

TC4 钛合金再结晶退火组织 EPMA 表征

EPMA-061

摘要：TC4 钛合金的力学性能和使用性能与其显微组织密切相关。本文参考《常用钛合金热处理规范》设计再结晶退火实验，对某 TC4 钛合金锻材加热到 950°C 后保温两小时并随炉冷却至室温，利用岛津 EPMA-1720 型电子探针对再结晶退火前后样品中进行了表征，结果表明，退火后两相的尺寸、形态及分布均发生了显著变化，测试结果对于评估 TC4 钛合金热处理工艺效果、优化设计热处理工艺及揭示组织性能强化机制有着重要的指导意义。

关键词：TC4 钛合金 再结晶退火 EPMA 岛津

钛合金是以钛作为基体，加入 V、Al、Sn、Mn、Mo 等一种或几种合金元素组成。钛合金作为一种新型的、具有广阔发展潜力及应用前景的轻质结构材料，具有无磁、密度小、耐腐蚀性好、比强度高、耐热性高等优良的综合性能，在航天航空、轨道交通及军事国防领域都具有广泛的应用。

按退火组织特征，钛合金可分为三类： α 钛合金、 β 钛合金、 $\alpha+\beta$ 双相钛合金。TC4 钛合金属于典型的 Ti-Al-V 系双相钛合金，其密度约为钢铁材料的二分之一，是国内外使用最为广泛的钛合金牌号。其中 Al 元素在 α 相中的固溶度大于在 β 相中的固溶度，可提高 α/β 相变温度，扩大 α 相区，属于 α 相稳定化元素；V 与 Ti 具有相同的晶格结构和相近的原子半径，在 β 相中无限固溶，可降低 α/β 转变温度，扩大 β 相区，增大 β 相稳定性。

TC4 钛合金的力学性能和使用性能与其显微组织密切相关，工业上直接锻造生产的 TC4 因组织和性能难以有效的精确控制，存在诸如变形抗力高、导热性差等问题，通常需要后续采用适当的热处理来调控组织以获得所需的性能。钛合金常用的热处理方法有再结晶退火、固溶和时效处理。其中，再结晶退火温度介于再结晶温度和 β 转变点之间，退火过程主要发生回复及再结晶，主要目的是为了消除应力、提高塑性、稳定组织及改善加工性能。

本文参考《常用钛合金热处理规范》设计再结晶退火实验，对某 TC4 钛合金加热到 950°C 后保温两小时并随炉冷却至室温，利用岛津 EPMA-1720 型电子探针对再结晶退火前后样品中元素的面分布特征进行了表征，测试结果可用于指导 TC4 钛合金再结晶退火工艺效果评估及工艺制定及优化。

■ 实验部分

1.1 仪器

岛津 EPMA-1720 型电子探针显微分析仪



1.2 分析条件

表 1 EPMA 测试参数

仪器：EPMA-1720	加速电压：15 kV
束流：100 nA	束斑直径：Min
步距：1.7 μm	驻留时间：50 ms

1.3 样品处理

样品经不同粒度砂纸机械磨制后，分别使用 9 μm 、6 μm 和 3 μm 等粒径的金刚石悬浮抛光剂抛光，上机测试。

■ 结果与讨论

利用电子探针针对再结晶退火前样品的主要元素进行面扫描分析，结果如图 1 所示。

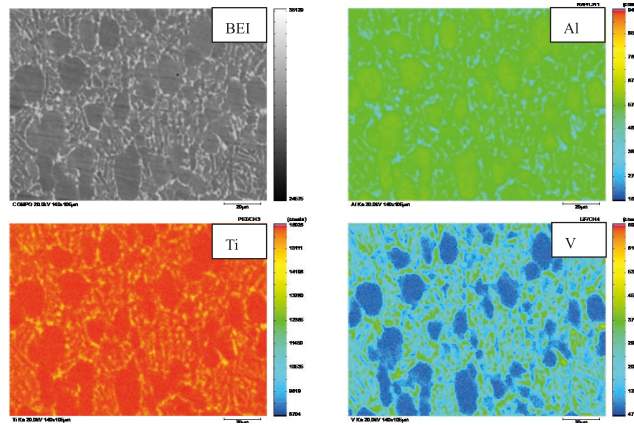


图 1 再结晶退火前 TC4 钛合金样品的元素面分布图

图 1 背散射电子像 (BEI) 显示样品由浅灰及白亮两种衬度差异明显的相组成，元素面分布图 (Al、Ti、V) 显示，浅灰相中 α 相稳定元素 Al 含量偏高，白亮相中则 β 相稳定元素 V 含量偏高，表明浅灰相为 α 相，白亮相为 β 相。从尺寸及形态上看，再结晶退火前，两相基本为等轴晶， α 、 β 两相平均晶粒尺寸分别约为 10.5 μm 、1.5 μm 。从分布上来看，部分 β 相沿 α 相晶界分布，部分分布在 α 相晶内。

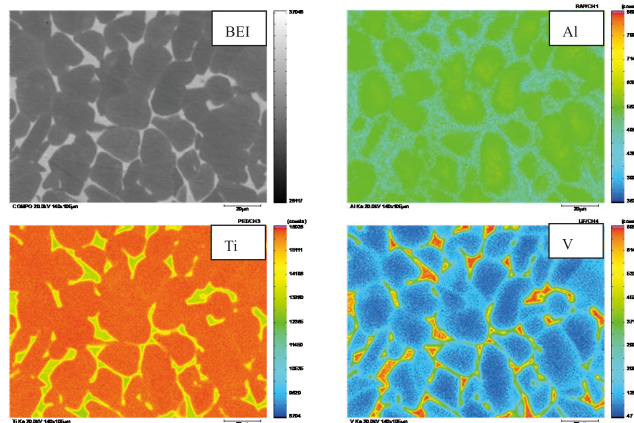


图 2 再结晶退火后 TC4 钛合金样品的元素面分布图

经 950 $^{\circ}\text{C}$ 再结晶退火处理后，样品背散射电子像及元素面分布图如图 2 所示。图 2 显示，相较于再结晶退火前，退火后两相的尺寸及形态均发生了显著变化。 α 相晶粒尺寸增大到约 17 μm ，而 β 相形态由之前的细小的近似等轴晶转变为粗大的板条状，且基本沿 α 相晶界呈网状分布。

上述结果表明，再结晶退火后，两相晶粒发生了明显的聚集长大现象。从热力学角度来看，晶粒的粗化可以减少表面能，在较高的温度下，原子具备了较强的扩散能力，通过表面能小的大晶粒吞并表面能大的小晶粒进行聚集长大，进而使合金处于较稳定的、自由能较低的状态。伴随着 α 、 β 两相的聚集长大，两者晶界接触后达到平衡形成相界，这也是再结晶退火后 β 相表现为沿 α 相晶界分布的原因。

TC4 钛合金中 α 、 β 两相的尺寸、形态、分布，对钛合金的性能有着直接影响；研究表明，相对于细小的等轴晶，聚集长大的板条状呈网状分布的 β 相，可提高钛合金再高温条件下的抗变形能力，即再高温下具有更好的瞬时强度、持久强度及蠕变强度，但也会带来塑性下降的问题。因此，通过设计合理的热处理工艺，调整两相的组织形态以获得良好的综合性能，对 TC4 双相钛合金具有重要的意义。

■ 结论

TC4 钛合金中 α 、 β 两相的尺寸、形态、分布，对钛合金的性能有着直接影响，本文利用岛津 EPMA-1720 型电子探针，分别对再结晶退火前后的 TC4 钛合金样品中进行了表征。测试结果表明，再结晶退火后，两相晶粒发生了明显的聚集长大现象， α 相晶粒尺寸由 10.5 μm 长大到约 17 μm ，而 β 相形态由之前的细小的近似等轴晶转变为粗大的板条状，且基本沿 α 相晶界呈网状分布。类似的工作可拓展用于评估 TC4 钛合金热处理工艺效果、优化设计热处理工艺及揭示组织性能强化机制。

岛津应用云

