

固溶温度对Ti-6Al-4V螺栓剪切强度的影响

■ 胡海鹏, 张贤忠, 李克, 杨文乐

摘要: 通过对钛合金Ti-6Al-4V的固溶工艺进行研究。主要试验各种固溶温度对Ti-6Al-4V剪切强度的影响, 并分析了各种固溶温度下的显微组织形态和种类, 获得最佳工艺参数: 970℃固溶+540℃时效, 该热处理工艺得到的显微组织为基体上均匀分布着15%左右初生α相的双态组织, 剪切强度可达690MPa以上, 满足某型航机高锁螺栓使用要求。

关键词: Ti-6Al-4V; 固溶; 剪切强度; 初生α相

由于钛合金的比强度、防腐蚀性能以及高温性能的优越性, 早在20世纪中期就在航空航天业进行了大规模的应用, 钛合金有三种不同的结构形式: α钛合金、α+β钛合金和β钛合金。Ti-6Al-4V是一种使用范围最广的α+β钛合金, 更由于其耐热性、强度、塑性、韧性、成形性、可焊性、耐蚀性和生物相容性均较好, 成为钛合金工业中的王牌合金。

针对某型航机高锁螺栓, 性能要求为: $\sigma_b \geq 1100\text{MPa}$, τ (剪切强度) $\geq 670\text{MPa}$ 。与普通钛合金螺栓相比, 抗拉强度等要求基本一致, 但剪切强度提高了20MPa (航标及其他型号 $\tau \geq 650\text{MPa}$)。现有的热处理工艺为950℃WQ+540℃AC, 很难达到该剪切强度要求, 因此需对现有的Ti-6Al-4V热处理工艺950℃进行优化。

1. 试验方案设计与试验过程

(1) 试验材料的选择 选

用材料为RMI Titaninm Company生产的Ti-6Al-4V (化学成分见表1), 符合AMS4967J材料标准, 材料规格 $\phi 8\text{mm} \times 100\text{mm}$, 原材料供货状态为退火态 (760℃×2h), 退火组织如图1所示, 组织为分布均匀细小等轴α相的等轴组织。氢含量: 0.0048% (质量分数), β转变点991℃。

(2) 试验参数及设备的选择 热处理试验在真空水淬炉WZC-30 (Ⅲ类加热设备) 和真空回火炉WZH-45 (Ⅱ类加热设备) 内进行, 按MIL-H-81200标

准现选取几种固溶温度进行试验 (见表2)。

(3) 剪切试验 热处理完成后, 将试样制成 $\phi 6_{-0.03}^{+0.03}\text{mm}$ 剪切试棒, 按GJB715.26—1990紧固件试验方法, 采用微机控制电子万能试验机及开放式工装进行双

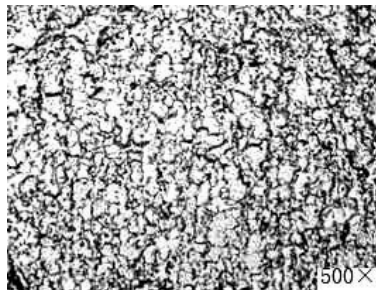


图1 原材料退火态组织

表1 Ti-6Al-4V化学成分 (质量分数) (%)

C	N	Fe	Al	V	Cu	Si	O	H	Ti
0.004	0.004	0.17	5.99	3.88	0.1	0.1	0.15	0.0048	余

表2 固溶温度的选择

固溶处理	920℃×90s	940℃×90s	950℃×90s	960℃×90s	970℃×90s	980℃×90s
冷却方式	自来水, 水温20℃, 循环搅拌					
转移时间	9~10s					
时效工艺	540℃×4h, 1bar气冷					

注: 1. 固溶处理真空度控制在 $6.6 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 以下。
2. 时效处理先抽真空 $\leq 6.6 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 后充99.999%的氩气保护加热。

剪试验。

(4) 对试样进行微观形貌检测 Ti-6Al-4V浸蚀剂组成配比: HF:HNO₃:H₂O=10mL:5mL:85mL。浸蚀时间:10s左右。试样制好后用Tiger 3000金相显微镜观察试样的金相组织。

2. 结果与讨论

(1) 固溶温度对剪切强度的影响 通过对6组试样在920~980℃内固溶+540℃×4h时效后,将试样加工成 $\phi 6_{-0.03}^{+0.04}$ mm剪切试棒,进行开放式双剪试验,剪切强度如图2所示。

通过试验可以发现,在相同的标准时效制度下,随着固溶温度的升高,Ti-6Al-4V材料的剪切强度整体呈正比升高。在920~950℃的固溶温度范围内,随着固溶温度的升高,剪切强度增加相对缓慢,且无法达到某型航机零件要求的 $\tau \geq 670$ MPa。在950~980℃的固溶温度范围内,随着固溶温度的升高剪切强度增加明显,960℃固溶时剪切强度达到了678MPa,980℃固溶更是达到了700MPa以上,相比某型航机零件的剪切强度要求有了足够的富余量。

由此可见,为满足设计要求,应选择固溶制度为:970℃固溶+540℃时效处理。

(2) 固溶温度对显微组织的影响 将6组试样用电粉末镶嵌抛光后,对试样进行腐蚀并进行显微组织(500×)检查,如图3所示。

通过显微组织分析,在920~970℃固溶处理的试样,显微

组织是由层片状组织和等轴状组织共同组成的双态组织,表现为 β 基体上分布着等轴的初生 α 相及细针状次生 α 相,随着温度的升高初生 α 组织的数量减少而针状 α 组织数量增多。从图3可看出,920℃固溶后,初生 α 相面

积比接近50%,但当固溶温度升高到950℃时,初生 α 相比例降至30%左右,初生 α 相形态和尺寸无明显变化;固溶温度升高到970℃时,等轴初生 α 相比例进一步降至15%左右,且可以清晰地看出部分等轴初生 α 相变小以

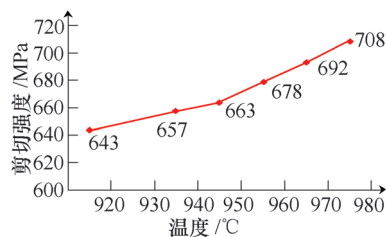


图2 固溶温度对剪切强度的影响

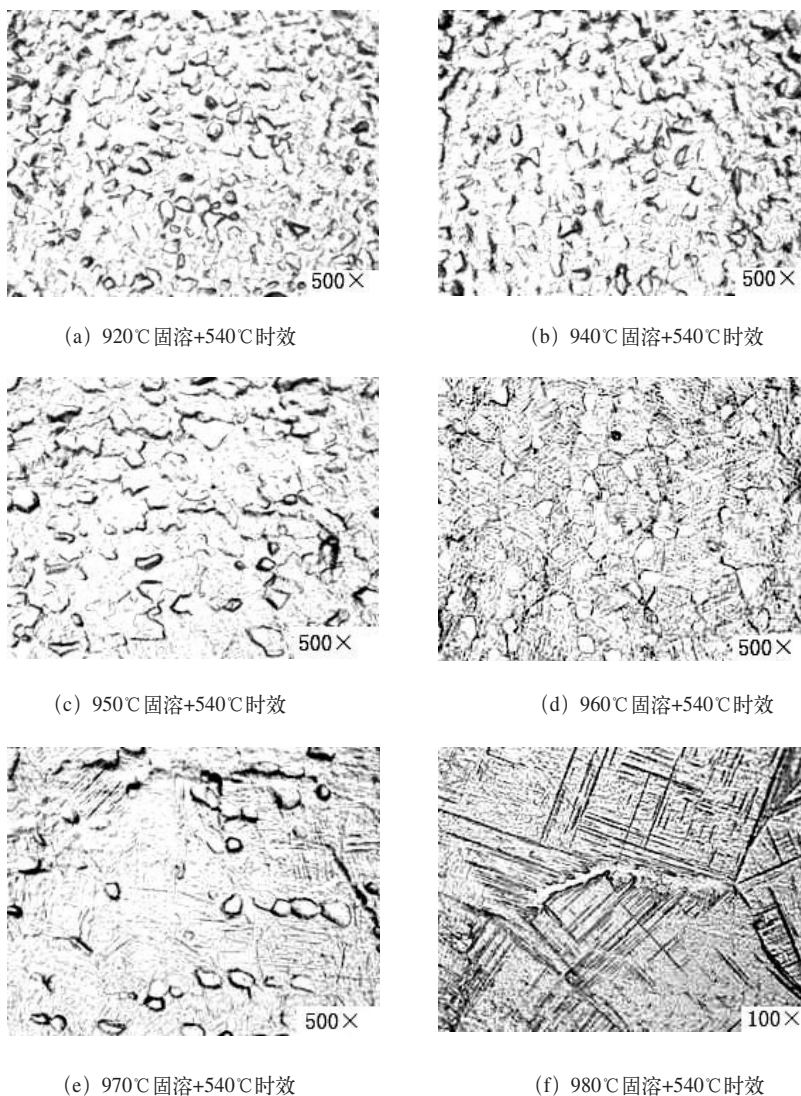


图3 各种状态下的显微组织

及即将溶解的形态；当固溶温度升高至980℃，等轴初生 α 相基本消失，基体变成了大晶粒 β 相的片层组织，说明该温度已很接近 β 相变点。

不同的显微组织对钛合金的力学性能有着强烈的影响：①等轴状组织往往具有高的塑性和疲劳强度，并易于超塑性变形。②片层组织具有高的断裂韧性、优异的抗蠕变性能和抗疲劳裂纹扩展性能。③双态组织综合了层状和等轴组织的优点，具有优良的综合性能。对于 $\alpha+\beta$ 型钛合金，固溶处理的目的是为了得到马氏体 α' 、 α'' 、 ω 和少量亚稳定 β 相，并控制初生 α 相的百分含量来调整强度，固溶温度一般在 β 转变温度以下。Ti-6Al-4V合金的力学性能与初生 α 相数量和形态有密切关系，一般来说，初生 α 相含量越多，室温拉伸塑性和疲劳性能越好；初生 α 相数量越少，则高温持久、蠕变和断裂韧度越好。为了获得优异的综合性能，初生 α 相含量通常希望控制在15%~50%。试验中，随着固溶温度的升高，在960℃固溶后，显微组织中隐约出现了细小次生针状 α 相。次生

针状 α 相是在固溶过程中溶解的初生 α 相在冷却过程中形成的，次生 α 相形核后向 β 相内生长，形成 α 束域或 α 丛，形状呈细小针状分布。 α 丛的大小受许多因素影响，加热温度越高，保温时间越长， β 稳定元素含量越大， β 相变点越低， α 丛越大。次生针状 α 相对强度的提高有促进作用。

在试验中，970℃固溶后，初生 α 相的数量显著下降，占比约15%，次生 α 相明显析出；980℃固溶后，在 $\alpha+\beta$ 基体分布粗大片状或针状 α 相，整齐地分布在 β 晶粒内部，等轴 α 相已消失， β 相晶粒也显著长大，晶界变粗变淡，是典型的魏氏组织或片层组织。魏氏组织的强度较高，但塑性很差，对紧固件不适用。

由此可见，为满足设计要求，应选择固溶制度为：970℃固溶+540℃时效，组织一般为基体上分布着15%左右初生 α 相的双态组织。

(3) 验证 通过上述分析，采用970℃固溶+540℃时效的工艺生产了一批零件对零件进行力学性能检查，完全满足某型

航机高锁螺栓 $\sigma_b \geq 1100\text{MPa}$ ， $\tau \geq 670\text{MPa}$ 的要求。

3. 结语

通过试验，找出了固溶温度对Ti-6Al-4V剪切性能和显微组织的影响，并得出以下结论：

(1) 在固溶温度920~970℃内，随着温度的升高，剪切强度从643MPa显著提高至692MPa，提升幅度为7.6%。

(2) 在固溶温度920~970℃内，随着温度的升高，显微组织中的等轴初生 α 相数量从50%左右减少至15%左右，在960℃以上有细小的次生针状 α 相析出。当980℃固溶时，等轴初生 α 相彻底消失，并形成粗针状 α 相。

(3) 经970℃固溶+540℃时效处理的Ti-6Al-4V零件能满足某型航机高锁螺栓 $\sigma_b \geq 1100\text{MPa}$ 、 $\tau \geq 670\text{MPa}$ 的要求。

作者简介：胡海鹏、张贤忠、李克、杨文乐，中国南方航空工业（集团）有限公司热表处理中心。

MW 20160918

征稿启事

《金属加工（热加工）》特设感应加热栏目，涵盖感应热处理、感应熔炼、感应透热等领域，并面向广大热加工行业工作者征集优秀稿件，凡内容涉及相关工艺、设备、材料、检测技术、缺陷分析，以及节能环保技术和生产管理文章均可向本刊投稿。

稿件一经录用可优先发表。

投稿路径：1. 登录<http://tougao.mw1950.cn> 网上投稿系统

2. 邮箱：rb1950@126.com

《金属加工》编辑部