

固溶时效处理对 TA10 钛合金组织与力学性能的影响

Effect of Solution and Aging Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of TA10 Titanium Alloy

供稿|杨梦迪¹, 张明玉², 于成泉³, 岳旭¹, 同晓乐¹, 张亚峰¹ / YANG Mengdi¹, ZHANG Mingyu², YU Chengquan³, YUE Xu¹, TONG Xiaole¹, ZHANG Yafeng¹

内容 导 读

选取 TA10 钛合金棒材, 对其固溶时效热处理, 随后使用光学显微镜、扫描电子显微镜研究其组织与力学性能的关系, 结果表明: 合金经固溶处理后, 金相组织由初生 α 相和 β 转变组织组成, 其中 β 转变组织由细小的次生 α' 相和残余 β 组成, 此时组织为典型的双态组织, 经时效处理后, 会形成细小的次生 α_s 相, 时效温度越高 α_s 相越细小; 合金经固溶处理后, 其抗拉强度为 510 MPa, 屈服强度为 395 MPa, 延伸率为 23%, 时效处理, 使其强度增大, 塑性降低, 随着时效温度升高, 趋势相同; 仅经固溶处理后, 合金的拉伸断口形貌是以等轴状的韧窝为主, 断口形貌主要由韧窝构成, 当合金再经时效处理后, 断口微观形貌中会出现二次裂纹, 当时效温度继续增大, 断口微观形貌中出现明显的撕裂棱。

钛及钛合金具有无磁性, 良好耐腐蚀性和生物兼容性等众多优异特性, 在汽车工业、海洋工程、生物医疗等领域均有广泛应用^[1-2]。TA10 钛合金是一种常见的近 α 型钛合金, 该合金是替代高成本 Ti-0.2Pd 合金而发明的, 因为其具有优异的耐腐蚀性, 较低的成本, 该合金在石油与化工领域得到广泛应用^[3-4]。

TA10 合金的应用领域不断增加, 国内外学者对该合金做了大量的研究, 苏娟华等^[5]研究了 TA10 钛合金的高温拉伸断裂极限, 结果表明: 应变速率和

温度的改变对该合金断裂极限值影响较大, 提升变形温度会提高合金的断裂极限值, 而提高应变速率会降低合金的断裂极限值。许耀平等^[6]进行了电子束冷床炉熔铸 TA10 钛合金非对称流动及凝固过程数值模拟, 结果表明: 形成非对称熔池的必要条件为传热和流动, 钛溶液流入结晶器的过程中, 部分溶液会侵蚀凝固坯壳, 而另一部分因为温度不同导致密度改变, 进而使其重返液面。

虽然对 TA10 合金的研究领域众多, 但对该合金的组织与性能研究目前仍是主要研究方向, 本文

作者单位: 1. 新疆湘润新材料科技有限公司, 新疆 哈密 839000; 2. 大连交通大学连续挤压教育部工程研究中心, 辽宁 大连 116028; 3. 长春工业大学应用技术学院, 吉林 长春 130000

选取确定固溶温度，改变时效温度，分析固溶时效对合金组织与力学性能的关系，为该合金的进一步应用作出参考。

实验材料与方法

本实验选用的材料为 TA10 钛合金，该合金的名义成分为 Ti-0.3Mo-0.8Ni，通过 ICP（电感耦合等离子体技术）测得实验用合金的化学成分为： $w(\text{Mo})=0.28\%$ 、 $w(\text{Ni})=0.77\%$ 、 $w(\text{O})=0.05\%$ 、 $w(\text{Fe})=0.074\%$ 、Ti 余量。通过金相法测定实验用合金的相变点为 890~895 °C。随后选取 860 °C 为固溶温度，对其进行固溶处理，随后选取 520、540 和 560 °C 3 组温度对其进行时效处理，具体制度如表 1 所示（WQ 为水冷，AC 为空冷），将经固溶时效处理后的合金进行切割加工，制成金相试样与室温拉伸试样。

表 1 TA10 钛合金固溶时效制度

试样编号	制度
1 [#]	860 °C×2 h/WQ
2 [#]	860 °C×2 h/WQ+500 °C×4 h/AC
3 [#]	860 °C×2 h/WQ+520 °C×4 h/AC
4 [#]	860 °C×2 h/WQ+540 °C×4 h/AC

合金的金相组织观察使用 Axiomatic 光学显微镜，使用 Instron 电子万能实验机进行拉伸实验测试，每组拉伸实验测试 3 个试样，最后取其平均

值，使用 Ziss 电子扫描显微镜观察拉伸断口微观形貌。

实验结果与分析

金相组织

图 1 为经固溶时效处理后的金相组织，由图 1 可得，合金经 860 °C 固溶处理后，金相组织由初生 α 相和 β 转变组织组成，其中 β 转变组织由细小的次生 α' 相和残余 β 相组成，此时组织为典型的双态组织，因为合金相变温度为 890~895 °C，当合金加热到 860 °C 时，组织中 α 相发生部分溶解，当进行水冷处理后，组织中发生 $\beta \rightarrow \alpha$ 相转变，导致组织中的 α 相的由 2 部分组织，一部分为组织原始存在的 α 相，另一部分为新转变而来的 α 相^[7]。又因为水冷处理时的过冷度较大，组织形成过饱和固溶体，形成亚稳定 β 相和次生 α' 相^[8]。当合金经固溶处理再进行 500 °C 时效处理后，组织中初生 α 相含量与形貌变化较小，组织中亚稳定 β 相分解，形成稳定的 β 相以及次生 α_s 相，此时组织中初生 α 相含量与形貌变化较小，而时效形成的次生 α_s 相体积较为细小且含量较少，随着时效温度升高到 520 °C，组织中析出的次生 α_s 相更加细小，且含量明显增多，当时效温度达到 540 °C 时，次生 α_s 相含量继续增大，形貌更加细小均匀，但初生 α 相含量几乎不变。

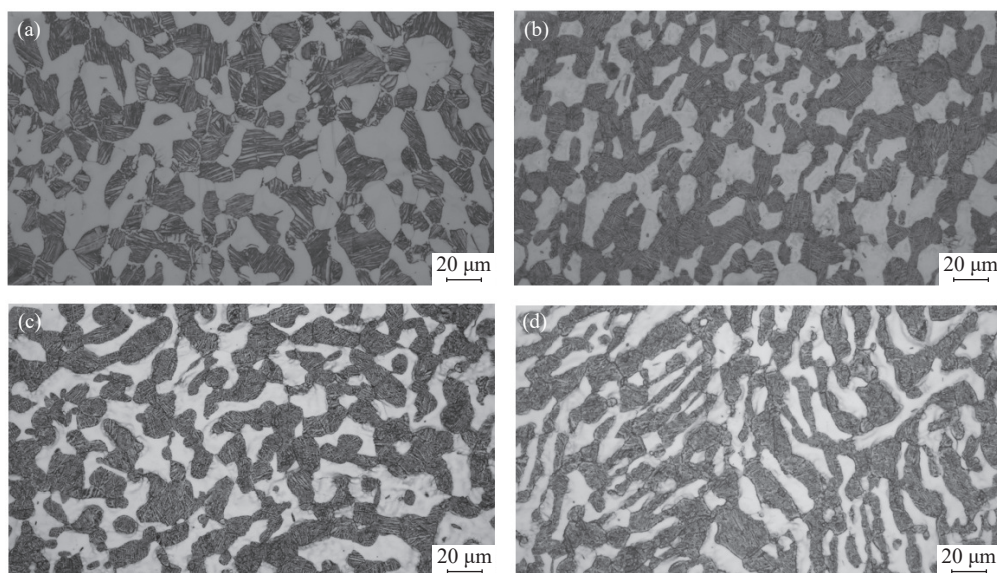


图 1 经不同固溶时效处理后的试样金相组织：(a) 1[#]；(b) 2[#]；(c) 3[#]；(d) 4[#]

因为合金经固溶处理后会形成过饱和固溶体,在随后的时效的过程中过饱和固溶体会发生分解,其中主要的变化为亚稳定 β 相发生分解为 α_s 相和稳定 β 相,而在固溶过程中形成的 α' 相会逐渐分解,最后转变成 α 相,故经时效后的组织由 α_s 相、 α 相、稳定 β 相构成^[9-10]。

拉伸性能

图2为经固溶时效处理后的拉伸性能,由图2可得,合金在只经固溶处理后,其抗拉强度(R_m)为510 MPa,屈服强度($R_{p0.2}$)为395 MPa,延伸率(A)为23%。当再经时效处理后,其强度增大,塑性降低,随着时效温度升高,趋势不变,其中在时效温度为540℃时强度最大,其抗拉强度为548 MPa,屈服强度为432 MPa,而时效温度为500℃时塑性最大,延伸率为17%。

合金经时效处理后强度升高,这是因为时效过程是析出相强化的过程,合金经时效后,组织中会形成较固溶处理后更加细小的 α_s 相,在合金进行拉伸时,位错在穿过细小的 α_s 相时,产生的形变不能快速的分散,导致位错塞积产生,增加晶界位置的应力,增加合金强度。随着时效温度的增加,合金中的 α_s 相含量不断增加,形貌更加细小均匀,在产生位错塞积的同时,会进一步增加滑移过程中的阻

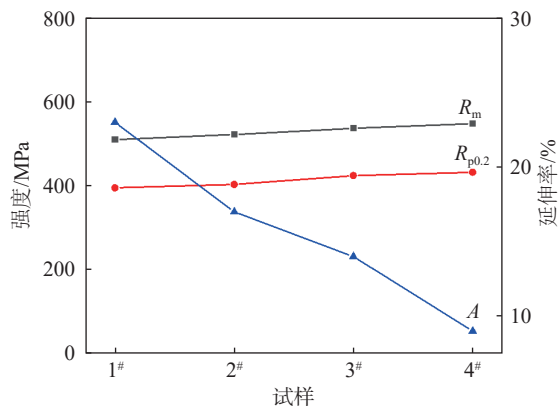


图2 经固溶时效处理后的力学性能

碍效果,导致合金强度进一步增加^[11-12]。通过图2还发现,合金的延伸率始终较好,这是因为时效的过程对组织中初生 α 相的含量和形貌并无较大影响,此时因为初生 α 相具有等轴形貌,等轴状的 α 相在变形时,其具有较好的协调性,促进滑移的开始,导致合金具有较好的塑性^[13]。

断口微观形貌

图3为经固溶时效处理后的拉伸断口微观形貌,由图3可得,经固溶时效处理后,合金的拉伸断口形貌均以等轴状的韧窝(位置A)为主。合金在拉伸时,因为应变速度较快,位错在运动过程中产生应力集,进而导致微孔开始成核,随着塑性变

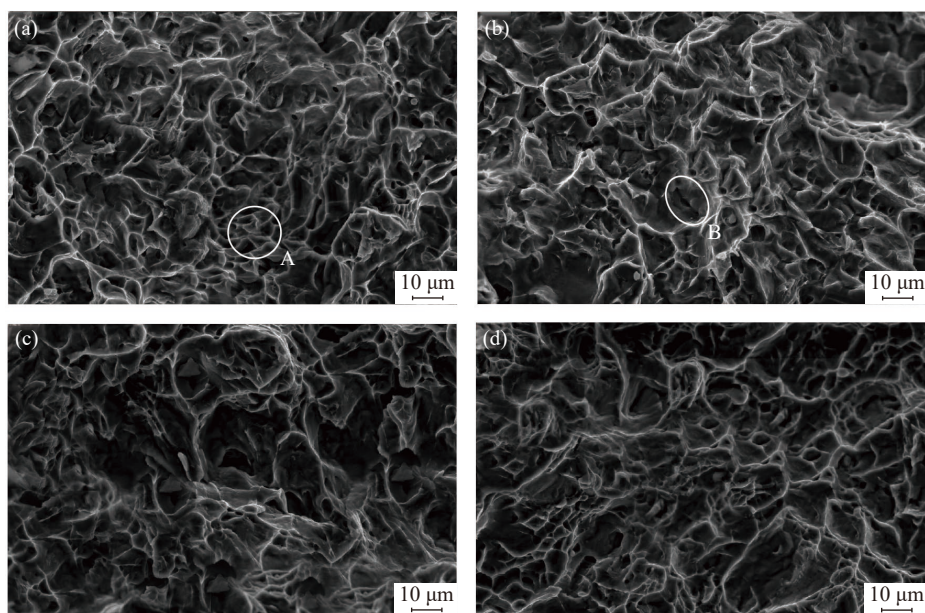


图3 经不同固溶时效处理后的试样拉伸断口微观形貌: (a) 1#; (b) 2#; (c) 3#; (d) 4#

形不断进行,位错在运动过程中所受的排斥力减小,部分位错进入微孔内,再次激活位错源,因为拉伸过程中位错不断形成,而微孔中会不断有新形成的位错进入,使得微孔逐渐长大,随后微孔都汇聚于断口位置并且留下痕迹,最后形成大量韧窝^[4]。

当合金经时效处理后,断口微观形貌中会出现一定数量的二次裂纹(位置B),这是因为时效后组织中形成了大量的 α_s 相,在拉伸时因为位错运动过程中会受到一定的阻塞,使位错发生偏移,二次裂纹的出现说明强度进一步增大。当时效温度继续增大,断口微观形貌中出现明显的撕裂棱,且断裂形貌有明显的起伏,这是组织中 α_s 相进一步增多所致,宏观表现为合金强度进一步增大,与实际结果相一致。

结束语

(1)合金经固溶处理后,金相组织由初生 α 相和 β 转变组织组成,其中 β 转变组织由细小的次生 α' 相和残余 β 相组成,此时组织为典型的双态组织,经时效处理后,会形成细小的次生 α_s 相,时效温度越高 α_s 相越细小。

(2)合金经固溶处理后,其抗拉强度为510 MPa,屈服强度为395 MPa,延伸率为23%,当再经时效处理后,其强度增大,塑性降低,随着时效温度升高,强度继续增大,同时塑性继续降低。

(3)经固溶处理后,合金的拉伸断口形貌均是以等轴状的韧窝为主,当合金经时效处理后,断口微观形貌中会出现二次裂纹,当时效温度继续增大,断口微观形貌中出现明显的撕裂棱。

参考文献

[1] 王庆娟,田云飞,高贝特,等.工业纯钛TA1的双道次热压缩

变形及软化行为.金属热处理,2022,47(4):75

- [2] 刘晓镇,韩恩厚,宋影伟.微观组织对TA2和TC4氢损伤行为影响.中国有色金属学报,2023,33(2):307
- [3] 刘全明,龙伟民,傅莉,等.氢致TA10钛合金焊接接头拉伸性能演变.焊接学报,2020,41(12):20
- [4] 张晋,王永强,户如意,等.大规格TA10钛合金铸锭生产工艺研究.世界有色金属,2020(23):127
- [5] 苏娟华,邵鹏,任凤章.TA10钛合金的高温拉伸断裂极限.金属热处理,2018,43(4):24
- [6] 许耀平,陈其朋,刘源,等.电子束冷床炉熔铸TA10钛合金非对称流动及凝固过程数值模拟(英文).稀有金属材料与工程,2020,49(11):3761
- [7] 王绍灼,孟晗,王芬,等.改善低氧TC4-LC及重熔TC4钛合金性能的热处理工艺.金属热处理,2022,47(4):204
- [8] 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.稀有金属,2022,46(3):273
- [9] 肖寒,于佳新,张宏宇,等.退火温度对新型高强耐蚀钛合金组织与性能的影响.稀有金属材料与工程,2022,51(3):947
- [10] 张明玉,运新兵,伏洪旺.不同热处理工艺对TC10钛合金组织及性能的影响.塑性工程学报,2021,28(12):237
- [11] Zhang M Y, Fu H W, Yun X B. Effect of isothermal annealing on the microstructure and impact properties of TC10 titanium alloy. *J Phys Conf Ser*, 2021, 2044: Art No. 012037
- [12] 贺轶,雷文杰,彭丹迪.去应力退火对TB15钛合金力学性能和组织的影响.热加工工艺,2021,50(24):146
- [13] 王博涵,程礼,崔文斌,等.锻造工艺对TC4钛合金组织和力学性能的影响.热加工工艺,2021,50(23):17
- [14] Huang Y, Gao H, Nix W D, et al. Mechanism-based strain gradient plasticity-II. *Analysis. J Mech Phys Solids*, 2000, 48(1): 99

基金项目:新疆钛基新材料重点实验室资助项目(XR/KY-XD-21005);自治区创新环境(人才、基地)建设专项资助项目(XJQY2009)。

作者简介:杨梦迪(1995—),女,新疆哈密人,本科,助理工程师,主要从事钛及钛合金生产以及质量管理工作。通信地址:新疆湘润新材料科技有限公司, E-mail: 924168452@qq.com。