

# Ti-6Al-4V航空紧固件热成形温度对显微组织的影响研究

■ 朱李云, 程全士, 胡庆宽, 许永春, 冯德荣

**摘要:** 通过采用红外线测温仪, 对Ti-6Al-4V紧固件热成形加热温度与显微组织的关系研究, 明确了热加工参数, 优化了热成形加工工艺, 保证了产品的质量与生产进度。

**关键词:** 紧固件; 显微组织; 热成形

Ti-6Al-4V钛合金是一种中等强度的 $\alpha + \beta$ 型两相钛合金, 与国内TC4材料相近, 含有6%的 $\alpha$ 相稳定元素Al和4%的 $\beta$ 相稳定元素V。该合金具有优异的综合性能, 在航空和航天领域获得了广泛应用, 长时间工作温度可达400℃, 在航空工业中主要用于制造发动机的风扇、压力机盘与叶片, 以及飞机结构中的梁、接头、隔框和紧固件等重要的承力构件。

为了保证紧固件良好的疲劳、持久等力学性能, 头部常采用镦制成形。而Ti-6Al-4V在室温下的退火态组织为大量的 $\alpha$  (hcp) 相+少量的 $\beta$  (bcc) 相, 由于 $\alpha$ 相的冷变形能力要比 $\beta$ 相差, 因此钛合金导热性差, 如果采取冷镦成形, 易产生折叠、裂纹, 内部空洞及绝热剪切带等缺陷; 所以Ti-6Al-4V往往采取头部热镦成形。在实际生产过程中, 为了保证产品进度, 常采用加热效率高、生产速度快的高频感应加热方式进行升温。在

应变速率不变的情况下, 提高成形温度, 有利于材料的塑性变形。但高频感应加热速度快, 温度难以控制, 易造成产品过热。

## 1. 原材料验证

为保证Ti-6Al-4V钛合金紧固件热成形质量, 有效控制其加热温度及保温时间, 现选取不同加热参数, 通过对显微组织观察, 判断热加工参数设置的合理性。

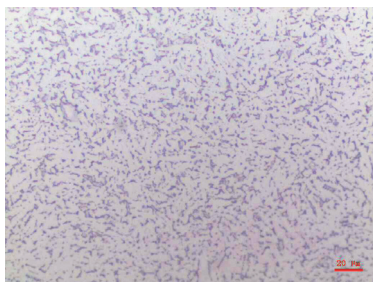
为保证试验结果的准确性, 选取进口的Ti-6Al-4V钛合金材料, 其显微组织如图1所示。

其中, 图1a为Ti-6Al-4V原材料横向显微组织形貌, 图1b为纵向显微组织形貌特征。可看出:

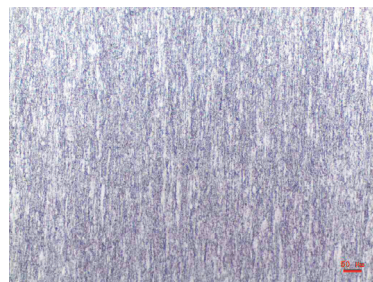
其显微组织形态为等轴组织, 在等轴的 $\alpha$ 相基体上, 分布着细小的 $\beta$ 相。该材料组织均匀, 未见明显冶金缺陷, 为典型的 $\alpha + \beta$ 双相钛合金。

为验证加热参数对原材料显微组织的影响, 将该Ti-6Al-4V原材料用高频感应加热, 加热至1000℃高于其相变点以上, 保温15s, 观察显微组织。

图2为1000℃, 保温15s的原材料显微组织特征。可以看出: 在200×下, 组织粗大, 晶粒明显, 晶粒内部有网状组织, 未发现细小的 $\beta$ 相存在; 图2a与图2b具有类似的组织结构, 晶粒基本上成等轴状, 魏氏组织形貌。



(a) 横向组织 (200×)



(b) 纵向组织 (200×)

图1 Ti-6Al-4V原材料显微组织

由于Ti-6Al-4V中铝含量相对较低，所以其增加点阵的扭曲程度，阻止原子再结晶过程中的定向移动并延迟晶粒长大的能力较弱。因此当加热温度高于相变温度后，原细小的等轴双相组织晶粒逐渐长大，原晶界处存在的细小 $\beta$ 相也溶入了 $\alpha$ 相基体当中，随着温度的降低，在晶粒内析出网状的魏氏组织。

Ti-6Al-4V原材料为退火态，其组织为平衡态组织。在加热及保温过程中，没有产生再结晶，随着加热温度的升高及保温时间的延长，其原子达到了扩散激活能，晶粒长大的驱动力来源于晶界迁移后体系总的自由能的降低。温度是影响晶粒长大的主要因素，而晶界的迁移与原子的扩散有关，扩散系数越大，晶界越容易迁移，即晶粒越容易长大。

通过对Ti-6Al-4V原材料高频感应加热至1000℃，保温15s，晶粒明显长大且成等轴状，并产生了魏氏组织。

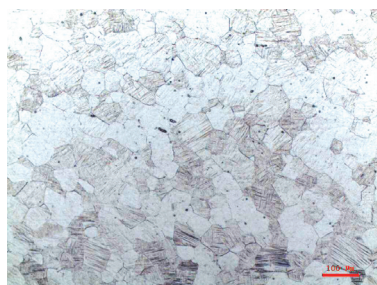
## 2. 产品镦制加热参数验证

为了验证Ti-6Al-4V钛合金紧固件在热镦时，是否出现过热现象，又对原材料进行了头部成形试验，其加热参数为温度1000℃、940℃，保温时间均为15s，其显微组织如图3所示。

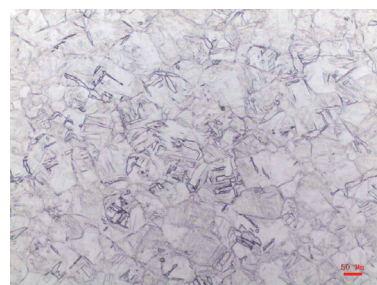
图3为不同加热温度下的Ti-6Al-4V钛合金紧固件显微组织特征，从中可看出：图3a原材料经1000℃保温15s后，经压力机镦制成形后，晶粒长大，成等轴的六边形形状，组织分布较为均匀；图3b为杆部显微组织，晶粒从表层到内部依次减小，由于

高频感应加热为瞬时加热，保温时间较短，材料仅表层获得了大量的能量，达到了原子的扩散激活能，使表层晶粒迅速长大，而材料内部仍保持原材料组织状态。加热镦制时，产生了动态再

结晶，且由于动态再结晶的晶核形成及晶粒长大期间仍受变形作用，使之反复形核、有限生长的特点，动态再结晶得到等轴晶粒组织，晶粒较为细小，晶粒大小决定于应变速率和变形温度。变



(a) 横向组织 (100×)

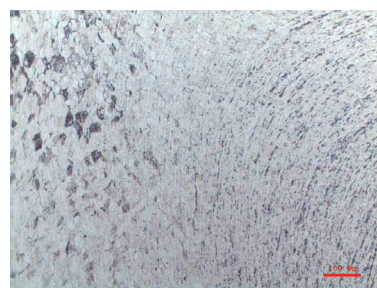


(b) 纵向组织 (200×)

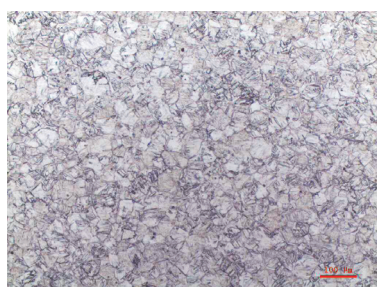
图2 原材料过热组织



(a) 头、杆结合处显微组织 (200×)



(b) 杆部显微组织 (100×)



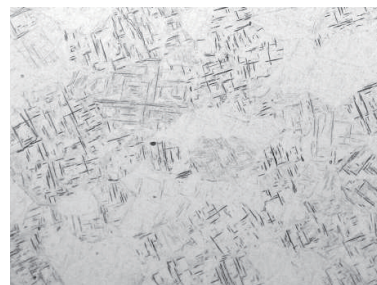
(c) 头、杆结合处显微组织 (100×)



(d) 头部非支撑面处显微组织 (100×)



(e) 头部非支撑面处显微组织 (100×)



(f) 头部非支撑面处显微组织 (500×)

图3 不同温度处理的Ti-6Al-4V显微组织

形温度越高, 应变速率越低, 也越易得到较大的晶粒。

图3c为高频感应加热940℃、保温15s的显微组织, 从中可看出: 晶粒较1000℃时明显减小, 晶粒破碎, 刚形核的晶粒还没有完全长大就失去了长大的驱动力; 图3d为螺栓头部上端面的显微组织形貌特征, 从图中可看到在裂纹两边, 显微组织完全不同, 裂纹左边为过热组织, 较为粗大, 裂纹右边为细密、破碎的显微组织。在塑性变形时, 对于 $\beta$ 相来说, 属于体心立方结构, 有48个滑移系; 而 $\alpha$ 相为密排六方结构, 只有3个滑移系。在受力时, 体心立方结构的 $\beta$ 相比密排六方结构的 $\alpha$ 相变形要容易的多, 在受力时, 滑移面的夹角与外力轴线的夹角越来越接近45°, 并且在粗晶粒和细晶粒之间形成的内应力共同作用, 导致了沿45°角开裂现象。

图3e为产品在成品检测时发现的过热现象。从图中可看出: 晶粒粗大, 基体上无初生的 $\alpha$ 相, 晶内出现明显的魏氏组织, 为典型的Ti-6Al-4V过热组织; 图3f为图3e的放大500×, 从中可看出: 组织粗大, 成网状的魏氏组织; 图3e与图3f为热锻过热产品, 又经940℃固溶与520℃时效处理之后的显微组织。过热组织在后续的热处理过程中很难纠正。产品一经交付将对产品的力学性能产生较大影响。

为找到合适的温度和保温时间, 使Ti-6Al-4V原材料热锻成形时不产生过热现象, 既节约资源, 又保证生产效率, 又进行了

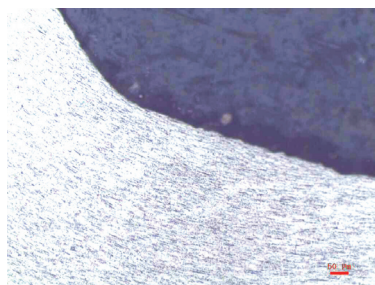
一系列的验证, 当加热温度降低至890℃时, 观察产品经锻制成形后的组织形貌。

图4为在固溶温度940℃以下、加热温度为890℃、850℃的不同显微组织。图4a和图4b为加热温度为890℃下的杆部与头、杆结合处的组织特征, 从中可以看出: 其显微组织与图1所示的原材料相差不大; 图4c与图4d为加热温度为850℃下杆部与头、

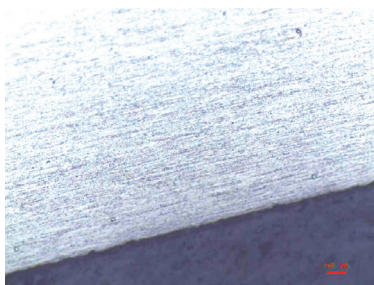
杆结合处的组织特征, 其显微组织比图1中所示的原材料更为细小。在动态再结晶过程中, 由于加热温度不高, 新形核的晶粒还没有来得及长大就失去了长大所需的驱动力, 造成晶粒细小。细小的晶粒在后续的热处理过程中将逐步长大, 由于加热温度的限制, 其长大的程度也受到很大的限制, 形成更好力学性能的显微组织。



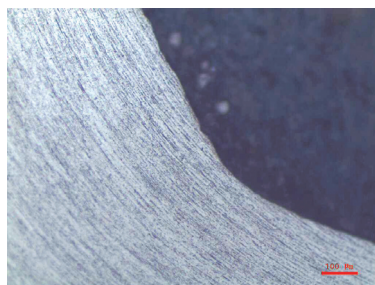
(a) 杆部显微组织 (200×)



(b) 头、杆结合处显微组织 (200×)



(c) 杆部显微组织 (200×)



(d) 头、杆结合处显微组织 (200×)

图4 不同加热温度下的显微组织

### 3. 结语

通过对Ti-6Al-4V紧固件热锻加工参数对显微组织影响的研究, 在1000℃、940℃下加热与保持较长时间, 易产生显微组织过热、晶粒长大及形成魏氏组织等缺陷; 在890℃、850℃下锻制, 产品均未出现过热现象, 无折叠、裂纹等缺陷产生, 850℃下锻制更能提高生产效率, 节约资源。后期热处理及试验证明,

在该温度下加工的产品, 经固溶、时效处理后, 产品的抗拉强度、抗剪强度、疲劳强度、金相等均符合相关产品标准要求, 保证了产品质量的一致性。

作者简介: 朱李云, 空军驻郑州某军代室; 程全士、胡庆宽、许永春、冯德荣, 河南航天精工制造有限公司。

MW 20160918