

抽芯铆钉钉体镦锻技术研究

Research on Upsetting Technology of Blind Rivets Set

中航工业北京航空制造工程研究所
数字化制造技术航空科技重点实验室

朱成祥 庄宝潼 刘风雷

[摘要] 研究了用于抽芯铆钉钉体的材料 CP-Ti 的再结晶温度以及基于该材料的抽芯铆钉钉体的镦锻工艺。结果表明：当加热温度在 550~800℃ 时，随着加热温度的升高，CP-Ti 显微组织发生回复、再结晶、晶粒长大，结合不同温度下的材料组织变化，通过金相法和显微硬度法确定 CP-Ti 的再结晶温度为 650℃；根据材料特点以及钉体强度要求，采用温锻工艺成形钉体，当加热温度为 400℃ 时，镦锻出的钉体头部成形良好，杆部强度达到设计要求。

关键词：再结晶 硬度检测 金相分析 温锻

[ABSTRACT] With the heating temperature increasing from 550℃ to 800℃, CP-Ti micro-structure generated the phenomenon of recovery, recrystallization and grain growth. With the study of organizational material change at different temperatures, the recrystallization temperature of drawing CP-Ti is identified as 650℃ by optical and Micro-hardness method. Depending on the material characteristics and strength requirements, the rivets body is molded by using warm upsetting. When the heating temperature is 400℃, the upsetting head of the rivets body shaped well, and the shank strength reached HV230.

Keywords: Recrystallization Hardness testing Metallographic analysis Warm upsetting

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.21.096

随着多种新型飞机的研制，在不开敞部位的连接结构大量采用了钛合金拉拔抽钉，以满足现代飞机设计的减重要求^[1]。钛合金拉拔抽钉具有较高的设计强度，而在制造过程中为满足拉拔抽钉钉体的较高抗剪强度，需对其材料 CP-Ti 进行特殊的处理，由此才能满足相应的强度要求^[2]。

CP-Ti 通常具有两种材料状态，即退火态和拉拔态。退火态 CP-Ti 硬度较低，并且难以通过后续热处理对材料进行强化，所以该状态下材料难以满足钉体强度要求。拉拔态 CP-Ti 相对于退火态 CP-Ti 具有更高的强度，镦锻成形后可以得到满足强度要求的钉体。但由于拉拔态 CP-Ti 本身存在较高的加工应力，且在镦锻中存

在着较严重的加工硬化现象，常温镦锻无法满足钉体头部成形的塑性要求。为解决钛合金抽芯铆钉钉体镦锻问题，本文通过试验研究拉拔态 CP-Ti 在不同温度下的组织性能变化，探究其再结晶温度及其性能；并研究了该材料强度与温度变化的关系，基于此，选择出合适的镦锻温度，保证钉体强度满足要求，镦锻工艺合理。

1 试验

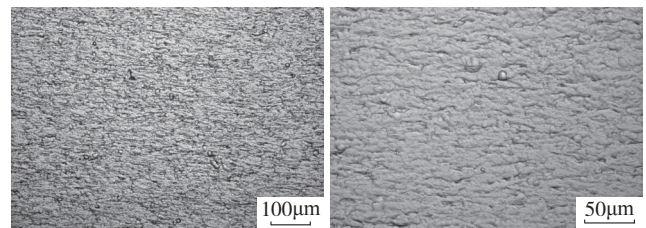
1.1 试验钉体材料

为满足设计的强度要求，钉体杆部要求的显微硬度大于 HV200，这种材料需通过变形强化才能达到这种强度要求，对提供的材料通过 HXD-1000TMC/LCD 型显微硬度检测，CP-Ti 的显微硬度为 HV240 左右，可以满足该硬度要求，其成分如表 1 所示。

表1 CP-Ti化学成分（质量分数） %

Fe	C	H	O	N
0.14	0.014	0.0021	0.12	0.0041

钉体原材料经熔炼-开坯-锻造-轧制-拉丝工艺，显微组织如图 1 所示，为 JENAPHOT2000 光学显微镜下放大 200 和 500 倍观察到的微观组织形貌。由图可知，该组织为典型的单相拉拔态组织。



(a) 放大 200 倍

(b) 放大 500 倍

图1 钉体原材料金相组织照片

Fig.1 Metallographic structure of rivet set materials

1.2 再结晶试验

由于 CP-Ti 的相变点在 882.5℃^[3]，其再结晶温度在该温度以下某一温度点。鉴于此，将试样分别加热至 550℃、600℃、650℃、700℃、750℃、800℃，保温 20min，然后水冷。热处理设备为真空淬火炉。采用水冷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

造成组织长大。热锻即基于此原理,即锻过程中,在加热后,待试样还未冷却即快速锻打,使材料在高温下的组织状态发生塑性变形。

热处理的试样经镶样-粗磨-精磨-抛光-侵蚀后,用 JENAPHOT2000 光学显微镜观察显微组织,在 HXD-1000TMC/LCD 维氏硬度计上测试显微硬度。

1.3 锻试验

锻设备为带感应加热-一模两冲锻机,锻分别采用冷锻、温锻、热锻工艺,钉体外形如图 2 所示。冷锻时,直接上料,在常温下锻成形;温锻时,取再结晶温度以下某一温度点作为锻温度,试验中分别以 300℃ 和 400℃ 为温锻温度,通过感应加热电源将材料加热到该温度后立即锻成形;热锻时,将材料加热到再结晶温度以上某一温度后立即锻成形。通过锻试验结果对比,并结合锻后钉体内部微观组织状态分析,最终确定合适的锻工艺。

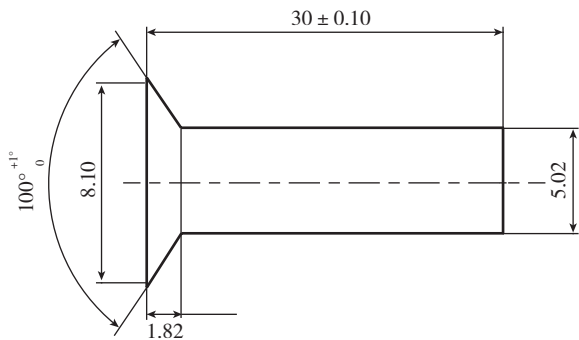


图2 钉体形状示意图 (mm)
Fig.2 Shape sketch of rivet set

2 结果与分析

2.1 钉体材料再结晶温度

在不同的加热温度下,晶粒长大的速度和程度差别较大^[4],图 3 所示为不同加热温度下的试样。先通过金相分析法研究不同温度下材料微观组织状态变化,并分析相应宏观性能的变化。

(1) 当加热温度为 550℃ 时,纤维组织逐渐消失,在晶界处出现细小的晶粒,由于晶界处能量高,所以容易形核,如图 3 (a) 所示。

(2) 当加热温度为 600℃ 时,形核生成的小晶粒继续不断长大,如 3 (b) 所示。

(3) 当加热到 650℃ 时,晶粒长大到一定程度会发生相互接触,从而使晶粒呈等轴状,晶粒大小约 2~5 μm,如图 3 (c) 所示。由于此时晶粒细小,在同样变形量下,每个晶粒变形均匀,因应力集中引起的开裂机会少,从而表现为塑性好。

(4) 当加热温度达到 700~800℃ 时,相邻晶粒互相

吞并,不断长大,如图 3 (d) 和图 3 (e) 所示。随着晶粒的变大,塑性开始下降。

(5) 当加热温度为 800℃ 时,晶粒直径达到 50 μm 以上,如图 3 (f) 所示,此时因晶粒充分长大,晶界明显,材料塑性下降较大。

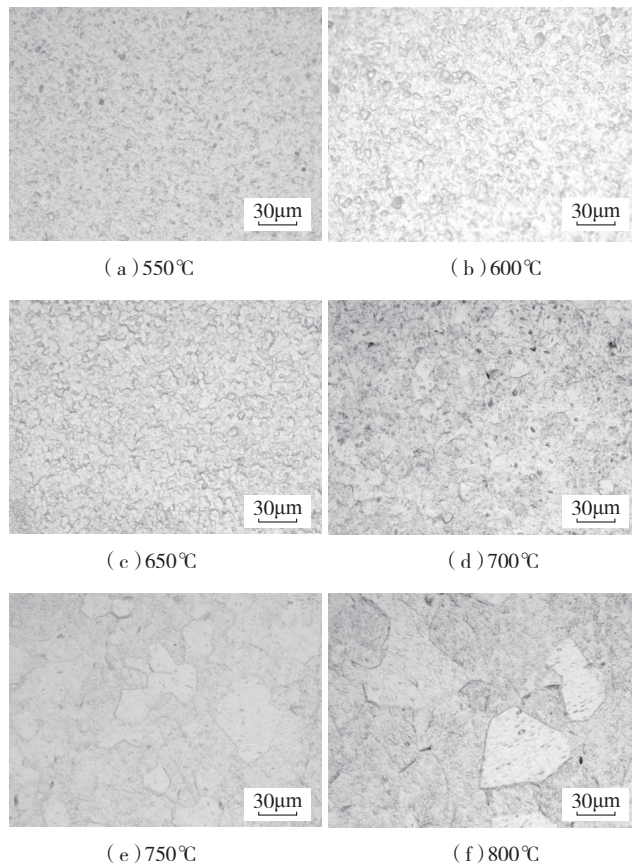


图3 不同加热温度下的显微组织照片
Fig.3 Microstructure at different temperature

再通过显微硬度计检测不同热处理温度下拉拔态 CP-Ti 的维氏硬度,可得如图 4 所示加热温度与显微硬度的关系。由图可知,随着加热温度升高,显微硬度下降。

550℃ ~600℃ 之间硬度下降趋势最为明显,原因在于这一热处理工艺过程包含组织晶粒形核长大的过程,而在材料晶粒尚未形核长大之前,拉拔态 CP-Ti 发生了回复。回复可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,宏观上则表现为硬度急剧下降。而回复的温度一般略低于钛材的再结晶退火温度。

综上,结合上述微观组织分析与图 4 中曲线可以得出:该种材料的再结晶温度在 650℃ 左右,回复温度在 500℃ 左右。

2.2 锻试验结果与分析

2.2.1 冷锻

图 5 为冷锻成形后钉体试样,图中试样表明,冷锻

钉体时容易出现开裂、裂纹和折叠等破坏或缺陷。通过分析材料状态可知,材料为拉拔态 CP-Ti 的钉体,塑性较差,仅为 18%^[5],常温下无法满足头部变形所需的塑性。

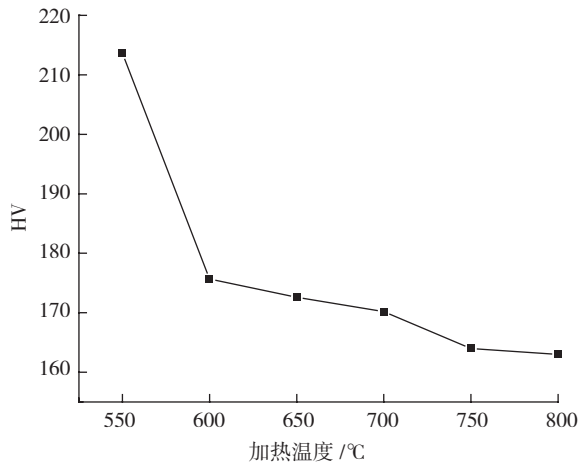


图4 加热温度与显微硬度的关系

Fig.4 Relationship between temperature and micro-hardness



(a) 毛坯冷锻开裂破坏 (b) 毛坯折叠缺陷

图5 钉体冷锻成形试样

Fig.5 Countersunk head screw set upsetting blank

若冷锻时未出现明显的外部缺陷,仍然不可靠,因为内部微裂纹也是钉体锻锻失效的重要缺陷之一。图6所示为冷锻状态下,外形无缺陷的某钉体试样在光学显微镜下观察得到的内部微观组织,可以发现明显的微观裂纹。由此可见,采用冷锻工艺成形钉体头部,极易形成宏观或微观缺陷。该工艺不适用于钉体头部锻锻成形。

2.2.2 温锻

图7所示分别为 300°C 和 400°C 温度下温锻成形试样。从试验结果可以看出,采用温锻工艺,试样头部成形较好,无裂纹、折叠等缺陷产生。

从图中可以看出,在 300°C 下锻锻成形的试样,头部 P 值(P 值是衡量钉体头部高度的一个重要参考值)较大,经测量超出钉体尺寸要求。而在 400°C 时 P 值合格,头部成形良好。而且该温度下钉体在圆角处有流线,头部无内部裂纹,杆部未受热影响,组织性能良好,如图 8 所示。经硬度检测,显微硬度为 HV 238,达到设计要求。

由此可见,将拉拔态 CP-Ti 加热到 300~400°C 时明

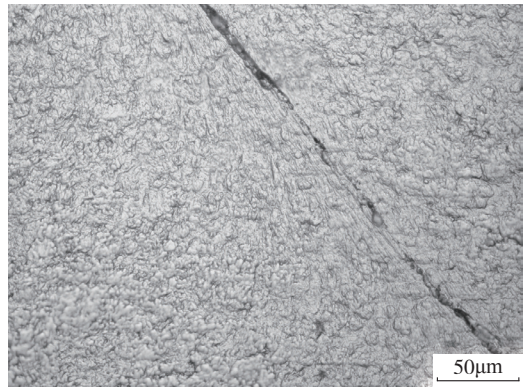
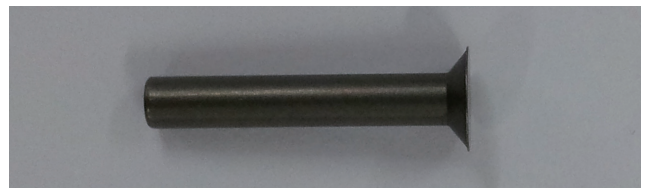


图6 钉体冷锻后微观形貌

Fig.6 Microstructure of cold heading specimen



(a) 300°C



(b) 400°C

图7 不同温度下钉体温锻成形试样

Fig.7 Rivet set warm upsetting forming specimen at different temperature

显降低了变形抗力,随着温度升高,材料的变形抗力下降得越明显,钉体头部成形越容易。

2.2.3 热锻

在温锻基础上继续升高锻锻温度达到或超过钉体原材料再结晶温度,即为热锻。

将钉体头部加热到再结晶温度 650°C 时,观察钉体杆部微观组织,如图 9(a) 所示,此时钉体杆部仍保持原有纤维状形貌。但经硬度检测,此时杆部显微硬度已经明显下降,相应强度下降,难以保证最终钉体成型后的质量。

当加热达到 850°C 时,钉体杆部微观组织如图 9(b) 所示。此时在纤维晶界处出现细小的组织,已经形核生成了新晶粒。杆部显微硬度进一步下降,强度已不满足钉体强度要求。

以上分析表明,热锻时,材料塑性大大增加,可锻锻得到外形与 400°C 温度下相同的钉头,但钉体头部显微硬度可能会下降到 HV200 以下,显著削弱钉体的强度。若温度进一步升高接近相变温度,不仅头部强度下降,

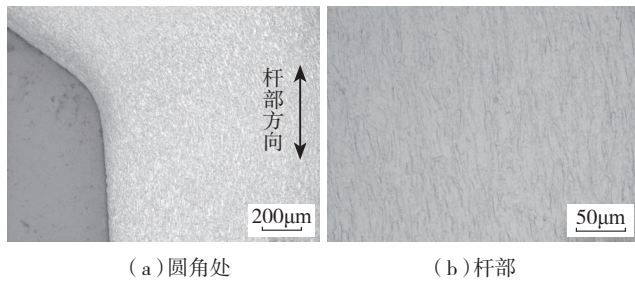


图8 400℃下钉体温镦成形显微组织

Fig.8 Microstructure of rivet set warm upsetting forming specimen at 400℃

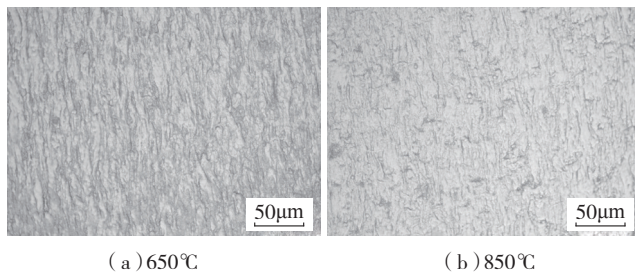


图9 不同温度下钉体热镦试样微观组织

Fig.9 Microstructure of heating upsetting rivet set sample at different temperature

钉体杆部强度也受到影响。因此,为满足强度要求,不宜通过热镦工艺成形钉体头部。

综上,为实现钉体头部成形无缺陷,且满足强度要求,400℃温镦为该拉拔态 CP-Ti 最佳镦锻工艺。

3 结论

(1)拉拔态 CP-Ti 具有典型的纤维状组织,力学性能良好,满足抽芯铆钉钉体抗剪切强度要求。

(2)拉拔态 CP-Ti 再结晶退火温度在 650℃左右,回复温度在 500℃左右;在 550~800℃时,随着温度的升高,CP-Ti 显微组织发生回复、再结晶、晶粒长大,通过再结晶退火可使其晶粒长大,由拉拔态转变为等轴态。随着温度升高,其显微硬度和材料强度均下降,塑性增大,适合镦锻成形。

(3)基于拉拔态 CP-Ti 回复和再结晶原理,在抽芯铆钉钉体镦锻时,头部加热到 400℃的温镦工艺可镦锻成形出合格的钉体头部,且能保证杆部力学性能不受影响,满足强度要求。

参考文献

- [1] 刘风雷. 我国航空钛合金紧固件的发展. 航空制造技术, 2000(6):39-40, 55.
- [2] 刘以波. TA2 工业纯钛高温组织演变研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [3] 张翥, 王群骄, 莫畏. 钛的金属学和热处理. 北京: 冶金工业出版社, 2009.

[4] 曹继敏, 樊亚军. CP-Ti 再结晶退火的组织演变和力学性能. 热加工工艺, 2012, 41(24):17-19.

[5] 江先锋, 向顺华, 陈乃录. 退火工艺对冷轧纯钛带再结晶组织的影响. 热加工工艺, 2011, 40(18):167-169. (责编 谷雨)

(上接第 92 页)

思路及方法也为网络化制造与装配环境下其他设备的研制提供借鉴。

参考文献

- [1] 任开勋, 沙云东. 飞机蒙皮铆接过程中阻尼减振降噪方法探讨. 沈阳航空工业学院学报, 2010, 27(4):12-16
- [2] 戴维·H·阿米尔特沙米, 威廉·P·赞特森, 布兰科·萨. 智能紧固件安装系统: 中国, CN101425240[P]. 2009-05-06.
- [3] ANGUSWAMY R, SAYGIN C, SARANGAPANI J. In-process detection of fastener grip length using embedded mobile wireless sensor network-based pull-type tools. International Journal of Manufacturing Research, 2009, 4(2):154-170.
- [4] SAYGIN C, MOHAN D, SARANGAPANI J. Real-time detection of grip length during fastening of bolted joints: a mahalanobis-taguchi system(MTS) based approach. Journal of Intelligent Manufacturing, 2010, 21(4):377-392.
- [5] 朱秀峰, 彭善谦, 林亦宏. 拉钉、拉帽枪的数字显示模组装置: 中国, CN101890472A[P]. 2010-11-24.
- [6] 林子敬. 基于 ZigBee 技术的无线传感器网络的研究与实现 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009. (责编 谷雨)

(上接第 95 页)

量: 整体结构大量减少紧固件数量; 降低成本, 缩短装配周期。

缺点: 整体结构尺寸大精度不易保证, 装配难度大; 无对接, 无工艺补偿, 对称度不易保证; 二次胶接造成变形, 定位困难。

(4) 建议批生产采用卧式装配方式, 方便整体壁板的上下架及合拢。目前, 下壁板通过外围螺旋压紧器压紧, 中间位置处于自由状态, 容易发生夹持不到位, 建议卡板中间开槽, 通过真空手段实现夹持, 消除中间位置与卡板之间的间隙。

参考文献

- [1] 冯军. 复合材料技术在当代飞机结构上的应用. 航空制造技术, 2009(22):40-42.
- [2] 张佐光. 飞机结构用先进复合材料的应用与发展. 第十四届全国复合材料学术会议论文集(上). 北京: 中国宇航学会, 2006.
- [3] 张鹏宇. 复合材料在民用产品上应用浅析. 中国高新技术企业, 2012(21):99-102.
- [4] 陈绍杰. 复合材料技术发展及其对我国航空工业的挑战. 高科技纤维与应用, 2010, 35(1):1-7.
- [5] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册 - 飞机装配. 北京: 航空工业出版社, 1993. (责编 玲犀)