

LF3 铝合金焊缝气孔问题*

北京航空学院 邹莱莲 周 达

一、前 言

铝 镁 合 金 是 航 空 工 业 中 常 用 的 一 种 铝 合 金, 在 铝 镁 合 金 的 焊 接 构 件 生 产 中, 常 常 会 在 焊 缝 金 属 中 产 生 气 孔 缺 陷。虽 然, 历 来 对 铝 合 金 焊 接 中 的 气 孔 问 题 研 究 颇 多, 但 是 由 于 铝 合 金 焊 缝 气 孔 的 影 响 因 素 甚 多, 焊 接 生 产 中 仍 然 屡 屡 出 现 此 类 缺 陷。因 此, 铝 合 金 焊 缝 气 孔 问 题 总 是 焊 接 工 作 者 密 切 关 心 的 问 题。本 文 通 过 大 量 的 试 验 工 作, 研 究 了 采 用 钨 极 氩 弧 焊 时 材 料 表 面 清 理 条 件 对 气 孔 的 影 响, 其 中 着 重 研 究 了 母 材 焊 接 端 面 氧 化 膜 对 焊 缝 中 生 成 气 孔 的 影 响, 此 外 研 究 了 焊 接 规 范 对 气 孔 的 影 响, 获 得 与 有 关 文 献 相 类 似 的 结 论, 即 认 为, 铝 镁 合 金 焊 缝 气 孔 的 倾 向 将 随 着 焊 接 速 度 的 变 化 而 异, 焊 接 速 度 减 小 或 增 大 均 能 减 小 焊 缝 气 孔 的 倾 向, 但 是 在 某 一 个 焊 接 速 度 区 间, 焊 缝 却 具 有 最 大 的 气 孔 倾 向。本 试 验 还 分 析 了 焊 缝 组 织 与 气 孔 的 关 系, 在 此 基 础 上, 对 钨 极 氩 弧 焊 时 铝 镁 合 金 焊 缝 气 孔 的 机 理 进 行 了 探 讨。

二、试验材料及试验方法

母材: LF3 铝合金 (厚 1.8 毫米)。填充焊丝: 成分同母材, 直径为 3 毫米。

试验方法: 采用手工钨极氩弧焊以研究母材、焊丝的不同清理条件对焊缝气孔的影响; 以自动钨极氩弧焊试验焊接规范对生成气孔的影响; 并以机械脉动送丝的自动钨极氩弧焊考

察焊缝组织与气孔的关系。不论手工焊或自动焊, 均采用对接接头, 自动焊时试件在不锈钢垫板上以琴键式夹具紧固而焊成。焊后焊缝均经过 X 光检验, 以 X 光底片上的气孔数为评定标准。为研究焊缝组织与气孔的关系, 配合金相分析与定量金相分析。

三、清理条件对焊缝气孔的影响

铝合金焊件的清理方法有化学清理和机械清理两种。本试验中, 焊前对母材及焊丝均进行化学清理, 着重研究不同的机械清理条件对焊缝气孔的影响。一般对母材的机械清理方法有: 用细铜丝刷刷净待焊表面、焊口以及用刮刀刮削试件对接端面。焊丝则可采用细铜丝刷刷除表面氧化膜。根据这些清理方法分别对焊丝和母材进行清理, 并以手工钨极氩弧焊焊接, 试验条件与结果见表 1。

由表 1 可见, 刮削焊件对接端的端面是最重要的清理条件。试件 005~008 和 011、012 均为没有刮削试件端面所焊, 由 X 光检验可知, 不论焊丝和试件是否经过细铜丝刷清理, 其焊缝中均存在多处密集气孔, 有的还有严重的链状气孔。为了确定焊件对接端面杂质对焊缝气孔的影响, 将试件 009、010 的焊前清理条件定为: 焊丝及试件经过化学清理后, 仅对焊口端面进行刮削处理。试验结果表明, 这两块试件的焊缝中仅存在个别的分散小气孔, 而历来的研究大多认为, 由于焊丝的比表面积较大, 因而焊丝表面的清理情况对于焊缝气孔的影响很

* 文中焊接工艺试验曾得到三二〇厂谢益善等师傅们的大力协助, 特此致谢。

表 1 清理条件对焊缝气孔的影响

| 试件号 | 清 理 条 件 | | 试验结果 (X光检验) |
|-----|---------|-------|---------------------------------|
| | 焊丝 | 试 件 | 气 孔 数 量 |
| 001 | 刷 | 刷、刮 | $\phi 0.1$ 毫米以下气孔一个 |
| 002 | 刷 | 刷、刮 | 一处密集气孔, 四个单独气孔 |
| 003 | 不刷 | 刷、刮 | 无气孔 |
| 004 | 不刷 | 刷、刮 | 二处密集气孔, 一个单独气孔 |
| 005 | 刷 | 不刷、不刮 | 二处密集气孔, 二处链状气孔 |
| 006 | 刷 | 不刷、不刮 | 六处链状气孔 |
| 007 | 不刷 | 不刷、不刮 | 四处链状气孔 |
| 008 | 不刷 | 不刷、不刮 | 五处链状气孔, 三处密集气孔 |
| 009 | 不刷 | 不刷、刮 | $\phi 0.3$ 毫米气孔一个 |
| 010 | 不刷 | 不刷、刮 | $\phi 0.3 \sim \phi 0.4$ 毫米气孔一个 |
| 011 | 不刷 | 刷、不刮 | 密集气孔三处 |
| 012 | 不刷 | 刷、不刮 | 密集气孔二处 |

注: 焊接条件: 焊接电流79安; 氩气流量7.2升/分; 试件尺寸: $1.8 \times 200 \times 90$ 毫米, 焊丝直径 $\phi 3$ 毫米, 焊接前试件与焊丝均经过化学清理。

大, 本试验的结果说明了在钨极氩弧焊时母材焊口端面的清理却更为重要。采用钨极氩弧焊焊接铝镁合金时, 必须充分重视焊口端面的清理, 除了进行化学清理外, 宜采用刮削焊口端面的措施以防止焊缝气孔。

四、焊接规范对焊缝气孔的影响

在保证焊缝正常成形和熔透的基础上, 采用钨极自动氩弧焊研究了焊接规范对气孔的影响 (见表 2)。

由表 2 可知, 焊缝中的气孔随着焊接线能量的不同而有较大的变化, 当焊接线能量较大时, 熔池存在时间加长, 虽然会有更多的氢溶入熔池, 但更有利于气泡的浮出, 因此气孔数量减少; 而线能量较小时, 会由于焊接熔池存在时间减少而使溶入熔池的氢减少, 从而降低了焊缝中生成气孔的倾向; 但是, 当焊接规范选择不当时, 就会使焊缝气孔倾向增加, 如焊接时溶入熔池的氢已足以形成气泡, 但熔池存在时间较短, 这些气泡又来不及逸出熔池, 这种情况下, 焊缝中气孔倾向增大。在以后的生产试验中, 甚至把焊速继续提高至 0.53 米/分, 焊缝金属中也仍然很少出现气孔。在焊接试件时, 以上结果甚稳定, 但是在焊件生产中 (即焊缝长度大于 1 米时), 采用减小线能量的措施虽然明显地减少焊缝中出现气孔的倾向, 但结果不够稳定, 总不如手工钨极氩弧焊那样能自如地掌握焊缝质量。分析手工焊与自动焊两

表 2 焊接规范对焊缝气孔的影响

| 试件号 | 焊接电流 (安) | 焊接速度 (米/分) | 电弧电压 (伏) | 送丝速度 (米/分) | 线 能 量 (焦/厘米) | 气 孔 倾 向 (X光检验) |
|-----|-------------|---------------|-------------|---------------|-----------------|------------------------------|
| 601 | 110 | 0.25 | 22~23 | 0.47 | 5800 | $\phi 0.8, \phi 1.0$ 毫米气孔各一个 |
| 602 | 110 | 0.25 | 22~23 | 0.47 | 5800 | 无 |
| 603 | 130 | 0.32 | 22~23 | 0.67 | 5400 | 长100毫米链状气孔二处 |
| 604 | 130 | 0.32 | 22~23 | 0.67 | 5400 | 链状气孔三处 |
| 606 | 150 | 0.45 | 22~23 | 0.76 | 4400 | $\phi 0.1$ 毫米单个气孔四个 |
| 609 | 150 | 0.45 | 22~23 | 0.76 | 4400 | 无 |

注: 试件材料及尺寸: LF3 铝合金, $1.8 \times 100 \times 600$ 毫米; 接头型式: 无间隙对接, 试件由琴键式气动夹具紧固而焊接, 焊接时夹具气压为 5 公斤/厘米²; 氩气流量: 10 升/分; 焊枪角度: 85°; 焊丝角度: 20°; 清理条件: 焊前焊丝及试件均经过化学清理, 试件对接处均经过细铜丝刷刷净及刮削处理。

种焊接方法的差异可知,手工焊时,焊丝是由焊工根据焊接熔池的情况断续加入的,而自动焊时,填充焊丝一般以匀速连续加入熔池,前者可以由焊工控制焊丝的熔化与搅拌熔池等,后者情况下,焊丝受电弧热而熔化,当焊丝端部的熔滴长得足够大时,熔滴的重力大于其表面张力,熔滴就会落入熔池,也就是说,连续送丝的钨极氩弧焊时,焊丝熔滴靠重力而过渡,由于没有手工氩弧焊时人工送丝给予的外力,因而熔滴长得较大,熔滴在电弧停留的时间也较长,熔滴容易过热,因此,在熔滴阶段能溶解、吸收较多的氢,在随后的冷却过程中,这些氢会残留于焊缝而形成气孔。由于这些因素的影响,在采用连续送丝的钨极氩弧焊时,即使在不容易出现焊缝气孔的规范域中,有时仍然会出现气孔,为了模拟手工氩弧焊时的送丝情况,三二〇厂把自动氩弧焊中的连续送丝机构改为机械脉动送丝,生产实践证明,经过改进后焊缝中出现气孔的倾向大为减小,但焊缝的X光底片上却又出现了“黑(白)线”的问题。一般,X光底片上“黑(白)线”常相伴出现(见图1),经研究,焊缝X光底片上的“黑(白)线”是由于焊缝中出现了一种呈双

晶面、规则排列的羽毛状组织所引起。

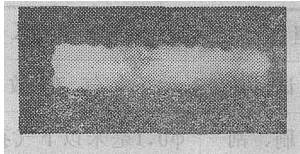


图1 焊缝X光底片上的“黑(白)线”

表3为脉动送丝的钨极自动焊焊接试验结果。由表可见,当采用机械脉动送丝后,即使在容易出现气孔的规范区域中,气孔率也大为降低,如试件37、38、43、44,其焊接速度恰为0.30~0.31米/分,是连续送丝焊接中比较容易在焊缝中生成气孔的规范,可是,这些试件中仅有个别直径小于0.2毫米的小气孔,表中其他规范下的焊缝中几乎均无气孔出现。但是,由表3可见,无论在何种焊接规范下,焊缝的X光底片上均出现“黑(白)线”。有人认为X光底片上的“黑(白)线”是由于焊缝中出现了密集的链状气孔所致,但是本试验的金相分析表明,凡是X光底片上有“黑(白)线”的试片,除了其焊缝组织形态有变化外,并没有发现密集气孔或链状气孔,也未见其他缺陷。有的工厂也在生产中出现过铝镁合金焊缝X光

表3 脉动送丝时焊缝中的气孔倾向

| 试件号 | 焊接电流 (安) | 焊接速度 (米/分) | 电弧电压 (伏) | 送丝频率 (次/秒) | X光底片观察情况 | | |
|-----|-------------|---------------|-------------|---------------|--------------|--------------|------------|
| | | | | | 黑线长度 (毫米) | 白线长度 (毫米) | 气孔情况 |
| 37 | 120 | 0.31 | 22~23 | 2.1 | 4 | 0 | 有个别微气孔 |
| 38 | 120 | 0.31 | 22~23 | 2.1 | 12 | 3 | 无 |
| 43 | 140 | 0.30 | 22~23 | 2.0 | 13 | 3 | 个别微气孔 |
| 44 | 140 | 0.30 | 22~23 | 2.0 | 8 | 4 | 个别<0.2毫米气孔 |
| 39 | 140 | 0.42 | 22~23 | 2.6 | 12 | 3 | 无 |
| 40 | 140 | 0.42 | 22~23 | 2.6 | 4 | 1 | 无 |
| 33 | 140 | 0.44 | 22~23 | 3.2 | 8.6 | 1 | 无 |
| 34 | 140 | 0.44 | 22~23 | 3.2 | 8 | 0 | 无 |
| 21 | 140 | 0.27 | 22~23 | 2.2 | 10 | 0 | 无 |
| 22 | 140 | 0.27 | 22~23 | 2.2 | 18 | 0 | 无 |

注:氩气流量为12升/分;试件均经过化学处理及刮、刷机械清理;气动夹具的气压为5~5.8公斤/厘米²;试件尺寸:1.8×100×500毫米;接头型式:无间隙对接。

底片的“黑线”问题，他们经过多次金相分析也没有发现密集气孔或链状气孔，只是有时磨片上出现个别气孔。但是在无“黑线”的焊缝磨片上有时也有个别气孔，可见X光底片上的“黑线”并非密集气孔或链状气孔。本试验还发现，有“黑线”的焊缝中往往存在一些微气孔，但这些微气孔是弥散分布的，因而不是形成“黑线”的原因。此外，这些微气孔不至于会影响焊件的强度，例如，曾对焊缝X光底片有“黑线”的压力容器进行破坏试验，其裂口不在有“黑线”的焊缝上，破坏压力仍然达到设计要求。

五、铝镁合金形成焊缝气孔机理的探讨

众所周知，铝镁合金的氧化膜由 Al_2O_3 和 MgO 所组成，而 MgO 越多，氧化膜越不致密，也更容易吸附水分，试件的对接端面若是一股剪切而成，则容易有较厚的氧化膜以及其他杂

质存在。这些氧化膜所吸附的水分以及表面存在的杂质，既增加了焊接时电弧气氛中氢的来源，又有利于熔池中气泡的形核长大，因而是钨极氩弧焊时焊缝气孔的主要来源。

为了分析端面氧化膜对形成焊缝气孔的影响，采用手工钨极氩弧焊制备焊件，焊前试件未加刮、削处理，焊后截取几个断面磨片分析，以研究熔池形成过程中焊口端面氧化膜的作用，图2为该焊件不同截面的金相照片，(a)为焊接起始部位的断面，(b)为未熔合末梢局部放大的扫描电镜照片。由图可见，由于焊口端面未经过刮削，在焊缝的起始部位产生了未熔合的现象，但是，由于热作用的时间较短，氧化膜中的化合水还来不及分解，因而不会形成气孔，将未熔合的末梢加以放大观察，也未见气孔(见图2, b)，但由于氧化膜的存在，给气泡的形核提供了有利条件，当输入热增加时，随着熔池的形成，氧化膜中的水分分解、反应而析出氢，未熔合处已有气孔存在，而且气孔的尺寸越来越大(见图2, c)。

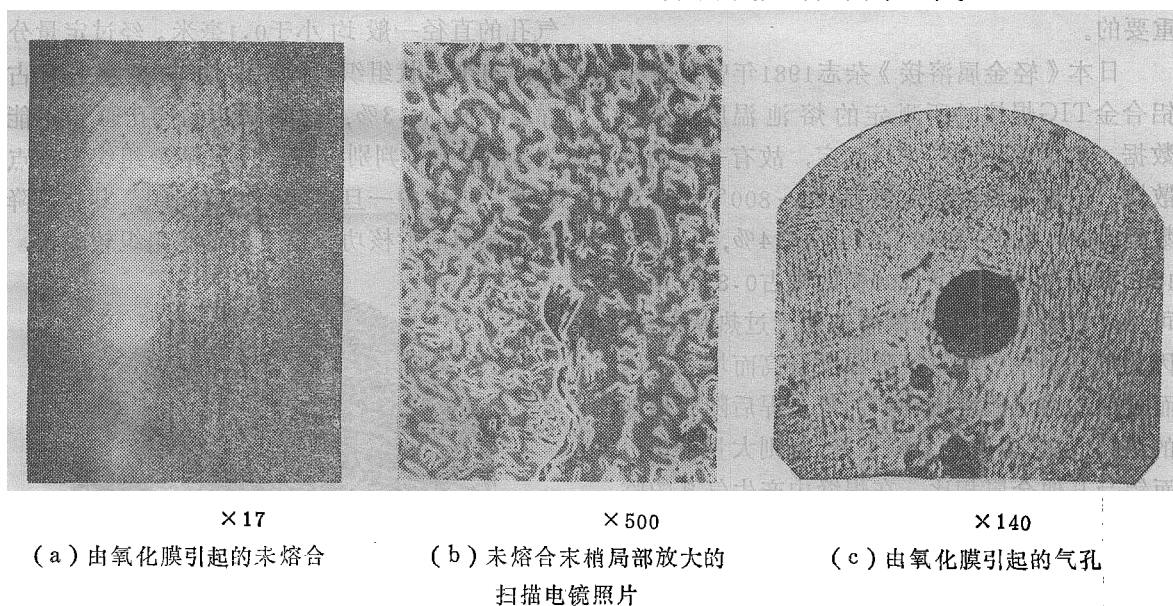
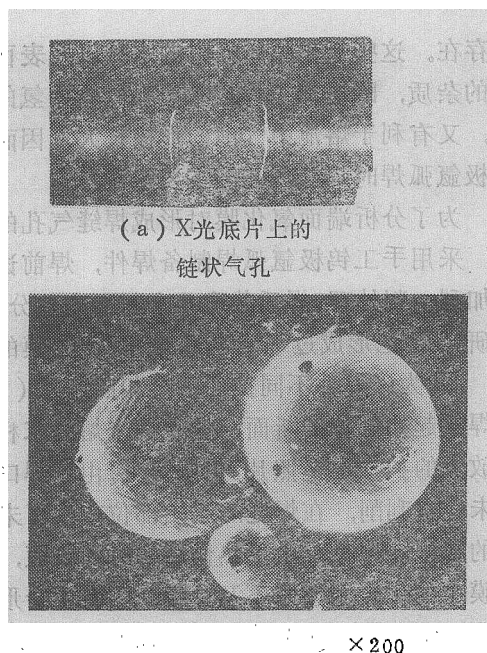


图2 焊口端面氧化膜对焊缝气孔的影响

图3为焊口端面不刮削的焊件中焊缝的链状气孔照片，a为焊缝的X光底片上所显示的链状气孔，b则为链状气孔的扫描电镜照片。

由图3可见，气孔呈圆形，且分布于焊缝中心底部，最下面的气孔较小，越至上面气孔越大，是由氧化膜引起的氢气孔。



(b) 链状气孔扫描电镜

图 3 焊缝中的链状气孔

由上述分析可知，为避免在焊缝中出现链状气孔和密集气孔，仔细刮削焊口端面是至关重要的。

日本《轻金属溶接》杂志1981年曾发表了铝合金TIG焊接时所测定的熔池温度的统计数据，由于熔池温度难以测定，故有一定的分散性，如熔池温度测定值为660~800℃占所测数据81%，800~1000℃的占16.4%，1000~1200℃的占1.8%，>1200℃的则占0.8%。由此可见，铝合金焊接时，其熔池处于过热状态，又因为氢在铝中的溶解度随温度升高而增大，因而过热的熔池能溶解较多的氢，焊后随着熔池的结晶，氢的溶解度急剧下降，氢则大量析出，而铝与其他金属相比，在焊缝中产生气孔的临界含氢量极低（见表4），因此比较容易产生气孔。本试验中所用材料为含3%Mg的铝合金，其结晶区间为650~610℃，结晶过程中生长的枝晶也是气泡形核的现成表面，当快速冷凝时，气泡来不及浮出而在焊缝中形成气孔。因而，当试件端面经过刮削的机械清理后，虽然去除了链状气孔、密集气孔，但有时仍然会有微小

气孔出现。

表 4 各种金属产生气孔的临界含氢量

| 金属 | 熔点下氢的溶解量 (毫升/100克) | 最大溶解量与熔点下溶解量之比 | 产生气泡的临界含氢量 (%) |
|----|-----------------------|----------------|-------------------|
| Al | 0.65 | 61 | 0.03 |
| Cu | 5.17 | 6.7 | 2.2 |
| Fe | 30.2 | 2.1 | 23 |
| Ni | 39 | 1.7 | 35 |

当焊缝中出现羽毛状组织时（见图4），往往在其X光底片上呈现“黑（白）线”。羽毛状组织是介于柱状晶与等轴晶之间的一种组织，其组织较疏松，当剖开试件，磨制金相试片分析时，可以看到羽毛状组织的金相磨片上常有微气孔存在（见图5），图5（a）、（b）分别为具有羽毛状组织焊缝的横剖面及纵剖面。虽然，在没有羽毛状组织的焊缝中有时也能观察到个别微气孔，但总的来看，具有羽毛状组织的焊缝中微气孔的数量为多，不过气孔的直径一般均小于0.1毫米。经过定量分析，有羽毛状组织的焊缝中微气孔的数量仅占焊缝断面的1.3%，这些微小的气孔通常不能为X光检验所判别。微气孔与焊缝组织的特点有关，焊缝中一旦出现羽毛状组织，其枝晶降低了气泡的形核功；由于羽毛状组织较疏松，

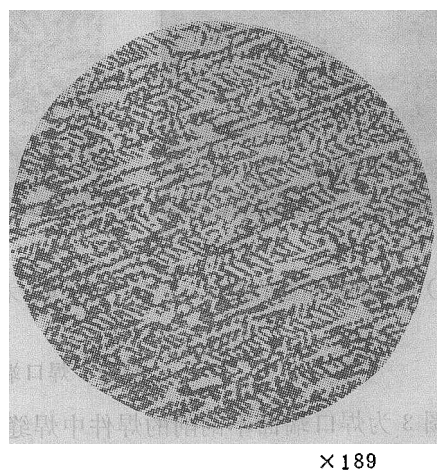


图 4 焊缝中的羽毛状组织

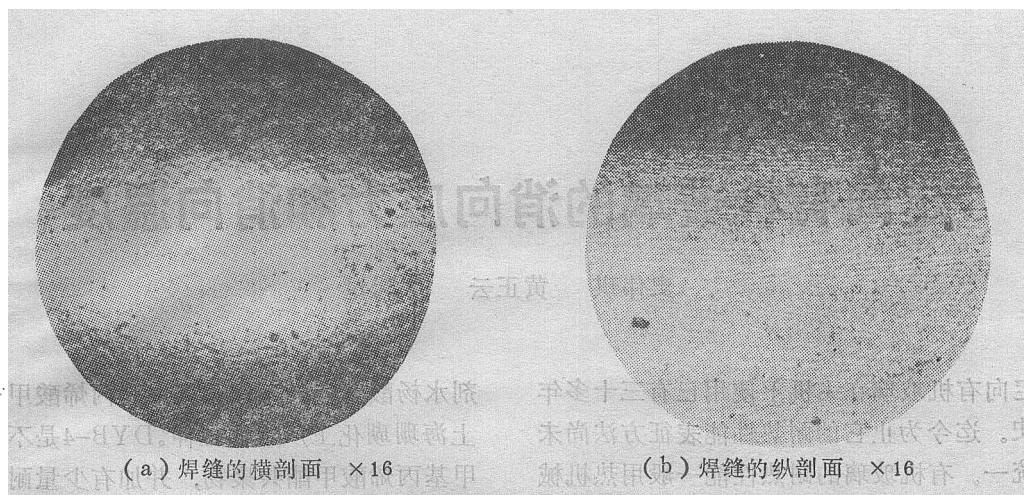


图 5 焊缝羽毛状组织中的微气孔

气泡形核后，会在其枝晶间逐渐长大，但羽毛状组织的枝晶妨碍了气泡的上浮，同时，羽毛状组织成长速度很快，气泡不易逸出，因而在焊缝中形成了微气孔。

由上述分析可知，铝镁合金焊缝中的链状气孔和密集气孔，一般是由于工件焊口端面的氧化膜所引起；焊缝中的分散气孔，则是由于过热的焊接熔池溶入了氢，熔池冷凝时，氢的溶解度突变而析出氢，当氢的逸出速度小于熔池的结晶速度时产生的；焊缝中的微气孔则是与焊缝的组织形态有关，焊缝中若出现较疏松的羽毛状组织，一般会在焊缝中存在较多的微气孔。

为了防止焊缝中出现气孔，除了要严格掌握清理条件外，通过调节焊接规范也能在一定程度上防止气孔产生。有人提出，在保护气中加入微量的氧，能防止铝合金焊缝气孔，本试验曾进行过这方面工作，当氩气中加入微量的氧或二氧化碳气体时，由于降低了熔池金属的表面张力，改善了熔池金属的流动性，从而可以获得焊波细小，外观优良的焊缝。X光检验表明，采取这种措施可以减小焊缝气孔的倾向，但是，氧化性的保护气体会使钨极氧化而引起焊缝夹钨，即使在氩气中加入千分之几的二氧化碳气体，在焊缝表面就可以见到黑色钨夹杂，因而该措施不宜在钨极氩弧焊中采用。

六、结 论

通过对 LF3 铝合金的钨极氩弧焊工艺试验，阐明了氧化膜对生成焊缝气孔的影响，摸索了焊接规范对焊缝气孔影响的规律，并研究了焊缝组织对焊缝气孔的关系。本试验可得结论如下：

1. 采用钨极氩弧焊焊接铝镁合金时，工件焊口端面的氧化膜是生成焊缝气孔不可忽视的因素，焊前，除了对焊丝及焊件进行化学清理外，刮、刷待焊工件焊口的端面是防止焊缝金属中产生链状气孔以及密集气孔的有效措施；

2. 调节焊接规范参数能使焊缝形成气孔倾向减小。焊接线能量适当增大或减小，均能使焊缝气孔倾向减小，一般，采用增加焊接速度（线能量减小）的措施，既可以减小焊缝金属中气孔的倾向，又可以提高焊接生产率。对于厚度为1.8毫米铝镁合金的对接焊缝，焊接速度大于0.45米/分，即可获得气孔率很小的焊缝；

3. 焊缝中的微气孔与焊缝的组织形态有关。焊缝金属中如果出现羽毛状组织，则其中一般会有微气孔存在；

4. 以钨极氩弧焊焊接铝合金时，不宜采用加氧化性气氛的措施。