

钛合金文集

(一九七八)

钛合金文集编辑组 编

上海科学技术文献出版社

前 言

一九七八年五月，在江苏省丹阳县召开了冶金部第三届钛合金学术交流会。参加会议的六十多个单位共提交了一百余篇学术报告，这些报告反映了我国近几年来钛合金科研、生产和应用方面的一些成果。

会议领导小组决定由宝鸡有色金属研究所、上海钢铁研究所、冶金工业部有色金属研究院、中国科学院金属研究所、沈阳有色金属加工厂和抚顺钢厂组成文集编辑小组，对会议推荐的文章进行了审编，并出版。本文集共收录了 28 篇文章，可供科研、生产和教学的有关工作人员参考。

本文集是遵照“百花齐放、百家争鸣”的方针编辑的，在学术观点和文章结构上未作大的修改。由于我们水平所限，缺点、错误在所难免，希望批评指正。

钛合金文集编辑小组

一九七八年十二月

目 录

TC ₄ 合金中的亮条.....	1
TC ₄ 合金中含氧量与性能的关系.....	16
TC ₄ 合金热处理制度的研究.....	31
热处理制度对 TC ₄ 合金轧棒组织及性能的影响.....	42
TC ₄ 合金的高速锤挤压组织.....	55
TC ₄ 合金饼材试验总结.....	69
TC ₄ 合金锻造饼材组织的研究.....	81
钛合金饼材热加工工艺的改革.....	88
TC ₄ 合金蠕变和持久强度的研究.....	98
TB ₂ 合金铆钉丝性能的研究	102
TB ₂ 合金铆钉应用研究	110
TB ₂ 合金固体发动机壳体试制及试车总结	129
Ti-5621S 合金轧饼研制	135
Ti-5621S 合金轮盘断裂分析	143
IMI-679 合金棒材挤压和轧制	156
IMI-679 合金棒材热处理工艺试验	167
提高 Ti-7Al-4Mo 合金扭转性能的研究	175
超低温新型钛合金的探索	184
Ti-32Mo 合金粉末冶金工艺及异型件研制	190
含钼钛合金中钼夹杂的消除	200
带材粉末轧制工艺的研究	211
钛的离子氮化	217
钛的阳极化处理	225
钛包铜棒材的静液挤压	233
钛合金焊接气孔的研究	240
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn 合金的相变	249
近 α 钛合金硅化物相电子衍射分析	258
钛合金中界面相的研究	263

TC₄ 合金中的亮条

上海钢铁研究所

国外已大量使用钛合金作为飞机机身及发动机上的结构材料,显著减轻了飞机的重量,从而提高了功效。

我国试制的 915 航空发动机中用了大量的钛合金,主要是 TC₄(Ti-6Al-4V) 钛合金。用它作低压气机的各级转子叶片、盘、风扇叶片、静子叶片、封严圈以及支承座等零件。在使用过程中发现各厂家生产的 TC₄ 钛合金轧棒和锻件中有亮点亮条存在。经过零件坯料逐段低倍检验,发现不同炉号存在的亮条数量比例不一,由 1%~20%,现将收集到的叶片坯料中一些炉号检验后发现亮条数量的情况列于表 1。

表 1 一些炉号 TC₄ 钛合金叶片
坯料上亮条数量情况

炉 号	坯 料 长 (毫米)	检查块数	有 亮 条 块 数	有亮条占 百 分 比 (%)
71642	65~70	550	36	~6.5
773117	65~70	1020	47	~4.6
71904	65~70	827	9	~1.1
71905	65~70	700	2	~0.3
71910	65~70	971	12	~1.2
A 14-87	~600	59	9	~15
A 14-197	~600	56	9	~16
A 14-198	~600	56	4	~7
A 14-199	~600	55	1	~2
A 14-200	~600	63	6	~10
A 14-201	~600	67	3	~4.5
A 14-203	~600	66	1	~1.5
A 14-204	~600	64	1	~1.6
A 14-205	~600	55	5	~9
A 14-206	~600	65	7	~11
A 14-208	~600	72	11	~15
71-12 D4	~600	20	2	10
71-12 D12	~600	62	6	~10
71-12 D21	~600	64	2	~3
71686	~600	82	17	~20
1534-009	~600	93	2	~2.1

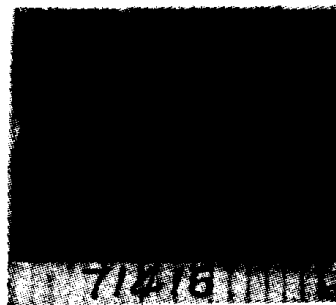
这些亮条是什么东西?如何产生的?对机械性能有那些影响?如何消灭?这一系列问题都是需要解决的。近三年对以上问题进行了一些研究,工作分为两大部份,第一部份是对发现的亮条进行分析检验,主要弄清亮条是什么东西及对合金性能的影响。第二部份是进行了一些试验工作来探索亮条出现的原因。

一、对亮条的分析检验

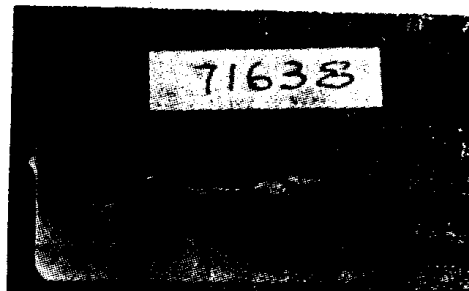
收集了各厂生产的有亮条的 TC₄ 钛合金近 30 个炉号,对以下项目进行了分析检验工作:

1. 低倍组织

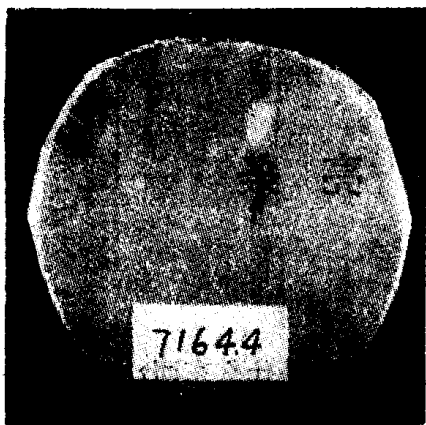
一些炉号低倍组织见图 1。



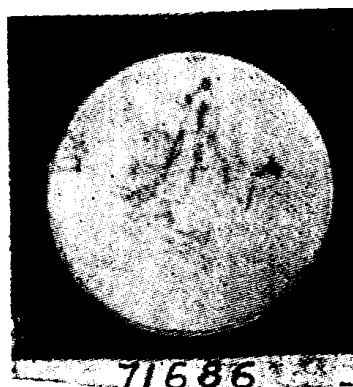
a.



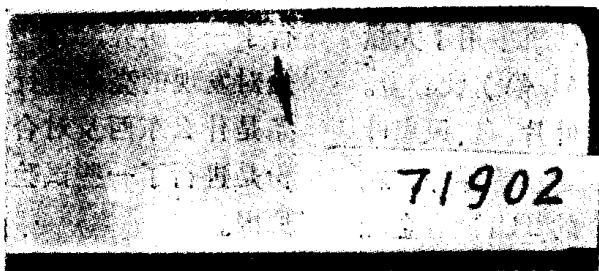
b.



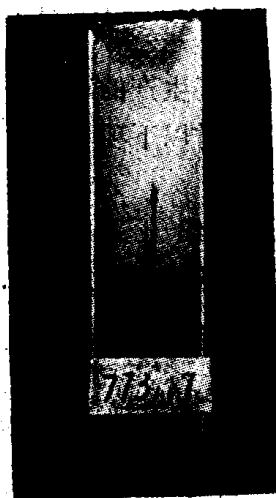
c.



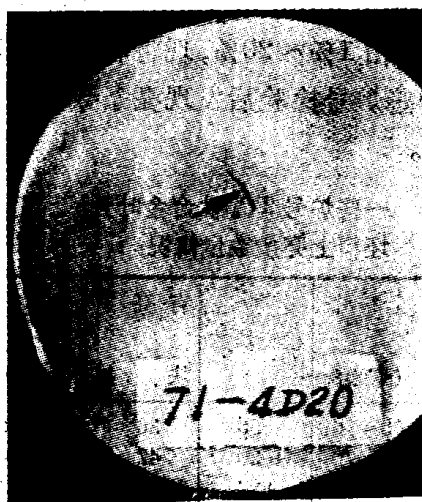
d.



e.



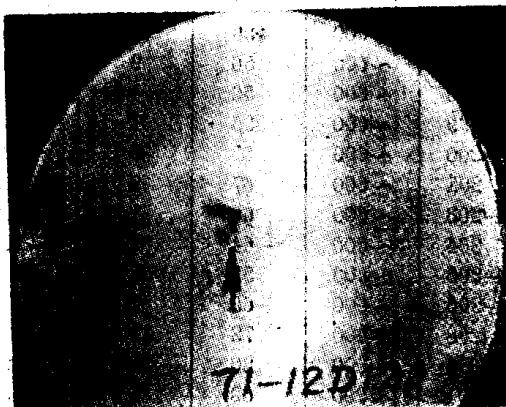
f.



g.



h.



i.

图1 亮条低倍组织

2. 高倍组织

一些炉号高倍正常组织及亮条组织见图 2。

3. 测定正常区及亮条区主要化学成份 Al、V 的变化情况

用电子探针测出的 Al 和 V 的变化情况列入表 2, 一些炉号所测 Al、V 变化情况见图

3。从表 2 中看到大部份炉号亮条区的 Al 和 V 都偏低, 有一些炉号无变化。又用离子探针测了一些炉号的 Al、V、O、N、C、Si 和 Fe 的变化情况, 数据列入表 3。

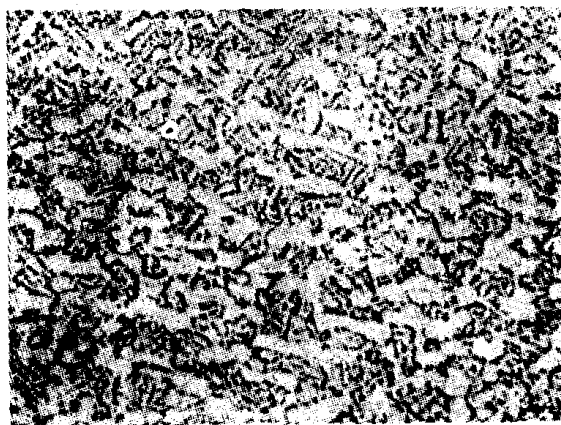
将表 2 及表 3 相比较, 看到电子探针和离子探针所测得的 Al 和 V 的变化情况是一致的。



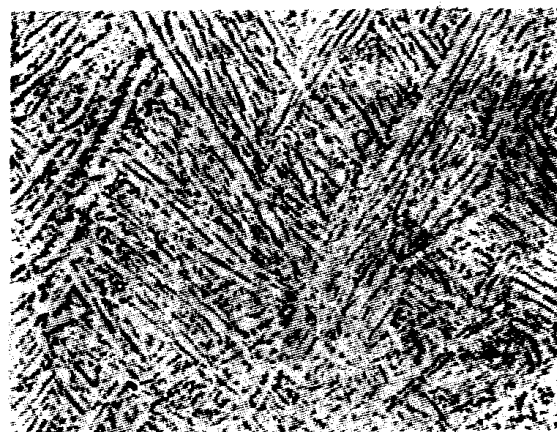
a. 71416 炉号正常组织 ×500



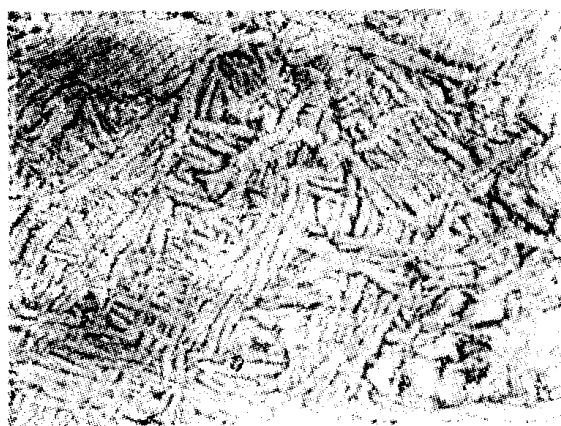
b. 71416 炉号亮条组织 ×500



c. 71638 炉号正常组织 ×500



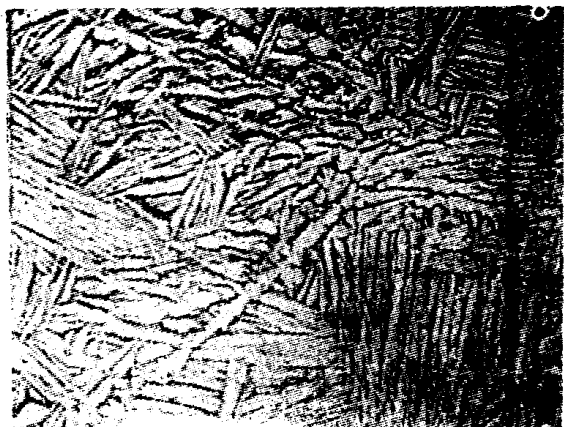
d. 71638 炉号亮条组织 ×500



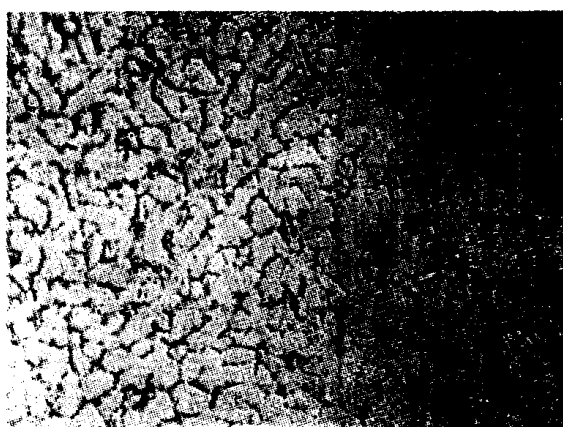
e. 71644 炉号正常组织 ×500



f. 71644 炉号亮条组织 ×500



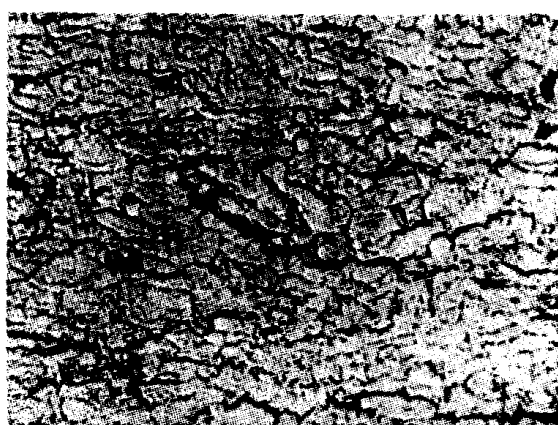
g. 71686 炉号正常组织 ×500



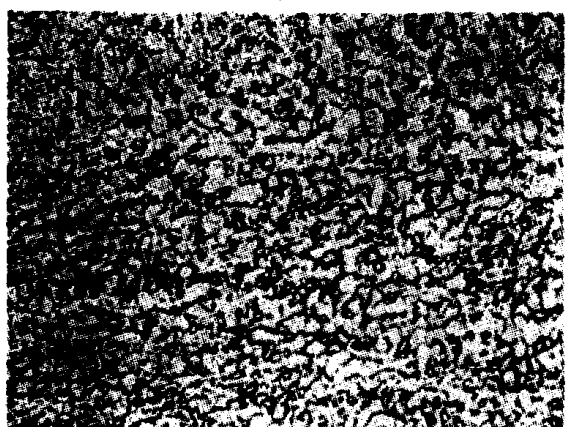
h. 71686 炉号亮条组织 ×500



i. 71902 炉号正常组织 ×500



j. 71902 炉号亮条组织 ×500



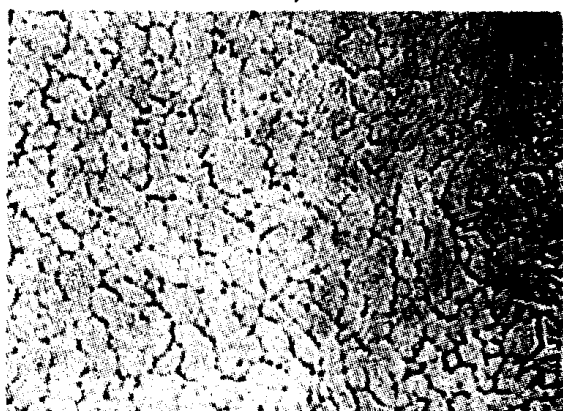
k. 773117 炉号正常组织 ×500



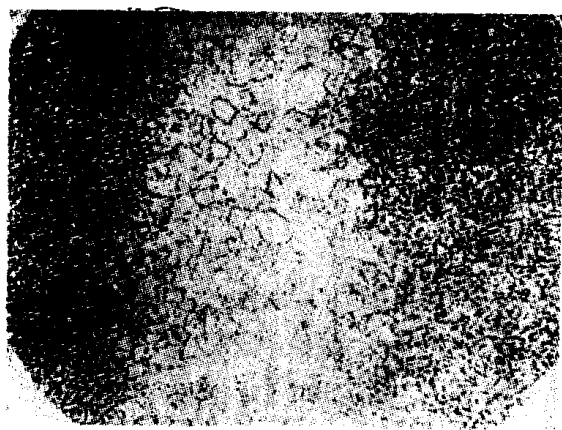
l. 773117 炉号亮条组织 ×500



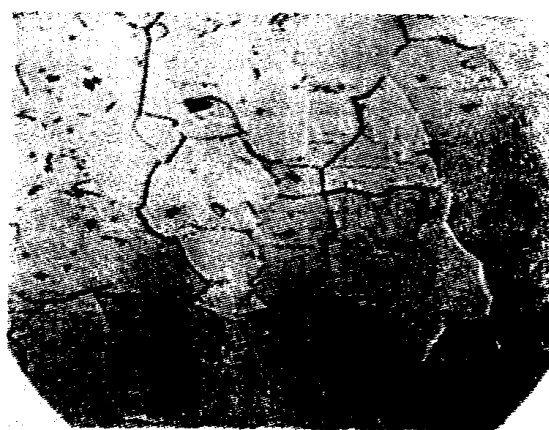
m. 71-4D20 炉号正常组织 ×500



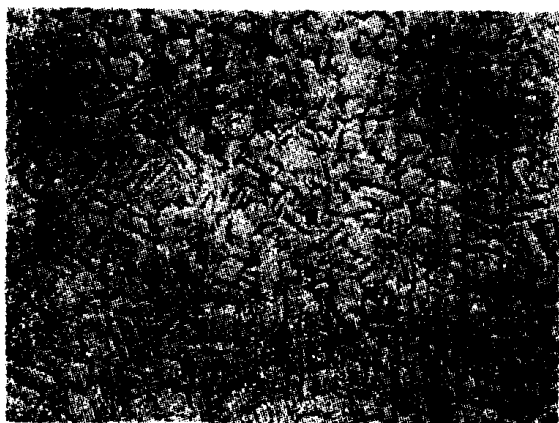
n. 71-4D20 炉号亮条组织 ×500



o. 71-7D7 炉号组织, 中间为亮条组织 $\times 100$



p. 71-7D7 炉号亮条组织 $\times 500$



q. 71-12D12 炉号正常组织 $\times 500$



r. 71-12D12 炉号亮条组织 $\times 500$

图2 高倍正常组织与亮条组织

表2 电子探针测定结果

炉 号	电 子 探 针 测 定 情 况	炉 号	电 子 探 针 测 定 情 况
71416	亮区化学成份与基体基本无差异。	71-9D9	亮区 Al 含量为基体的 44%, V 含量无变化, 亮区 C 含量比基体增加 110%, [N] 含量增加 125%。
71418	亮区化学成份与基体基本无差异。	71-12D12	亮区 Al 含量为基体的 12%, V 含量为基体的 28%, [N]、[O] 含量未测。
77638	亮区化学成份与基体基本无差异。	71-9D10	亮区 Al 含量为基体的 60%, V 含量为基体的 32.4%。
71644	亮区化学成份与基体基本无差异。	71-12D21	亮区 Al 含量为基体的 24%, V 含量为基体的 55%。
522-357	亮区化学成份与基体基本无差异。	A14-87	亮区 Al 含量为基体的 68%, V 含量为基体的 19%。
71-12D4	亮区化学成份与基体基本无差异。	A14-93	亮区 Al 含量为基体的 81%, V 含量为基体的 36%。
71686	亮区 Al 含量为基体的 36%, V 含量为基体的 26%。	A14-197	亮区 Al 含量为基体的 64%, V 含量为基体的 22%。
71902	亮区 Al 含量为基体的 25%, V 含量为基体的 111%。	A14-200	亮区 Al 含量比基体稍低, V 含量为基体的 64%。
71910	亮区 Al 含量为基体的 69%, V 含量为基体的 51%。	A14-205	亮区 Al 含量与基体无差异, V 含量为基体的 64%。
773117	亮区 Al 含量为基体的 57%, V 含量为基体的 30%。	A14-206	亮区 Al 含量与基体无差异, V 含量为基体的 50%。
522-357	亮区 Al、V 含量皆比基体低。	71642	基体 Al=6.25%, V=4.26%, 亮区 Al=3.4%, V=1.5%, [N]、[O] 含量未测。
522-359	亮区 Al 含量为基体的 46%, V 含量为基体的 37%。	71682	基体 Al=6.44%, V=4.28%, 亮区 Al=3.4%, V=1.2%, 亮区 C 含量比基体增加 245%, [N] 含量增加 320%, [O] 含量增加 73%。
71-4D12	亮区 Al 含量为基体的 86%, V 含量为基体的 72.5%。		
71-4D14	亮区 Al 含量为基体的 60.7%, V 含量为基体的 45.2%。		
71-4D20	亮区 Al 含量为基体的 76%, V 含量为基体的 242%。		
71-7D7	亮区 Al 含量为基体的 38.8%, V 含量无差异, [N][O] 含量未测。		

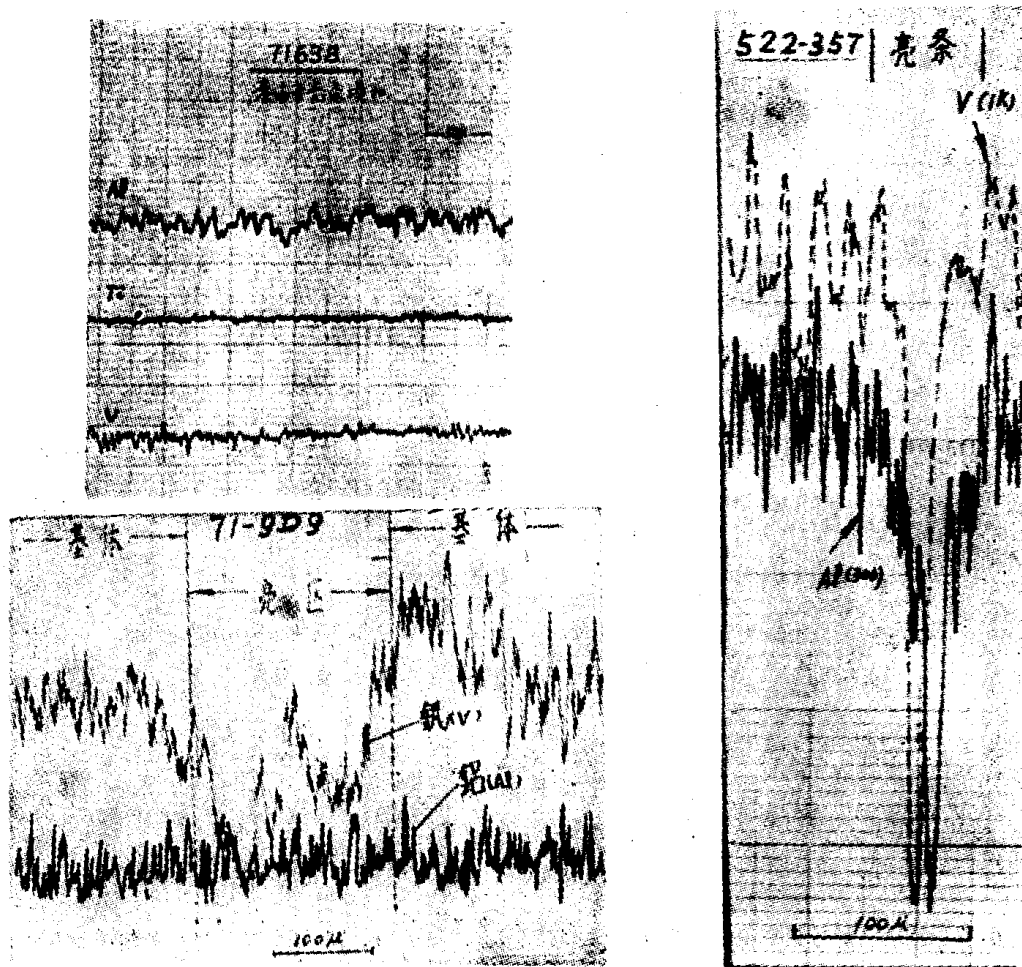


图3 电子探针扫描曲线

表3 离子探针测定结果

炉 号		元 素						
		C ₁₂	N ₁₄	O ₁₆	Al ₂₇	Si ₂₈	V ₅₁	Fe ₅₆
		能 量 相 对 强 度						
71418	基体	7.3×10^{-3}	3.3×10^{-2}	4.0×10^{-2}	1.5	4.0×10^{-3}	3.7×10^{-1}	6.7×10^{-4}
	变化	6.2×10^{-3} -15%	3.5×10^{-2} +6%	3.8×10^{-2} -5%	1.1 -27.0%	3.8×10^{-3} -5%	3.8×10^{-1} +3%	7.7×10^{-4} +15%
71642	基体	9.2×10^{-3}	1.3×10^{-2}	3.8×10^{-2}	1.8	1.6×10^{-2}	4.6×10^{-1}	2.7×10^{-2}
	变化	6.6×10^{-3} -28%	8.4×10^{-3} -35%	2.6×10^{-2} -32%	1.0 -44%	1.4×10^{-2} -13%	2.5×10^{-1} -46%	6.3×10^{-3} -77%
71638	基体	5.7×10^{-4}	1.1×10^{-4}	4.1×10^{-2}	2.5	6.1×10^{-3}	7.0×10^{-1}	7.4×10^{-1}
	变化	7.6×10^{-4} +33%	3.3×10^{-4} +220%	4.9×10^{-3} +20%	2.4 -4%	6.5×10^{-3} +3.5%	8.3×10^{-1} +18.6%	1.1×10^{-2} -97%
773117	基体	2.7×10^{-3}	1.2×10^{-3}	1.5×10^{-1}	2.4	9×10^{-3}	4.0×10^{-1}	3.0×10^{-3}
	变化	2.5×10^{-3} -7.4%	3.5×10^{-3} +190%	1.1×10^{-1} -31.4%	3.2×10^{-1} -83%	4.9×10^{-3} -45.4%	1.2×10^{-1} -70%	2.6×10^{-3} -13.4%
71682	基体	2.9×10^{-3}	3.8×10^{-3}	2.6×10^{-2}	4.0	2.3×10^{-2}	6.3×10^{-1}	3.0×10^{-2}
	变化	1.0×10^{-2} +245%	1.6×10^{-2} +320%	4.5×10^{-2} +73%	1.7 -58%	1.2×10^{-2} -52%	3.5×10^{-1} -45%	3.2×10^{-3} -90%
71-9D9	基体	6.2×10^{-3}	1.2×10^{-3}	4.3×10^{-2}	2.4	2.4×10^{-2}	4.5×10^{-1}	2.4×10^{-2}
	变化	1.3×10^{-2} +110%	2.7×10^{-2} +125%	5.2×10^{-2} +21%	1.7 -29%	2.1×10^{-2} -13%	4.3×10^{-1} -5%	2.1×10^{-2} -13%
A14-87	基体	6.3×10^{-3}	7.5×10^{-3}	1.1×10^{-1}	2.0	2.5×10^{-2}	6.3×10^{-1}	1.4×10^{-2}
	变化	8.1×10^{-3} +28.7%	7.5×10^{-3} 0%	1.7×10^{-1} +54.5%	8.7×10^{-2} -56.7%	3.4×10^{-2} +36%	1.1×10^{-1} -82%	1.1×10^{-2} -21.4%
A14-200	基体	2.7×10^{-3}	2.1×10^{-2}	6.4×10^{-2}	3.1	4.3×10^{-3}	3.4×10^{-1}	1.6×10^{-3}
	变化	2.5×10^{-3} -7.3%	2.2×10^{-2} +4.7%	5.8×10^{-2} -9.3%	3.2 +3.2%	4.1×10^{-3} +4.5%	3.0×10^{-1} 1.18%	7.5×10^{-4} -53%

离子探针所测的数据为该元素的能量相对强度,不能作为绝对含量之值,只作为该元素含量之相对比较。

4. 显微硬度的比较

所测正常区与亮条区的显微硬度 (H_V) 之值列于表 4, 从表中看到亮条处的显微硬度有的下降, 有的上升, 有的基本无差别。

5. 机械性能的比较

因受亮条料数量及尺寸的限制, 只对一些炉号进行了室温拉伸, 400°C 高温拉伸及持久的性能测定, 测出结果与正常组织的性能比较示于表 5。

表 4 基体处与亮条处显微硬度 H_V

亮类	条型	炉 号	部位	显微硬度 H _v	比 较	亮类	条型	炉 号	部位	显微硬度 H _v	比 较
第 I 类	71416	基体	364	亮区与基体 无 差 异	71-4D20	基体	283, 315, 315	基本无差异			
		亮区	364			亮区	310, 283, 336				
	71418	基体	335, 364	亮区与基体 差别不大	71-9D10	基体	358, 371, 336	亮区稍高			
		亮区	364, 380			亮区	358, 412, 358				
	71638	基体	349, 329, 349	亮区稍低	71-12D21	基体	310, 329, 321	差异不大			
		亮区	329, 306, 317			亮区	321, 345, 321				
	71644	基体	321, 310, 310	亮区稍高	A14-87	基体	315, 297, 315	亮区稍高			
		亮区	340, 321, 340			亮区	271, 371, 257				
	522-357	基体	310, 299, 321	基体与亮区 无 差 异	A14-93	基体	306, 329, 329	亮区低			
		亮区	310, 306, 329			亮区	239, 244, 262				
	71-12D4	基体	329, 338, 321	亮区稍高	A14-197	基体	335, 322, 315	亮区稍低			
		亮区	355, 349, 345			亮区	298, 304, 298				
第 II 类	71686	基体	282, 293, 298	基本无差异	A14-200	基体	304, 349, 335	亮区稍低			
		亮区	298, 298			亮区	322, 329, 304				
	71902	基体	401, 353, 381	亮区稍低	A14-205	基体	380, 335, 304	亮区低			
		亮区	350, 329, 393			亮区	271, 281, 253				
	71910	基体	317, 321, 345	亮区低	A14-206	基体	310, 310, 306	差异不大			
		亮区	256, 277, 242			亮区	336, 315, 306				
	773117	基体	298, 320, 322	亮区低	71642	基体	322, 364, 357	亮区稍高			
		亮区	240, 257, 267			亮区	434, 388, 380				
	522-357	基体	396, 396, 346	亮区稍低	71682	基体	407, 407, 396	亮区高			
		亮区	348, 321, 316			亮区	435, 524, 540				
	522-359	基体	310, 310, 306	差异不大	71-7D7	基体	383, 394	亮区稍高			
		亮区	310, 279			亮区	409, 420				
	71-4D12	基体	383	亮区高	71-9D9	基体	340, 340, 367	亮区高			
		亮区	464			亮区	435, 453, 447				
	71-4D14	基体	306, 299, 321	亮区稍高	71-12D12	基体	329, 329, 310	亮区高			
		亮区	349, 362, 362			亮区	400, 423, 442				

表5 一些炉号有亮条与无亮条料的机械性能比较

亮条类型	炉号	状态	室 温				400°C 时		
			σ_b (公斤/毫米 ²)	δ (%)	ψ (%)	α_k (公斤·米/厘米 ²)	σ_b (公斤/毫米 ²)	σ_{100}	τ (小时)
第 I 类粗晶	治 标		≥95	≥10	≥30	≥4	≥63	58	>100
	71644	无亮条					67.5		
							66.0		
		有亮条					57.0		
							67.0		
	522-357	无亮条	95.5	16.0	42.0		63.0		
			95.5	16.0	40.0		62.0		
		有亮条	92.5	14.5	37.0		59.0		
			89.5	16.0	40.0		56.0		
第 II 类低 Al 低 V 偏析	71686	无亮条	104.5	13.0	31.0	5.4	65.5	58	>100
			98.0	15.0	36.0	4.9	52.5	58	0
		有亮条	97.0	13.5	32.0	4.9	56.0		
	71902	无亮条	104.0	18.0	27.0		68.0	58	*199:30
			104.5	14.5	33.0		68.5	58	*251:45
		有亮条	101.0	15.5	36.0		63.0	58	*103:50
			101.0	16.5	30.5		62.0	58	*132:25
	71904	无亮条					63.5		
							64.5		
		有亮条					57.5		
							57.5		
	71910	无亮条	101.5	15.0	42.0		69.0	58	*571:05
			104.0	14.0	45.0		69.5	58	*566:0
			101.0	15.0	45.0		69.5		
		有亮条	98.5	13.5	45.0		67.0	58	*121:0
			101.0	14.0	48.0		67.0	58	65:45
			98.0	15.0	42.0		65.5		
	773117	无亮条	101.2	17.1	42.1		67.0	58	278:30
			100.2	13.9	38.1		67.5	58	431:10
		有亮条	100.0	18.0	45.2		61.5	58	86:40
			100.0	15.9	42.8		60.0	58	53:35
	71-12D21	无亮条	97.5	13.0	33.5		64.0		
			96.0	12.0	30.0		63.5		
		有亮条	99.0	12.0	30.5		53.5		
			98.5	11.5	35.5		43.5		
	A14-87	无亮条	98.5	17.2	46.0	5.1	69.7	58	>100
			98.0	17.6	45.5	5.6	71.5	58	>100
		有亮条	^95.0	16.0	42.5	5.1	62.0	58	46:15
			^94.5	16.0	44.0	5.3	62.0	58	2:55
			88.0	17.0	36.0				
			94.5	18.0	48.0				
	A14-200	无亮条	97.0	16.0	40.0	5.0	68.5	58	>100
			96.5	14.8	45.0	5.0	68.5	58	>100
		有亮条	^101.0	18.0	47.0	5.3	70.5	58	*143:30
			^101.5	16.0	44.0	5.3	69.5	58	*141:20
			*98.5	16.5	34.0				
			*97.0	17.0	45.0				

(续表)

亮条类型	炉号	状态	室 温				400°C 时		
			σ_b (公斤/毫米 ²)	δ (%)	ψ (%)	a_k (公斤·米/厘米 ²)	σ_b (公斤/毫米 ²)	σ_{100}	τ (小时)
第 III 类低 Al 低 V 兼 [O][N] 增加偏析	71642	无亮条	110.0	13.5	56.0			64	31:00
		有亮条	107.0	8.0	13.0			64	3:10
	71682	无亮条	124.5	12.0	31.0				
		有亮条	106.5	2.0	7.5	2.4			
	71-9D9	无亮条	107.5	16.0	41.5	4.3			
		有亮条	112.5	10.0	13.0	3.1			
	71-12D12	无亮条	99.0	14.0	42.0		71.0		
		有亮条	102.0	2.0	11.5		62.5		
							64.0		

注: Δ —室拉试样直径 $\phi 10$ 毫米, $\times$ —室拉试样直径 $\phi 5$ 毫米。

*—持久试验 58 公斤/毫米² 应力挂满 100 小时后将应力增至 62 公斤/毫米²。



a. 正常组织塑性断口 $\times 3000$

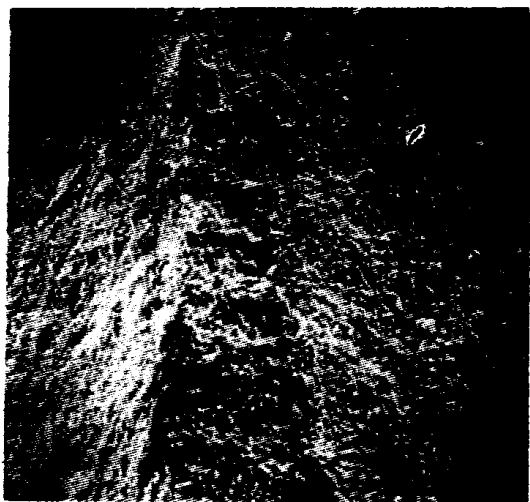


b. 71642 炉号亮区脆性断口 $\times 2200$



c. 71-9D9 炉号亮区脆性断口 $\times 3000$

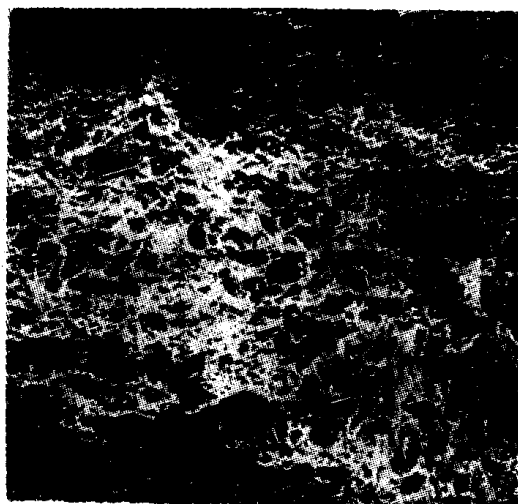
图 4 电镜断口



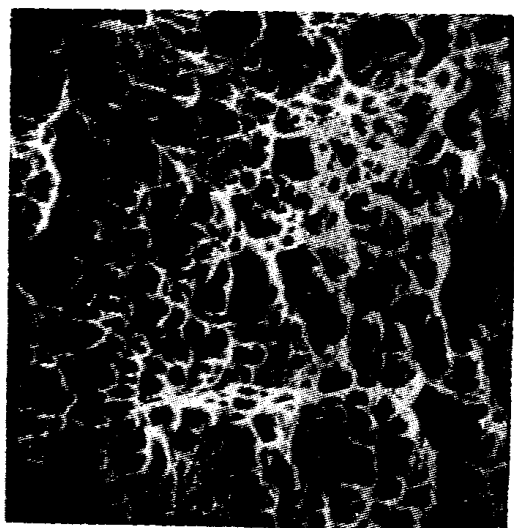
a. 71-9D9 炉号基体与亮条室拉断口 $\times 200$



b. 71-9D9 炉号亮条处脆性断口 $\times 2000$



c. A14-87 炉号基体与亮条室拉断口 $\times 200$



d. A14-87 炉号基体塑性断口 $\times 1000$



e. A14-87 炉号亮条处断口 $\times 1000$

图5 扫描电镜断口

6. 断口分析

用电镜及扫描电镜对一些炉号的拉伸试样断口作了分析(照片见图4、5)。正常组织处的断口皆为塑断,亮条处的断口有的为塑断,有的为脆断。

整理以上的检验结果,从测得的化学成分变化来分,亮条可分为三大类:第一类是亮条处的成份与正常组织处的成份无差异;第二类是亮条处的主要化学成分Al和V有变化;第三类亮条除Al、V有变化外,其间隙元素[O]、[N]也有差异,亮条处的[O]、[N]增高。这三种亮条的特点如下:

第一类:成份无变化的亮条,宏观组织和其他二类无大区别,但高倍组织和其他二类的差别很大。从照片上看到,不论正常区的组织是高温变形组织还是低温变形二相细小组织,而亮区全是平直长条状组织,这种亮条我们认为是粗晶,是在加热过程中由于加热不均或变形不均使局部地区温度升到相变点以上而形成的。它们的显微硬度与正常区相比无差异或基本无差异,但粗晶对机械性

能有影响,对室温强度 σ_b 有较小的影响, δ 和 ψ 有一定程度的降低,对400°C的高温性能影响较大,往往达不到冶标要求。

第二类:由Al、V变化形成的亮条。我们所测得的炉号基本都是低Al低V(据说以前也曾发现过高Al高V的亮条),它们的高倍组织特点是不论正常区的组织为高温变形组织还是低温变形二相细小组织,而亮条组织皆为较等轴的二相组织, α 相量增多, β 相量减少,有的晶粒变短变粗,有的晶界变得十分模糊,有的晶粒长得很大。Al是 α 相稳定元素,V是 β 相稳定元素,它们的变化引起合金相变点的移动及组织的改变,所以随着Al、V含量的变化组织也起变化。低Al低V亮条的显微硬度都有不同程度的下降,室温强度及400°C时的高温强度 σ_b 都下降,但高温强度下降得比室温的多(见表5)。下降的程度和Al、V的减少程度有关,也和亮条所占工作面积多寡有关。做了一个对比试验观察亮条含量对性能的影响,其结果列入表6。

表6 亮条含量对性能的影响

炉 号	室 温						400°C 时			
	亮条量 (%)	σ_b (公斤/毫米 ²)	δ (%)	ψ (%)	亮条量 (%)	α_k	亮条量 (%)	σ_b (公斤/毫米 ²)	亮条量 (%)	58 (公斤/毫米 ²) 持 久
A 14-87	0	98.0	17.6	45.5	0	5.6	0	71.5	0	>100
	×2	94.5	18.0	48.0	9.5	5.1	30	62.0	10	2:55
	△4	94.5	16.0	44.0	12.5	5.3	25	62.0	40	46:15
	×20	88.0	17.0	36.0						
A 14-200	0	97.0	16.0	40.0	0	5.0	0	68.5	0	>100
	×2	97.0	17.0	45.0	3.5	5.3	2	70.5	3	>100
	△2.5	101.5	16.0	44.0	4.0	5.3	2	69.5	3	>100

×— ϕ 5 毫米试样 △— ϕ 10 毫米试样

从表中看到,亮条含量占试样截面5%以下时对瞬时拉伸性能及持久性能影响很小,如占面积大于10%就有比较大的影响了。

这一类亮条对塑性指标 δ 和 ψ 基本无影响,断口也为塑性断裂。至于对疲劳性能及其他一些力学性能有何种程度的影响,需要以后通过实验来确定。

这种 Al、V 成份偏析的亮条如果再经过一次熔炼是可以消除的。将有低 Al 低 V 亮条的 A 14-87, A 14-200, 71-4D20 炉号的 $\phi 50$ 毫米锻棒重新自耗熔化一次, 即再次将化学成份搅拌均匀化一次, 结果锻棒上的亮条全部消失。

第三类: 由间隙元素 [O]、[N] 偏析形成的亮条。这一类亮条的高倍组织特点是不论正常区是何种组织, 亮区都是类 α 单相等轴大晶粒。这主要因为 [O]、[N] 都是 α 相稳定元素之故, 这种亮条的显微硬度比正常组织的要高 (见表 4)。电镜衍射分析, 发现有大量的氮化物及氧化物存在, 它们使硬度增加, 特别是氮化物使硬度增加得更快。资料 [2] 介绍钛的布氏硬度可按下式计算:

$$HB = 196\sqrt{\%N} + 158\sqrt{\%O} + 45\sqrt{\%C} + 20\sqrt{\%Fe} + 57.$$

由此可见 [O]、[N] 这类间隙元素的增加对增高钛合金的硬度影响是很大的。曾熔炼了一支有 [N] 偏析亮条的锭子, 炉号 676062, 亮条处的 H_v 比基体要高二倍以上 (见表 9)。这种亮条对机械性能有影响, 特别对室温拉伸性能影响较大, 使强度 σ_b 增加而塑性 δ 及 ψ 明显下降 (见表 5), 甚至使合金在锻造时产生裂纹。从 676062 炉号试验锭的金相照片上清楚可见 (图 6)。再从断口照片上看, 亮条处为脆断 (解理面或准解理面), 而正常组织区为塑断 (见图 3、4)。但它对高温性能影



图 6 高 [N] 亮条的高倍组织及裂纹炉号 676062 $\times 500$

响不大, 稍使高温强度 σ_b 增加^[3]。因为测得的 [O]、[N] 偏析的炉号全兼有 Al、V 的偏低变化, 在第二类亮条中已谈到 Al、V 偏低的亮条使高温强度降低得比较多, 虽 [O]、[N] 能增加一些高温强度, 但两种因素同时起作用, 所以使所测炉号的高温强度有高有低。至于说这种 [O]、[N] 偏析的亮条经再一次熔化是否可以消除, 因无料做试验, 故还不可下结论, 不过根据^[4]介绍, TiN 的熔点为 2950°C , 比重 5.3克/厘米^3 , VN 的熔点为 2050°C , 比重 6.13克/厘米^3 , TiO 的熔点为 1770°C , 比重 4.93克/厘米^3 , 都比 TiO_2 合金的熔点 1600°C , 比重 4.4克/厘米^3 要高得多, 估计重熔时这一类杂质是不可能消除的。因此这一类亮条的存在对使用来说是非常危险的。

从以上三种类型的亮条特点来看, 第一类粗晶, 是一种热加工缺陷。粗晶对合金的机械性能有影响, 主要对高温性能影响较大, 对室温性能影响较小, 但在以后的热加工过程中只要工艺选用得当, 是可以消除的, 故其为害性就比较小, 但在成品件上是不希望有的。至于第二类第三类由成份偏析引起的亮条, 是一种冶金缺陷, 它们对性能影响较大, 而且在以后的热加工中又不可能消除, 因此, 要寻找其产生的原因并防止其出现。我们认为它们是在熔炼过程中产生的, 那么在熔炼过程中那些因素促使这种缺陷产生呢? 对此进行了一些试验工作。

二、试验——寻找成份偏析亮条产生的原因

钛锭是用海绵钛及中间合金按配比在油压机上压制成电极棒再经二次自耗熔炼而成。自耗熔炼的特点是边熔边凝结, 成份的均匀化主要靠电极中合金料放得比较均匀及在自耗过程中在有限的熔池中搅拌均匀化。一般来讲经过二次自耗熔炼, 化学成份基本可以达到均匀, 但如遇到一些特殊情况, 就可能

出现局部地区成份的变化。例如,压制电极棒用的海绵钛及合金料颗粒大小非常不均,如颗粒极大或放置不均就可能导致钛锭中局部化学成份不均,另外,如电极压制或焊接不牢,在熔化过程中大块掉入熔池来不及化清或搅拌均匀,也能使锭中局部成份不均^[6],随着掉入元素不同,成份偏析可能是低 Al 低 V,可能是高 Al 高 V。另外,如原材料中(海绵钛和 Al-V 中间合金)含有大量的气体元素 [O]、[N],就能出现局部地区 [O]、[N] 间隙元素的偏析(增高),为了证实以上看法我们做了以下的熔炼试验:

1. 电极焊接牢度较差,使其在熔化过程中产生大的掉块,观察是否有亮条出现。在 500 吨油压机上压制 $\phi 60 \times 300$ 毫米电极,每支重 2.5 公斤,海绵钛颗粒度 < 10 毫米,Al-V 中间合金颗粒 < 5 毫米,Al 的配入量为 6.1%,V 为 4.0%,一次钛熔炼时用的电流为 1800A,电压 28~35V,锭直径为 $\phi 100$ 毫米,重 5 公斤。解剖了三只锭子观察化学成份分布情况(见图 7)。然后将六只一次锭头尾相联接,采用炉外手工氩弧焊,有意焊得牢度较差,使其在第二次熔炼过程中容易造成脱落。第二次熔化时用的电流为 3000~3500A,电压为 31~32V,锭直径为 $\phi 160$ 毫米,锭重 30 公斤,锭化学成份列于表 7。锭子头尾成份基本相同,然后锻造成 25×60 毫米扁材,锻造最后一火次加热温度为 940°C ,

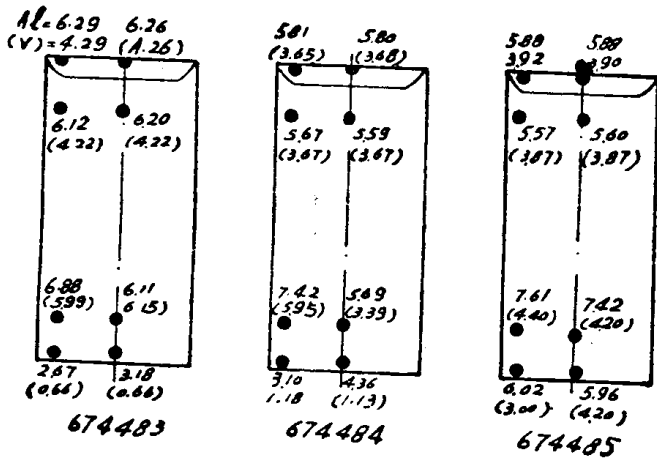


图 7 三只一次锭 Al、V 成份分布情况图

表 7 掉块试验锭化学成份%

炉 号	部位	Al	V	C	Si	Fe	N
775040	头	5.86	3.95	0.03	<0.05	0.11	0.028
	尾	5.94	3.92	0.02	<0.05	0.11	0.026

切成小段检查端面低倍,在一段料中发现有一亮条,如图 8(a)所示。

观察亮条处的金相组织,为不规则的单相组织,兼夹有少量二相条状组织。再看亮条二侧之组织,一侧为杂乱的短片状组织(属魏氏组织),一侧为一片细小的等轴二相组织,初生 α 量比较多,晶粒极细,其他地方则为杂乱的片状组织(图 8(b)所示)。初生 α 较多的细小等轴二相组织只有在相变点以下经大变形才能得到,杂乱的片状组织是在相变点以上也要有较大的变形量才能得到,在很小的一个区域内组织有如此巨大的变化,肯



a. 宏观组织



b. 高倍金相组织 $\times 100$

图 8 掉块试验出现的亮条

表 8 掉块试验料亮条处与基体
部分化学成份之差异情况

部 位	Al	V	N	O
基体 1	1.3	4.6×10^{-1}	7.0×10^{-4}	4.0×10^{-2}
基体 2	9.6×10^{-1}	4.0×10^{-1}	1.2×10^{-3}	6.0×10^{-2}
基体 3	2.0	7.3×10^{-1}	1.2×10^{-3}	4.5×10^{-2}
亮区 1	2.1	8.5×10^{-1}	8.0×10^{-4}	4.5×10^{-2}
亮区 2	1.2	3.3×10^{-1}	1.4×10^{-3}	6.1×10^{-2}
亮区 3	3.0	1.0	1.7×10^{-3}	6.6×10^{-2}

定和化学成份的变化有关。经离子探针测定,各处 Al、V 变化很大,亮区的 Al 含量比基体高, V 含量也稍高, [N]、[O] 基本无差异,化学成份变化情况列入表 8。

又做了一些掉块试验,主要是在二次熔炼时有意将二支电极的接头处不焊牢,熔后锭子剖开作低倍检验,看到几乎所有这类锭子在锭中下部有一大块未熔化物(图 9),测其位置所在,为焊接之处,因此证实了电极焊

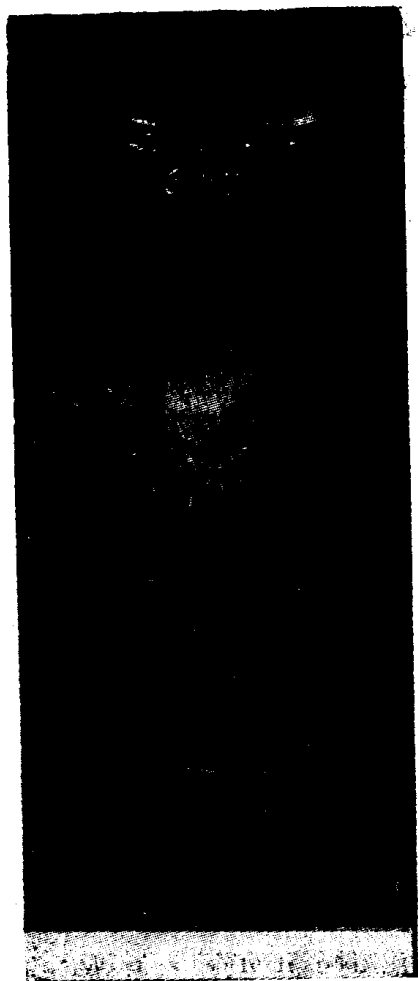


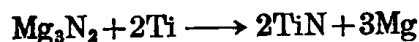
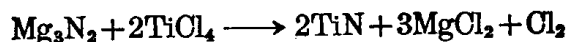
图 9 有掉块未熔化物的锭子的低倍

接不牢会产生掉块,当掉块较大,在熔池中来不及熔化干净,经加工后就形成了拉长的有化学成份变化的亮条^[6]。

从生产炉号中分析到的亮条基本都是低 Al 低 V。虽说从前也曾发现有高 Al 高 V 的亮条,但各厂供 708 工程的料中未发现。为什么都是低 Al 低 V 呢?考虑与一次锭底部成份有关,一般来讲一次锭底部 Al、V 量都比较低(图 7 所示)。第二次熔炼时如焊接脱落,刚好是一次锭的底部一段掉入熔池,在熔池中来不及熔清,于是就出现了低 Al 低 V 的偏析区。因此,为了防止这一类亮条的产生,必须改善电极的焊接质量,要增大焊接面来加强焊接的牢度。当然海绵钛及中间合金颗粒的均匀及电极压制质量也是很重要的,需要密切加以注意。

2. 原材料中有含 [O]、[N] 较多的颗粒而形成亮条试验:

根据分析测得有些亮条中的间隙元素 [O]、[N] 有较多的增高。这种 [O]、[N] 的富集是如何造成的?我们认为从原材料海绵钛及 Al-V 中间合金中带进去的。现所用的海绵钛及中间合金有一些颗粒的氧化色彩很浓,其 [O] 含量肯定较高,另外,根据资料 [5] 介绍,海绵钛中也可能出现含有氮化钛的海绵钛颗粒,当用 Mg 法生产海绵钛时,如有氮化物存在,则钛就会取代镁中的氮而形成氮化钛,其化学反应式如下:



当合金熔炼时,氮化钛因熔点 (2950°C) 比重 (5.3 克/厘米^3) 都比钛合金高而偏聚到熔池底部,在它们周围形成富氮区,经加工则形成亮条并出现裂纹。

为了证实,熔炼了几个小锭作试验。在 500T 油压机上压制每支 0.9 公斤的 $\phi 32$ 毫米电极,在电极中每隔 50 毫米放入一些氧化、氮化的海绵钛或 Al-V 中间合金,放入量占总配入量的 5%。第一次熔炼成 $\phi 55$ 毫米