且与边条及嵌在夹层侧面內的钎料并排放齐, 边条和夹层用定位焊焊在一起;

(5) 放置必須的垫片, 并用定位焊焊在边条的上緣上;

(6) 在夹层上表面放置钎料;

(7) 将上蒙皮置于钎料上, 并与其定位焊。至此, 壁板的装配基本完毕。

将組合件以及钎焊成型夹具均放置在由薄板制成的钎焊箱內, 然后将钎焊箱焊死, 并試驗其气密性。通过钎焊箱上的抽气管, 将钎焊箱抽成真空, 以排除钎焊箱內的有害气体, 然后輸入惰性气体。如此重复数次, 保証将钎焊箱內的空气排除干淨。

最初, 蜂窝壁板的钎焊是在氩气保护下进行的, 但氩气保护有两个缺点: 首先, 氩气容易爆炸; 其次, 沉淀硬化不锈鋼含有一些对氧亲和力很大的合金元素 (如鋁等), 氩气中的微量水分即使这些材料氧化, 从而妨碍钎料的潤湿。所以后来用惰性气体 (如

氬) 代替了氬氣。壁板的鈎焊是在部分真空的條件下進行的, 這就是說在鈎焊前將鈎焊箱抽成真空, 然後充入一定壓力的氬氣 (約 250 到 600 毫米水銀柱), 鈎焊箱表面在壓力下向內陷入, 從而保證均勻的壓力并向整個蜂窩壁板表面傳熱。鈎料中的鋰起自鈎劑作用, 它可提高鈎料的潤濕性和流布性。

鈎焊箱有單箱式和雙箱式兩種。上面提到的是單箱式鈎焊箱。在實際生產中常常使用雙箱式鈎焊箱, 其構造如圖 3 所示。先將壁板組件放在鈎焊箱內的石墨墊 2 上。石墨墊的作用是保證

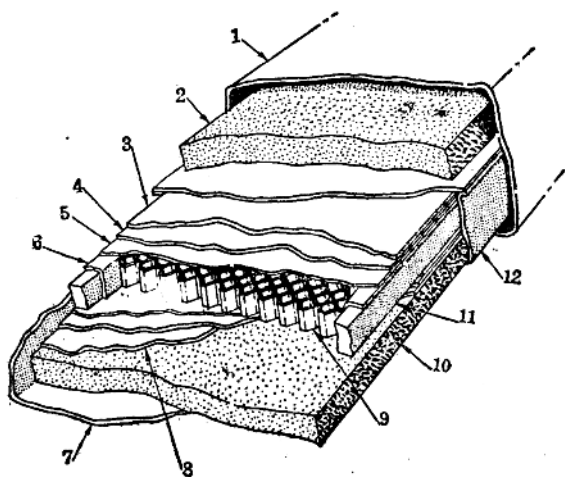


圖 3 雙箱式鈎焊容器:

1—鈎焊容器; 2—石墨墊; 3—不銹鋼墊片; 4—蒙皮; 5—鈎料; 6—
 邊條; 7—鈎焊箱; 8—不銹鋼墊片; 9—夾層; 10—石墨墊; 11—成型
 夾具; 12—鈎焊箱。

壁板獲得精確的外形並保證壁板均勻加熱。對平壁板來說, 有時可以不用石墨墊。為了防止石墨使壁板增碳, 在兩者之間還夾上一層不銹鋼墊片 8。鈎焊成型夾具 9 放在邊條一邊, 以免因鈎焊箱內達到真空後引起扭曲及傳遞負載。上蒙皮上同樣蓋以不銹鋼

垫片，上下垫片和成型夹具同时再用矾土和丙烯水泥混合物涂盖，免得钎料从壁板内部向外流出时将夹具钎焊在蒙皮上。然后将钎焊箱焊死，即将一块薄钢板用气密焊缝焊在钎焊箱的凸缘上。在钎焊箱上面再放置石墨垫，然后将整个装配件放入钎焊容器内。钎焊也是在部分真空的条件下进行的，以保证蒙皮和夹层紧密贴合。在钎焊容器和钎焊箱内均充有氢气。双箱式钎焊容器的优点是：如果在钎焊过程中钎焊箱发生漏气，也不会影响蜂窝壁板的钎焊质量，因此复杂的，或贵重的大壁板均适于用此法钎焊。

钎焊时应精确地控制加热温度和加热时间。钎焊温度借助于与钎焊箱接触的热电偶测量。用银铜锂钎料钎焊 17-7PH 壁板时，钎焊温度为 897°C ，用银铜钼钨钎焊 PH15-7Mo 壁板时，钎焊温度为 958°C 。若钎焊温度过高，便可能影响基体金属性能，并会使钎料流失；若钎焊温度过低，则钎料流布不佳，钎缝圆角不均匀。保温时间一般为 10 分钟左右。

钎焊完毕后，应使壁板迅速而均匀地冷却。对沉淀硬化不锈钢来说，钎焊后的冷却速度非常重要。例如对 PH15-7Mo 不锈钢来说，为了取得最佳机械性能，要求该材料在 5 分钟内从 843°C 冷却到室温。如果冷却时间延长，则会使随后的时效处理时间延长。钎焊后必须根据对每种材料规定的条件进行处理，如对 PH15-7Mo 不锈钢来说， -73°C 冷处理 8 小时， 510°C 时效 1 小时。

钎焊曲度较大的壁板时，熔融的钎料有向较低部位流动的倾向，因而减小了较高处的钎缝圆角尺寸。为了消除这一缺点，可在钎料中加 20% 的镍粉。也曾试验过一种三层钎料，即内层是纯银，外层是银铜锂钎料。钎料熔化时，银铜锂内的铜扩散至中层银内，从而提高外层的熔点，这使得钎料的流动性降低，因而可控制钎料的流失量。三层钎料的层度一般为 1:3:1 至 1:6:1。

国外对蜂窝壁板的钎焊加热方法进行了研究。常用的钎焊加热方法有以下几种。

发光壁炉钎焊 发光壁炉是根据新的燃烧原理工作的。炉子的内壁系由多孔的耐火砖壁板组成，在每个壁板的后面有一个增压室，炉子外壁是钢的。煤气和空气预先在炉外混合，以很低的压力送入增压室。当混合气体通过多孔砖时发生燃烧，多孔砖被加热到白热状态，因而形成一个有效的辐射表面，使钎焊容器加热，由于冷混合气体不断通过多孔砖，所以可防止热量积集在砖内。钎焊后关闭混合气体，同时输入冷空气，使工件迅速冷却。发光壁炉的优点是：1）加热较快；2）冷却速度也比较快；3）温度可精确控制。利用此种方法可以钎焊中等复杂程度的大型壁板。

利用图3所示的钎焊容器时，由于石墨吸热量很大，因此，钎焊周期仍相当长。为了缩短钎焊周期，有人提出用带铜垫的单钎焊容器（图4），这样可使加热速度大大提高。在后期，据称发光壁炉已停止使用。

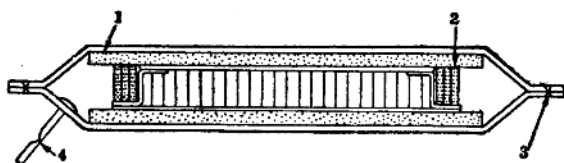


图4 钎焊容器：

1—铜垫，2—垫片；3—缝焊；4—抽气管。

盐浴钎焊 盐浴钎焊时，将壁板组合件放在一个单箱式钎焊容器内，将钎焊箱抽空，并充入氩气，最后将抽气管焊死，在钎焊箱内保持静止的氩气，然后将钎焊箱放在石墨垫之间，把整个装置放入盐浴槽内。钎焊后自盐浴槽内取出整个装置，并令其在空气中冷却。盐浴加热钎焊的优点是加热速度极快，钎焊温度容易控制，并且盐浴可防止氧化，钎焊后组合件的冷却速度也比较快。由于盐浴槽的限制，盐浴钎焊适用于小型壁板和中等曲度壁板。

为了加速蜂窝壁板在钎焊后的冷却速度，可采用模具淬火法。例如，将壁板组合件放入单箱式钎焊容器内，在组合件的上、下均敷设铜垫。钎焊容器在炉中加热。钎焊完毕后，从炉中取出容器，放在一淬火模内，使它迅速冷却，以便基体金属获得优良的性能。利用此法只能钎焊小型壁板，因为高温的钎焊容器从炉中取出时，大型蜂窝壁板各零件的相对位置可能发生移动。

电热毡钎焊 电热毡加热是一种比较适宜的钎焊方法。电热毡由上、下加热垫组成。加热垫由耐火砖制成，通过耐火砖，设有冷却水管网。电阻丝或平电阻条安置在加热垫的整个表面上，其形状与壁板的外形相同。当壁板组合件装置完毕后，放入钎焊容器内（图5），气密焊接整个容器，使之形成一个封闭容器。容器内空气排除后，通入氩气。为了保证壁板零件紧密贴合，通过一个安置在壁板上的气囊加压，此气囊是用氩气来增压的。用电热毡加热时加热效率较高（达60%），同时钎焊夹具简单，因此加热速度比较高。钎焊完毕后，通过敷设在耐火砖内的冷却管道，使组合件迅速冷却。一般说来，从 954°C 降到 538°C 的时间约为45分钟。电热毡加热法可用来钎焊外形复杂的工件。

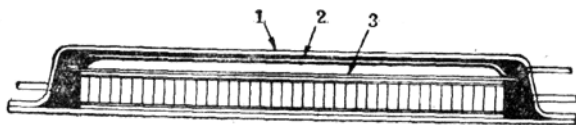


图5 电热毡钎焊夹具：

1—钎焊容器；2—压力囊；3—蜂窝壁板。

最近发展的且投入生产使用的新的钎焊法是陶瓷模钎焊。陶瓷模具由一种称为玻璃岩的熔融硅石制成。这种材料具有极高的尺寸稳定性，因而能确保钎焊零件的外形精度。由于这种材料是一种良好的绝热体，故用这种材料制造的模具吸热很少，因此蜂窝壁板在钎焊后能迅速冷却。由 900°C 冷却至 538°C 只消5分钟即可。模具的制造方法是先用水泥将硅石块粘结成模具初型，然

后在模具上敷設許多因康鎳管子，然后再复上一层掺有硅石的水泥。当水泥凝固后，将模具表面磨至所要求的形状。因康鎳管子既作加热元件，又作冷却元件。先将蜂窝壁板組合作件放在一容器內；然后将容器放入模具內。钎焊在部分真空（充氬）的条件下进行。利用因康鎳管子加热組合作件。钎焊后，向因康鎳管子內輸入冷却水使組合作件迅速冷却。然后，压入氟三氯三烷冷冻剂（ -78°C ）进行冰冷处理。最后向因康鎳管輸入电流，将壁板加热到时效温度进行时效处理。因此，利用一个电热陶瓷模可同时完成钎焊和钎焊后的热处理工序，这样既能提高生产率，又能确保钎焊壁板的质量。

石英灯钎焊 作为钎焊热源的石英灯是一个内部装有钨絲的密封純石英管。钎焊时，利用成排的石英灯发出的輻射热加热工件。钎焊时将装配好的蜂窝壁板組合作件放入一个容器中，然后将容器中的空气抽出，通入氬气。将容器置于石英灯照射下，这时壁板温度迅速上升。石英灯钎焊时，在5~15分钟内就可以完成一个钎焊周期，如采用普通的炉中钎焊，通常需要3~12小时。

在钎焊用超級合金制成的蜂窝壁板时，加热速度非常重要。为了滿足高溫工作的要求，钎焊这类合金的蜂窝壁板时常采用鎳基钎料。如果由于加热速度緩慢而使壁板長時間处于高溫作用下，則由于溶解的緣故会使基体金屬产生溶蝕。因此，为了确保工件质量，必須使用快速加热的方法。

除了蜂窝壁板外，飞机液压系統中的各接头常用钎焊方法来制造。如B-70的液压系統上共有5,000个接头。为了节省重間和空間，管接头上钎焊一个套管以代替普通的螺紋联接件，从而使B-70飞机減輕了435公斤的重量。套管用AM355不銹鋼切削而成的，内部有两个环槽，供安置钎料之用。钎料系采用含鋰的銀基钎料，利用感应加热法在 833°C 下钎焊。感应钎焊的速度极高，只有几秒钟，因此不会影响結構材料的性能，液压系統的其他构件，如作动筒、液压活門等也采用了钎焊方法。如H-11工

具鋼的作動筒筒體釐焊上 AM 355 不銹鋼管。釐料是采用 82% 金和 18% 鎳的成分。在 1000°C 左右釐焊。AM 355 不銹鋼的活門和 AM355 管子的釐焊方法與上述相似，但採用銀基釐料，釐焊溫度為 950°C。

在航空發動機中，尤其是航空燃氣渦輪發動機上有很多部件，如渦輪導向器、壓氣機靜子、導向器葉片、擴散器和換熱器等都是用釐焊法製造的。例如，英國在製造功率為 1000 馬力的直升飛機用燃氣渦輪發動機的導向器和排氣機匣時便採用了真空釐焊法。一級渦輪導向器有釐縫 113 條，3 個導向器的 339 條釐縫可在真空爐內一次釐成。導向器用 Stellite 和 Nimonic 75 合金製造，釐料則採用 Endurance 52 高溫鎳基釐料（圖 6）。

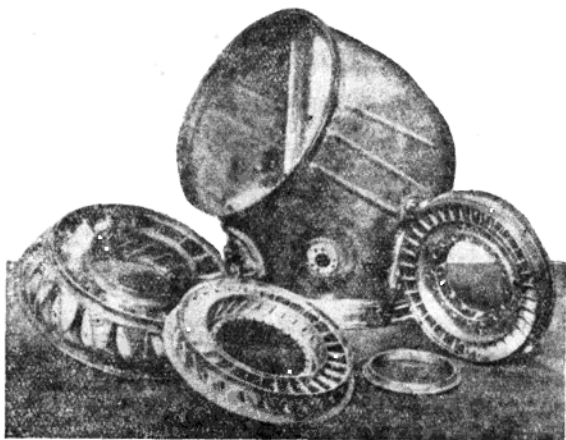


圖 6 燃氣渦輪發動機的導向器和排氣機匣，用真空釐焊焊成。

除了以後要提到的一些航空發動機的釐焊實例外，在 B58、F4H、康維爾 880 和 B-70 飛機燃氣渦輪燃油控制系統中的某些零件均採用了釐焊法。例如換熱器是用 AISI 321 不銹鋼管以鎳基釐料在真空爐中釐焊而成的。

噴气发动机的鈺焊部件大部分是在高溫下工作的，因此在大多数情况下均采用高溫鈺料，其中鎳基鈺料应用最广。鈺料的选择取决于部件工作条件及基体金属性能等。

前几年，发动机零件普遍采用氩气保护的炉中鈺焊。现在，特别是鈺焊那些含鈦、含鋁或含鈦鋁的高溫合金时，开始改用超級純氩和真空代替干燥氩气，利用前两种气氛能取得更良好的保护效果。这样，既可提高鈺焊接头的质量，又可简化鈺焊前的制备工件或鈺焊工序。

制造发动机的复杂部件时，有时采用多重鈺焊。多重鈺焊包括两个以上独立的、各不相同的鈺焊工序。在每一个鈺焊工序中，依次地装入新的零件或組合作，从而装配成最終的构件。图7所示为利用多重鈺焊制成的大型噴气发动机用的蜂窝夹层密封圈。密封圈的內环采用的是0.093吋厚的因康鎳条材，夹层是0.005吋厚和1/8吋見方的格子。首先將內环和夹层鈺焊成开式的蜂窝夹层。鈺焊在1121°C下进行，所用鈺料为Ni-Cr-Mn-Si-B成分。然后将0.043吋厚的因康鎳W鈺焊在开式的蜂窝夹层上，第二次鈺焊时，为了降低鈺料的熔点，在原有的鈺料基体上再加入0.5%硼和0.5%硅，鈺焊温度为1037°C。

图8所示为噴气发动机的气动調节器，它是采用含1.4%硼的高溫鎳基鈺料鈺焊三次制成的。

液体火箭发动机壳机也是可用鈺焊法制造的一种組合作。例如，將0.2毫米厚的AM-350 U型不銹鋼点焊成一定的外形，然后将0.2毫米厚的AM-350不銹鋼帶和鈺料同时纏繞在U型鋼条上。把組合作放在充有氩气或氦气的炉中加热，鈺焊温度为1100°C。鈺焊完毕后將工件冷却到室溫，随后装配輸送推进剂的支管、加热环和噴注器的法兰盘，然后用銅-錫鈺料在約1000°C溫度下鈺焊。这些U型鋼和薄鋼帶纏繞結構的优点是重量輕，强度高，成本低。

“阿特拉斯”、“雷神”和“丘辟特”導彈所用的液体燃料火箭



图 7 大型发动机用的全金属蜂窝密封圈。



图 8 喷气发动机的气动调节器。