

循环热处理对ZT-3铸造钛合金 组织和性能的影响

窦 兰 芳

一、前 言

钛合金重量轻、强度高、耐蚀性好,近年来作为结构材料的用途不断扩大。对形状复杂的零件采用铸造工艺是有利的,但铸造钛合金在铸态及退火状态下呈针状或片状 α 的魏氏组织。这种组织具有连续的晶界,塑性及韧性较低,且用常规热处理方法不能改变这种结构特征。铸钛组织的这种弱点,大大限制了铸钛在工业中的应用。

为了满足高性能的要求,只好采用变形件,而不采用铸件。

近年来,国外对铸造钛合金的循环热处理开始重视,并获得一定效果。茨木善朗发表的文章^[1,2,3]表明,对Ti-6Al-4V铸造钛合金进行循环热处理,可达到将铸钛组织变为接近等轴组织的效果。我们自1978年以来也对ZT-3铸造钛合金进行了循环热处理的试验研究,其处理规范虽与茨木等人的规范不尽相同,但效

系,也有晶界沉淀相由过渡相 θ' 转变成稳定 θ 相的现象。我们认为PFZ的出现是时效过程中沉淀相析出所伴随的一种现象,因此不能以无沉淀带的宽窄来判断SCC敏感与否。否则双级时效的LD10合金亚晶界也存在很窄的PFZ(见图4c、g),而应力腐蚀并不敏感这一现象就无法解释。

Al-Cu-Mg-Si系的LD10合金主要强化相为 θ 相,同时还含有少量 β 相和S相。这些少量强化相在时效过程中也会变化,交互影响着合金的性能。这里突出讨论了主要强化相(θ)

果却十分明显。我们进行这项工作的目的在于探求并考察循环热处理工艺引起铸件微观结构的变化及其对铸件塑性和韧性的影响,以便用最简便的方法来改善组织及性能。

本文介绍了用循环热处理工艺改善ZT-3合金离心浇注环形件的微观结构,提高其塑性及韧性的研究结果。

二、试验材料及方法

ZT-3钛合金的名义成分为Ti-5Al-5Mo-2Sn-0.25Si-0.02Ce。离心浇注工艺于50公斤凝壳炉中进行。所用石墨模应在1000℃保温1小时,炉冷至室温进行除气处理,浇注2.5公斤梅花型试样坯料。重复试验所用试样坯料均为1978年浇注的机匣,其塑性及韧性都比较低。

化学成分及机械性能分别见表1和表2。

用金相法测定的ZT-3钛合金相变温度为1000~1010℃。

试验选用了950℃保温30分钟,炉冷至

与材料性能,特别是抗应力腐蚀性能的关系。

通过对LD10铝合金的研究,综合考虑合金性能,着重提高抗SCC能力,我们认为可以使用双级时效制度作为LD10铝合金的热处理工艺:第一阶段160℃8小时时效以得到细小均匀弥散的强化相;第二阶段190℃2小时时效改善应力腐蚀性能的时效。

在实验中得到红安公司孙成清、周精琦同志和北航邢淑仪老师的帮助,谨致谢意。——作者

(参考文献从略)

表 1 ZT-3钛合金试验坯件的典型化学成分

成 分	Al	Sn	Mo	Ce	Si	Fe	C	H ₂	O ₂	N ₂	Ti
含 量, %	5.10	2.09	4.98	0.011	0.26	0.09	0.02	0.0013	0.14	0.021	余 量

表 2 ZT-3钛合金试验坯件的典型力学性能

试 样 号	室 温 拉 伸			500°C 下 热 暴 露			a_k 公斤·米/厘米 ²
	σ_b 公斤/毫米 ²	δ_5 %	ψ %	σ_b 公斤/毫米 ²	δ_5 %	ψ %	
1	107.5	5.4	10.4	106.6	1.92	6.95	1.23
2	107.9	3.6	5.4	113.1	3.92	10.4	0.86
3	109.4	3.8	7.0	113.2	4.08	7.37	0.86
平 均 值	108.3	4.3	7.6	111.0	3.3	8.24	0.98

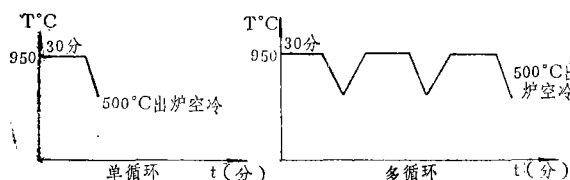


图 1 循环热处理规范

500°C的加热循环。采用单循环和多循环的热处理方案,如图1所示。

性能测试主要选了室温拉伸、热稳定性能、冲击性能和高温(500°C)瞬时性能。

三、试验结果

热处理均在电炉中进行,几种循环处理的典型显微组织如图2所示。典型零件——机匣在一、三、五循环处理状态下的机械性能变化见图3。

从显微组织看出,原始组织为典型的魏氏组织。经单循环处理变为部分片状 α 和近似于等轴 α 及转变 β ,晶界 α 断开并变粗短。三循环处理的试样进一步变态。五循环处理的试样几乎全部变成短 α 片网篮状编织形态了。

所采用的升温速率一般为8~19°C/分。

从图3a可以看出,热循环次数愈多,塑性及韧性提高得也愈多。经五循环处理的试样 δ_5 及 ψ 均提高了一倍,但强度略有损失。

冲击性能有较大改变,经五循环处理的试样变化尤其明显, a_k 值由原始铸态的1.0提高到2.61。

不同循环次数对热稳定性和高温瞬时性能的影响也进行了测定,结果见图3b。

由图可以看出,经循环热处理的铸件,其热稳定性能也有所改善,特别是高温瞬时性能变化十分显著, ψ 及 δ_5 差不多为原始铸态的三倍。

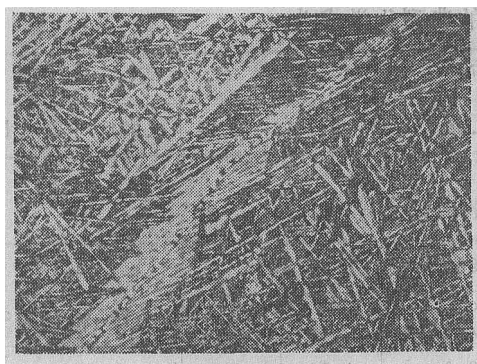
作了不同热处理后组织的复型观察,详见图4。由图4可以得到有关残留 β 相分解出次生 α 相及其生长过程的概貌。

还作了不同循环处理方案的拉伸断口形貌观察。经650°C处理1小时的试样断口全部为晶界断裂,晶粒粗大。而经循环热处理的试样,开始出现穿晶断裂,随着循环次数的增加,穿晶断裂增加,断口都有典型韧窝出现,见图5和图6。

四、分析与讨论

1. 关于组织变化过程的探讨

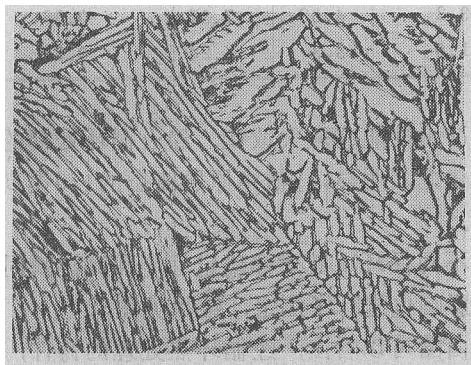
由于试剂(HF:HNO₃:H₂O=1:3:7)对组织有选择腐蚀作用,在此试剂浸蚀下, β 相较 α 相容易腐蚀。因此,可借助金相试样的复型观察研究一、三、五各循环处理的细节。



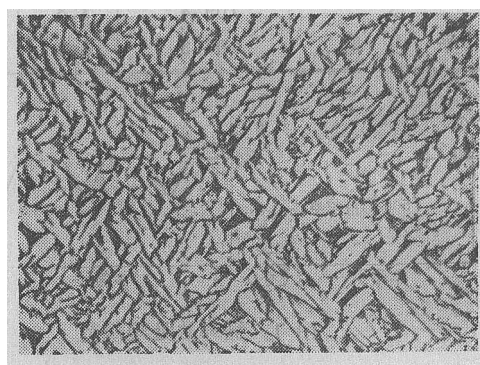
a. 原始铸态



b. 单循环



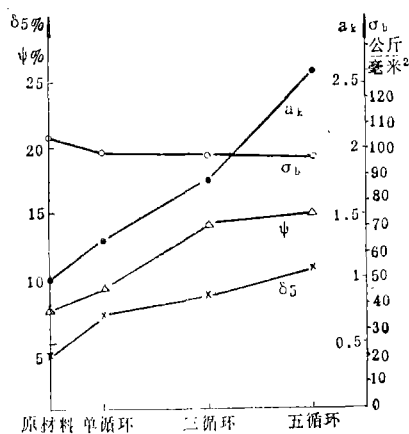
c. 三循环



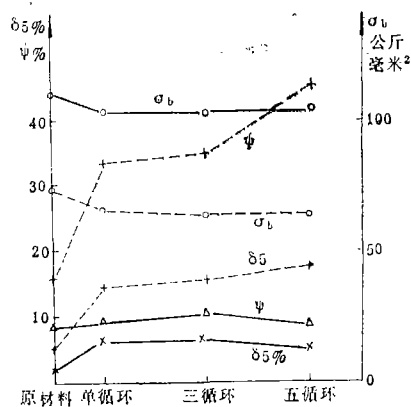
d. 五循环

图 2 原始铸态及循环热处理后的显微组织

× 500



a. ZT-3铸造钛合金室温拉伸性能与循环加热次数的关系



b. ZT-3铸造钛合金500°C高温拉伸、500°C/100小时热暴露后的室温拉伸性能与循环加热次数的关系

.....500°C拉伸性能

——500°C/100小时热暴露后的室温拉伸性能

图 3 ZT-3铸造钛合金在各循环热处理后的力学性能变化

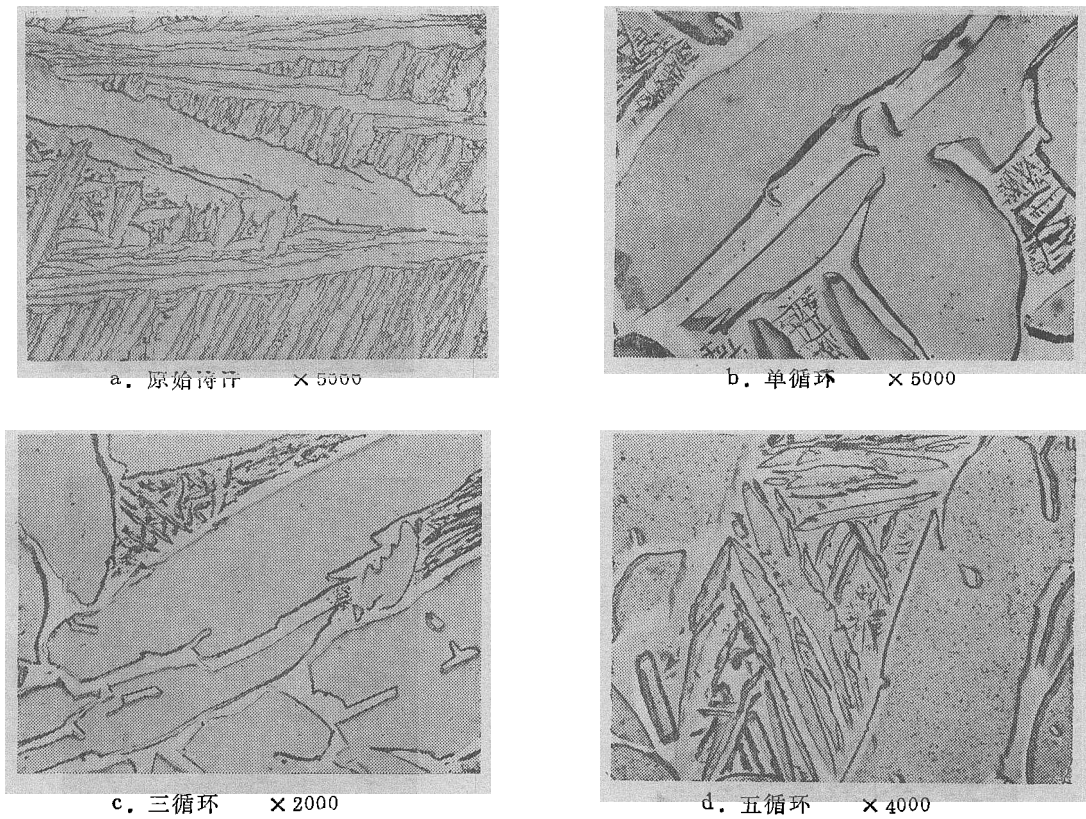


图 4 复型观察

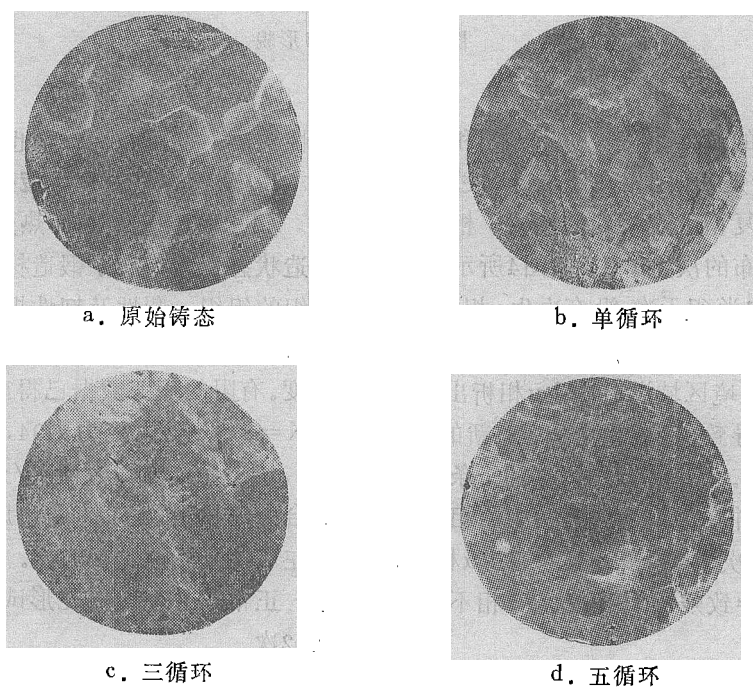
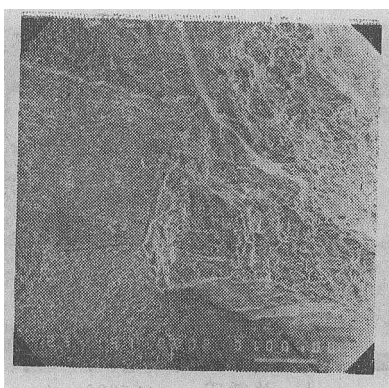
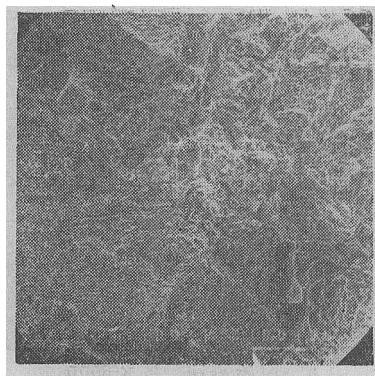


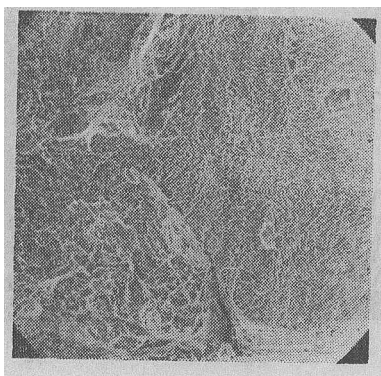
图 5 拉伸断口形貌 × 9



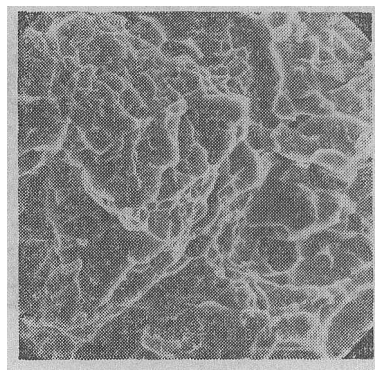
a. 原始铸态 × 90



b. 单循环 × 90



c. 三循环 × 90



d. 五循环 × 90

图 6 拉伸断口形貌

单循环处理的试样保持着初生 α 相和针条状 $\alpha + \beta$ 区,后者是残留 β 相在缓慢冷却过程中分解而成的。在复型上观察到的残留 β 相内有“松树枝”状分布的次生 α 相,如图4所示。但在某些残留 β 区内尚很干净,没有次生 α 相析出,次生 α 相主要集中在 β 区内的中心部位,而在与初生 α 相接壤的边境区域没有次生 α 相析出。热循环次数增加,导致初生 α 相增加,有新的 α 相在残留 β 相内析出。到五循环时,次生 α 条状已长得相当粗大,并在个别地方与初生 α 相连成一体。与此同时,次生 α 相慢慢长入初生 α 相内。总之,循环加热导致残留 β 相内次生 α 相不断生核与生长。

经五循环处理后得到短 α 片网篮状编织和 β 转变组织。此时晶粒出现细化与等轴化,因此

塑性提高,韧性指标 a_k 值也大幅度提高。

2. 对循环热处理后疲劳性能的分析

ZT-3钛合金经循环热处理后,显微组织由铸造状态变为近似于锻造材料的短 α 片网篮状编织的组织,塑性及韧性提高了。此种处理后的铸件能否作为转子类零件使用还取决于疲劳强度。有限的疲劳数据已得出良好的初步结果。在 $K=0.7$ 、最大应力为94.49公斤、最小应力为9.45公斤、频率为10次/分的条件下,ZT-3钛合金的拉-拉疲劳寿命由原正常热处理5472次左右提高到最少7291次。在同样的试验条件下,正常热处理的梅花形试样的寿命最多为1832次。

经循环热处理的ZT-3钛合金离心浇注件的 K_Q 值与原来状态相当。

3. 关于循环热处理工艺的应用

ZT-3 钛合金循环热处理方案研究已经多次重复, 重复性良好。

根据使用对性能的要求, 可以采用一、三、五循环处理方案, 在此基础上, 再经常规热处理可以使合金调整到强度和韧性匹配良好的综合性能状态。

ZT-3 钛合金的常规热处理制度为 650°C 1 小时空冷处理。

循环热处理由于提高了塑性, 明显地改善了钛铸件的焊接性能。为了消除焊接脆性, 可酌情考虑使用一、三、五各种循环处理。在处理焊接机匣零件时, 单循环方案即可获得较好结果。

五、小 结

通过上述试验结果可得出如下结论:

1. ZT-3 钛合金离心浇注环形件, 用 950°C 保温 30 分钟炉冷至 500°C 的五循环热处理工艺, 可使其微观结构变为短 α 片网篮状编织组织, 从

而可能得到良好的综合性能。

2. 循环热处理改善了 ZT-3 钛合金的室温拉伸塑性及韧性。经五循环处理后 δ_5 由 4.3% 提高到 10.9%, ψ 由 7.6% 提高到 15.2%, 但强度约损失 10 公斤。冲击性能有明显提高, 为原始状态的 2.6 倍。

3. 经循环热处理的机匣铸件试样, 其热稳定性性能的 δ_5 、 ψ 亦略有改善。而高温瞬时的 δ_5 由 6.1% 提高到 17.9%, ψ 由 13.9% 提高到 45.1%, 均提高了二倍左右。

参 考 文 献

- [1] Y. Ibaraki and T. Sasaki, Heat Treatment of Cast Ti-6Al-4V Alloy, 3-rd International Conference on Titanium, May 18-21, 1976.
- [2] 茨木善朗等, Ti-6Al-4V 合金铸造品の繰り返し加熱冷却熱処理による組織の改良, 日本金属学会志, Vol. 43, No9, 1979.
- [3] 茨木善朗等, 铸造組織を改良した Ti-6Al-4V 合金の組織と機械的性質に関する検討, 日本金属学会志, Vol. 44, No3, 1980

(上接第 37 页)

响不敏感, 而循环软化材料对不同加工工艺的影响敏感。两种材料纵向抛光后一般都提高疲劳极限。

2. 表面残余应力的影响

一般说来, 压应力提高疲劳极限, 拉应力降低疲劳极限。但为了确切地反映材料真实的疲劳性能, 最佳加工工艺就应选择为试样加工后的残余应力接近于零, 应变层厚小于 0.02 毫米。

3. 加工工艺对试样表面完整性的影响

不同的加工工艺对试样表面完整性的影响不同, 因此裂纹的疲劳源也不同。一般疲劳源都在表面, 只有最后精加工为横磨, 表面层产

生较大的压应力并有一定的应变层厚度时, 即使存在横纹, 横纹的影响已被一定厚度的残余压应力所掩盖, 并在表皮之下有个拉应力峰, 这时疲劳源就在表皮之下。

以上五种材料的试样加工后光洁度为 $\nabla 9$, 最后精加工的切削量采用 0.005~0.0025 毫米的吃刀深度为宜。它们纵向抛光后, 一般都提高了疲劳强度极限。

综上所述, 只有严格地控制试样的加工工艺, 才能有效地排除表面完整性诸因素对疲劳性能的影响, 从而获得材料的真实疲劳极限, 以便为评价材料的疲劳性能、选材以及进行疲劳设计提供可靠的依据。

(参考文献略)。