

钛合金锻件的超声波探伤

钛合金比重小（约 4.5）、熔点高（1600℃左右）、塑性好，具有比强度高、耐腐蚀性强，能在高温下长期工作（目前热强钛合金已用于 500℃）等优点，因而已经越来越多地用作飞机和飞机发动机的重要承载部件，除了钛合金材料的锻件外，还有铸件、板材（如飞机蒙皮）、紧固件等等。现代国外飞机上采用钛合金的重量比已经达到 30%左右，可见钛合金在航空工业上的应用有着广阔的前途。当然，钛合金也存在如下缺点：例如变形抗力大、导热性差、缺口敏感性较大（1.5 左右）、显微组织的变化对机械性能影响较显著等，从而导致在冶炼、锻造加工和热处理时的复杂性。因此，采用无损检测技术以保证钛合金制品的冶金和加工质量，就是一个很重要的课题。

钛合金锻件中容易出现的缺陷

一.偏析型缺陷

除了 β 偏析、 β 斑、富钛偏析及条状 α 偏析外，最危险的是间隙型 α 稳定偏析（I 型 α 偏析），其周围常伴有细小的孔洞、裂纹，含有氧、氮等气体，脆性较大。还有富铝型 α 稳定偏析（II 型 α 偏析），也因伴有裂纹并有脆性而构成危险性缺陷。

二.夹杂物

多是高熔点、高密度的金属夹杂物。由钛合金成分中高熔点、高密度元素未充分熔化留在基体中形成（例如钼夹杂），也有混在冶炼原材料（特别是回收材料）中的硬质合金刀具崩屑或不适当的电极焊接工艺（钛合金的冶炼一般采用真空自耗电极重熔法），例如钨极电弧焊，留下的高密度夹杂物，如钨夹杂，此外还有钛化物夹杂等。

夹杂物的存在容易导致裂纹的发生与扩展，因此是不允许存在的缺陷（例如苏联

1977 年的资料中规定，钛合金 X 射线照相检查时发现直径 0.3~0.5mm 的高密度夹杂物就必须予以记录)。

三.残余缩孔

见实例。

四.孔洞

孔洞不一定单个存在，也可能呈多个密集存在，会使低周疲劳裂纹扩展速度加快，造成提前疲劳破坏。

五.裂纹

主要指锻造裂纹。钛合金的粘性大，流动性差，加上导热性不好，因而在锻造变形过程中，由于表面摩擦力大，内部变形不均匀性明显以及内外温差大等，容易在锻件内部产生剪切带（应变线），严重时即导致开裂，其取向一般沿最大变形应力方向。

六.过热

钛合金的导热性较差，在热加工过程中除了加热不当造成锻件或原材料过热外，在锻造过程中还容易因为变形时的热效应造成过热，引起显微组织变化，产生过热魏氏组织。

钛合金锻件超声探伤的几个问题

除了一般锻件超声探伤方法中应当注意的问题外，钛合金锻件的超声探伤还有以下几个需要注意的问题。

一.原材料的冶金质量

前面第二部分所述的缺陷大部分是在原材料上就存在的，结合考虑我国钛工业生产

的实际情况（原材料、工艺等），加上钛合金价格昂贵，加工困难，并且锻件的形状一般都比较复杂，使得锻件的超声探伤存在一定的困难（例如死角、盲区、探测方向不利等），为了将质量隐患尽早阻绝在初始阶段，应该严格把好原材料的冶金质量关，其超声验收标准应该从严要求，其方法也应该更为详细。

例如，对钛合金圆棒，除了按一般周面 360° 的径向入射纵波探伤外，还应作周面 360° 的弦向横波探伤（折射角一般为 45° ），以保证发现直探头无法发现的表面和近表面缺陷（例如径向裂纹）。对于钛合金方坯、饼坯、环坯等除了作垂直入射的纵波探伤外，考虑到可能存在沿锻造变形应变线产生的裂纹（在横截面上多为近似 45° 取向）及某些倾斜取向的缺陷，还应作折射角 45° 的径向横波探伤（国外有些标准还要求作水中 5° 入射纵波检查和折射角 60° 的径向、弦向横波检查，如英国的 RPS705 和美国的 DPS4.713）。

由于钛合金探伤灵敏度要求较高，故纵波探伤宜用 5MHz，横波探伤用 2.5MHz（两者在同一材料中波长相当）的频率。在评定、鉴别缺陷时，有时还要使用更高的频率（如苏联资料建议使用 20MHz 的频率）。

二.选择合适的检测方法

为了确保钛合金锻件的质量，除了严格控制原材料质量外，还必须防止在后续热加工过程中出现缺陷，应该重视锻件的毛坯及半成品的超声探伤，以及成品阶段的 X 射线探伤、荧光渗透探伤和阳极化腐蚀等检查手段，其方法的选用原则上与一般锻件基本相同。

三.需要评定的几个参数

1. 钛合金锻坯与锻件的超声波验收标准很严格，要求评定的参数也较多，目前国外航空钛合金锻件超声波探伤的验收标准如表 1。

表 1 国外航空钛合金锻件超声波探伤验收标准（最高等级）一览表

机构名称	美国格鲁曼飞机公司	美国波音飞机公司	美国道格拉斯飞机公司	美国宇航材料规范	美国军用规范
标准名称	钛与钛合金的超声质量要求	超声检验	锻制金属的超声检验	钛合金的超声检验	锻制金属的超声检验
适用范围	棒材,锻坯,模锻件,自由锻件(厚度 ≥ 1 英寸)及厚度 $\geq 1/2$ 英寸的板材及中间坯,直径 ≥ 2 英寸的圆形件	锻坯,棒材,板材,模锻件,自由锻件,挤压件及机加工零件	锻件,锻坯,环形锻件,轧坯,棒材或板材,挤压棒及型材,挤压或拉制管材及其制品	横截面厚度 $\geq 13\text{mm}$ (0.5英寸)的钛合金制品,包括圆棒,圆饼及平面制品(锻坯,板材,锻件与挤压件)	横截面厚度 $\geq 1/4$ 英寸的锻制金属及其制品:锻坯,锻件,轧坯或板材,挤压棒或轧棒及其制成的挤压或轧制型材和零件
超声验收标准:					
单个缺陷显示 平底孔当量直径 mm	≥ 1.2 (3/64 英寸)	≥ 1.2	≥ 1.2	≥ 0.8	$\geq 0.4^*$
多个缺陷显示					
平底孔当量直径 mm	> 0.4 (1/64 英寸)	≥ 0.8 (2/64 英寸)	> 0.8	---	> 0.8
中心指示间距 mm	≤ 25.4 (1 英寸)	≤ 25.4	≤ 25.4	---	≤ 3.18 (1/8 英寸)
长条形缺陷显示					
平底孔当量直径 mm	> 0.4 (1/64 英寸)	> 0.8	> 0.8	---	> 0.4
指示长度 mm	≥ 2.38 (6/64 英寸)	≥ 12.7	≥ 25.4	---	≥ 3.18
杂波水平	$\geq 0.4\text{mm}$ 直径平底孔当量(1/64 英寸)	---	见备注	不高于基准参考平底孔波高的 70%	---
底波损失 %	≥ 50	---	≥ 50	≥ 50	≥ 50
备注	飞机用钛合金 AA 级 长条形缺陷的长度确定:在大于 $\Phi 0.4\text{mm}$ 平底孔当量的缺陷上移动探头至缺陷回波消失时两端的长度减去在同深度的 $\Phi 0.8\text{mm}$ 平底孔试块上以相同方法移	飞机用钛合金 AA 级 起始灵敏度:最大声程的 $\Phi 0.8\text{mm}$ 平底孔波高至少为 30% 荧光屏满刻度 长条形缺陷指示长度的确定:以试块上 $\Phi 0.8\text{mm}$ 平底孔波高为 80% 满	飞机用钛合金 AI 级 长条形缺陷长度以最大缺陷回波振幅下降到 50% 满刻度的两端点间距离确定 当与正常材料相比的底反射损失大于 50% 并结合在材料中的杂波有两	飞机、发动机用优质钛合金 AA 级 与正常材料相比的底反射损失大于 50%, 并伴随有上下底面之间任何信号的增加(至少两倍于正常本底噪音信号)时,产品拒收	飞机用钛合金 AAA 级 * 原文如此

	动测得的长度, 刻度, 向两端移动探头至波高 所得差值不应大于 10% 满刻度时两点间距 为感受直径, 在此灵敏度下 测定缺陷长度, 以缺陷波高降 到 10% 满刻度的两端点间距 为测量长度, 则指示长度=测 量长度-感受直径 其底波损失不应大于 50%			
--	--	--	--	--

机构名称	英国 IMI 公司	英国 罗-罗公司		加拿大普惠 飞机公司	法国 Tm 发动机公司
标准名称	IMI 盘件用 优质钛合金锻 坯 通用技术条件	主轴、压气机 转子盘、涡轮盘 及有关转动件的 超声验收标准	IMI679 钛合金压气机盘	钛合金棒材与锻 坯 的超声检验标准	制造 I 组零件 用 优质 TA6V 自 由锻件或模 锻件的 验收技术条 件
适用范围	Ti-6Al-4V 与 IMI550 锻坯, 直 径 (1) $\Phi 100 \sim 255 \text{mm}$ (2) $> \Phi 255 \sim 305 \text{mm}$	斯贝发动机 Ti-6Al-4V 与 Ti685 锻件	斯贝 MK202 发 动机, IMI679 (1) 供应厂检 验要求 (2) 中间阶段 检验要求	用于制造盘件、 轮毂、隔套、叶 片等直径或厚度 在 0.5 英寸以上 的圆形、方形或 矩形锻坯 直径或厚度: (1) 0.5~4 英 寸 (12.7~101.6mm) (2) $> 4 \sim 9$ 英 寸 (101.9~228.6mm)	Ti-6Al-4V 直 径 100~250mm 的半成品及 由其加工的 锻件 (1) 棒材直径 100~250mm (2) 模锻件
超声验收标准:					
单个缺陷显 示平底孔当 量直径 mm	(1) ≥ 1.2 (2) ≥ 1.6	$\geq \Phi 1.27 \sim 12 \text{dB}$ (0.05 英寸-12dB)	(1) $\geq \Phi 1.27$ (2) $\geq \Phi 1.27 \sim 12 \text{dB}$	(1) ≥ 0.8 (2) ≥ 1.2	(1) ≥ 1.2 (2) ≥ 0.5
多个缺陷显示					
平底孔当量 直径 mm	---	$< \Phi 1.27 \sim 12 \text{dB}$	(1) $< \Phi 1.27$ (2) $< \Phi 1.27 \sim 12 \text{dB}$	---	---
中心指示间 距 mm	---	≤ 7.62 (0.3 英寸)	≤ 7.62	---	---
长条形缺陷显示					

平底孔当量 直径 mm	---	---	---	---	---
指示长度 mm	---	---	---	---	---
杂波水平	---	≥Φ1.27-18dB	(1)≥Φ1.27-6dB (2)≥Φ1.27-18dB	不应有明显较高的 杂波显示	---
底波损失 %	---	---	---	---	---
备注	发动机用钛合金坯料	发动机用钛合金锻件 缺陷显示总数不得 多于 10 个(单件)	发动机用钛合金坯料与锻件，缺陷显示总数不得 多于 10 个(单件)	发动机用钛合金锻坯	发动机用钛合金

由表 1 可见，要达到这样高的验收标准，不仅对探伤人员的技术水平有较高要求，而且还要有性能良好的超声探伤仪及探头，如灵敏度要高，信噪比和动态范围要大，线性要好，电噪声电平要低，分辨率要高等等。

2. 钛合金锻件的显微组织变化对其机械性能有较显著的影响，对超声探伤中的杂波水平及底波损失的评定起到检查钛合金组织均匀性的作用，应予以充分的重视。

超声波在晶界及晶内相组织上的散射可能在荧光屏上以杂波显示，也可能表现为声能衰减引起底波高度的降低（底波损失），这两者与显微组织有一定的对应关系。根据这两项参数的评定，已经发现过粗晶、并列 α 组织（能造成低周循环疲劳性能下降的魏氏组织）等。

就目前所作的工作来看，杂波水平高的钛合金显微组织，多表现为有完整明显的原始 β 晶界和平直细长的魏氏 α 组织（未变形的典型魏氏组织），或显现有多且大的条块状 α 相，这类组织在机械性能上表现为强度指标下降。此外，某些铸造组织残留也可能造成杂波水平较高。但就一般的过热魏氏组织，如果其原始 β 晶界及晶内相组织取向较紊乱无规则时，尽管这样的组织是不好的，甚至从显微组织评定是不合格的，其杂波水平却不一定偏高，说明杂波水平的评定目前还存在较大的局限性。

在底波损失的评定中，某些魏氏组织对超声脉冲的高频分量有较明显的衰减（如并

列 α 组织)，这在频谱仪上较易观察到（北京航空材料研究所钱鑫源等），但对工业生产上的大批量检查如何使用普通超声探伤仪，选用最佳响应频率的探头进行检测上存在一定的实际困难。

应当说明的是，目前对钛合金内部偏析也尚无可靠有效的超声检测方法。

总之，如何利用超声波对各种不同显微组织的响应达到控制钛合金的性能质量，是目前需要深入研究的课题（例如采用更高的、甚至上百兆赫的频率，以及使用电子计算机进行信息处理等）。尽管如此，在目前钛合金锻件及材料的超声探伤中，杂波水平与底波损失的评定仍然是两项很有价值的指标。

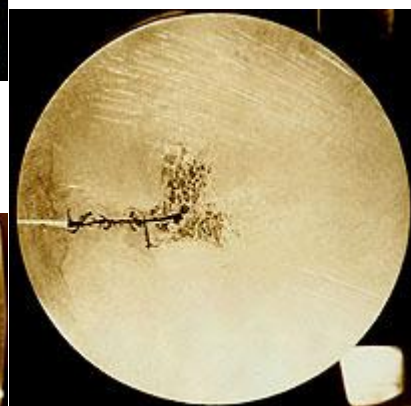
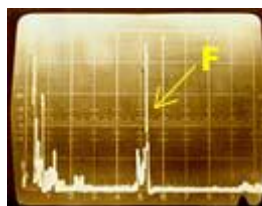
3. 钛合金材料的超声探伤中，有时由于单个大晶粒或者局部的组织不均匀造成的组织反射会以单个反射信号的形式出现，容易和真正的冶金缺陷（如高密度夹杂物、裂纹、孔洞等）的反射信号相混淆，通过试验分析认为，这种反射信号可能是由于超声反射波的相位叠加所致。在这种情况下，采用小直径探头或聚焦探头（缩小波束直径），提高超声频率，以相同的探测灵敏度（平底孔直径相同的试块）重新评定时，会发现其反射信号幅度明显下降，有时甚至消失，而真正的冶金缺陷的反射信号在这种情况下不会有明显变化。这种方法可以鉴别钛合金中真正的冶金缺陷与组织反射。

当然，在钛合金的超声探伤中，也和其他材料的超声探伤一样，企图仅以 A 型显示的反射脉冲信号判断缺陷的性质显然是不可能的，必须结合具体探伤对象的材料成分特点、冶炼及锻造加工工艺，以及辅以其他无损检测手段（如 X 射线照相、渗透、超声 C 扫描等等），加上探伤人员自身的经验水平等进行综合分析判断，必要时还要进行解剖验证（包括宏观、高倍，甚至电子显微镜、电子探针等手段）。因此，目前在钛合金锻件及原材料超声探伤中，其质量验收标准基本上仍以回波信号参数为依据。

钛合金锻件与材料的缺陷实例

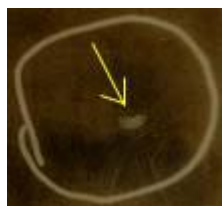
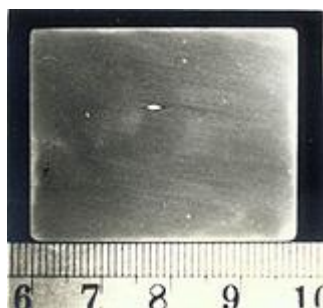
一. $\Phi 70\text{mm}$ 钛合金锻棒中的残余缩孔

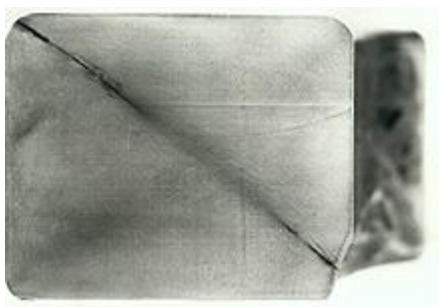
纵波（上为纵波波形照片）与横波（下为横波波形照片）均能发现，纵波探测时表现为强烈的缺陷回波并造成底波降低（面积型缺陷，可大致判断为径向走向），横波探测时表现为清晰强烈的缺陷回波（裂纹状缺陷）。右图为横向低倍照片（1x）。



二. 钛合金饼坯中的钼夹杂（高密度夹杂物）

这是冶炼时作为铝钼中间合金中的钼未完全熔解而留在基体内形成，可用纵波探测到，无论改变超声频率及超声波束直径都能很好地发现，并且在两面探测时位置对应良好。解剖后验证为钼夹杂。在横向低倍上多呈“眼睛”状，在饼坯中的取向多与端面平行，但也有的会取向倾斜，在饼坯上不易发现，待模锻成盘形件后因变形力使其取向改变到与端面平行时才易于发现。左图为横向低倍照片（2x），右图为按超声束投射方向拍摄的 X 射线照片（外圈为铅丝，中间的白点即为高密度夹杂物-钼夹杂）





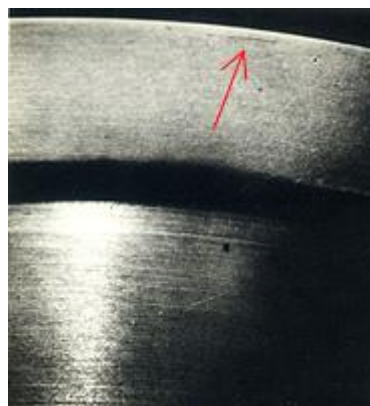
a) 环坯上的 45° 裂纹 横向低倍 x1/2



b) 左边环坯裂纹高倍 100x



c) 饼坯上的 45° 裂纹 横向低倍 x1/2



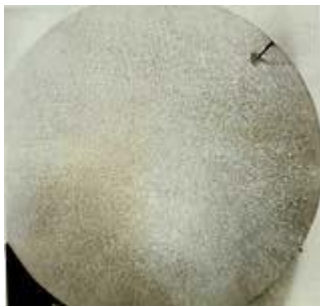
d) 饼坯上的端角 45° 裂纹带到模锻盘上加工至半成品时暴露 1x



e) 锻制板状件上的十字裂纹 x1/2

三. 钛合金饼（环）坯中的 45° 裂纹及锻制板状件上的十字裂纹

这类裂纹是由锻造引起的，特别是从钛锭开坯锻制饼（环）坯时，往往因终端温度过低、锤击力过大等而沿最大变形应力方向开裂。这种裂纹大多在开口处弥合较紧，或者整条裂纹上的开隙度很不均匀，局部弥合很紧，经锻造后机械加工至半成品时，如果表面恰好在弥合较紧的部位处，则用腐蚀或渗透法有时未必能发现，但其内部开裂又较大，甚至出现孔洞（如照片 b)）。采用 45° 折射横波是很容易探测到并可以判断的。



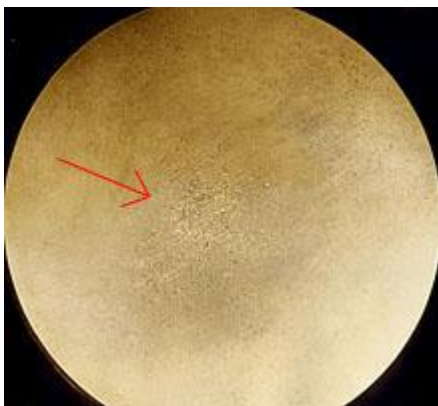
a) 横向低倍 x1/2



b) 表面裂纹着色渗透显示 x1

四. $\Phi 70\text{mm}$ 钛合金轧棒上的径向表面裂纹

这类裂纹也属于锻造或轧制加工中形成的裂纹，可以用腐蚀或渗透法发现，采用 45° 折射横波作周面弦向扫查是很容易探测到的，而用一般的纵波周面径向入射探测是发现不了的。



a) 横向低倍 x1/3

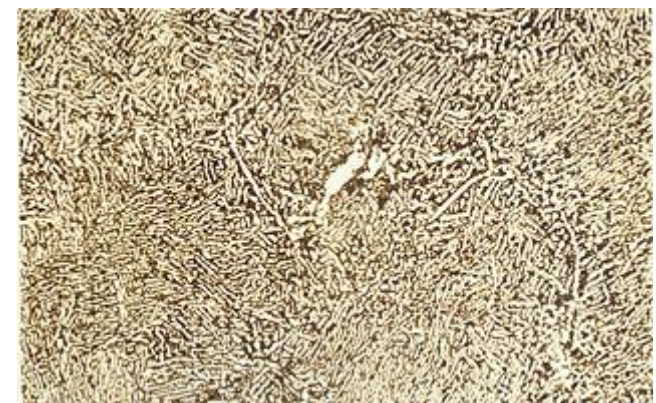


c) 中心粗晶处横向高倍 x500



b) 纵向低倍 x1/2

五. $\Phi 125\text{mm}$ 钛合金锻棒的中心粗晶：用 5P14 直探头周面径向探测，中心部位的杂波水平（同声程比较）达到 $\Phi 1.2\text{mm}-6\text{dB}$ 。



c) 中心粗晶处高倍 x250 (有条块状 α)



a) 横向低倍 x1

b) 纵向低倍 x1

六. $\Phi 70\text{mm}$ 钛合金轧棒中的粗晶

用 5P14 直探头周面径向探测，中心部位

的杂波水平（同声程比较）达到 $\Phi 0.8\text{mm}$

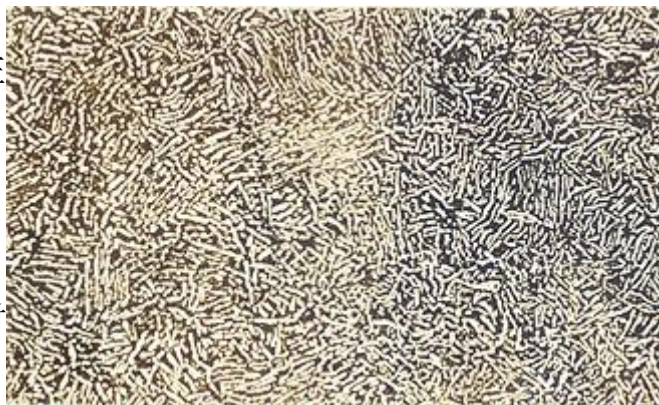
平底孔当量，而正常试件上的杂波水平在

$\Phi 0.8\text{mm}-10\sim 12\text{dB}$ 左右。

机械性能试验：室温拉伸， $d=5\text{mm}$ 试样，

均取自棒材中心，在同炉号、同规格棒材

上取样。



d) 正常组织的高倍（杂波水平 $\Phi 0.8\text{mm}-10\text{dB}$ ）x250

项目	$\sigma_b \text{ kg/mm}^2$	$\sigma_s \text{ kg/mm}^2$	$\delta_5 \%$	$\psi \%$
杂波水平 $\Phi 0.8\text{mm}$ 平底孔当量的三支试样	110.0	104.5	17.5	45
	109.0	104.5	17.5	43
	110.0	106.0	17.0	43
杂波水平 $\Phi 0.8\text{mm}-10\text{dB}$ 平底孔当量的三支试样	114.0	108.0	15.0	46
	114.5	108.0	16.5	49
	114.0	109.0	15.5	47

由上述机械性能试验数据可见，杂波水平高的（高倍组织中有较多的条块状 α 相）

其强度、塑性数值均不同于杂波水平低的试样。



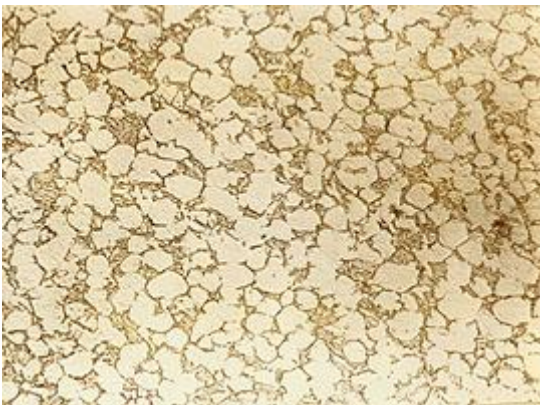
a)纵向低倍 x1



b)粗晶处横向高倍 x500

七.Φ75mm 钛合金锻棒中的粗晶

用 5P14 直探头周面径向探测，中心部位的杂波水平（同声程比较）达到Φ0.8mm-6dB，正常部位处杂波水平在Φ0.8mm-12dB 以下。



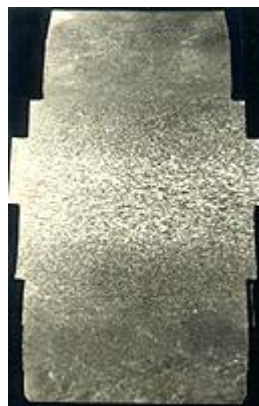
c)正常部位处横向高倍 x500

机械性能试验：室温拉伸，d=5mm 试样，在该粗晶试样的中心粗晶处（杂波水平Φ0.8mm-6dB）和 1/4D 处（杂波水平Φ0.8mm-12dB 以下）各取一支试样。

项目	σ_b kg/mm ²	$\sigma_{0.2}$ kg/mm ²	δ_5 %	ψ %
~Φ0.8mm-6dB	90.0	83.0	17	52
<Φ0.8mm-12dB	94.0	88.0	17	49.5

八.钛合金饼坯的中层粗晶（并列α组织）

用 5P14 直探头从饼坯端面作轴向探测，杂波水平达到Φ1.2mm-6dB 左右。这是锻造变形过程中变形热效应导致的过热魏氏组织。



b)粗晶处高倍 x500

a)纵向低倍 x1

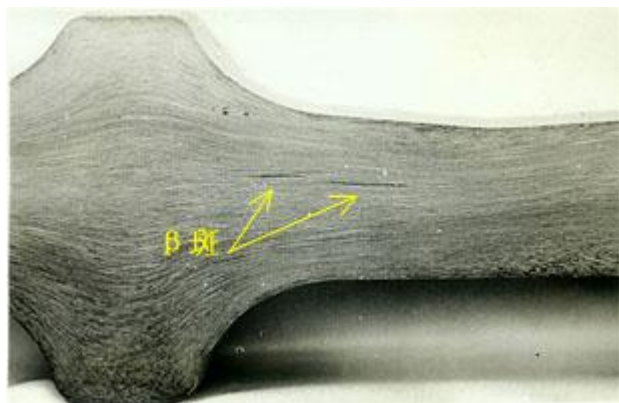
a.纵向低倍 x1 （缺b. 粗 晶 处 高 倍九.钛合金饼坯的中层粗晶（魏氏组

图)

x500 (缺图)

织)

此例也是锻造变形过程中变形热效应导致的一种过热魏氏组织,但用纵波 5、10 甚至 15MHz 均未发现,其杂波水平低于 $\Phi 0.8\text{mm}$ -12dB,底波损失也不明显,是取样解剖腐蚀后发现的。估计是由于晶界及晶内相组织排列取向不规则,使得从饼坯端面轴向入射的超声纵波散射后相互抵消而不能在荧光屏上显示出较高的杂波水平。



a. 低倍 x1



b. β 斑的高倍 x250

十. 钛合金模锻盘形件辐板与轮毂过渡处的β斑

用纵波 5、10 甚至 15MHz 均未发现,底波损失不明显,杂波水平低于 $\Phi 0.8\text{mm}$ -12dB,β斑是在解剖盘件时发现的。



a. 端面表面低倍 x1



b. 截面低倍 x1



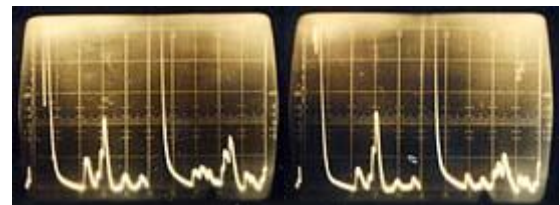
c. 端面表面粗晶的高倍 x100



d. 截面变形带的高倍 x100

十一. 钛合金环坯冲芯上的粗晶与变形带

这是锻制钛合金环坯时冲下的芯子，由于快速的重力锤击，急速变形的热效应导致粗晶及明显的变形带，其杂波水平达到 $\Phi 1.2\text{mm}$ -18dB 以上(实际上是变形带处的组织反射)。用西德 USIP11 型超声探伤仪，MB5F 直探头（5MHz 频率，晶片直径 10mm）从端面轴向探测到。



e. 从端面轴向探测时的波形（相当于 $\Phi 1.2\text{mm}$ -17dB）



十二. 钛合金模锻盘辐板上的拉长 α 组织

用 5MHz, 7°, 10mmx10mmx2 组合双晶直探头（接触法）、大直径水浸聚焦探头（晶片直径 50mm，焦距直径 3.2mm）等均能发现为 $\Phi 0.8\text{mm}$ 直径平底孔当量的单个反射信号，但采用更高频率及小直径晶

拉长的 α 组织 $\times 100$ 片的探头探测时，其反射信号幅度明显下降，解剖后在低倍上表现为亮线，长约 25mm，高倍观察为聚集的拉长 α 组织(北京航空材料研究所钱鑫源等)。

结束语

随着钛合金的应用不断推广，越来越多地取代钢制的重要承载件（如美国已经在民航机上采用重达一吨以上的大型钛合金飞机结构锻件），其冶金质量要求必将越来越高，特别是利用超声检测技术控制钛合金锻件的冶金质量，以及超声响应与钛合金的显微组织、机械性能三者关系方面的研究还有大量深入的工作要做。

本文中的许多工作是在北京航空材料研究所李家伟、钱鑫源、孟素琴等同志的指导帮助和合作下，以及本单位潘建华、林则民、朱海军等同志的协助下完成的，再次表示衷心感谢。