

TC1 钛合金精锻棒材的拉伸性能及断口形貌

朱宝辉, 胡晓晨, 吴孟海, 王培军, 刘彦昌

(宁夏东方钽业股份有限公司 钛材分公司, 石嘴山 753000)

摘要: 对 TC1 钛合金棒材室温下和高温下的拉伸性能、显微组织和断口进行了分析。结果表明: 随着实验温度的升高, TC1 钛合金的强度显著下降, 伸长率基本保持不变, 断面收缩率明显增加。室温下的断口形貌均为延性断裂和细小的等轴韧窝, 随着实验温度的升高, 韧窝尺寸增大, 深度增加。

关键词: 钛合金; TC1; 拉伸性能; 断口形貌

中图分类号: TG 146 文献标志码: A

Tensile properties and fractographs of finish forged bar of TC1 titanium alloy

ZHU Bao-hui, HU Xiao-chen, WU Meng-hai, WANG Pei-jun, LIU Yan-chang

(Titanium Product Plant, Ningxia Orient Tantalum Industry Co., Ltd., Shizuishan 753000, China)

Abstract: The tensile properties, microstructure and fracture surface of TC1 titanium alloy bars were analyzed at room temperature and high temperature. The results show that the strength of TC1 titanium alloy decreases significantly with increasing test temperature, but the elongation variation with temperature is not obvious, and the increase of reduction in area is very apparent. The fracture shows ductile cracking and tiny ductile dimples at room temperature. A close comparison among the fractures under various conditions reveals that the dimples at elevated temperature are deeper and larger.

Key words: titanium alloy; TC1; tensile properties; fractograph

TC1 钛合金(名义成分为 Ti-2Al-1.5Mn, 质量分数, %)是我国自行研制的低合金化 Ti-Al-Mn 系近 α 型钛合金, 名义成分的铝当量为 3.0, 钼当量为 2.5, 具有密度小、比强度高、塑性优良、耐蚀性好等优点, 在航空工业、宇航工业、化工工业、造船业等方面日益得到广泛的应用。TC1 钛合金的主要性能特点是强度比工业纯钛略高, 并保持了很好的塑性, 另外, 还具有良好的焊接性能和热稳定性, 可在 350 °C 下长时间工作^[1]。

到目前为止, 对 TC1 合金板材和棒材的组织性能研究较多, 但对 TC1 合金在室温和高温下的拉伸断口研究较少。本文作者对 TC1 精锻棒材在室温和 300~400 °C 下的组织、性能及断裂方式进行了实验

研究。

1 实验

TC1 钛合金铸锭经两次真空自耗电弧炉熔炼而成, 第一次熔炼在真空状态下进行, 第二次在氩气气氛保护下进行, 铸锭化学成分见表 1。铸锭在 1 600 t 快锻机上经 β 区和 $(\alpha+\beta)$ 区多次火次锻造成直径为 120 mm 的坯料, 接下来在 SXP-13 型精锻机上经 $(\alpha+\beta)$ 两相区精锻成直径为 45 mm 的锻棒, 然后, 在箱式电阻炉中进行退火处理, 并车削加工成直径为 42 mm 的成品棒材。

表 1 实验用 TC1 合金的化学成分

Table 1 Chemical compositions of experimental TC1 alloy (mass fraction, %)

Al	Mn	Fe	C	N	H	O	Ti
1.81	0.73	0.02	0.006	0.013	0.000 6	0.06	Bal.

对锻造态和退火态的合金棒材按标准进行取样。采用 Leica MM-6 金相显微镜观察金相组织, 采用 INSTRON 4505 电子万能试验机测试合金的室温(25)和高温(300 和 400)拉伸性能。在拉伸断裂试样上截取断口, 高度大约为 6 mm, 采用 JSM-5610 扫描电镜对断口形貌进行观察。

2 结果与讨论

2.1 室温下 TC1 合金的拉伸性能和显微组织

在室温下对 TC1 钛合金精锻棒和退火后的精锻棒进行拉伸实验, 结果如表 2 所示。从表 2 可以看出: 两种状态的力学性能均满足标准要求, 退火后材料的强度有所下降, 塑性有所提高, 且塑性指标差异明显降低, 强塑性指标显著高于标准要求。

表 2 TC1 合金室温下的拉伸性能

Table 2 Tensile properties of TC1 alloy at room temperature

Sample No.	State	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A_5 /%	Z /%
1	R	776.0	636.2	16.0	37.0
2	R	794.0	658.8	19.2	37.5
3	700 , 1 h, AC	670.0	519.6	21.8	40.8
4	700 , 1 h, AC	688.5	540.0	21.0	40.0
GB/T2965—2007		585	460	15	30

图 1 和图 2 所示为 TC1 合金精锻棒的锻态显微组织和退火态显微组织。可见: 经两相区锻造的 TC1 合金精锻棒的显微组织细小、均匀, 相组成为 α 相和少量的 β 相, 未发现冶金偏析或组织偏析及粗大的块状 α 相或长条状 α 相, 退火后的 α 相晶粒略有长大, 但仍然为较细的均匀等轴组织。

2.1 高温下 TC1 合金的拉伸性能及显微组织

TC1 合金棒材在 300 和 400 下的拉伸测试结果如表 3 所列。可以看出: 随着实验温度的升高, 合金强度逐渐下降, 塑性略有增加; 与室温拉伸性能相比, 强度下降比较显著, 伸长率基本保持同等水平,

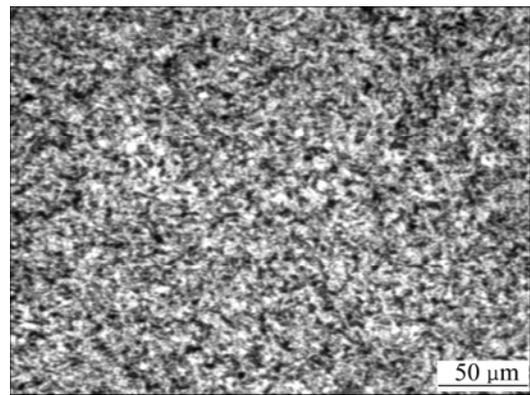


图 1 TC1 合金的锻态显微组织

Fig.1 Microstructure of as-forged TC1 alloy

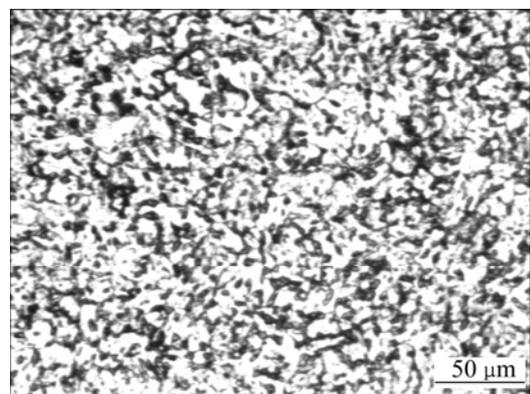


图 2 TC1 合金的退火态显微组织

Fig.2 Microstructure of TC1 alloy after annealing

表 3 TC1 合金高温下的拉伸性能

Table 3 Tensile properties of TC1 alloy at 300 and 400

No.	Test temperature/	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A_5 /%	Z /%
1	300	557.0	410.4	19.0	63.6
2		531.0	396.8	17.9	64.2
3	400	501.1	379.8	18.5	65.6
4		504.1	379.4	23.0	63.4

断面收缩率明显增加。

图 3 所示为 TC1 合金棒材在 300 和 400 下的高温拉伸试样断口附近沿长度方向的显微组织。取样位置在拉伸断口附近, 试样受拉伸应力的影响产生了塑性变形, 显微组织均为拉长的纤维状 α 相晶粒, 在纤维状晶界上分布着许多细小的等轴晶粒。和室温显微组织相比, 许多均匀、细小的等轴晶粒被拉长成为纤维状组织。由于拉伸变形的温度低于再结晶温度(约 720), 仍然属于冷变形或温变形, 所以, 晶粒沿受

力方向被拉长,而且随着变形程度的增加,晶粒的形状变化增大,呈现了类似冷变形的纤维状组织特征。

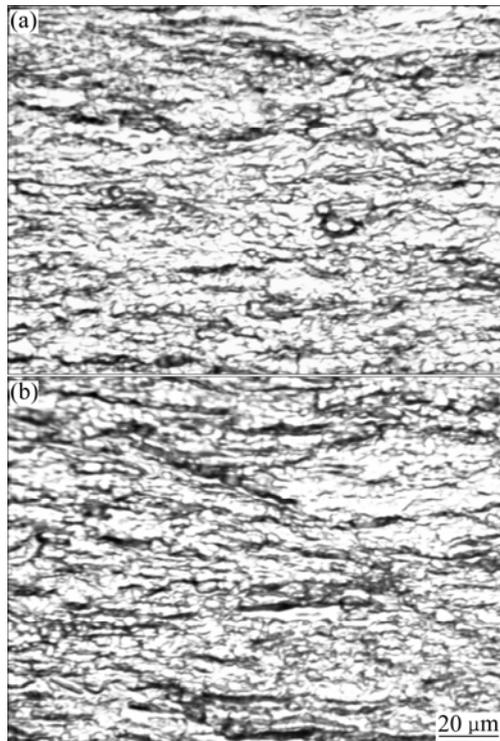


图3 TC1合金高温拉伸试样的显微组织

Fig.3 Microstructures of sample tensioned at 300 (a) and 400 (b)

2.3 不同温度下的断口形貌

对室温拉伸试样和高温拉伸试样的断口形貌进行SEM观察,其形貌分别如图4和图5所示。由图可见:4种状态的断口中心区均为韧性断裂,表现为典型的单轴拉伸产生的等轴韧窝,窝内无明显的成核质点。室温下锻造态和退火态的断口形貌非常相似,基本都是细小的等轴韧窝区,存在少量较大的韧窝,而且这些大韧窝又包含着若干小韧窝,个别韧窝区存在微小的空洞。高温下的断口形貌虽然也是等轴韧窝,但韧窝明显比室温下的大且深,个别韧窝区的空洞也变得又大又深。随着温度的升高,韧窝的大小和深度也明显增加(见图5(c)和5(d))。这是因为合金中一般总存在着与金属相物理性质不同的夹杂物颗粒,相当于在金属基体上分布着一连串空洞,金属在外力作用下发生塑性延伸时会使这种空洞扩大,空洞间的材料发生颈缩,使毗连的材料承受强烈的剪切。随着材料的继续延伸,剩下的就是空洞之间分裂线的薄脊。最后,末尾的连接部分也被拉开,留下两个散布着韧窝花样的断口^[2]。韧窝的大小和深度取决于材料断裂时微孔成核的数量和材料塑性变形的能力,材料的塑性越好,韧窝就越大、越深。由于材料的塑性变形特性随温度的变化而变化,因此,温度对韧窝的大小会有影响^[3]。从表2和表3的对比可以看出:TC1合金棒随着实验温度的升高塑性明显增加;从图4和图5的对比也可

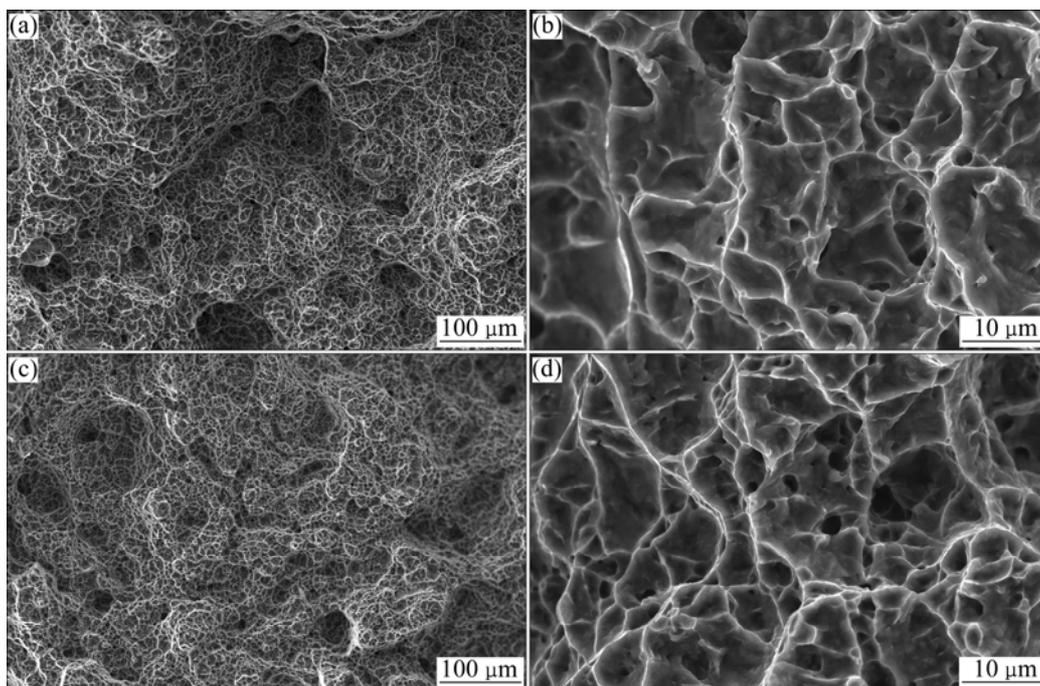


图4 TC1合金的室温拉伸断口形貌

Fig.4 SEM morphologies of tensile fracture surface of TC1 alloy at room temperature: (a, b) Appearance of forged bar; (c, d) Appearance of annealed bar

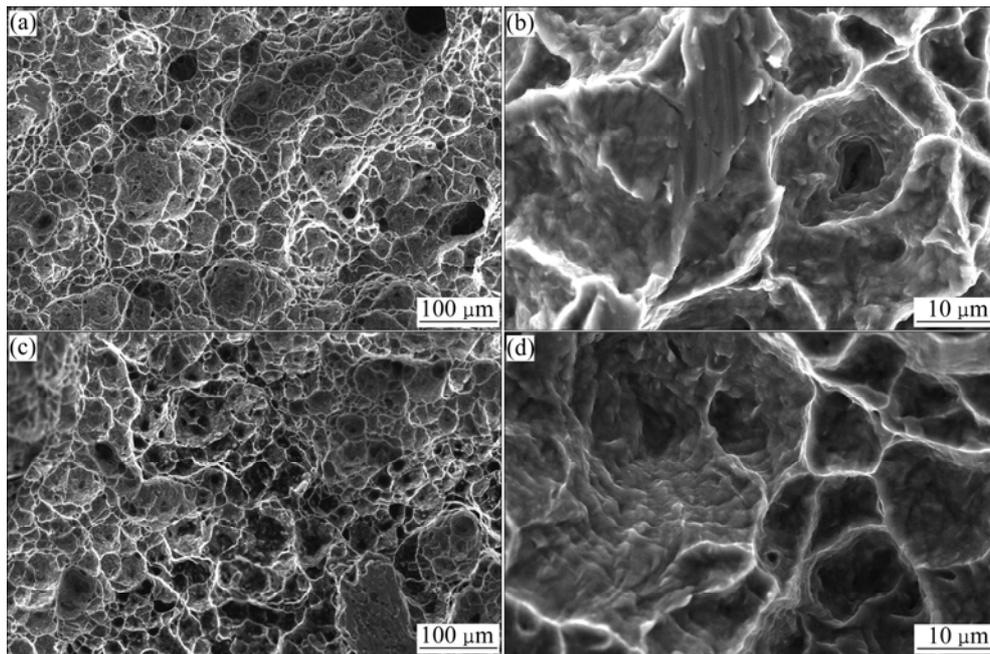


图5 TC1合金的高温拉伸断口形貌

Fig.5 SEM morphologies of tensile fracture surface of TC1 alloy at high temperature: (a, b) Tested at 300 °C; (c, d) Tested at 400 °C

可以看出:随着实验温度的升高,空洞伸长,韧窝的尺寸和深度也相应增加,高温下拉伸断口的韧窝尺寸比室温下拉伸断口的韧窝尺寸明显增大,而且深度增加,韧窝的内壁有明显的变形滑移特征(见图5(b)和5(d))。合金在400 °C和300 °C的断口形貌相比,前者比后者的韧窝更大、更深,尤其是出现了深度较深、尺寸较大的深孔韧窝汇聚区(见图5(c))但300 °C的断口形貌中仅存在个别大尺寸的深孔韧窝,数量较少,分布不均匀。总之,随着实验温度的升高,TC1合金棒材拉伸断口的韧窝尺寸和深度都明显增加,表现出良好的塑性和韧性。

3 结论

1) 在室温下,TC1钛合金精锻棒锻造态和退火态的力学性能均满足标准要求。其中,锻造态经退火后的强度指标有所下降,塑性指标有所提高,而且塑性指标差异明显减少,强塑性指标明显高于标准要求。

2) 在高温下,随着实验温度的升高,TC1钛合金的强度逐渐降低,塑性指标略有增加;与室温拉伸性能相比,强度下降比较明显,伸长率基本保持同等水平,断面收缩率增加非常明显。

3) 室温下的锻造态和退火态的断口形貌相似,基本都是细小的等轴韧窝区,且存在少量的较大的韧窝,高温下的韧窝尺寸比室温下的韧窝尺寸明显增大,而且深度增加。随着实验温度的升高,空洞伸长,韧窝的尺寸和深度也相应增加。

REFERENCES

- [1] 黄伯云,李成功,石力开,邱冠周,左铁镛. 中国材料工程大典:第4卷[M]. 北京:化学工业出版社,2005:558.
HUANG Bo-yun, LI Cheng-gong, SHI Li-kai, QIU Guan-zhou, ZUO Tie-yong. China materials engineering canon: Vol.4 [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 558.
- [2] ENGEL L, KLINGELE H. 金属损伤图谱[M]. 孟锡明,译. 北京:机械工业出版社,1990:29-40.
ENGEL L, KLINGELE H. An atlas of metal damage [M]. MENG Xi-ming, transl. Beijing: China Machine Press, 1990: 29-40.
- [3] 航空航天工业部航空装备失效分析中心. 金属材料断口分析及图谱[M]. 北京:科学出版社,1991.
Aerospace Industry Aviation Equipment Failure Analysis Center. An atlas of metal fracture surface analysis [M]. Beijing: Science Press, 1991.

(编辑 方京华)