

# 等离子弧焊接



国外航空编辑部

1977年9月

# 等 离 子 弧 焊 接

1977 年 9 月

# 目 录

## 小电流等离子弧焊最终技术报告

提要	(1)
第一部分 绪言	(1)
第二部分 设备、材料的准备	(3)
第三部分 设备的启动	(4)
第四部分 工艺能力的评定	(5)
第五部分 零部件用的材料的可焊性	(8)
第六部分 实际零部件的试制	(14)
第七部分 焊接实验的评定	(17)
第八部分 结论	(18)

## 调制式电流的焊接电源的设计和研制

提要	(20)
1. 前言	(20)
2. 电气设计	(20)
3. 结构细节	(23)
4. 电源变压器——整流器组	(26)
5. 校准	(26)
6. 应用	(27)

## 运用非调制的和调制的电流对钛板进行的等离子锁孔焊

1. 简介	(36)
2. 材料	(36)
3. 设备	(37)
4. 试验程序	(38)
5. “3毫米”厚板材的试验结果	(39)
6. “6.5毫米”板材的试验结果	(42)
7. “11毫米”厚板材的试验结果	(43)
8. 结论	(43)
参考资料	(44)
附录 A	(45)
附录 B	(46)
附录 C	(46)
附图	(47)

## 等离子弧的磁控制及其在焊接中的应用

摘要	(60)
前言	(60)
实验设备和程序	(61)
实验结果和讨论	(62)
结论	(78)

## 等离子弧焊接的磁控制

### ——关于等离子体的压力分布及其对小孔效应的影响

摘要	(79)
一、前言	(79)
二、实验装置和材料	(79)
三、实验结果和讨论	(80)
四、结论	(87)

## 磁控制等离子弧的某些性质

摘要	(88)
前言	(88)
实验设备	(88)
实验结果和讨论	(88)
电压和等离子弧柱中的电弧电位梯度	(89)
阳极上的电流分布	(89)
等离子弧的能量密度	(90)
阳极表面压力分布	(90)

## 等离子弧焊的自动控制

题要	(93)
§ 1. 前言	(93)
§ 2. 静特性	(94)
§ 3. 动特性	(98)
§ 4. 等离子弧焊的自动控制	(103)
§ 5. 结论	(105)
参考文献	(105)

# 小电流等离子弧焊最终技术报告

## 提 要

这篇研究的目的是为了给出燃气涡轮发动机中常用的五种航空材料用 Linde 公司 100 安培小电流等离子弧焊机焊接的最佳工艺。选择的材料是：AMS-5521 (310SS)，-5505 (410SS)，-5597 (Inco718)，-4911 (Ti6Al-4V) 和-6350 (4130)。厚度是从 0.015 吋 (0.38 毫米) 到 0.125 吋 (3.18 毫米)。手工和自动焊试件的组合 (即接头型式) 包括平对接接头，端面接头，搭接接头，和 T 字型接头。0.048 到 0.125 吋 (1.22~3.18 毫米) 厚材料的平对接接头，采用带有填加焊丝的一次自动锁孔焊是十分成功的。锁孔焊能使熔透得到保证，焊缝宽度明显地减少了，电流数值也小，焊接速度还高。对某些规格材料来说，搭接接头和 T 字型接头的角焊是不成功的，主要原因是：等离子电弧是圆柱形的，而组合的板子又呈直角形，这就使得一块试件或二块试件跟根部同时熔穿。焊缝的强度性能整个地得到增加，单轴拉伸试验表明：其连接效能是 100% (即与母材等强)。熔化的焊缝的微观结构也是正常的，用 X 光和荧光检验表明，焊缝中很容易做到没有气孔，而且完全没有夹钨。三个被选为产品试制的燃气涡轮发动机部件中的二个焊得很成功，第三个还需要对参数进一步核算。计划一开始就表明，焊枪的部件质量直接影响工艺的可靠性和焊接的再现性。与厂商要配合起来评定焊枪能使焊枪消耗部分的使用寿命得到有效地增加。与不熔化极气体保护焊 (G.T.A.) 相比，等离子电弧灵活性增加了，穿透能力得到保证，(对平对接锁孔焊焊接接头) 100 安培时的一次焊接厚度增加了，对操作者的技巧要求减少了，改善了质量，节约了耗电量。把它用在平对接接头和端面接头一定是很有利的。

这篇报告的销售是受到限制的，因为它谈到的工艺无法跟列在联邦出口控制条例 1948 (635TA7, 7)、修改条例 (50U.S.C.A.P.P.2020-2031)、补充条例 AFR400-10, AFR310-2 和 AFSCR80-20 上所规定的出口和进口战略禁运条款相区分。

## 第一部分 绪言

这篇最终技术报告对最近发展起来的中等范围 (0.1~100 安培) 等离子弧焊设备用于连接薄的和中等厚度的航空材料做了评定，并找出了最佳范围。这个科研计划是通用汽车公司阿里森 (Allisoh) 分公司于 1967 年开始的合同 (F33615-67-C-1159)，并且它是已公

布的 0.1 到 100 安培工艺评定的技术报告 (AFML-TR-66-177) 的后继。

### \*发展的需要

通常现有形式的钨极气体 (保护) 电弧焊 (G.T.A.W.) 是航空加工技术所必须的工

艺。然而由于飞机发动机功率重量比的提高，就必须在发动机的各个部件上运用更薄的材料，因此就对设备和操作者都提出了更严格的要求。在小电流时，电弧的不稳定性增加了，这个 GTA 焊接的固有特点，还表现在焊接接头的间隙和错位的许用值上，即使接头的装配和电弧的稳定状态都在允许的界限之内，用 GTA 焊接薄材料时，还需要用极短的电弧。GTAW 电弧固有的形状是圆锥形，因此，当弧长稍微有点变化时，其焊接电弧的投射面积就有很大的变化。当然，这就使得手工焊变得很苛刻。并且，在焊接较厚的材料时，GTAW 焊速较慢，故花费昂贵，还由于用多道焊，消耗时间也多。

#### \* 最新的设备发展

等离子弧焊 (PAW) 工艺是基于这点发展起来的，即它适用于各式各样的材料厚度。发展的开始阶段是努力着眼于连接较厚的板材，发展到最近阶段是着眼于建立连接薄箔的能力。目前的努力是着眼于使 PAW 工艺方法适应于用现有设备不能充分满足要求的中等规格材料。等离子弧焊工艺是通常的 GTA 焊的特殊形式，它具有很多可能的优越性，其中如：

- 改善了电弧的稳定性
- 接头的错位和弧长的变化允许有较大的公差
- 消除了夹钨的可能
- 均匀一致和确保的熔透。
- 在焊接起动机时，消除了电弧短路时对工件表面的损伤。

等离子弧焊用的电气原理图用图 1 表示，焊接的能量由一个常规的下降的伏安特性电源提供。中间电流范围装置的离子气和保护气在引弧点燃以前就要通过来。在引弧运行时，保护气帮助冷却喷嘴和防止喷嘴和电极的氧化。这两种气体系统是同样重要的。通过压缩喷嘴以形成等离子电弧的氩流量相对来说要小点。为了保护焊接熔池，另一股气体通过环形的气

体透镜装置提供，保护气通常用的是氩、氦、氢和它们的混合气，氢的浓度按体积在 5% 以下。

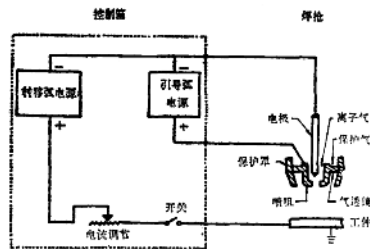


图 1. 等离子弧焊原理图(兰德(Lind)手工方法)

图 2 上表明的是最近发展起来的中间电流范围的等离子焊接设备。它由二台(独立的焊机组成，并把它称为 PWM-7T。把原先容量为 0.1~17 安培的 PWM-5 焊机(或 PWC-5 控制箱)跟常规的 200 安培电源连接组合起来后，这个互连的组合体能用来进行 0.1~100 安培的等离子弧焊，也能用于 200 安培 GTAW，或用于 SMAW(熔化极保护焊)。

图 2. 100 安培等离子针弧焊机样机 PWM-7T (图不清晰)

为了能在三个电流范围提供最佳的等离子弧柱，新的 PT-12 等离子针弧焊枪包括可拆换的喷嘴及其他连接部件。这个圆柱形的集中而又挺直的等离子电弧的大小将跟喷嘴的尺寸，气体的流量和电流数值很有关系。“熔融”法等离子弧焊的特性和通常的 GTAW 方法相似。较厚材料的“锁孔”法这个等离子弧焊的独特特征是在焊接熔池的前缘由等离子喷流的力产生一个小孔，然后在喷流运动后而由表面张力关闭小孔，以形成固体的焊缝焊道。锁孔焊的优点是：

- 用较小的电流穿透较大的截面。
- 完全穿透时有明确的指示。
- 焊速增加。

- 均匀一致性好。
- 没有机械的反面衬垫时，可对反面焊缝加以控制。

#### \* 计划的目的

这项研究计划是为了获得 100 安培等离离子弧焊机用于连接燃气涡轮发动机中用的 0.125 吋以下厚度的航空材料时的工艺能力资料。

这项计划要达到以下几个目的：

- 确定焊接 AWS-5521 板材 (310SS) 五种厚度规格，四种接头型式时整个工艺方法的能力。

- 确定厚度与现行生产的发动机构件相对应的五种材料的接头强度性能。这些材料是：AMS-5597 (Inco718)，AMS-5521 (310SS)，AMS-5506 (410SS)，AMS-6350 (4130)，和 AMS-4911 (Ti6Al-4V)。

- 为了确立此焊接工艺的生产能力试制了几个规划涡轮发动机部件的模拟件（或实物），这三项特殊的实际部件是从可以用等离离子弧加工的 6-7 项部件中挑选出来的。

#### \* 材料的选择

根据航空上对燃气涡轮发动机部件的要

求，对材料进行了选择。它包括在以前已经过审定的小电流（10 安培以下）等离离子弧焊装置所适应的薄规格材料，这些材料都是美国航空协会所属的，其种类有：

- 对于工艺能力的评定：

- AMS-5521——具有代表性的 300 号系列的奥氏体不锈钢，现提出的规格是以前结果的继续，即：0.015，0.030，0.060，0.090 和 0.125 吋。

- 零部件材料的可焊性：

- AMS-5504 和 -5505——具有代表性的通用的 410 号马氏体不锈钢，规格有 0.030，0.060，0.090 和 0.125 吋。

- AMS-5596 和 -5597——具有代表性的沉淀硬化的镍基合金，规格有 0.030，0.060，0.090 和 0.125 吋。

- AMS-4911——具有代表性的高强度钛合金，规格是 0.060 吋。

- AMS-6350——具有代表性的低合金热处理钢，规格是 0.125 吋。

试样用公认的规范焊接，焊后热处理按照实物制造的说明书要求进行。

## 第二部分 设备、材料的准备

#### \* 焊接设备

等离离子弧装置要求其设备实用。电源设计要求在 230 或 460 伏，60 周，3 相，交流等条件下运行。冷却水的要求是在排水口压力为 0 吋以 40 磅/吋<sup>2</sup>的压力每分钟流出一夸脱的水。PWC-5 控制箱和 200 安培电源之间按照厂商售出的电气原理图来进行连接。氩气跟给出适当压力的调节器和流量计相连接（包括拖尾保护和夹具的背面气体保护，这时在以后讨论），这些组成了氩气的整个体系。保护气

（比如说氩）从气瓶里得到，为了简化自动焊时的情况，可以用实验室现存工作台，它的活动托架是带刻度的，其装置见图 2。

拖尾保护在所有的自动焊中都加以运用，这是为了对凝固了的焊缝熔池提供附加的保护。AMS-4911 钛的自动焊要求拖尾保护要加长。钛试件接头的手工焊是在图 3 所示的充氩室中进行的。

图 3. 充氩气室-AMS-4911 手工焊（图不清略）

#### \* 夹具

焊接夹具对试件来说是基础，但为了提供合理的保护和校准，这些夹具要改进并且要用新的背面衬垫，以适应锁孔焊时的电弧力。涉及的夹具和适当的试件式样是：

- 平对接接头——一般的，直线焊缝的夹具，并带有背面构槽宽度可调的充氩不锈钢衬垫。
- 端面接头——一般的没有背面气体的夹紧装置。
- 搭接接头——用平对接焊时的直线焊接夹具，仅利用单边夹紧块。
- T 字接头——一种特殊的，可变规格的夹具，它将对接接头另一侧面提供氩气保护。
- 实物——必须能对准和旋转每一个部件。

#### ※材料

交货单和机床加工的要求产生了下面的材料替换（经审定）：

合同材料	材料规格（吋）	经审定的替换
AMS-5506	0.125	AMS-5504
AMS-5597	0.030	AMS-5596
AMS-5597	0.060	AMS-5596
AMS-5597	0.090	AMS-5596

所有焊接试片的预加工包括剪裁、边缘研磨和清洗。拉伸试样用的焊接试片应加工成其滚轧方向垂直于焊缝。对研究计划中所有的材料都应用时都按下列尺寸。

- 平对接试片——4吋×8吋
- 端面接头试片——1吋×4吋
- 搭接试片——1吋×4吋
- T 字形接头试片——1吋×4吋
- 母材拉伸试片——8吋×8吋

### 第三部分 设备的启动

在平对接试片上焊机一启动，就会给焊枪的一部分元件带来损伤，因此就需要在试验参数执行以前提出解决办法。这些损伤是：0.086 吋铜喷嘴的严重烧损及 0.062 吋钨极（用 0.052 吋喷嘴时）的严重烧损和玷污。这些损伤将使得电弧不稳定并且花费太大（花费指的是仅仅只有引导弧时就要停工和更换部分零件）。图 4 上是改善引导弧参数以后的一组照片。每次试验开始时，喷嘴和电极都是新的。引导弧运行时间除了在附录 A 中表Ⅴ和表Ⅵ中注明的以外，都是 15 分钟。从 1 号到 4 号喷嘴烧损减少了，其参数变化是：

图 4. 0.086 吋喷嘴烧损试验结果（试验号参见附录 A 表Ⅴ）（图不清晰）

- 增加了喷嘴的流量
- 增加了喷嘴的内缩
- 改进了喷嘴和枪体之间的接触

所有的数据列在附录 A 的表 9 上。运用

No.4 试验的参数证明不能使试验持续 4 个小时（如 No.5 试验）。

1~5 号试件是在与制造厂商的技术代表取得联系之前完成的。制造者有下列建议：

- 返回到所有的推荐参数，并且让保护气（95% Ar-5% H<sub>2</sub>）在试验引导弧的 15 分钟中保持流动。
- 如果不成功，就把保护气稀释到 97.5% Ar-2.5% H<sub>2</sub>。

• 如果上述二个建议都不成功就维持保护气按 97.5% Ar-2.5% H<sub>2</sub> 的比例，另外增加钨极内缩 2 圈半。

正如图 4 上所表示的试件 6 号和 7 号还引起喷嘴的烧损，但是 8 号试件是完全成功的，因此得到二点结论：

- 钨极内缩的增加帮助引导弧撤到喷嘴内径中去。
- 保护气的连续运用帮助冷却喷嘴和防止



图 5. 0.062 吋钨极烧损试验结果 (试验号参见附录 A 表 X) (图不清略)

喷嘴和钨极的氧化。

当与制造商进一步联系时, 0.062 吋电极的烧损问题在试验过程中没有取得成效, 这明显地表示与图 5 和附录 A 的表 X 上。由于和制造商协同一致的研制的结果, 建议用下列新的参数:

- 对三种类型喷嘴 (0.030, 0.052 和 0.086 吋) 用 0.093 吋的电极, 以减小电流密度和电极汽化。

- 将 0.093 吋电极的头部锥角从 45° 改为 30° 或更小, 而其顶端平面直径仍保持在 0.005~0.015 吋。

- 按附录 A 的表 X 修订电报内缩和引导弧电流。

通过这样改进 (包括用带有 30° 新的锥

角的 0.093 吋电极) 暴露出来的另外一个问题在图 6 上方的照片中清楚地表明了。

图 6. 0.093 吋钨极跟陶瓷对中衬套打弧造成的影响 (图不清略)

可以认为: 在引导弧射不出时产生的剩余热量将导致尖锐的陶瓷内径边缘发生局部的熔化, 这个现象与钨的汽化沉积结合在一起。然后就建立一个电弧。随着小电弧的建立, 以上就要依次逐渐发生, 并能产生对陶瓷的焊接作用。在引导弧运行的四分钟内衬套就出现了这些情况。图 6 下部的照片上表明了陶瓷内径边缘跟电极的半边融合的衬套。在经过四小时以上的焊接电弧运行和引导弧多次点燃以后, 这个衬套就不打弧了。自这个实验以后, 很多陶瓷衬套在用转移弧焊接时, 约在 10~15 天内使用没有弧光和缺损。曾与制造商联系修改新的衬套。

## 第四部分 工艺能力的评定

这一章的目的在于建立材料为 AMS-5521, 厚度为 0.015~0.125 吋, 四种接头形式的工艺特性。预定的组合列在表 1 上。

表 1. 自动的和手工的焊接计划  
——工艺能力评定 (AMS-5521)

规格(吋)	平对接	端面接	搭接	T 字形接
0.015	×	×	-	-
0.030	×	×	×	×
0.060	×	×	×	×
0.093	×	×	×	×
0.125	×	×	×	×

\* 进行拉伸试验的规格, 包括-手工、自动和母材。

### \* 自动焊

自动焊时焊枪直线运动并填加焊丝。

#### 平对接接头

0.060 和 0.090 吋熔融焊和锁孔焊的初步试验表明, 为了得到不咬边的焊缝, 如果不加焊丝就必须有填加物。对没有填加焊丝的试样

进行了非破坏性检验。从有无缺陷来说, 认为它们是可以通过的, 但是焊缝焊珠的凹陷是不能符合要求的, 也不能经受下一步的拉伸试验的检验。

大家知道, 大多数情况是希望得到一道就焊成的焊接件, 这是为了经济, 也因为焊第二层焊缝 (填充层或光滑焊缝) 时常常要求改变焊枪的元件, 以得到较大的焊接电流容量。此外, 正如 0.125 吋材料焊接时所表明的那样, 进行第二层焊接时, 要求对前面那层焊道进行清理。0.125 吋材料开始进行锁孔焊时有很厚的一层浮渣 (后面讨论) 和咬边。试了很多条试板也是这样。所有的参数都做了改变也不成功, 因此进行了二道焊的研究。为了得到很好的第二道焊缝, 浮渣的完全清除是必须的。单道锁孔焊的重新努力终于成功了。图 7 上表明的就是 0.125 吋的试件用标准的直线夹具进行的锁孔焊。熔融方法专门用于 0.015 和 0.030 吋的厚度。各自每次只需焊一道。以上

两种焊法都可以用于 0.060~0.125 吋的平对接单道焊。就用于拉伸试验的自动焊试样而言，由于锁孔焊有下列的优点，因此就很可能地排除了熔融法焊接。

图 7. 锁孔自动焊-材料厚度 0.125 吋(图不清略)

- 用小的电流穿透较厚的厚度。
- 熔透得到保证。
- 增加了焊速。
- 均匀一致性。
- 没有机械反面衬垫的情况下，可以对反面焊道进行控制。

图 8. 0.125 吋 AMS-5521 自动焊的平对接接头

用锁孔焊时，一般焊缝宽度可减少 30%~50%，如图 8 所示。如果焊后自动（衰减）控制是符合要求的，并且表面焊道也不咬边，这个百分比还可以适当地增加。

通常在 AMS-5521 材料的焊缝表面和根部产生“浮渣”，这是一个相当困难的问题。随着焊速的增加，这个随之而来的缺陷就要严重。一旦浮渣从前边部的熔池的后面滴出来，局部的表面咬边就将形成，并且还常常带来了未

焊透，其原因是，随着浮渣的存在，使其下面的焊缝金属大量地丧失而使熔池突然变冷并且贫乏。电子显微镜指出，表面玷污（浮渣）是铝和钙。因为它们原子序数较小，荧光特性也小，所以把它们推论为  $\text{CaAl}_2\text{O}_3$ ，这是一种陶瓷材料。为了弄清这些元素的来源，在充氩室里不带陶瓷气体外套进行钨极气体保护焊，这些焊缝也有相同的浮渣产生。这个问题的消除没有去做努力，因为认为它来源于母材，只是调整了参数，以得到可以允许的浮渣。

列于表 I 并图示上图 9 上的是计划中各种厚度的拉伸特性，它包括了手工焊缝和母材试样。所有的数据都是四根试样的平均值，并满足说明书上的要求。所有试件的焊接参数和各个特征数据在附录 B 上给出。

0.125 吋材料建立锁孔焊的电流是 81 安培，推测能够允许的材料最大厚度或称为锁孔焊的变化范围为 0.125 吋，这厚度可以用改进喷嘴直径（用 0.060 或 0.065 吋直径的喷嘴代替现在用的 0.052 吋直径的喷嘴）的办法提高。这时锁孔还是可以得到的，但是电流容量将从 80 安培至少增加到 95 安培。

表 2. 单向拉伸性能——工艺能力评定 (AMS-5521)

试样类型	规格 (吋)	最终拉伸强度 (千磅/吋)	0.2% 残余变形时的屈服强度 (千磅/吋)	2 吋时延伸率 (%)	断裂位置
母 材	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—
手 工 焊 (熔融方法)	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—
自 动 焊 (锁孔方法)	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—

所有试件都在室温下进行试验，材料都在公认的固溶热处理状态下焊接，没有焊后热处理，数值是四根试样的平均值。

\* 这个厚度是熔融方法

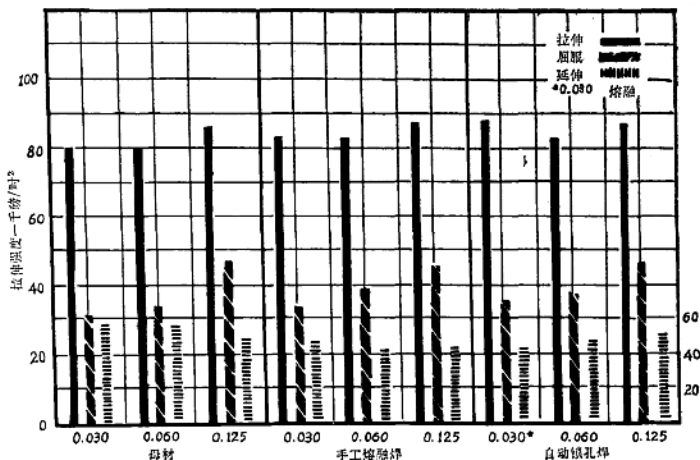


图 9. 单向拉伸性能-AMS-5521 (316SS)

### 端面接头

在不加焊丝的端面接时，所有的五种厚度都能很成功地焊接。这种类型的接头对等离子弧焊来说是“天生”合适的，并且焊道的宽度很容易达到母材的厚度。图 10 给出了这种工艺方法用手工焊和自动焊焊出的五种试样。焊接参数列表于附录 B。

图 10. 端面接头手工和自动焊-AMS-5521 (0.015、0.030、0.060、0.090 和 0.125 吋)

最终的焊接电流是 82 安培，焊速是 8 吋/分，最大的厚度能超过 0.125 吋。

### 搭接和 T 字形接头

在这种接头型式中有某些材料厚度的焊接是成功的；然而，总的来说，搭接和 T 字形接头的手工焊和自动焊严重地受到等离子电弧的基本特性的阻碍。圆柱形电弧撞击点偏离出接头根部区就会导致焊缝熔核很浅，为了满足一些基本要求，就有可能出现以下一种或几种情况：

- 不足够的根部熔透（最小要求——母材的 1%）。
- 试板的一面或二面烧穿。
- 焊缝尺寸不够（单边角焊缝的焊脚—— $1.5 \sim 2.0 \times$  母材厚度）
- 焊接质量很差。
- 要求二道焊（只对应于 0.125 吋厚的材料）。

图 32（第七部分）上表明的是能得到公认的手工焊试样的照片。然而上方的焊接件为了得到必须的焊角尺寸，就要求二道焊，这是不能用来跟 GTAW 竞争的，下面的二张照片表明其刚刚得到根部熔透，焊缝外形宽而浅。焊枪的手工操作是帮助这些试样成功焊接的有利因素。图 33（第七部分）表明了大多数试样中遇到的典型问题。为了满足说明书的要求，对各种厚度同时采用手工焊和自动焊做了大批试验。当焊缝外形、尺寸和要求的根部熔透率很明显不能很容易地得到时，研究工作做了以下接头型式后就停止了。

- 0.030 吋——搭接  
——T
- 0.060 吋——T
- 0.090 吋——搭接  
——T
- 0.125 吋——T

所有自动焊参数列在附录 B 上

### \*手工焊

手工焊的研究是很广泛的，包括不加焊丝的平对接焊的理论性试验，研究都在不带拖尾下进行。

#### 平对接接头

所有的平对接手工焊试件都用熔融方法完成。只有有限数量的板条试件，以试验性的用锁孔方法焊接。然而它表明，在特殊情况下，经过追加的操作训练，手工锁孔焊是可以实现的。不加焊丝的试片发展到用填加焊丝，并且认为，随后自动焊用增加焊丝对消除表面缺陷（咬边和过分的凹陷）是有益的，不加焊丝的手工焊焊速经常是填加焊丝时的二倍。

测量表明：熔融方法的表面焊道的宽度始终是母材厚度的四倍（与此相比，通常的自

动锁孔焊焊缝表面宽度是母材厚度的二倍）。

在自动焊章节里叙述的浮渣情况，对手工焊来说并不是严重的问题。虽然它还是存在的，但减少了对焊缝咬边的影响，这是由于操作者的操作和焊接速度较慢。

拉伸性能和自动焊的及母材的结果一起列在表 I 并图示在图 9 上。所有的数据都对应着四个试样的平均值，并满足说明书要求。附录 B 包括着所有试件的焊接参数及各个性能参数。

#### 端面接头

这一部分研究的结果和这篇报告自动焊章节中的情况类似。五种厚度都不困难地成功地焊接了，并图示在图 10 的自动焊试样的上面。所有试件的焊接参数列在附录 B 中。

也和自动焊时一样，最终参数是 78 安培，焊速 8 吋/分，最大厚度能超过 0.125 吋。

#### 搭接和 T 字形接头：

参阅搭接和 T 字形接头自动焊章节中关于角焊的基本问题。0.030 吋的 T 字形接头的研究工作由于以前讲过的原因而停止。手工焊的参数列表附录 B 上。

## 第五部分 零部件用的材料的可焊性

这一章的目的是为了找出现行涡轮发动机部件上用的各种材料的工艺特性。用的是 AMS-5504, -5505, -5596, -5597, -4911 和 -6350 各种厚度的样料的一种或二种接头设计其计划的组合列在表 III 上。

表 3 自动焊和手工焊零部件用的材料可焊性实验计划

材料 AMS-	规格	平对接	搭接
5505	0.030	× <sup>1</sup>	…
	0.060	×	×
2	0.090	× <sup>1</sup>	×
5504	0.125	×	×
5596	0.030	× <sup>1</sup>	…

	0.060	× <sup>1</sup>	…
	0.090	×	×
5597	0.125	×	×
4911	0.060	× <sup>1</sup>	…
6350 <sup>4</sup>	0.125	× <sup>1</sup>	…

1. 除了特别注明的以外，拉力实验的要选自动、手工和母材三种规格。
2. 被焊接的拉伸试样材料从可买到的 0.110 降到 0.080 吋（这是为了模拟实物的厚度）对搭接就在 0.110 吋焊接。
3. 材料在 0.060 吋焊接和检验，0.048 吋的材料被焊接并去做和实物厚度相模拟的拉伸试验。

#### 4. 只进行自动焊。

经审查的可以代替的材料列在第Ⅰ部分，在这个试验里也不改变。材料厚度变化-AMS-5505, 0.090 变到 0.080 吋, AMS-5596, 0.060 变到 0.048 吋-这是为了模拟真正实物部件的厚度。

#### \* 自动焊

这一部分的自动焊是用的直线焊机并带有送丝机构。

#### \* 平对接接头

总的来说这些材料比 AMS-5521 的焊接要容易, 这时浮渣若形成则是不连贯的。表面和根部焊道都有很好的外形, 质量也高, 内部缺陷也少。0.030 吋用熔融方法焊接, 其他所有的厚度, 包括 AMS-5596 的 0.048 吋厚度都是带有填充金属的单道锁孔焊, 焊缝表面宽度在锁孔焊时都一致地为母材厚度的二倍, 不透透的主动焊缝用另一种方法(即熔融方法)完成。图 11 表明的是三种材料三种不同厚度锁孔焊的表面和根部焊道的情形。

AMS-5504 和-5505 两种材料在锁孔焊时表面焊道咬边的倾向性很强, 减少保护气中氮的含量有助于这个问题的消除。

0.125 吋是锁孔焊厚度的最大值, 这时电流是 77 安, 焊速是 6 吋/分(如用 0.052 吋直径的喷嘴, 最大电流可达 80 安)。

图 11. 实际零件材料锁孔自动焊焊缝  
——平对接接头(图不清晰)

AMS-5596 和-5597 材料在所有的厚度情况下, 无论用两种焊接方法中的那一种, 其可焊性都是极好的。锁孔焊(含有 5% 的氮)时的咬边问题可以用控制电流、焊速和填增加金属的方法克服。正如第四部分中说的, 带有 0.060~0.085 吋直径的喷嘴允许锁孔焊的焊接厚度增加, 然而这点是明确的, AMS-5597 材料用 0.052 吋直径的喷嘴锁孔焊时最大厚度

比 0.125 吋大, 因为它焊 0.125 吋只需要 51 安电流, 焊速为 6.2 吋/分。

AMS-4911 材料 0.060 吋厚度的带有填充金属的锁孔自动焊, 第一道参数为消除咬边而用的第二道光滑焊道的参数都已建立了。然而最近又建立了单道带填充金属锁孔焊的参数。对这种材料来说表面和根部焊道是极好的, 虽然不在计划之内, 但后面的试验表明其最大厚度跟其他实物材料是相等的。为了在焊速接近 18 吋/分时能对钨有足够的保护, 就需要使用长度超过 10 吋的拖尾保护。

AMS-6350 材料单道焊厚度为 0.125 吋时用的电流接近最大值为 78 安, 焊速只为 6 吋/分, 虽然它的焊接和力学实验都是成功的, 但这个材料表面张力较小, 根部焊道总是反常, 又高又狭。实物材料 AMS-6360 和 6370 锻打出来的, 规定它经过 1025-1075°F (1 小时) 消除应力以后使用。

表Ⅳ到Ⅷ列出了每种材料计划中厚度规格的拉伸性能, 也包括手工焊(如果能用的话)和母材试样的性能。只有 AMS-5596 材料的试样不是只在室温下进行实验的(室温, 800°F 和 1200°F)。图 12 到 16 的照片表明了相同的结果。所有的数据都对应着四个试样的平均值, 并满足说明书的要求, 所有试件的焊接参数和各个性能数据在附录 C 中给出。

对 AMS-4911 材料还测量了弯曲角。做成横向弯曲试件的有: 母材、手工等离子焊(熔融方法)、自动等离子焊(锁孔方法)和手工钨极氩弧焊。表Ⅷ列出了拉伸应力在焊接试样的正表面和根部表面的结果。所有的试样达到母材的 60%, 用钨极氩弧焊得到 81%, 图 17 图示了这个结果。焊缝加强高被磨削加工(包括母材试样)到均匀的厚度  $0.057 \pm 0.002$  吋, 所有的试样都是  $1.00 \times 2.00$  吋。全部试样用半径与材料厚度相同的芯轴加载, 支点间跨度是 1 吋。各个特性数据列在附录 C 上。

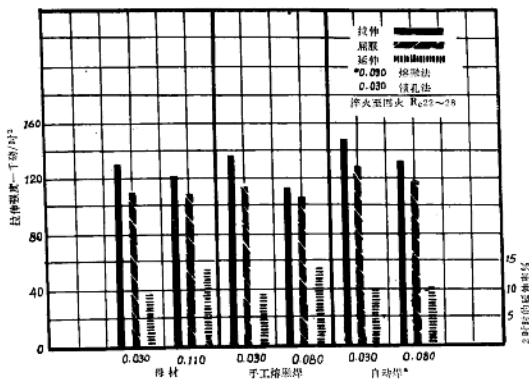


图 12. 单向拉伸性能-AMS-5505 (410SS)

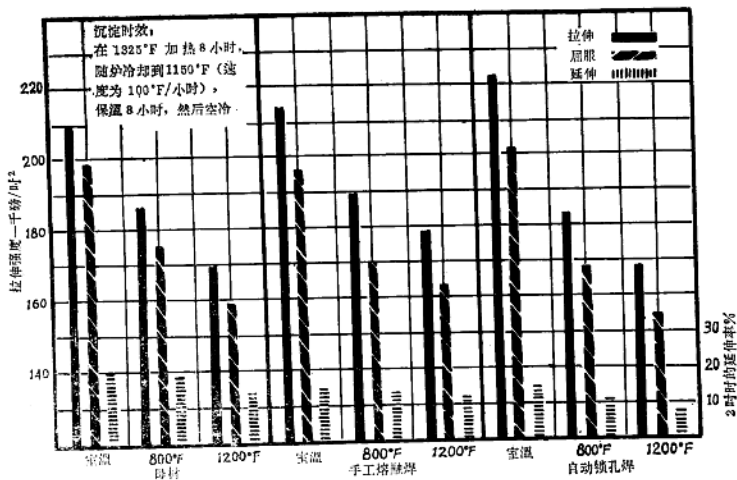


图 13. 单向拉伸性能—0.030 吋 AMS-5596 (Inco 718)

## 搭接

正如表 I 中指出的那样, 搭接焊只包括 AMS-5505 材料的三种厚度规格和 AMS-5597 材料的二种厚度规格。虽然在第四部分已谈过由于等离子体头部碰撞的原因而带来的困难,

但总的来说, 搭接要比 T 字形接头容易做到, 所有的搭接接头都成功地焊接了, 这些材料的流动性好也提供了帮助, 所有试样的参数列表于附录 C。

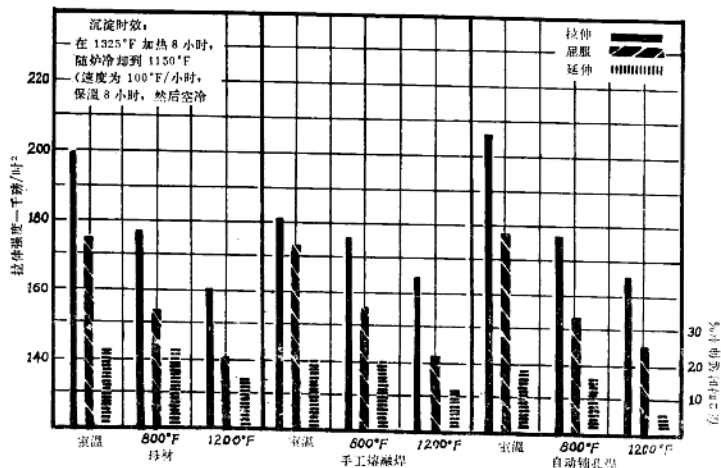


图 14. 单向拉伸性能——0.048 吋 AMS-5596 (Inco 718)

表 4. AMS-5505 单向拉伸性能——零部件用的材料可焊性

试样	规格 (吋)	最终拉伸强度 (千磅/吋 <sup>2</sup> )	0.2% 残余变形屈服限 (千磅/吋 <sup>2</sup> )	2 时时的延伸率 (%)	断裂位置
母 材	0.030	127.6	110.2	8.6	---
	0.110	123.8	107.8	13.4	---
手 工 焊	0.030	137.8	114.1	9.8	母材
熔 融 方 法	0.080	113.9	107.0	13.5	母材
自 动 焊	0.030*	148.2	128.4	9.6	母材
锁 孔 方 法	0.080	132.2	115.7	11.3	母材

所有实验都在室温下进行, 材料在公认的退火状态下焊接, 焊后淬火——1,800°F, 1 小时, 取出来空冷, 回火——1,050°F, 3 小时,

空冷数值是 4 块试样的平均值, 为了模拟可能应用的实物, 材料从 0.110 吋降到 0.080 吋。

\* 这个厚度用熔融方法焊接。

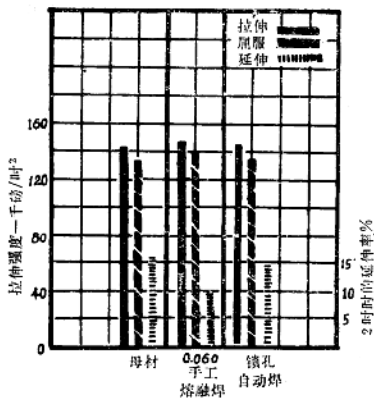


图 15. 单向拉伸性能——AMS-4911 (Ti6Al-4V)

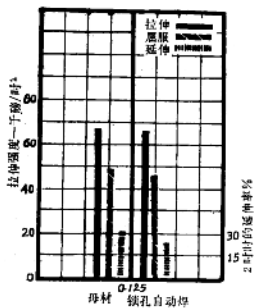


图 16. 单向拉伸性能——AMS—6350 (AISI-4130)

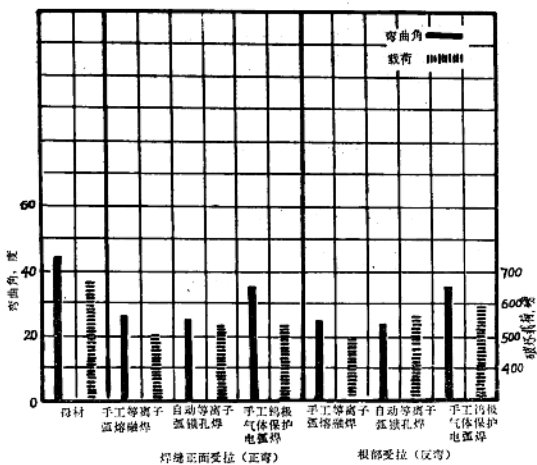


图 17. 弯曲试验结果——横向——0.057 吋 AMS-4911 (Ti6Al-4V)



表 5. AMS-5596 单向拉伸性能——零部件用的材料可焊性

试样	规格 (吋)	试件温度 (°F)	最终拉伸强度 (千磅/吋 <sup>2</sup> )	0.2 残余变形时屈服限 (千磅/吋 <sup>2</sup> )	2 吋时的延伸率 (%)	断裂位置
母 材	0.030	室温	209.6	198.6	18.5	---
		800	187.0	175.3	18.1	---
		1200	170.1	158.9 <sup>1</sup>	15.2	---
	0.048	室温	200.0	174.9	22.8	---
		800	176.6	153.6	23.4	---
		1200	160.9	141.3	13.6	---
手工焊 (熔融 方法)	0.031	室温	213.5	196.2	14.9	母材
		800	190.3	170.2	13.9	母材
		1200	178.2	163.4	11.9	2
	0.048	室温	181.6	172.0	21.1	母材
		800	175.9	154.6 <sup>3</sup>	18.9	母材
		1200	164.5	142.2	12.0	母材 <sup>4</sup>
自动焊 (锁孔 方法)	0.030 <sup>5</sup>	室温	222.1	202.3	15.2	母材
		800	182.9	168.0	10.5	母材
		1200	168.2	154.7	7.3	热影响区
	0.048	室温	207.2	177.9	17.7	母材
		800	177.2	153.9	16.9	母材 <sup>6</sup>
		1200	164.8	145.1	4.8	热影响区

材料在 1,750°F 固熔热处理状态下焊接，焊后 1,325°F 8 小时，炉冷，速度为 100°F/时，到 1,150°F 保温 8 小时再空冷，数值除了在下面特别注明的以外是四块试样的平均值。

1. 伸长计滑动，只是二块试样的平均值。
2. 一块断在母材，二块断在热影响区，一块断在焊缝（二处有未焊透，没有被 X 光

或 Zyglo 发现）

3. 伸长计滑动，只是三块试样的平均值。
4. 一块断在焊缝。（未焊透未被 X 光或 Zyglo 发现）
5. 这个厚度是用熔融方法焊接。
6. 一块试验断在锁孔。

表 6. AMS-4911 单向拉伸性能——零部件用的材料可焊性

试样类型	规格	最后拉伸强度 (千磅/吋 <sup>2</sup> )	0.2% 残余变形时的屈服限 (千磅/吋 <sup>2</sup> )	2 吋的延伸率 (%)	断裂位置
母 材	0.060	143.1	134.9	15.6	---
手工焊 (熔融方法)	0.080	145.0	137.9	9.8	母材
自动焊 (锁孔方法)	0.060	143.9	136.4	13.7	母材

所有试件在室温下进行，材料在公认的退火状态下焊接，焊后，1,000°F 3 小时（空气中）消除应力，数值是 4 块试样平均值。