

# 固溶前预热对 Ti6Al4V 合金厚截面环锻件组织均匀性的影响

邹朝江, 郑腾腾, 张 正, 王攀智

(贵州航宇科技发展股份有限公司, 贵州 贵阳 550081)

**摘要:** 针对截面厚度为 100 mm 以上的 Ti6Al4V 合金环轧锻件, 开展了在 650 °C 预热处理后再升温至 960 °C 进行固溶处理和设定温度 960 °C 下装炉进行固溶处理的工艺试验。采用等效试块和负载热电偶监控 Ti6Al4V 合金厚截面环轧锻件热处理过程的温度变化和保温时间。从经不同热处理后的锻件的典型位置切取横截面试片观察宏观组织, 然后分别从锻件内径、芯部和外径处切取试样观察显微组织和测试室温拉伸性能。对比分析了两种热处理工艺对环锻件组织均匀性和室温拉伸强度均匀性的影响。研究表明, 固溶处理前先进行 650 °C 预热处理的环锻件, 其组织均匀性、室温拉伸强度均匀性均优于在设定温度 960 °C 下装炉进行固溶处理的锻件。受合金淬透性限制, 预热处理无法完全消除 Ti6Al4V 合金厚截面环锻件不同截面位置的组织和性能的差异。

**关键词:** Ti6Al4V 合金; 厚截面环锻件; 预热处理; 固溶; 组织均匀性

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.09.027

**中图分类号:** T156.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2023) 09-0213-07

## Influence of preheating before solution on microstructure uniformity for Ti6Al4V alloy ring forgings with thick cross-section

Zou Chaojiang, Zheng Tengting, Zhang Zheng, Wang Panzhi

(Guizhou Aviation Technical Development Co., Ltd., Guiyang 550081, China)

**Abstract:** For Ti6Al4V alloy ring-rolled forgings with a cross-section thickness of more than 100 mm, the process tests of preheating treatment at 650 °C and then rising to 960 °C for solution treatment and furnace charging at the set temperature of 960 °C for solution treatment were carried out, and equivalent test blocks and load thermocouple were used to monitor the temperature change and holding time during heat treatment of Ti6Al4V alloy ring-rolled forgings with thick cross-section. Then, the macrostructure of cross-section test pieces cut from the typical positions of forgings after different heat treatments were observed, and the specimens were cut from the inner diameter, core and outer diameter areas of forgings to observe microstructure and test tensile properties at room temperature. Furthermore, the influences of the two heat treatment processes on the microstructure uniformity and the tensile strength uniformity at room temperature of ring forgings were compared and analyzed. The research results show that the microstructure uniformity and the tensile strength uniformity at room temperature of the ring forgings preheated at 650 °C before solution treatment are better than those of the forgings furnace at the set temperature of 960 °C for solution treatment. However, limited by the hardenability of alloy, the preheating treatment can not completely eliminate the differences in the microstructure and properties of Ti6Al4V alloy ring forgings with thick cross-section at different cross-sectional positions.

**Key words:** Ti6Al4V alloy; ring forgings with thick cross-section; preheating treatment; solution; microstructure uniformity

Ti6Al4V 合金是使用最广泛的钛合金, 它是一种以铝为  $\alpha$  稳定元素、钒为  $\beta$  稳定元素的  $\alpha$ - $\beta$  型两相钛合金。该合金经退火处理或经固溶处理+时效处理后, 具有优异的综合性能, 可在约 427 °C 及以下的低温环境中使用。Ti6Al4V 合金常用于航空发动机压气机叶片、盘和环件, 以及机身、太空舱部件、直升机旋翼中心件等要求高强度与高重量比的零部件。

随着 Ti6Al4V 合金的大量工程化应用, 更高强度要求的零部件也越来越多, 特别是需要满足长期使用性能要求的航空发动机机匣、安装座及其他重要承力部件。经典的退火处理状态已不满足性能要求, 须采用固溶处理后再进行时效处理的工艺进行强化。李明东等<sup>[1]</sup>发现固溶时效可以显著提高合金的强度和塑性。研究<sup>[2-3]</sup>发现, 固溶工艺是影响 Ti6Al4V 合金力学性能的主要因素。Ti6Al4V 合金的淬透性较差, 一般在 30 mm 以下。在强化处理工艺方面, 关于固溶加热温度和冷却速率方面的研究较多, 而对固溶前是否对工件进行预热处理的研究较

收稿日期: 2023-03-09; 修订日期: 2023-06-19

作者简介: 邹朝江 (1984-), 男, 学士, 工程师

E-mail: zouchaojiang@gzhykj.net

少，尤其是厚壁工件的强化处理工艺。钛合金在固溶或高温时效过程中常会发生片层组织粗化的现象，粗化的组织会影响后续热加工过程中片状组织球化的难易程度，影响双态组织中等轴组织与片状组织的比例，最终对零件的力学性能产生较大影响<sup>[4]</sup>。本文以某航空发动机用后安装座环锻件为例，研究在环锻件固溶前进行预热处理对 Ti6Al4V 合金壁厚环锻件组织和室温拉伸性能的影响。

1 试验材料及方法

试验所用的 Ti6Al4V 合金黑皮环轧锻件的名义尺寸为  $\Phi 1532\text{ mm}\times 221\text{ mm}$ ，壁厚为 108.5 mm，公差为  $\pm 6\text{ mm}$ ，一个黑皮锻件可以从高度方向切分、加工为两个最终零件。黑皮锻件名义重量为 475 kg，锻件用的锻坯为尺寸为  $\Phi 400\text{ mm}\times 938\text{ mm}$  的棒材，化学成分见表 1。

表 1 Ti6Al4V 合金环锻件原材料化学成分（%，质量分数）  
Table 1 Chemical compositions of raw material for Ti6Al4V alloy ring forgings（%，mass fraction）

Fe	V	Al	C	O	N	B	其他元素
0.16	4.10	6.35	0.14	0.20	0.0048	<0.001	<0.2

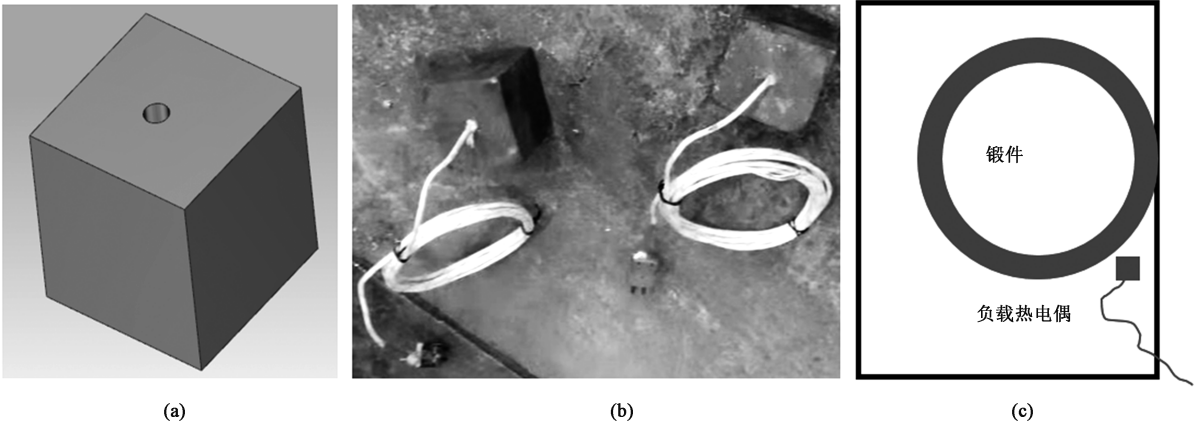


图 1 等效试块和热处理装炉示意图  
(a) 等效试块 (b) 介入负载热电偶 (c) 装炉位置图

Fig. 1 Schematic diagrams of equivalent test block and heat treatment furnace charging

(a) Equivalent test block (b) Embedded load thermocouple (c) Location diagram of furnace charging

2 试验结果及分析

在两种热处理工艺的固溶阶段，锻件芯部金属温度的到温滞后时间统计见表 3，实际热处理曲线见图 4。

锻件采用相同的工艺路线：经 850~950 ℃加热后，在  $\alpha$ - $\beta$  两相区镦粗冲孔、马架扩孔、预轧和终轧成形。根据相关文献<sup>[5-8]</sup>可知，Ti6Al4V 合金的  $\beta$  相转变温度范围为 980~1000 ℃，为获取较好的显微组织<sup>[8]</sup>，本试验选择固溶处理设定温度为 960 ℃，根据产品最终使用要求，退火处理温度采用 705 ℃。根据相关研究<sup>[9-10]</sup>可知，当固溶温度低于 650 ℃ 时，热处理对 Ti6Al4V 合金的组织 and 性能的影响不大，故预热处理温度选择 650 ℃。为了便于观察厚大截面芯部金属的到温滞后时间，采用如图 1a 所示的有效厚度相同的同类材料制作的等效试块和负载热电偶监控锻件金属的温度和保温时间。在等效试块的任一端面中心钻孔，钻孔直径为  $\Phi 4\sim\Phi 6\text{ mm}$ ，钻孔深度为  $(55\pm 2)\text{ mm}$ ，将负载热电偶插入孔洞中并用陶瓷纤维填充间隙，如图 1b 所示，热处理时锻件装炉位置如图 1c 所示。锻件表面温度采用热处理炉控温热电偶进行控制，即默认为炉膛温度。

如图 2a 所示，分别从锻件上切取 15~20 mm 试环，检查锻件的组织和室温拉伸性能。为了对比锻件近表层与锻件芯部之间的显微组织、室温拉伸性能差异，锻件按照表 2 和图 3 所示的热处理制度进行热处理。

从表 3 和图 4 可以看出，Ti6Al4V 合金厚截面环锻件表面到达设定温度（由控制热电偶监测的炉膛温度）的时间与锻件芯部到达设定温度（由负载热电偶监测的金属温度）的时间存在差异。经 650 ℃ 预热处理后再升温固溶处理的到温滞后时间为 15 min，在设定温度 960 ℃ 下装炉升温进行固溶

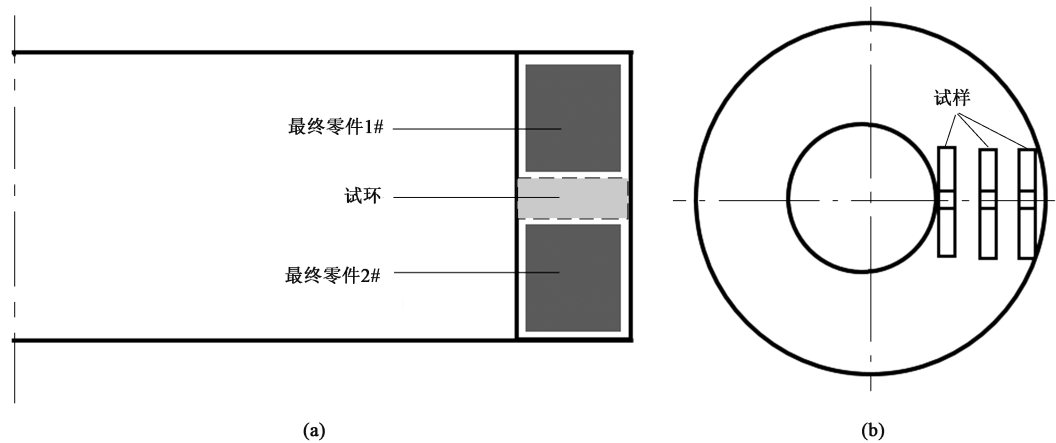


图 2 试环位置图 (a) 和取样示意图 (b)

Fig. 2 Location diagram of test ring (a) and schematic diagram of sampling

表 2 Ti6Al4V 合金环锻件热处理工艺			
Table 2 Heat treatment processes of Ti6Al4V alloy ring forgings			
工艺	预热处理	固溶处理	退火处理
A	650 ℃×60 min	960 ℃×60 min, WC	705 ℃×90 min, AC
B	—	960 ℃×60 min, WC	705 ℃×90 min, AC

处理的到温滞后时间为 47 min。主要原因为：经过 650 ℃ 预热后，锻件表面温度与芯部温度更加均匀，在随后的升温过程中锻件温差更小，锻件表面与芯部到达工艺要求温度的时间差异也 小。

锻件宏观组织检查结果见图 5。从图 5 可以看

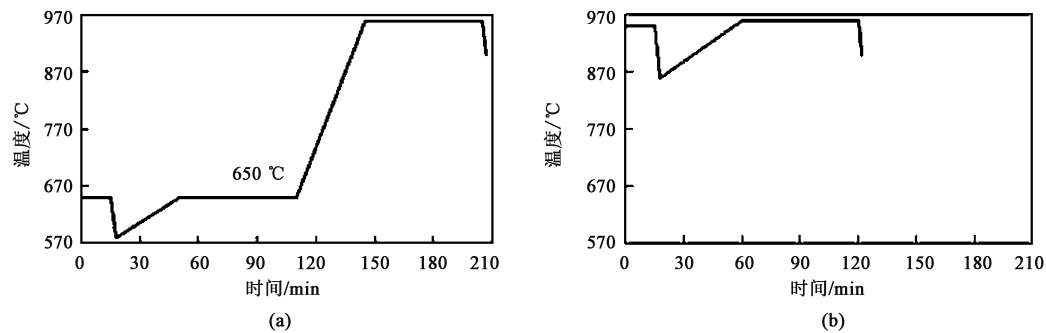


图 3 不同工艺下 Ti6Al4V 合金环锻件理论热处理曲线

(a) 工艺 A (b) 工艺 B

Fig. 3 Theoretical heat treating curves of Ti6Al4V alloy ring forgings under different processes

(a) Process A (b) Process B

表 3 Ti6Al4V 合金环锻件不同工艺处理下芯部金属的到温滞后时间			
Table 3 Lag time of core metal reaching temperature for Ti6Al4V alloy ring forgings during different process treatments			
工艺	预热处理	保温时间/min	滞后时间/min
A	650 ℃×60 min	控制热电偶：75 负载热电偶：60	15
B	—	控制热电偶：107 负载热电偶：60	47

件组织更均匀。工艺 B 处理的锻件，内径、外径近表层的组织与芯部组织存在较明显的差异（图 5b 虚线框部分）。Ti6Al4V 合金的导热性较差，工艺 B 处理的锻件芯部金属的到温滞后时间明显长于工艺 A 下的锻件，工艺 B 下锻件的近表层组织的实际  $\alpha$ - $\beta$  相转变时间长于工艺 A 处理的锻件。炉膛到温（或锻件表面到温）早期，锻件芯部温度尚未达到加热设定的温度，随着保温时间的延长，近表层显微组织发生较大转变，该厚壁锻件从室温到升至固溶处理温度的过程中，锻件内、外近表面组织的  $\alpha$ - $\beta$  相的转变时间较长，锻件芯部和近表面的宏观组

出，工艺 A 下的锻件，其宏观组织较工艺 B 下的锻

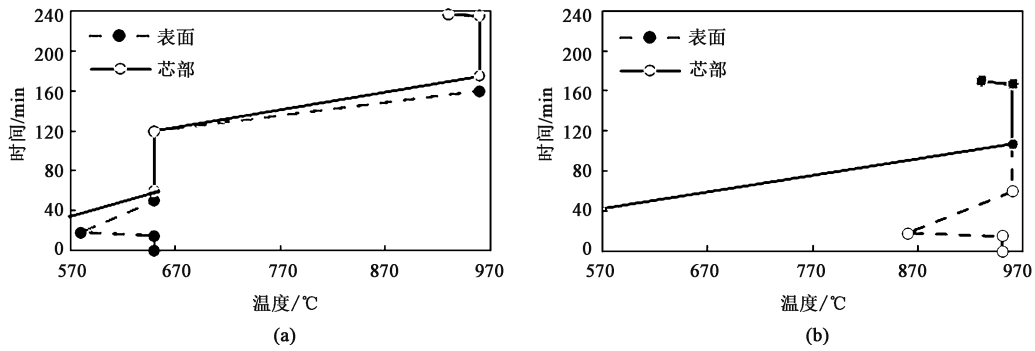


图 4 不同工艺下 Ti6Al4V 合金环锻件实际热处理曲线

(a) 工艺 A (b) 工艺 B

Fig. 4 Actual heat treating curves of Ti6Al4V alloy ring forgings under different processes

(a) Process A (b) Process B

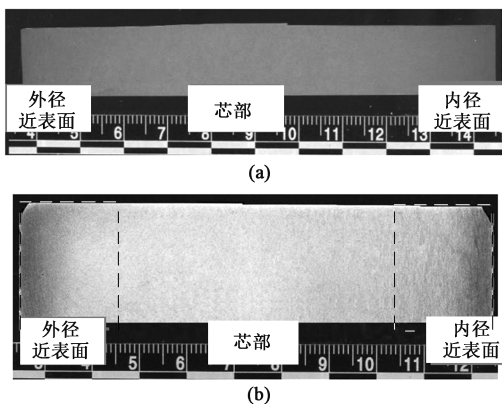


图 5 不同工艺下 Ti6Al4V 合金环锻件的截面宏观组织

(a) 工艺 A (b) 工艺 B

Fig. 5 Macrostructures of cross section for Ti6Al4V alloy ring forgings under different processes

(a) Process A (b) Process B

织不均匀；而在经 650 °C 预热处理后，再将锻件升温至固溶处理温度， $\alpha$ - $\beta$  相的转变时间缩短，锻件宏观组织较均匀。

锻件高倍检查结果见图 6。如图 6a~图 6c 所示，工艺 A 下的锻件中 3 个位置的初生  $\alpha$  含量分别为 30%、35% 和 30%，各位置初生  $\alpha$  相含量较均匀。如图 6d~图 6f 所示，工艺 B 下 3 个位置的初生  $\alpha$  含量分别为 25%、40% 和 25%，各位置初生  $\alpha$  相含量的差异较大。两组工艺下的化学成分、锻造过程相同，锻件微观组织的差异或波动将直接决定室温拉伸性能的差异或波动。

按图 2b 分别从试环上靠近锻件内径、芯部和外径位置各切取 3 根室温拉伸试样，测试结果见表 4，对测试结果进行对比，分析两种热处理工艺对锻件不同位置处的室温拉伸性能波动的影响。

图 7 展示了工艺 A 或 B 对应锻件不同截面位置的室温拉伸性能，从图 7 中可以看出：无论是经工艺 A 还是工艺 B 处理的锻件，芯部位置的室温强度均为最低点，塑性无明显差异，这与锻件宏观组织检查结果（图 5）一致，反应了 Ti6Al4V 合金厚截面环锻件近表面与芯部之间的组织与性能的差异。另一方面，固溶冷却速率对 Ti6Al4V 合金环锻件力学性能会产生影响，这主要由 Ti6Al4V 合金的淬透性决定，从图 5b 中的虚线框看出，本次试验锻件实际淬透深度约为 20 mm，与锻件内、外径近表面室温拉伸测试取样位置相对应。由于 TC4 钛合金的导热性差，经  $\beta$  淬火后，淬透深度在 25 mm 左右<sup>[8]</sup>，即便是基于 Ti6Al4V 合金增加了  $\beta$  相稳定元素而改进淬透性的 Ti-6Al-6V-2Sn 型合金，淬透截面厚度一般为 38.1~50.8 mm<sup>[11]</sup>。在固溶冷却过程中，锻件近表层组织优先冷却，考虑锻件内部自身热传导作用，厚大截面的芯部组织初始冷却速率及后续的冷却速率均不及近表层组织大。Ti6Al4V 合金片层组织中影响性能的组织特征参数主要包括  $\beta$  晶粒尺寸、 $\alpha$  集束尺寸和  $\alpha$  片厚度，冷却速率对片层组织特征影响显著，随着冷却速率的提高， $\alpha$  片厚度、晶界  $\alpha$  宽度和  $\alpha$  集束尺寸明显减小，抗拉强度提高<sup>[12]</sup>。本试验中锻件的有效厚度 108.5 mm 远大于合金淬透厚度，淬透性较差是导致 Ti6Al4V 合金厚截面环锻件不同部位组织性能差异的原因之一。

为对比两种固溶处理工艺对锻件不同位置的组织与性能波动的影响程度，分别采用内径、外径室温拉伸结果的平均值与芯部室温拉伸结果的平均值进行差异分析（图 8）。从图 8 可以看出：锻件经工



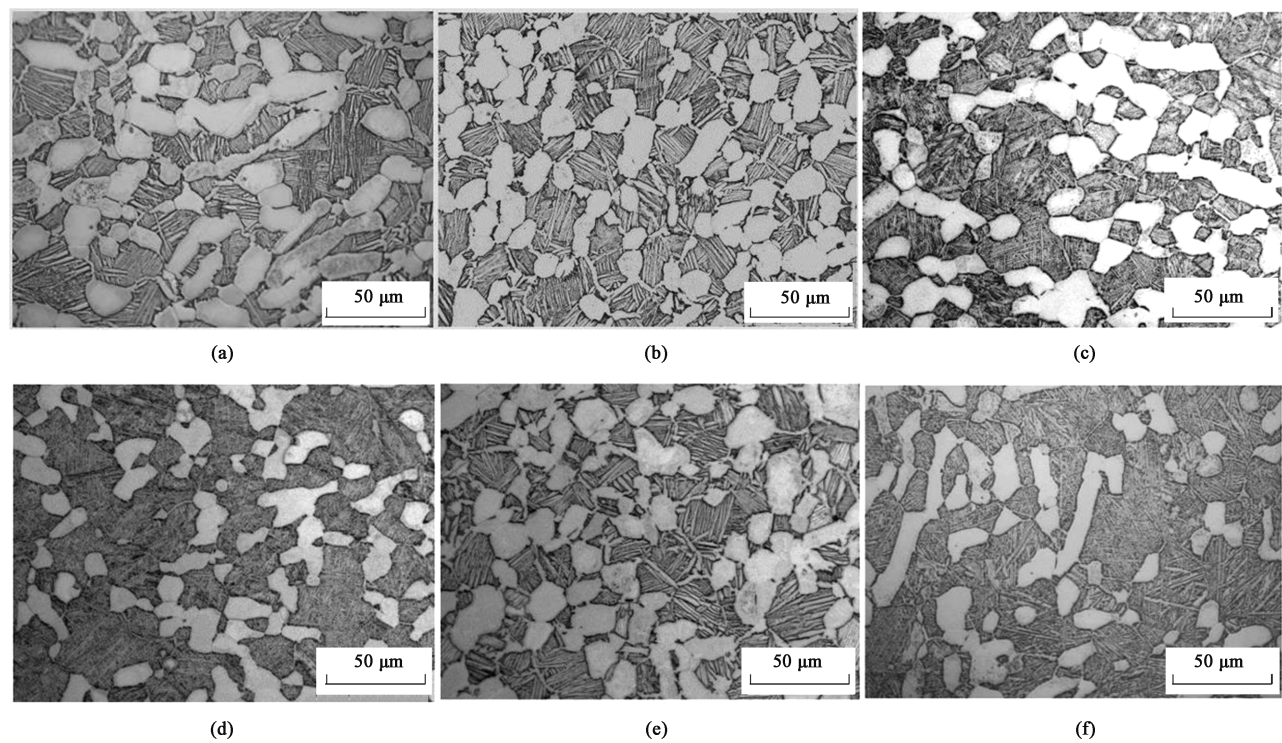


图 6 Ti6Al4V 合金环锻件不同横截面位置的显微组织  
(a) 工艺 A, 内径近表面 (b) 工艺 A, 芯部 (c) 工艺 A, 外径近表面 (d) 工艺 B, 内径近表面 (e) 工艺 B, 芯部  
(f) 工艺 B, 外径近表面

Fig. 6 Microstructures at different locations of cross section for Ti6Al4V alloy ring forgings

(a) Process A, inner diameter near surface (b) Process A, core (c) Process A, outer diameter near surface  
(d) Process B, inner diameter near surface (e) Process B, core (f) Process B, outer diameter near surface

表 4 Ti6Al4V 合金环锻件室温拉伸性能

Table 4 Room temperature tensile properties of Ti6Al4V alloy ring forgings					
工艺	位置	试样 编号	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长 率/% 断面收 缩率/%
A	内径	1	1000	890	19.0 47
		2	1010	920	18.5 46
		3	1000	900	19.5 45
	芯部	1	980	870	18.0 43
		2	960	855	20.0 45
		3	970	865	18.0 45
	外径	1	1010	900	17.0 45
		2	1020	930	19.0 47
		3	1010	920	19.5 45
B	内径	1	1020	920	17.0 46
		2	1040	955	18.0 46
		3	1030	960	15.5 49
	芯部	1	960	875	17.0 44
		2	940	860	18.0 45
		3	950	870	17.5 46
	外径	1	1050	950	14.5 44
		2	1040	955	16.5 44
		3	1050	960	16.0 45

艺 A（650 ℃ 预热）处理后的室温拉伸性能波动总体上小于锻件经工艺 B 处理后的室温拉伸性能波动，进一步说明了 Ti6Al4V 合金厚截面环锻件热处理过程中不同部位在相转变温度下加热时间的差异对组织与性能的影响。

3 结论

- (1) 受材料淬透性的影响，预热处理无法完全消除 Ti6Al4V 合金厚截面环锻件固溶处理过程导致的组织和性能差异。
- (2) 同一固溶处理温度下，经 650 ℃ 预热处理的 Ti6Al4V 合金厚截面环锻件的显微组织、室温拉伸性能波动优于直接在固溶温度为 960 ℃ 的装炉热处理的环锻件。
- (3) 采用负载热电偶监控 Ti6Al4V 合金厚截面环锻件热处理过程中的芯部金属温度，有利于精确控制锻件在相转变温度范围内的加热时间，减小组织差异和性能波动。

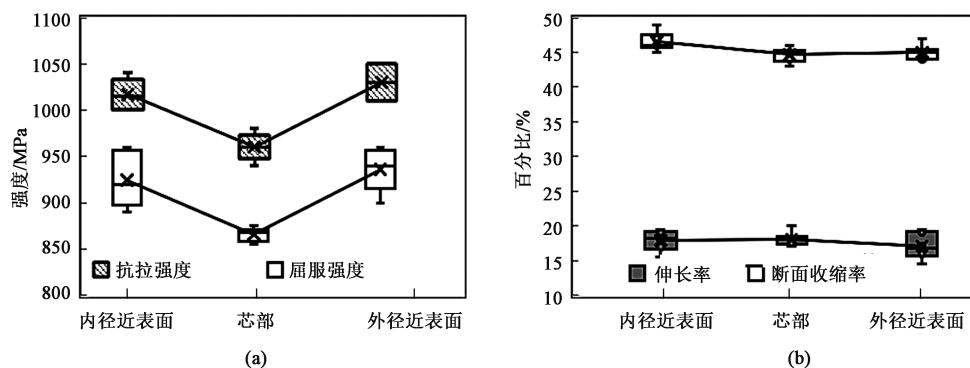


图 7 Ti6Al4V 合金环锻件室温拉伸性能箱线图

(a) 强度 (b) 塑性

Fig. 7 Boxplot diagrams of room temperature tension properties for Ti6Al4V alloy ring forgings

(a) Strength (b) Plasticity

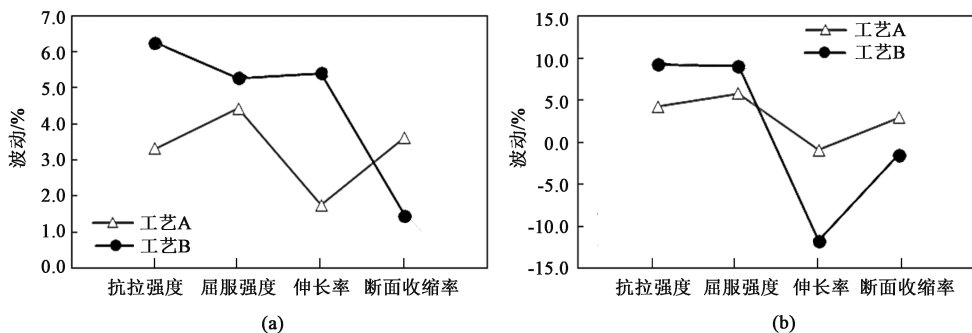


图 8 Ti6Al4V 合金环锻件室温拉伸性能波动

(a) 内径近表面与芯部位置 (b) 外径近表面与芯部位置

Fig. 8 Deviation of room temperature tensile properties for Ti6Al4V alloy ring forgings

(a) Inner diameter near surface and core locations (b) Outer diameter near surface and core locations

## 参考文献:

- [1] 钦兰云, 李明东, 杨光, 等. 热处理对激光沉积 TC4 钛合金组织与力学性能的影响 [J]. 稀有金属, 2018, 42 (7): 698-704.  
Qin L Y, Li M D, Yang G, et al. Microstructure and mechanical properties of laser deposition manufacturing TC4 titanium alloy with heat treatment [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2018, 42 (7): 698-704.
- [2] 马英杰, 刘建荣, 雷家峰, 等. 多重热处理对 TC4 合金的组织与力学性能的影响 [J]. 材料研究学报, 2008, 22 (5): 555-560.  
Ma Y J, Liu J R, Lei J F, et al. The influence of multi heat-treatment on microstructure and mechanical properties of TC4 alloy [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2008, 22 (5): 555-560.
- [3] 顾晓辉, 刘君, 石继红, 等. 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): 29-33.  
Gu X H, Liu J, Shi J H, et al. Influence of quenching and aging temperature on microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36 (2): 29-33.
- [4] 李冬, 曾卫东, 李欣, 等. Ti60 合金保温过程中片状组织的粗化行为 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (3): 273-280.  
Li D, Zeng W D, Li X, et al. Coarsening behavior of lamellar microstructure of Ti60 alloy during heat treatment [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (3): 273-280.
- [5] Fan X G, Yang H. Internal-state-variable based self-consistent constitutive modeling for hot working of two-phase titanium alloys coupling microstructure evolution [J]. International Journal of Plasticity, 2011, 27 (11): 1833-1852.
- [6] 帅美荣. 钛合金棒材三辊热连轧过程变形机理与技术研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2012.  
Shuai M R. Study on Deformation Mechanism and Technique of Titanium Alloy Rod During Three-roll Hot Continuous Rolling Process [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science & Technology, 2012.
- [7] 李静, 林鑫, 钱远宏, 等. 激光立体成形 TC4 钛合金组织和力学性能研究 [J]. 中国激光, 2014, 41 (11): 109-113.  
Li J, Lin X, Qian Y H, et al. Study on microstructure and proper-

- ty of laser solid forming TC4 titanium alloy [J]. Chinese Laser, 2014, 41 (11): 109-113.
- [8] 党全顺. Ti-6Al-4V 大规格棒材工艺研究 [J]. 世界有色金属, 2015, (5): 45-47.
- Dang Q S. Research on production process of large-sized Ti-6Al-4V rods [J]. World Nonferrous Metals, 2015, (5): 45-47.
- [9] Liu W Y, Lin Y H, Chen Y H, et al. Effect of different heat treatments on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46 (3): 634-639.
- [10] 杜刚, 孙小平, 高玉社, 等. 低温固溶及时效处理对 TC4 钛合金棒材组织及力学性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47 (6): 1941-1944.
- Du G, Sun X P, Gao Y S, et al. Effect of low temperature solution and aging treatment on microstructure and mechanical properties of TC4 alloy bars [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47 (6): 1941-1944.
- [11] 朱宝辉, 曾卫东, 陈林, 等. 固溶时效工艺对 Ti-6Al-6V-2Sn 钛合金棒材组织及性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2018, 28 (4): 677-684.
- Zhu B H, Zeng W D, Chen L, et al. Influences of solution and aging treatment process on microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-6V-2Sn titanium alloy rods [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28 (4): 677-684.
- [12] 谭海波, 师周龙, 张书美, 等.  $\beta$  退火参数对 Ti6Al4V 合金组织和性能的影响 [J]. 金属热处理, 2021, 46 (1): 209-213.
- Tan H B, Shi Z L, Zhang S M, et al. Effect of  $\beta$  annealing parameter on microstructure and properties of Ti6Al4V titanium alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46 (1): 209-213.

## “第十八届全国塑性工程学术年会暨第十届全球华人塑性技术研讨会”会议通知 (第一轮)

“第十八届全国塑性工程学术年会暨第十届全球华人塑性技术研讨会”(以下简称“年会”)将于2023年10月20-22日在武汉市举行,大会主题为“提高自主创新能力 扎实推进产业基础再造工程”。会议同期举办“中国机械工程学会塑性工程分会成立60周年纪念大会”和“中国机械工程学会塑性工程分会第十三届会员代表大会”。

一、组织单位:中国机械工程学会塑性工程分会主办,中国机械工程学会、中国机械科学研究总院集团有限公司指导,中国机械总院集团北京机电研究所有限公司、武汉理工大学、华中科技大学、太原理工大学、山东大学、精密成形国家工程研究中心承办,《锻压技术》杂志、《塑性工程学报》媒体支持。

### 二、会议内容:

#### (1) 大会主旨报告

复杂航天薄壁构件设计与制造——林忠钦院士(上海交通大学)

材料大数据与智能设计制造——谢建新院士(北京科技大学)

超高强钢结构件数字化精密热成形技术与装备研究——单忠德院士(南京航空航天大学)

Lightweighting Strategies for Electric Vehicles——林建国院士(英国帝国理工学院)

飞行器轻量化结构塑性成形技术发展展望——李志强院长(中国航空制造技术研究院)

新能源汽车用材的发展思考——蒋浩民副院长(宝山钢铁股份有限公司中央研究院)

金属材料塑性本构模型及其应用——吴沛东教授(加拿大麦克马斯特大学)

#### (2) 分组学术交流:详见后续安排。

三、会议注册:详情请登录注册网站: <https://conference.cstp-cmes.org.cn/?siteid=10241>

四、会议地点:武汉光谷潮漫凯瑞国际酒店(武汉东站店,武汉市洪山区高新大道408号)

五、展览:年会期间,将举办塑性工程领域新技术、新工艺、新装备展。届时,参展单位也可在年会资料袋及《年会议序册》、《年会论文集》(电子版)、《年会论文摘要集》(纸质版)和年会现场进行企业宣传和产品推介。欢迎有意向的企业、科研院所及高校积极报名参加展览助力大会成功举办。

### 六、塑性工程分会秘书处联系方式

地 址:北京市海淀区学清路18号711房间

联系人:秦思晓(15201461873,投稿及报名)

薛红燕(18810080219,财务咨询)

金 红(13911560582,组织协调)

邮 编:100083 电 话:010-62920654, 82415084

李世龙(15210857179,报名咨询)

周 林(13811919643,赞助展览)

E-mail: duanya@cmes.org

中国机械工程学会塑性工程分会