

抽钉用拉拔 CP 钛的组织演变研究

庄宝潼, 刘风雷, 赵庆云, 朱成祥

(中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

[摘要] 研究了拉拔态 CP (Commercially Pure) 钛不同加热温度下的组织演变, 确定了再结晶温度。结果表明: 在保温 20min 的条件下, 当加热温度为 550~600℃ 时内部组织发生回复; 加热温度为 600℃ 时开始出现再结晶组织; 达到 650℃ 时发生完全再结晶, 晶粒呈等轴状, 大小为 2~5 μm, 抗拉强度为 525MPa。研究了保温时间对内部组织的影响, 当不进行保温时, 在 650℃ 温度下不能使材料发生完全再结晶; 当保温时间为 20min 时, 材料发生完全再结晶且组织状态良好; 在 650℃ 下保温时间达到 1h, 材料组织粗大。冷却方式对显微硬度的影响较小, 对晶粒度有一定影响, 当加热温度为 600~650℃ 时, 水冷方式晶粒细小, 当加热温度小于 600℃ 或大于 700℃, 冷却方式对晶粒度影响较小。
关键词: 拉拔态 CP-Ti; 再结晶; 抽钉; 组织演变; 显微硬度

Research of Microstructure Evolution for Drawing State CP Titanium in Blind Rivet

ZHUANG Baotong, LIU Fenglei, ZHAO Qingyun, ZHU Chengxiang

(AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] Structure evolution of the drawing state CP (Commercially Pure) titanium is studied under different heating temperature, the recrystallization temperature is determined. The results show that the tensile strength of rivets set materials drawing state CP Ti is higher than 720MPa. In the condition of 20min heat preservation, reply temperature of CP Ti is from 550– 600 ℃ , and the recrystallization temperature is from 600–650 ℃ . And the recrystallization is completed when the temperature reaches 650℃ in which the strength of extension is 525MPa. Grains become equal shape, which size is 2–5μm. The recrystallization performance of drawing state CP Ti is affected by the heat preservation time. When there is no heat preservation, recrystallization would not fully complete on the temperature of 650℃ in the material. When the time of heat preservation is 20 min, fully recrystallization will take place successfully in the materials and its organization will be in good condition. When the heat preservation temperature reaches 1h at 650℃ , material organization will become bulky and its plastic performance will degrade. There are more effect on grain size than microhardness, the grain size is small when cooling in water under heating temperature 600–650℃ .

Keywords: Drawing state CP-Ti; Recrystallization; Blind rivet; Microstructure evolution; Microhardness

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.06.098

钛及钛合金具有高比强度、良好的耐蚀性、低弹性模量, 广泛应用于航空、海洋、医疗等行业, 由于其生产成本较高以及热处理工艺复杂, 限制了其在普通行业的应用^[1]。钛合金中 Ti-6Al-4V 应用最为广泛, 占到钛合金产品总量的 60%^[2]。纯钛虽然没有 TC4 应用广泛, 但是由于具有单相 α 组织, β 相组织转变温度较高, 还有良好的组织稳定性、耐热性、耐腐蚀性以及焊接性, 在生物医学等领域具有潜力。Poondla 等^[1]研究了 CP (Commercially Pure) 钛的显微硬度与组织关系。曹继敏等^[3]研究了纯钛在不同保温时间下的组织演变。但

是拉拔态 CP 钛的组织演变未见报道。抽钉中的钉体采用拉拔态 CP 钛, 钉体在安装过程中由于局部发生鼓包进而夹紧被连接件, 所以需要钉体局部进行再结晶退火, 以降低强度、提高塑性。本文研究不同加热温度下 CP 钛的再结晶组织变化, 采用金相法与硬度法确定再结晶温度^[4], 并且分析加热温度、保温时间以及冷却方式对组织、硬度的影响, 从而为钉体软化提供理论基础。

1 试验及方法

试验材料为拉拔态 CP 钛, 化学成分如表 1 所示, 经

过轧制、拉拔后得到直径为 $\phi 5.02$ 棒材,原材料显微组织为长纤维组织,抗拉强度为778MPa,如图1所示。

热处理设备为真空淬火炉,真空度高于 2×10^{-2} ,将试样分别加热至550~800℃,保温20min,然后水冷。采用水冷的目的是为了将高温下的组织大小保留至室温,防止缓慢冷却造成晶粒组织长大,具体热处理工艺如图2所示,加热温度分别为:550℃、600℃、650℃、700℃、750℃、800℃。

试样经镶样、打磨、抛光、侵蚀后,在JENAPHOT 2000光学显微镜下观察显微组织;抛光干燥后的试样用HXD-1000TMC/LCD型显微硬度计测量显微硬度;采用Z100电子材料万能试验机测试力学性能。

2 结果与讨论

2.1 加热温度的影响

不同加热温度下材料的显微组织如图3所示。当加热温度为500℃时,仍为拉拔态组织,如图3(a)所示,此时与图1所示的钉体原材料组织相似,均呈现出沿轴向的纤维状。

当加热温度为550℃时,拉拔态CP-Ti材料的纤维组织逐渐消失,在晶界处出现细小的晶粒。分析认为:由于晶界处能量高,容易形核,该晶粒为加热保温过程中出现形核所致,如图3(b)所示。

当加热温度升高到600℃时,形核生成的小晶粒进一步长大,晶粒的长大反过来促使形核进一步扩展,如

表1 CP钛化学成分及含量(质量分数) %

C	Fe	O	N	Ti
0.015	0.14	0.12	0.0048	其余

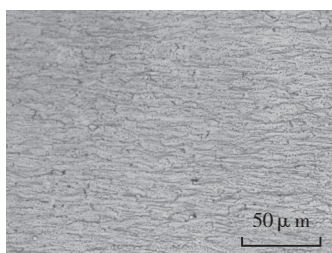


图1 原材料显微组织

Fig.1 Microstructure of raw material

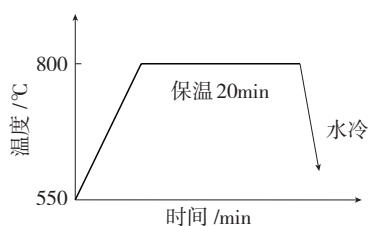


图2 热处理制度

Fig.2 Heat treatment

图3(c)所示,当扩展到一定程度时即开始发生再结晶。形核及其长大是CP-Ti发生再结晶的必要条件,形核的进一步长大为材料的再结晶提供组织和能量基础^[3,5]。

当加热到650℃时,晶粒进一步长大,当长大到一定程度后会发生相互接触,从而使晶粒呈等轴状,如图3(d)所示。由于此时晶粒细小均匀,在同样变形量下,每个晶粒变形均匀,所以应力集中引起的开裂机会少,从而使材料表现出良好的塑性。

当加热温度达到700~750℃时,形成的等轴晶会进一步长大,而且相邻晶粒会逐步发生互相吞并,不断长大,慢慢出现组织粗大的现象。图3(e)、(f)所示分别为将CP-Ti加热到700℃和750℃条件下保温并冷却后的组织形貌,可以看出明显的晶粒吞并长大的现象。

当加热温度为800℃时,晶粒直径达到50μm以上,如图3(g)所示,晶粒过分长大,晶界明显。

不同加热温度下材料显微硬度如图4所示。随着

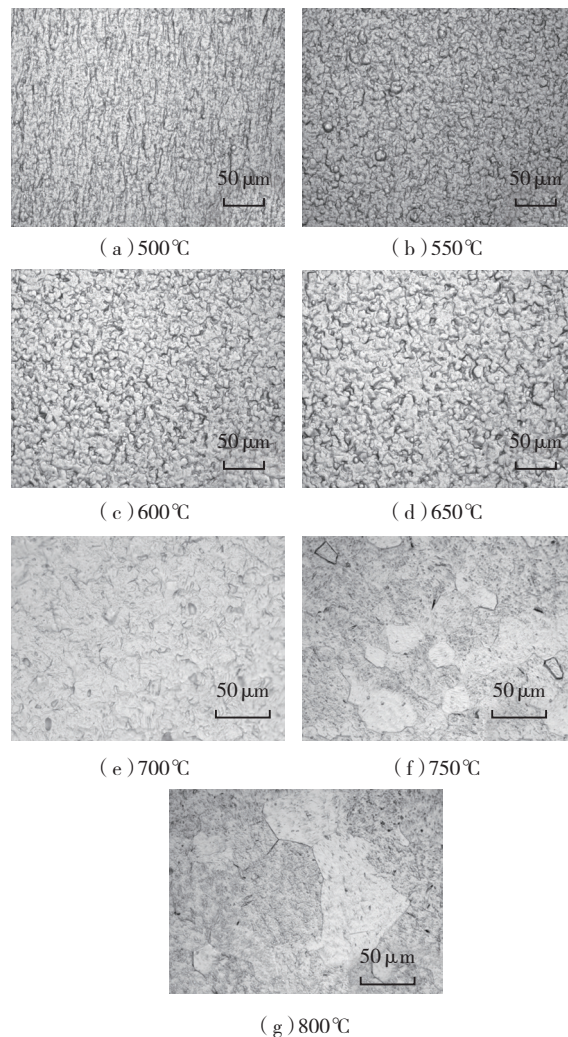


图3 拉拔态CP-Ti在不同加热保温后的组织

Fig.3 Microstructural of drawing state CP-Ti under different heat temperature

加热温度升高,显微硬度均有所下降,在 550~600℃之间硬度下降趋势最为明显。分析可知,拉拔态 CP-Ti 会发生回复现象,当材料发生回复时,将大幅消除冷变形加工中产生的晶格畸变,释放多余的畸变能,使钛材的加工硬化大大降低,宏观上表现出硬度急剧下降^[2]。

回复温度一般略低于钛材的再结晶退火温度,即在回复之后如果对材料继续加热升温,材料会进一步发生再结晶^[6]。因此,该材料显微硬度急剧下降的温度区间是材料发生回复的温度区间。紧邻回复温度区间的更高温度区间为发生再结晶的温度区间。

加热温度随抗拉强度的变化关系如图 5 所示,抗拉强度随着加热温度的升高而降低,当加热温度小于 600℃时,抗拉强度下降较快,原材料抗拉强度为 778MPa;当加热温度为 500℃,抗拉强度为 670MPa,当加热温度为 550℃时,抗拉强度为 541MPa;当大于 650℃时抗拉强度相差不大,650℃时抗拉强度为 525MPa。

综上,结合图 3、图 4 和图 5 可以得出该拉拔态 CP-Ti 材料在保温时间为 20min 的条件下,加热温度为 550~600℃时,内部组织发生回复;在加热温度为 600~650℃时内部组织发生再结晶,再结晶的温度为 650℃。

2.2 保温时间的影响

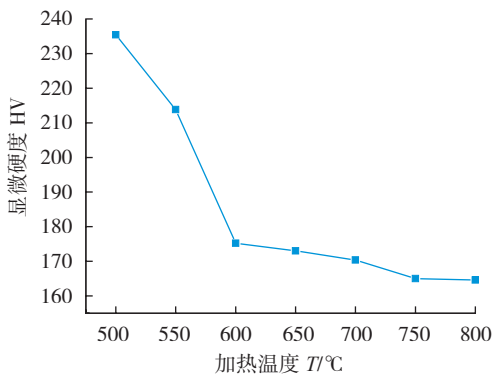


图4 加热温度与显微硬度的关系

Fig.4 Relationship of heating temperature and the microhardness

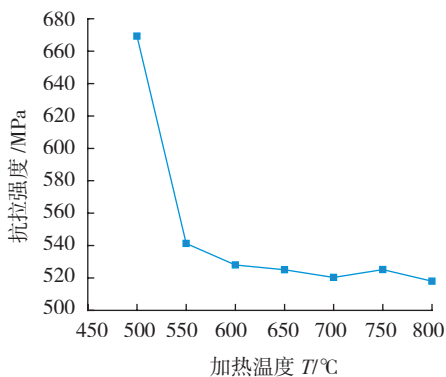


图5 加热温度与抗拉强度的关系

Fig.5 Relationship of heating temperature and the tensile strength

在再结晶温度 650℃下研究不同保温时间(不保温、保温 20min、保温 60min)对组织、硬度的影响。不同保温时间下的显微组织如图 6 所示。

650℃不保温时,其组织如图 6 (a)所示,拉拔态 CP 钛原有的纤维状组织消失,发生了形核过程,但晶粒未充分长大,原因是晶粒形核长大需要一定的能量,但在该过程中温度迅速降低,未能给再结晶过程持续提供能量。所以在温度达到再结晶开始温度后,虽然晶粒在急剧的加热过程中发生了一定的形核与长大过程,但再结晶过程很不充分,所以晶粒无法达到完全再结晶时的等轴状。

当加热到 650℃后,保温 20min 时,其组织状态如图 6 (b)所示。此时,材料晶粒呈现等轴状,表明已经发生了完全再结晶。

当温度加热到 650℃并将保温时间升至 60min 时,其组织状态如图 6 (c)所示。显然,此时材料晶粒较保温 20min 时粗大,直径接近 50μm。这种晶粒状态与加热至 700~750℃保温 20min 的状态相似,即加热至 650℃保温 60min 时,原本形成的等轴晶会发生相邻晶粒相互吞并的现象。

拉拔态 CP 钛原材料及加热至 650℃保温不同时间下的显微硬度如表 2 所示。

加热后拉拔态 CP-Ti 的显微硬度值较原材料均有不同程度的下降,这是因为材料经过 650℃加热后发生了不同程度的再结晶。当加热至 650℃不保温冷却时,材料发生较弱程度的再结晶,但晶粒不足以长大成等轴状,显微硬度稍有下降,但下降幅度不大;而当加热至 650℃保温 20min 时,材料充分再结晶,组织转变为等

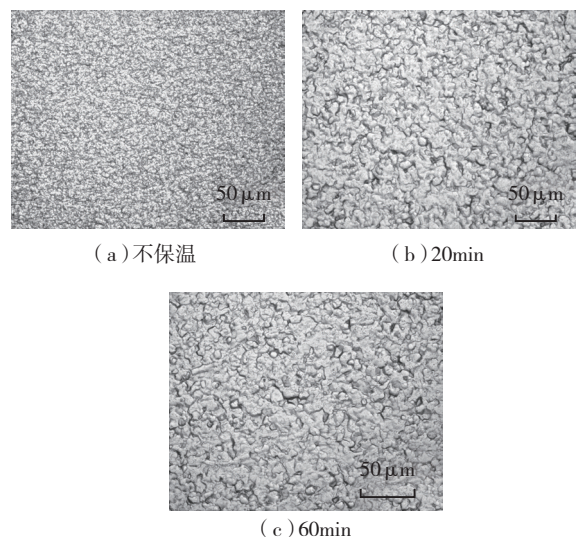


图6 加热650℃不同保温时间的显微组织

Fig.6 Microstructural of heating temperature 650℃ under different heat preservation time

轴状,宏观上表现为硬度下降至最低值;当保温时间为60min时,材料内部晶粒吞并现象造成晶粒粗大,塑性下降,显微硬度较保温20min下有所回升。

2.3 冷却速度的影响

加热后水冷与空冷对显微组织转变影响不大,组织相形貌与图3相似,只是晶粒大小略有不同,不同冷却方式与晶粒度的关系如图4所示,当加热温度小于600℃时,冷却方式的影响不大,这是因为在该温度下组织还处于回复阶段;当加热温度为650~700℃时,水冷比空冷的晶粒度小1级(表3),这是因为在该温度段,组织发生了再结晶,晶粒不断长大,空冷速度慢,在冷却过程还能给晶粒长大提供部分能量,而水冷速度快,冷却后组织基本保持高温时的状态;当加热温度大于750℃时,不同冷却方式得到的组织晶粒度相同,这是由于在该温度下,晶粒不断长大,而空冷过程中所提供的热量不足以支承晶粒持续长大。

不同冷却方式对显微硬度的影响如图7所示,空冷与水冷后组织的显微硬度值相差较小,基本在HV_{0.5}左

表2 拉拔态CP-Ti原材料及650℃下不同保温时间的显微硬度值

材料状态	硬度值 HV _{0.5}			平均值
原材料	246.8	242.9	249.9	246.5
无保温时间	236.7	227.3	220.9	228.3
保温 20min	178.2	175.2	173.2	175.5
保温 60min	191.6	196.6	202.0	196.7

表3 冷却方式与晶粒度关系

加热温 / °C	冷却方式	晶粒度 / 级	加热温 / °C	冷却方式	晶粒度 / 级
550	水冷	11	550	空冷	11
600		10	600		10
650		9	650		8
700		8	700		7
750		5	750		5
800		4	800		4

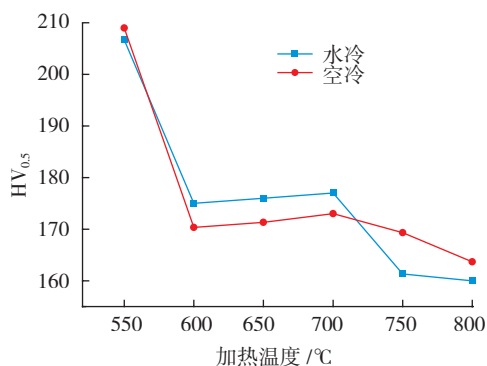


图7 冷却方式对显微硬度的影响

Fig.7 Influence of cooling way and microhardness

右,并且无明显的规律。

3 结论

本文研究了不同加热温度、保温时间、冷却方式下,拉拔态 CP-Ti 的组织演变和性能变化:

(1) 在保温 20min 的条件下,随着保温温度的升高,拉拔态 CP 钛形核长大的倾向逐步增强。在 550 ~ 600℃之间保温,拉拔态 CP-Ti 发生回复,但未发生明显再结晶。在 600~650℃之间保温,拉拔态 CP-Ti 发生明显再结晶,再结晶温度为 650℃。

(2) 在 650℃温度下保温,随着保温时间的增加,材料的再结晶程度逐步加强。无保温时间时,拉拔态 CP 钛未发生再结晶;保温 20min 时,拉拔态 CP 钛完全再结晶,强度有所下降;当保温时间达到 60min 时,明显粗大,塑性变差,强度基本不变。

(3) 当加热温度为 600~650℃时,水冷方式晶粒度大于空冷方式,当加热温度小于 600℃和大于 700℃时,冷却方式对晶粒度和显微硬度的影响较小。

参考文献

- [1] POONDLA N, SRIVATSAN T S, PATNAIK A, et al. A study of the microstructure and hardness of two titanium alloys: commercially pure and Ti-6Al-4V[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 486: 162-167.
- [2] 顾晓辉,刘君,石继红. 淬火、时效温度对 TC4 钛合金组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2011, 36(2): 29.
- [3] GU Xiaohui, LIU Jun, SHI Jihong. Influence of quenching and aging temperature on microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(2): 29.
- [4] 曹继敏,樊亚军. 纯钛再结晶退火的组织演变和力学性能[J]. 热加工工艺, 2012, 41(24): 17-19.
- [5] CAO Jimin, FAN Yajun. Microstructure evolution and mechanical properties of pure titanium after recrystallization annealing[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(24): 17-19.
- [6] 李旭. 工业纯钛的形变孪生和退火再结晶行为研究[D]. 长沙:中南大学, 2011.
- [7] LI Xu. The study of deformation twinning behavior and annealing heat treatment for CP titanium[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [8] 张翥,王群骄,莫畏. 钛的金属学和热处理[M]. 北京:冶金工业出版社, 2009.
- [9] ZHANG Zhu, WANG Qunjiao, MO Wei. Metallography and heat treatment[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
- [10] 徐国富,崔学敏,彭小燕,等. 冷轧工业纯钛的退火再结晶行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(11): 2263-2268.
- [11] XU Guofu, CUI Xuemin, PENG Xiaoyan, et al. Annealing heat treatment behavior in CP-Ti[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(11): 2263-2268.

通讯作者: 庄宝潼,博士、高工,研究方向为先进机械连接技术, E-mail: zbt115@163.com。

(责编 大漠)