

北京航空学院
科学报告会论文集

庆祝建校三十周年

第七分册 制造工程类

1982.10

前 言

建校三十年来,我院科研工作遵循党的方针政策,密切结合教学,取得不少成果,在此基础上,总结出了一批有一定理论价值与实践意义的学术论文。

战斗在祖国各地的校友们,在为实现我国四个现代化这一伟大历史任务的过程中,同样做出了可喜的成绩,此次他们热情响应母校三十周年校庆征稿的号召,把自己多年来从事教学、科研与工程技术实际工作中所积累起来的宝贵经验,进行理论总结,书写成文,投寄我院。

为隆重纪念我院三十周年校庆日,加强院内外的学术交流与联系,我处特编辑这套校庆论文集。文集刊载本院与校友近期科研成果或技术总结的详细文摘。为节省篇幅,在编辑时将作者原列参考文献删去。

论文按专题分类出版:

1. 材料科学与工程类
2. 无线电电子学类
3. 自动控制类
4. 发动机类
5. 飞行器与力学类
6. 计算机类、管理工程类、情报学类
7. 制造工程类
8. 数理类
9. 机械设计类
10. 医疗类、体育类
11. 社会科学类
12. 大学生论文集

由于编辑出版力量有限,时间也较仓促,难免有遗漏和不妥之处,欢迎批评指正。

北京航空学院 科研处

1982年10月

第七分册 制造工程类

目 录

1. 含铝、钛合金高温钎焊时的表面反应
.....庄鸿寿 (1)
2. 关于铝合金焊缝的羽毛状组织
.....邹莱莲、丁松福 (8)
3. 用双波长激光全息干涉术测定焊接电弧等离子体的研究
.....陈球武、马进 (15)
4. 点加热变拘束试验研究
.....张子文、丁松福等 (21)
5. 具有几何扭角机翼的数学模型和程序
.....何惠田 (28)
6. 二次圆锥曲线的通用程序; 二次贝齐尔——伯恩斯坦曲线的扩展
.....杨国柱 (37)
7. 用线性规划法光滑三次样条
.....盛一兴 (46)
8. 重节点端点条件 B 样条曲线曲面研究
.....吴瑞祥、朱心雄 (54)
9. 机械类零件的体素拼合造型
.....马德昌 (63)
10. B 一样条拟合翼型曲线端点条件的处理
.....任仲贵、崔存生 (70)
11. B 样条的几何定义
.....施法中、吴骏恒 (77)
12. 计算机图形显示中圆的一种剪取算法
.....温文彪 (86)
13. 用有限元法确定干涉配合螺栓的最佳干涉量
.....孙家润 (90)
14. 均匀 B 样条局部复杂曲面造型
.....韩道康、吴骏恒 (95)

15. 关于中硬钢的冷反挤压及剩余变形能力的研究
.....周贤宾(106)
16. 简化成形极限曲线的作法
.....陈鹤峰(114)
17. 坐标网制造及测量技术
.....陈孝代、周安龙、常荣福(122)
18. 根据变形增量分阶段变张力的钢丝缠绕机架算法
.....梁炳文(127)
19. 钣金成形中的摩擦分析
.....常荣福(136)
20. 加工过程的二级微计算机控制系统的硬件设计
.....杨宗煦(141)
21. 计算机辅助制造中过渡曲面的处理
.....李联诚(147)
22. *EDBS*——网状模式的数据库管理系统
.....唐梓荣、刘一鹏(156)
23. 数控语言系统中翻译程序的形式化处理
.....唐小青(160)
24. 数控程序编制的发展
.....杨光薰(163)
25. 三次 B 样条曲线、曲面的求交问题
.....彭群生(168)
26. 具有相关部件和表决器的系统可靠度的一种计算机算法
.....洪士勤(174)
27. 微型计算机在动态测试中的应用——直升机尾桨空测数据处理
.....韩云台、曹维、孙清河(178)
28. 切削钙易切钢时刀具表面上保护膜的形成和消失
.....陈诚高等(186)
29. 关于缺齿(不完全齿)齿轮传动
.....张洪(197)
30. 偏心体的趋法向效应及其在型面加工和检测中的应用
.....张洪、余梅笙(203)
31. 从增大行距宽度减小波纹度的角度看型面加工发展的方向
.....张洪(209)

32. 无孔蜂窝结构铝合金夹芯选胶研究	刘淑梅(214)
33. 合金铝蜂窝夹芯的先加工后拉伸气胀成形工艺	郭忠信执笔(223)
34. 改进和简化大、中型飞机装配型架结构的途径和措施	刘忠梁(230)
35. 热膨胀在飞机制造中对互换协调的影响	刘忠梁(236)
36. 型架基础的探讨	刘忠梁(244)
37. 卧式仿形仪的研制	钟春兰(250)
38. 直流脉冲焊接规范参数和波形的理论与方法研究	萧乐岭(256)
39. 飞机外形复杂曲面的计算机辅助设计	仰文发(262)
40. 试论电火花线切割加工航空发动机产品的安全和可靠性	郑恩昆(269)
41. MC170—2整流叶片安装板加工组合铣床研制	周松清(283)
42. 不锈钢和高温合金熔化极氩弧焊工艺参数计算	侯玉年、郝俊明(291)
43. 薄壁高压容器高效率焊接夹具	朱缙云(298)
44. TLP连接工艺的研究	阳新华(302)
45. 有限元弹性网线法造型理论及应用	励振纲(306)
46. 关于参数多项式曲线的一个定理	熊火轮(321)

含铝、钛合金高温钎焊时的表面反应

制造工程系 庄鸿寿

緒 言

根据经典的理论,钎焊时为了获得良好的润湿性,必须充分去除被钎焊件表面的氧化物。铝、钛对氧的亲和力很大。含铝、钛的合金真空加热时是否也发生氧化反应?它对钎料的润湿性究竟有多大的影响?这些都是需要研究解决的问题。本文利用俄歇谱仪、二次离子谱仪、真空热天平、扫描电镜对含铝、钛的镍基合金和铁基合金在真空加热时的表面反应和润湿过程进行了研究。

所采用的基本金属和钎料成分列于表1°。

表1 基本金属和钎料成分

	C	Cr	Al	Ti	Mo	Co	Fe	Ni	P	Au
镍基合金	<0.1	14.9	1.8	1.8	2.9	-	<0.5	余量	-	-
铁基合金	0.02	-	-	1.6	4	12	余量	18	-	-
BNi-7	-	13	-	-	-	-	-	余量	10	-
BAu-4	-	-	-	-	-	-	-	18	-	82

试件于加热前进行抛光,真空加热时的真空度为 2×10^{-6} 毫巴。

1. 镍 基 合 金

用俄歇谱仪研究表明,镍基合金真空加热前各元素沿深度的分布如图1所示。合金表面层由O、Cr、Ni、Al和Ti等组成。氧化层的厚度约为 $2 \sim 2.5nm$ 。表面的碳是由于污染而造成的。经 $1000^{\circ}C$ 真空加热后的各元素沿深度的分布如图2所示。此时合金表面由氧化铝组成,其厚度约 $10nm$ 。此表明,合金表面的铝在真空加热过程中发生氧化。经 $1150^{\circ}C$ 真空加热后的合金元素沿深度的分布如图3所示。此时,氧化物厚度又恢复到 $2 \sim 2.5nm$,也就是加热到 $1000^{\circ}C$ 形成的氧化物重新消失。氧化铝消失的原因是由于碳的作用,根据热力学计算,反应 $2C + Al_2O_3 = Al_2O + 2CO$ 于 $1150^{\circ}C$ 和 10^{-7} 大气压下的 ΔG 为 -21405 卡,即使假定碳的活度为 0.001 时, ΔG 值仍为 -8300 卡。所以,含铝的镍基合金在真空加热到高温时

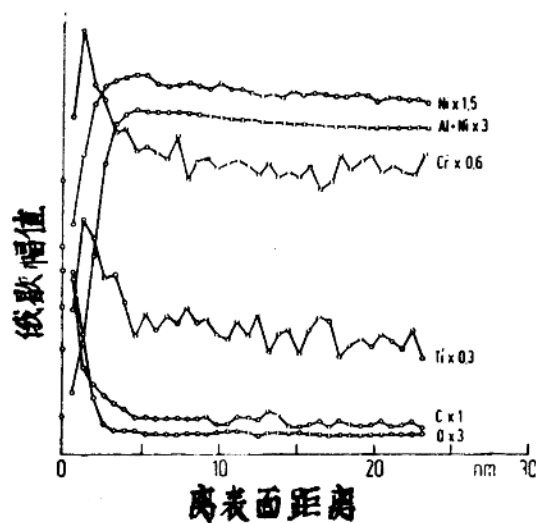


图1 含铝、钛的镍基合金各元素沿深度的分布

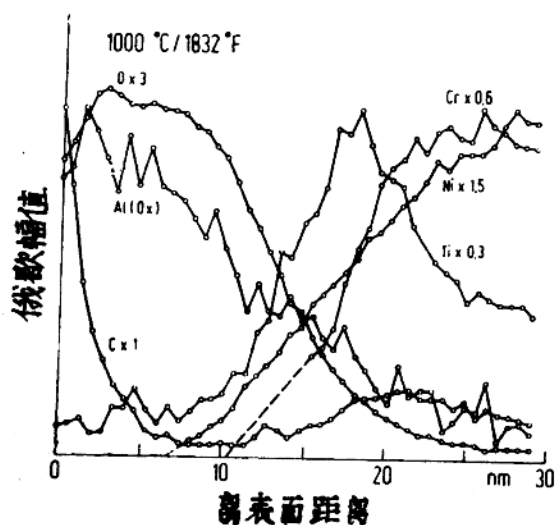


图2 含铝、钛的镍基合金经1000℃真空加热后各元素沿深度的分布

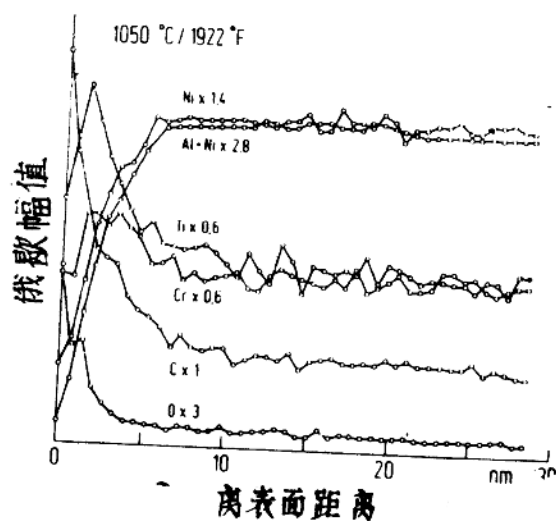


图3 含铝、钛的镍基合金经1150℃真空加热后各元素沿深度的分布

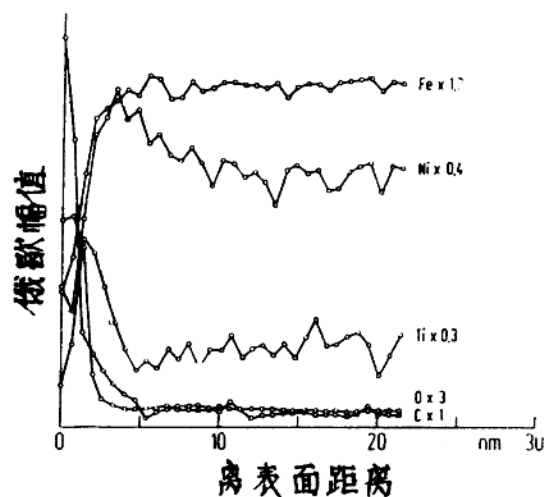


图4 含钛的铁基合金各元素沿深度的分布

(如1150℃)，在较低温度下形成的氧化铝被还原成低价氧化铝，此低价氧化铝挥发而消失。合金表面的钛，由于铝的保护作用而不发生氧化。含铝、钛的镍基合金于1000℃真空加热后的合金表面呈微黄色，而经1150℃真空加热后的合金表面又恢复到白亮色。

2. 铁 基 合 金

铁基合金真空加热前的各元素沿深度的分布如图4所示。氧化层的厚度约2nm。合金表面层由 $Fe \cdot Ni \cdot Ti \cdot O_2$ 等组成。表面的碳是由于污染而造成的。经1000℃真空加热后的各元素沿深度的分布如图5所示。此时氧化层的厚度提高到50nm。为了确定表面化合物的构成，用二次离子谱仪进行了分析，其结果如图6所示。该图表明，表面层由 TiC^+ 、 TiN^+ 和 TiO^+ 组成，也就是说主要是碳化钛、氮化钛和氧化钛。该合金在真空加热过程中主要产生钛的氧化和氮化过程。1150℃真空加热后的各元素沿深度的分布（图7）表明，氧化层的厚度继续增长，达到150nm。含钛的铁基合金和含铝、钛的镍基合金真空加热时的表面反应不同。含钛的铁基合金，即使真空加热到较高温度，表面上钛的化合物没有消失，而是继续发展。从试样表面的颜色也可以看出，含钛的铁基合金在1000℃真空加热后的表面呈兰色，1150℃真空钎焊后的表面呈兰灰色。

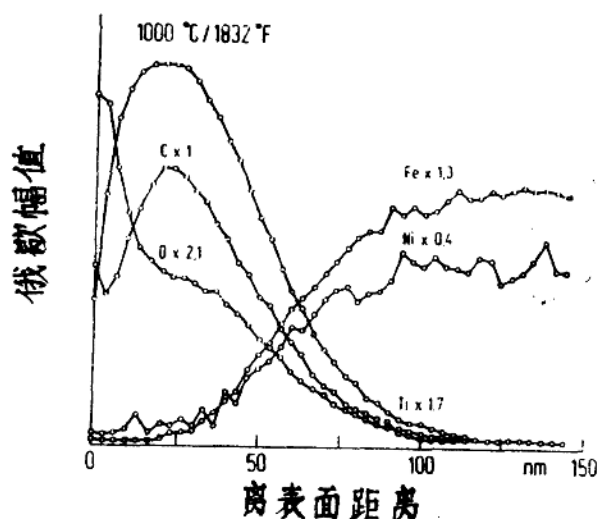


图5 含钛的铁基合金1000℃经真空加热后各元素沿深度的分布

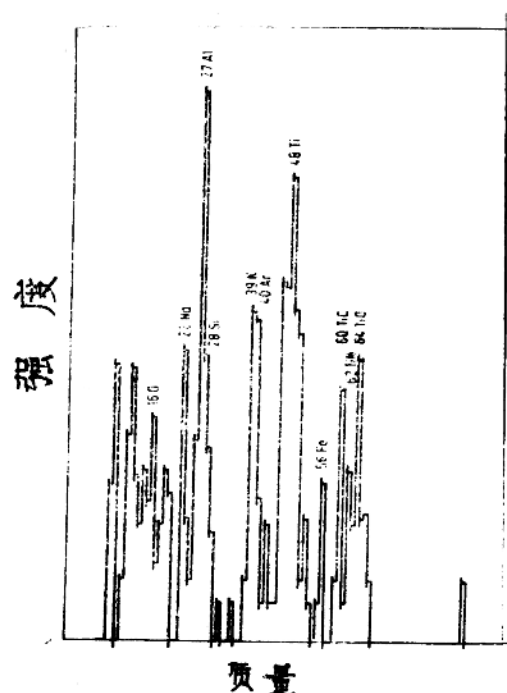


图6 含钛的铁基合金经1000℃真空加热后表面的二次离子质谱分析

3. 润 湿 性

上述研究表明,含铝、钛的镍基合金和含钛的铁基合金在真空加热过程中,(1000℃),表面均发生一定程度的氧化或氮化。此化合物层对钎料的润湿性究竟有多大的影响?为此,用BNi-7和BAu-4钎料在1000℃下分别钎焊了上述两种合金。试验表明,钎料具有极好的润湿性,钎料的润湿角小于10°,这就是说,这类合金在真空加热过程中形成的薄氧化膜或氮化膜并不影响钎料的润湿。

为了进一步研究钎料的润湿过程,将镍基合金在 10^{-2} 毫巴低真空中,于1000℃温度下预先氧化,铁基合金在 10^{-4} 毫巴真空度下于1150℃温度下预先氧化,然后在1000℃下用BNi-7钎料堆钎。钎焊后的钎焊层组织如图8所示。从此图可以看到,在钎料和基本金属之间有一层以破裂状态呈断续分布的薄膜。这就是说,合金表面的薄膜在加热过程中发生破裂,钎料通过裂缝润湿基本金属,并在其表面上流散。

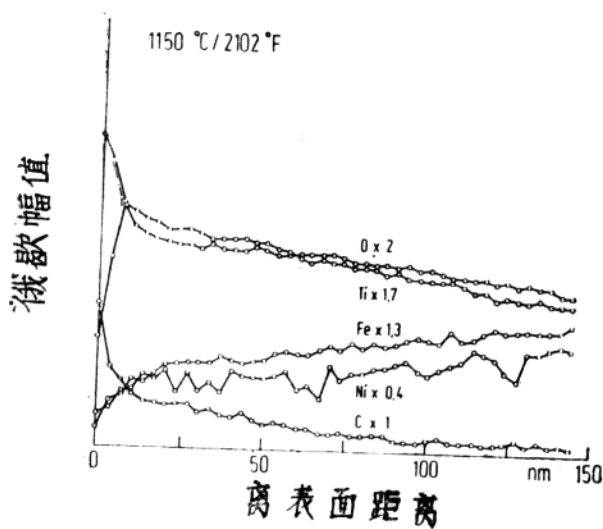


图7 含钛的铁基合金经1150℃真空加热后各元素沿深度的分布

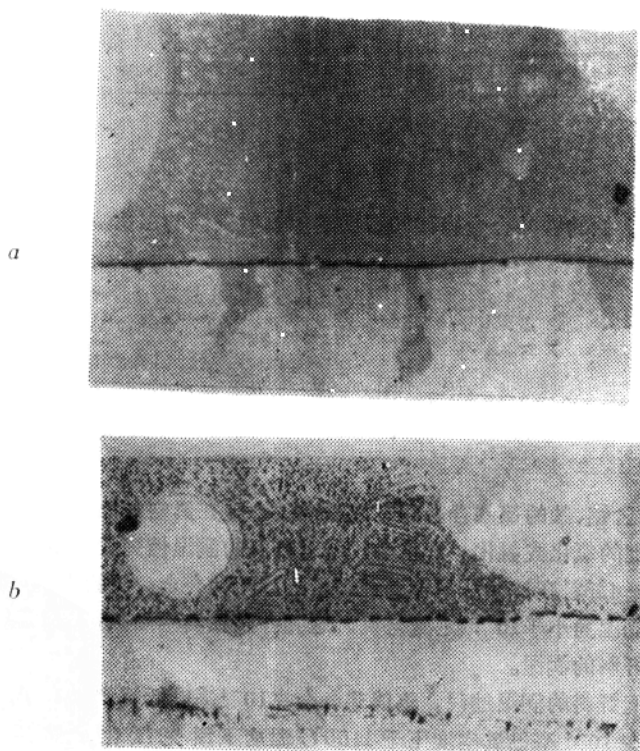


图8 钎料和基本金属之间的薄膜 $\times 100$

a——镍基合金—BNi—7

b—铁基合金—BNi—7

4. 結 論

1. 含铝、鈦的镍基合金真空加热时表面层的铝发生氧化，加热到1150℃后，此氧化铝层消失。
2. 含鈦的铁基合金真空加热时表面生成氧化鈦、氮化鈦，该层厚度随着真空加热温度的提高而增厚。
3. 真空焊时，表面形成的薄氧化膜或氮化膜并不影响钎料的润湿性。

关于铝合金焊缝的羽毛状组织

制造工程系 邹莱莲 丁松福

一、前言

铝镁合金钨极氩弧焊缝的光底片上,常常会出现条带状的“黑线”、“白线”。这些“黑(白)线”一般处于焊缝中心部位,沿焊缝长度方向达数毫米至数十毫米,宽约数毫米,人们往往将此误认为一种焊接缺陷,1980年,日本学者松本二郎曾论述了该现象的本质,并引证了仙田富男、松田福久所提出的论点,认为这是由于焊缝中形成了所谓羽毛状组织所致,但是,他们的试验是以5083板材表面堆焊(不加填充焊丝)为基础的,与实际生产中施焊情况有较大出入,此外,他们对于羽毛状组织的微观分析(如各组织在焊缝中的比例、各成分的偏析情况等)尚不够,而国内对此问题未见研究,本文以我国航空焊接生产中出现的类似问题为依据,改变各种施焊条件,焊接了大量试片,并分析、比较了从产品上截取的试样,试验结果表明,铝镁合金焊接生产中,焊缝 x 光底片上出现的“黑(白)线”,与不加填充焊丝的板材表面堆焊时一样,也是由于焊缝中产生了羽毛状组织所引起,而并非裂纹、夹杂、未焊透等焊接缺陷。

本文除了证实焊缝中确实存在羽毛状组织以外,还发现,羽毛状组织中,往往存在有不少显微空洞,在“黑线”清晰可见的试件中,其金相磨片中往往有气孔存在,这可能会引起焊缝塑性下降。

二、试验材料及试验方法

试验材料:焊接母材采用LF3铝镁合金(主要成分为:3.2~3.8% Mg ,0.3~0.6% Mn ,0.5~0.8% Si),试件尺寸:1.8 $\times$ 150 $\times$ 500毫米,焊丝成分同母材,直径为2.5毫米。试件与焊丝焊前均经过化学清理。

试验方法:采用琴键式夹具和带槽的不锈钢垫板,以自动钨极氩弧焊焊接对接接头,试件焊后进行 x 光检验,以 x 光底片测定焊缝中“黑(白)线”的长度,然后选择典型焊道截取金相试样进行组织观察以及成分分析等。

三、焊接条件对形成“黑(白)线”的影响

本试验通过改变焊接电流、焊接速度、送丝方式以及钨极一焊丝的角度等参数共焊接63对试件,研究了上述因素对焊缝中“黑(白)线”的影响,部分试验结果如表1所示。

由表1可知,一般,“黑”、“白”线常相伴出现,而“黑线”出现的倾向稍大,故下面以分析“黑线”为主。当焊速为300—309毫米/分,送丝频率为1.5—3.2次/秒,焊缝 α 光底片上的“黑线”长度将随焊接电流的增加而减小,图1是由表1的数据所得的示意图,由图可知,在满足焊缝成形良好的条件下,焊接电流从110安增加至160安时,其“黑线”的平均长度由17毫米降为6.8毫米,同理也可作出“黑线”长度与焊接速度的关系图(见图2),由此可见,当焊接电流为140安、送丝频率为2—3.2次/秒时;其“黑线”长度将随焊接速度的增加而有减小的趋势。

此外,由表可见,随着送丝频率的减小,焊缝 α 光底片上的“黑线”却有增加的倾向。

表1 焊接参数对“黑(白)线”的影响

试件号	送丝频率 f (次/秒)	焊接电流 I (安)	电弧电压 U (伏)	焊接速度 V (毫米/分)	“黑线”长度 (毫米)	“白线”长度 (毫米)
28	1.5	140	22	390	18	4
29	1.5	140	22	390	17	无
41	1.5	140	23	300	38	1
42	1.5	140	23	300	16	2
15	1.7	110	24	303	22	4.5
17	1.9	120	23	300	20	1
18	1.9	120	23	300	19	无
19	1.9	120	23	300	21	3
20	1.9	110	23	300	12	无
43	2.0	140	23	300	13	3
44	2.0	140	23	300	8	4
49	2.0	120	23	302	25	5
50	2.0	120	23	302	7	1
51	2.0	120	23	302	34	9
52	2.1	120	23	309	9	4
53	2.1	120	23	309	16	无
35	2.1	120	21	307	18	2
36	2.1	120	21	307	无	无
8	2.1	120	23	302	30	6
21	2.2	140	23	270	10	无
22	2.2	140	23	270	18	无
9	2.4	140	23	302	10	无
30	2.4	140	21.5	347	13	无
45	2.4	140	23	300	9	无
46	2.4	140	23	300	12	无
23	2.6	140	23	333	6.8	7
24	2.6	140	23	333	15	4
25	2.6	140	23	420	无	无
39	2.6	140	23	415	12	3
40	2.6	140	23	415	4	1
10	2.7	160	23	302	4.6	无
11	2.7	160	23	302	9	1
31	2.9	140	21	443	4	无
32	2.9	140	23	415	13	1
47	3.0	140	23	300	19	6
48	3.1	140	23	300	13	无
33	3.2	140	23	440	8.6	1
34	3.2	140	23	440	8	无

注:送丝方式:机械脉冲送丝

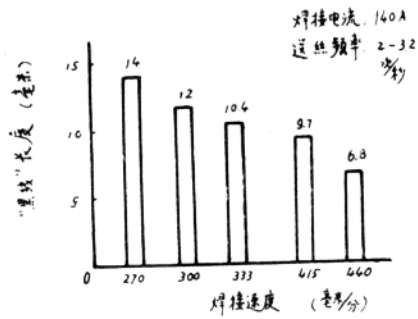


图1 “黑线”长度—焊接电流的关系

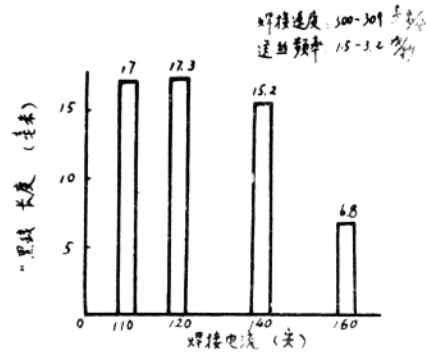


图2 “黑线”长度—焊接速度的关系

四、焊缝光底片上“黑（白）线”的实质

对所焊试件进行 x 光检验时发现，当 x 光垂直于工件进行透视时，往往会在 x 光底片的焊缝中心部位附近出现“黑（白）线”（见图3）。由照片可见，“黑”、“白”线往往相伴出现，把焊缝加强高及根部焊漏镢除后，“黑（白）线”依然存在，但当改变 x 光透视角度，以一定角度分别从两侧对焊缝透视时，则 x 光底片上往往不再出现“黑（白）线”，根据以上事实，为进一步探明“黑（白）线”的实质，分析比较了 x 光底片与试件，分别截取与 x 光底片中有无“黑（白）线”相应的试件进行金相分析，共磨制不同情况下的平剖面、横剖面以及纵剖面的金相试片30块。

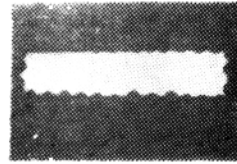


图3 某工件上焊缝 x 光底片

所有的金相磨片均未见裂纹、夹杂、未熔合等缺陷，也未见密集气孔，不论试片为哪种情况，大多数试片均能观察到弥散分布的微气孔，一般以 x 光底片上有“黑线”的焊缝中为多，但气孔直径均小于0.2毫米，通常不能为 x 光透视显示。

金相组织分析可见，有“黑线”或“白线”的试件中，在焊缝的中心部位往往存在一种呈放射状的组织（见图4），放大观察时，则见到呈规则排列的组织，可称羽毛状组织（以下称羽毛状晶）（见图6，7）。而图7为正常焊缝中的组织，其中却没有上述的羽毛状晶。

为了进一步查明羽毛状晶的特点，对试样进行了电子探针成分分析，图8为不同组织的成分变化曲线，除此以外，还作 Fe 、 Mn 元素的分析，结果表明，各元素在不同组织中的变化相似。表2所列为 Fe 、 Mg 、 Mn 、 Si 四种元素在焊缝不同组织中的定量分析结果，由表可见，不论哪种组织，均存在晶界偏析，其中以 Fe 较显著，此外，一般说，元素在羽毛状晶中偏析稍多于柱状晶。

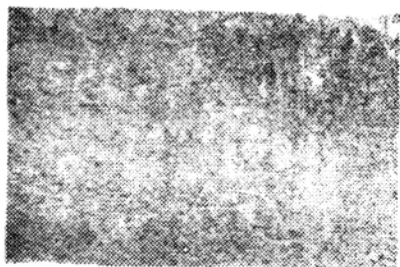


图4 试件中的羽毛状组织 $\times 35$

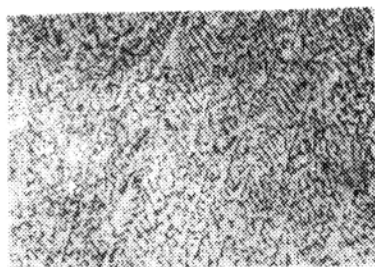


图5 “白线”处组织 $\times 150$

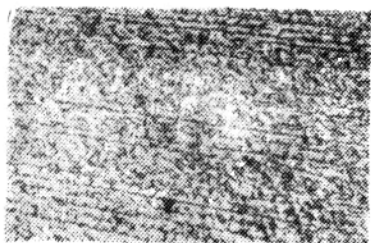


图6 “黑线”处组织 $\times 150$

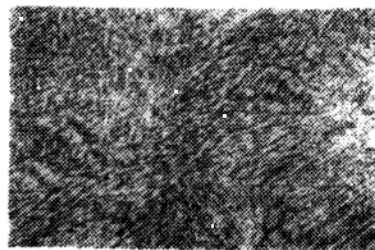


图7 α 光底片上无任何阴影的组织 $\times 150$

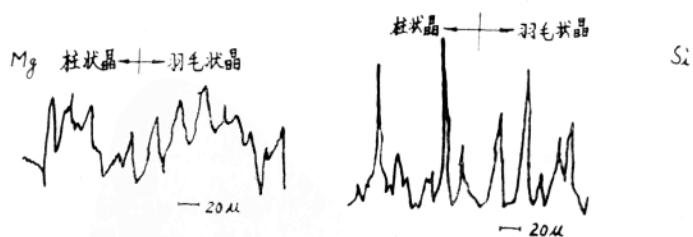


图8 焊缝中不同组织的成分变化

表2 焊缝中不同组织的成分分析

	Fe (%)			Mg (%)			Mn (%)			Si (%)		
	晶内	晶界	平均	晶内	晶界	平均	晶内	晶间	平均	晶内	晶间	平均
羽毛状晶	0.039	0.236	0.1376	3.3786	4.1041	3.741	0.365	0.422	0.394	0.16	0.187	0.174
柱状晶	0.0324	0.1584	0.0954	2.5689	3.822	3.195	0.310	0.5565	0.433	0.149	0.192	0.171

众所周知，当 x 射线穿过晶体时会产生吸收和散射， x 射线的衰减与经过物体中的距离成正比，也与吸收元素的原子序数成比例，虽然羽毛状晶中的元素偏析稍多于柱状晶，但相差甚微，故对 x 射线的吸收影响不大；其次考虑其散射， x 射线穿过等轴晶、柱状晶时， x 光的散射是紊乱的，因而不影响底片上的反差，而焊缝中的羽毛状晶却是以一定角度规则排列的组织，它将使 x 光的散射线具有相同的相位，一方面由于散射会减弱对底片的感光而形成“白线”，另一方面，呈规则散射的波又增强了相邻部位的 x 射线，使底片上出现“黑线”；故一般有羽毛状晶的焊缝中，其光底片上常常“黑、白线”相伴出现，由于它们是散射线所致，因此呈现为具有一定宽度、不很清晰的线条。

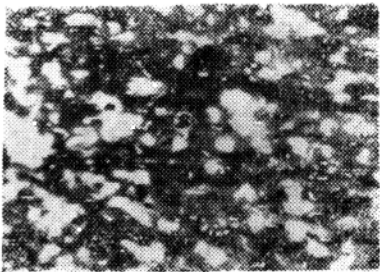


图9 羽毛状晶中的微气孔

通常，在含有羽毛状晶的焊缝的 x 光底片上，“黑线”常多于“白线”，这是因为，在羽毛状晶中往往有显微空洞存在（见图9），这些空洞会使 x 光的衰减程度减小，因而抵消了规则散射引起的衰减程度，从而减小了在 x 光底片上出现“白线”的可能性，却使出现“黑线”的倾向加大，若把 x 光底片上呈现“黑线”部位的相应焊缝金属锉去再补焊，则由于羽毛状晶不复存在，因而若再以射线检测时，就能得到无“黑线”的 x 光底片。

五、关于铝合金焊缝中的羽毛状晶

1. 焊缝中羽毛状晶的生成条件

根据结晶理论，焊缝组织的结晶形态主要取决于合金中的溶质浓度 C_0 、结晶速度 R 和液相中的温度梯度 G 的大小，当溶质浓度一定时，温度梯度大、结晶速度小易生成柱状晶，反之则易生成等轴晶。焊接薄件时，其温度梯度 G 可由下式表示：

$$G = 2\pi\lambda C\rho(h/Q)^2V(T_m - T_0)$$

式中， λ ：导热系数（卡/cm·秒℃）； C ：比热（卡/·℃克）； ρ ：密度（克/cm³）；