

## 加工工艺对 Ti5553 合金等温锻件力学性能和显微组织的影响

徐 锋, 计 波, 朱益藩, 罗月新, 庞克昌

(宝山钢铁股份有限公司 特钢事业部, 上海 200940)

**摘 要:** 主要研究加工工艺对不同成分的 Ti5553 合金等温锻件力学性能和显微组织的影响, 并讨论了未来新型航空部件对该类型高强度和高断裂韧性钛合金材料的需求。结果表明, 不同的加工工艺可使 Ti5553 合金能获得不同级别的力学性能。

**关键词:** 钛合金; 加工工艺; 力学性能; 显微组织

中图分类号: TF 804.3

文献标志码: A

## Effect of process routes on mechanical properties and microstructure of Ti5553 isothermal forgings

XU Feng, JI Bo, ZHU Yi-fan, LUO Yue-xin, PENG Ke-chang

(Special Steel Business Unit, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 200940, China)

**Abstract:** The influence of process routes on the mechanical properties and microstructure of Ti5553 isothermal forgings with different components was investigated. The requirements for titanium alloys in light of potential applicability to airframe structures were discussed for current. The results indicate that Ti5553 alloys with different microstructure and mechanical properties are obtained according to different processes.

**Key words:** titanium alloy; process route; mechanical properties; microstructure

Ti5553 合金是由俄罗斯合金 BT-22 发展而来的一种新型高强度高断裂韧性钛合金, 其名义成分为 Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr<sup>[1]</sup>。与当前广泛应用于大型民用客机上的 Ti-1023 合金相比, Ti5553 合金不会产生明显的成分偏析, 且强度提高了约 15%; 该合金拥有良好的淬透性和较宽的加工工艺范围, 其厚度为 150 mm 的锻件性能可以达到 Ti-1023 合金厚度为 75 mm 的锻件性能。该合金在生产过程中可以用空冷工艺代替水淬工艺, 改善了残余应力对后序机加工的影响, 从而降低其加工成本<sup>[2-3]</sup>。

如今, Ti5553 合金已成功地应用于波音 787 和空客 A350 飞机的起落架, 机翼结构等 20 多种承力部件<sup>[4-5]</sup>, 代替原来所用的 Ti-6Al-4V 和 Ti-1023 合金(见图 1)。据统计, 应用 Ti5553 合金可以实现减轻飞机总质量的 8%<sup>[5]</sup>。

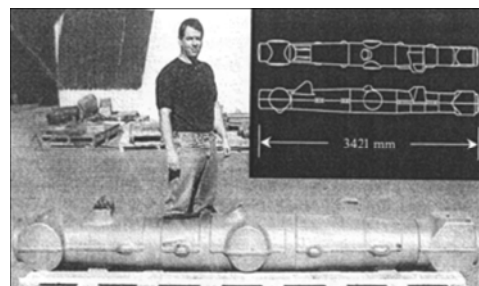


图 1 Ti5553 合金起落架锻件

Fig.1 Ti5553 forging for landing gear<sup>[1]</sup>

目前, 国内已有研究单位逐步开展了对该类型合金的研究<sup>[7-8]</sup>, 但相关报道并不多见。本文作者以宝山钢铁股份有限公司研制的 Ti5553 合金及其等温锻件为基础, 初步探索 Ti5553 合金的加工工艺对其性能及显微组织的影响。

1 实验

通过三次真空自耗炉熔炼, 得到 2 种配比的 Ti5553 合金铸锭, 铸锭直径为 200 mm, 其成分如表 1 所列。经过开坯、 $\beta$  单相区锻造以及  $\alpha+\beta$  两相区锻造后获得尺寸为 80 mm×220 mm×700 mm 的锻件坯料。坯料按表 2 所列的实验方案, 经  $\alpha+\beta$  两相区和  $\beta$  单相区两种等温锻工艺压制成锻件(见图 2)。锻件经时效热处理后, 按照 GB/228—2002 标准进行试样加工并在日本岛津 AG- 5000A 电子拉伸实验机上进行室温拉伸性能测试。金相试样经克罗尔腐蚀液腐蚀后进行金相显微镜观察并拍照。

表 1 Ti5553 合金铸锭的成分

| Table 1 Components of Ti5553 ingots (mass fraction, %) |      |      |      |      |     |      |
|--------------------------------------------------------|------|------|------|------|-----|------|
| Ingot No.                                              | Al   | Mo   | V    | Cr   | Fe  | Ti   |
| 1                                                      | 5.50 | 5.30 | 5.30 | 3.30 | 0.4 | Bal. |
| 2                                                      | 5.00 | 5.0  | 5.00 | 3.00 | 0.4 | Bal. |

表 2 Ti5553 合金锻件加工工艺

| Table 2 Process route of Ti5553 isothermal forging |           |                                |  |
|----------------------------------------------------|-----------|--------------------------------|--|
| Process route                                      | Ingot No. | Isothermal forging temperature |  |
| A                                                  | 1         | $\alpha+\beta$                 |  |
| B                                                  | 2         | $\alpha+\beta$                 |  |
| C                                                  | 1         | $\beta$                        |  |
| D                                                  | 2         | $\beta$                        |  |



图 2 Ti5553 合金等温锻件

Fig.2 Ti5553 isothermal forging

2 结果与讨论

热处理后 Ti5553 合金锻件的力学性能如图 3 和表

3 所示。结果表明, 不同工艺获得的锻件的力学性能明显不同, 其中经过  $\alpha+\beta$  两相区锻造(工艺 A 和 B)获得的锻件强度明显高于  $\beta$  单相区锻造(工艺 C 和 D)获得的锻件强度。而在  $\beta$  单相区锻造(工艺 C 和 D)获得的锻件的断裂韧性( $K_{IC}$ )明显高于经过  $\alpha+\beta$  两相区锻造(工艺 A 和 B)获得的锻件的断裂韧性( $K_{IC}$ )。

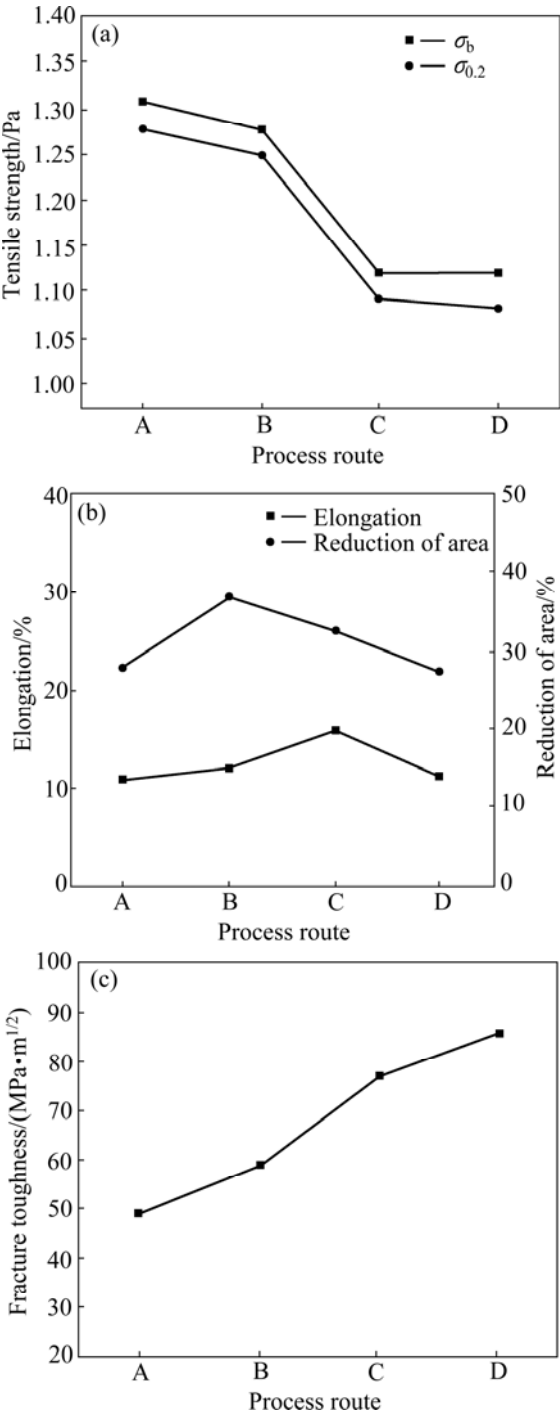


图 3 不同加工工艺的 Ti5553 合金锻件的力学性能

Fig.3 Mechanical properties for Ti5553 isothermal forgings with different processes: (a) Tensile strength; (b) Elongation and reduction of area(RA); (c) Fracture toughness

表 3 不同加工工艺的 Ti5553 合金锻件的力学性能

Table 3 Mechanical properties for Ti5553 isothermal forgings with different processes

| Process route | UTS/MPa | YS/MPa | Elongation/% | RA/% | $K_{IC}/(MPa \cdot m^{1/2})$ |
|---------------|---------|--------|--------------|------|------------------------------|
| A             | 1 310   | 1 280  | 11           | 28.0 | 49.1                         |
| B             | 1 280   | 1 250  | 12           | 37.0 | 58.7                         |
| C             | 1 120   | 1 090  | 16           | 32.5 | 77.0                         |
| D             | 1 120   | 1 080  | 11           | 27.5 | 86.1                         |

对比结果还显示,在 $\alpha+\beta$ 两相区锻造时,合金元素含量较高的锻件(工艺 A)的强度略高于合金元素含量较低锻件(工艺 B)的。而在 $\beta$ 单相区锻造(工艺 C 和 D)获得的锻件的强度几乎没有差别。

热处理后 Ti5553 合金锻件的显微组织如图 4 所示。发现不同工艺获得的锻件其显微组织差别明显。其中经过 $\alpha+\beta$ 两相区锻造(工艺 A 和 B)获得的锻件其显微组织为双态组织。而在 $\beta$ 单相区锻造(工艺 C 和 D)获得的锻件的显微组织为网篮组织。

由上述结果可以看出,由 $\alpha+\beta$ 两相区锻造(工艺 A 和 B)获得的锻件显微组织为双态组织。在该状态下,锻件强度高、塑性好,适用于飞机转向梁支架等高强度锻件材料的使用需求。而由 $\beta$ 单相区锻造(工艺 C 和 D)获得的锻件为网篮组织,锻件在保证一定强度和塑

性的前提下,具有较高的断裂韧性( $K_{IC}$ ),可用于发动机吊挂等部件对高断裂韧性( $K_{IC}$ )锻件材料的使用需求。

另外,由表 4 和图 5 的数据可以看出,与其他目前大量使用的高强度高韧钛合金 Ti-1023 和 BT22<sup>[1]</sup>相比,Ti5553 合金经过 $\alpha+\beta$ 两相区锻造加固溶时效(SAT)处理后的强度略有提高。而经过 $\beta$ 单相区锻造后,Ti5553 合金在保证一定强度和塑性的前提下,拥有比 Ti-1023 和 BT22 更高的断裂韧性( $K_{IC}$ ),充分体现了该合金可通过合理的加工工艺实现各性能之间的相互匹配来满足不同使用需求的设计特点。加之该合金拥有良好的淬透性和较宽的加工工艺范围,代表了未来高强度高韧钛合金的发展方向。

表 4 几种高强钛合金的力学性能

Table 4 Mechanical properties of several kinds of high strength titanium alloy

| Alloy                    | UTS/MPa | YS/MPa | Elongation/% | RA/% | $K_{IC}/(MPa \cdot m^{1/2})$ |
|--------------------------|---------|--------|--------------|------|------------------------------|
| Ti-1023                  | 1 188   | 1 130  | 10.2         | 39.2 | 76.9                         |
| BT22                     | 1 140   | 1 070  | 11.8         | 29.8 | 72.9                         |
| Ti5553(SAT)              | 1 310   | 1 280  | 11.0         | 28.0 | 49.1                         |
| Ti5553( $\beta$ process) | 1 120   | 1 080  | 11.0         | 27.5 | 86.1                         |

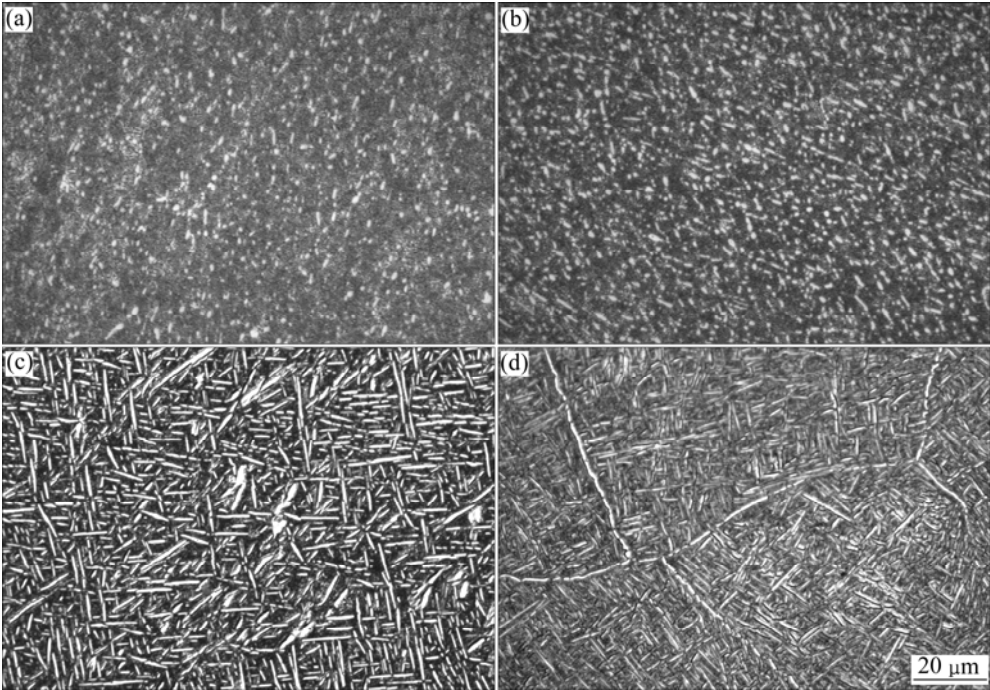


图 4 不同加工工艺处理后的 Ti5553 合金锻件的显微组织

Fig.4 Microstructures of Ti5553 isothermal forgings by different process routes: (a) Process A; (b) Process B; (c) Process C; (d) Process D

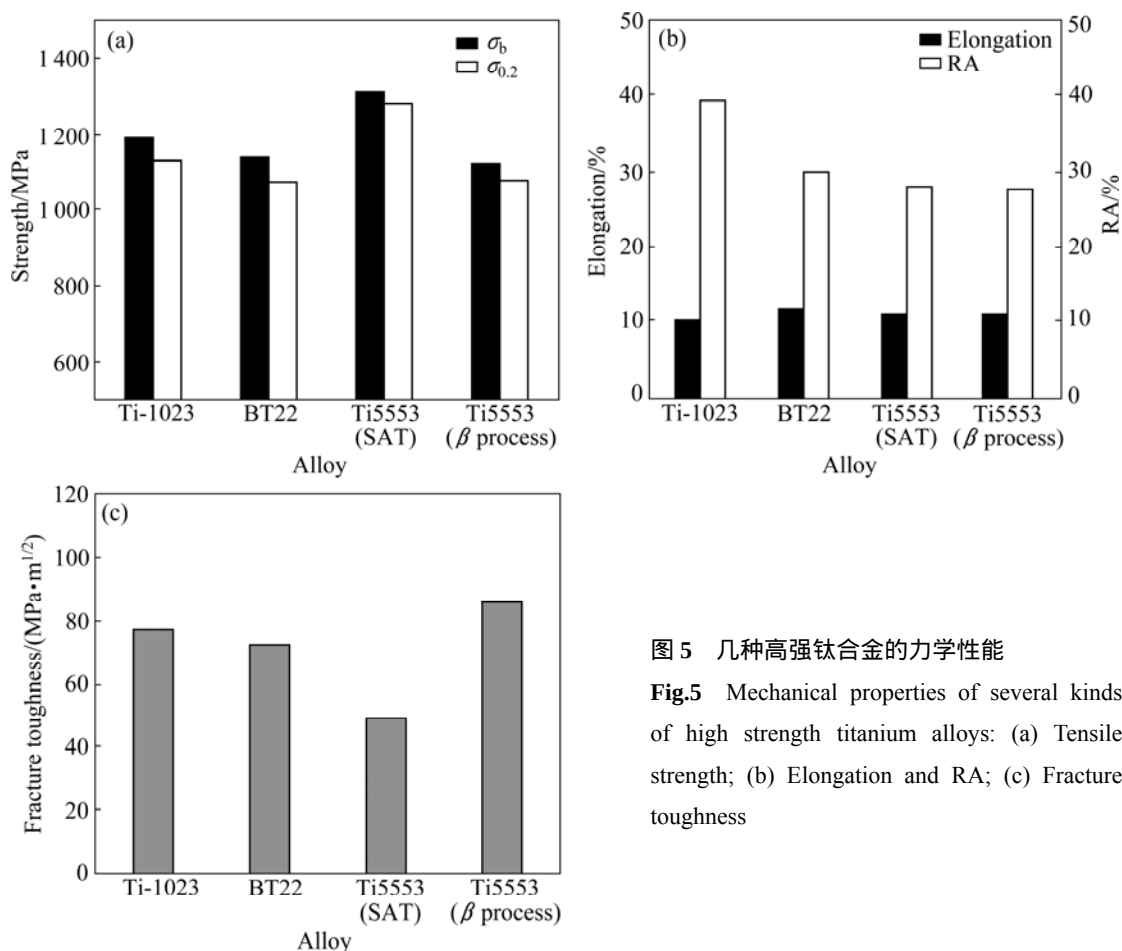


图5 几种高强钛合金的力学性能

**Fig.5** Mechanical properties of several kinds of high strength titanium alloys: (a) Tensile strength; (b) Elongation and RA; (c) Fracture toughness

### 3 结论

1) 通过不同的加工工艺, Ti5553 合金能获得不同级别的力学性能。

2) 由  $\alpha+\beta$  两相区锻造获得的锻件显微组织为双态组织。在该状态下, 锻件强度高, 塑性好。由  $\beta$  单相区锻造获得的锻件为网篮组织, 锻件在保证一定强度和塑性的前提下, 拥有较高的断裂韧性。

3) 上述工艺可分别满足未来新型航空部件对高强度和高断裂韧性钛合金材料的需求。

### REFERENCES

- [1] FANNING J C, BOYER R R. Ti-2003 science and technology[M]. Weinheim, Germany: Wiley VCH, 2004: 2643.
- [2] [http://asm.confex.com/asm/aero06/techprogram/paper\\_13276.html](http://asm.confex.com/asm/aero06/techprogram/paper_13276.html)

- [3] <http://asm.confex.com/asm/aero09/webprogram/Paper24783.html>
  - [4] <http://www.eads.com.Taking the lead: A350XWB presentation>
  - [5] <http://www.boeing.com/commercial/787family/>
  - [6] 付艳艳, 宋月清, 惠松晓, 米绪军, 叶文君. 热处理对 VST55531 钛合金的组织 and 拉伸性能的影响[J]. 稀有金属, 2008, 32(4): 399-403.
  - [7] 付艳艳, 宋月清, 惠松晓, 米绪军. 用正交试验法优化 VST55531 钛合金的热处理工艺[J]. 金属热处理, 2008, 33(7): 66-68.
- FU Yan-yan, SONG Yue-qing, HUI Song-xiao, MI Xu-jun, YE Wen-jun. Influence of heat treatment on microstructure and tensile property of VST55531 alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2008, 32(4): 399-403.
- FU Yan-yan, SONG Yue-qing, HUI Song-xiao, MI Xu-jun. Optimization on the heat treatment process of VST55531 titanium alloy with orthogonal test[J]. Metal Heat Treatment, 2008, 33(7): 66-68.

(编辑 何学锋)