

固溶温度对 Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al 钛合金组织性能的影响

魏衍广, 陶海明, 罗 峥, 崔雪飞

(北京有色金属研究总院 粉末冶金及特种材料研究所, 北京 100088)

摘要: 对 Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al 钛合金 $\phi 10$ /mm 棒材在不同固溶时效制度下的拉伸断口形貌与显微组织进行分析, 研究了断口形貌及显微组织对力学性能的影响。结果表明: 当材料在相变点以下固溶时效时, 随着固溶温度的升高, 初生 α 相减少, β 晶粒长大, 断口纤维区变小, 韧窝变大变浅, 断裂方式由韧性断裂逐渐变成准解理断裂, 强度升高, 塑性降低; 当材料在相变点以上固溶时效时, β 晶粒重新形核长大, 初生 α 相已经消失, 断口由棱角清晰的小晶面颗粒组成, 断裂方式为典型的沿晶脆性断裂, 强度在 1500/MPa 以上, 断后伸长率为 2%。

关键词: Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al 钛合金; 固溶时效; 断口形貌; 显微组织; 力学性能; 沿晶断裂

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2014.5.001

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2014)05-0001-06

Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al 钛合金是作为星箭连接机构左右连杆而研制的新型材料, 是拥有自主知识产权的近 β 高强高韧钛合金, 国家牌号为 TB10, $K_p = 1.10$, Mo 当量为 13.76^[1]。该合金中 β 稳定元素总含量在临界浓度附近, 使得合金兼有 $\alpha + \beta$ 和亚稳定 β 型钛合金的性能特征, 它具有比强度高, 断裂韧度好, 淬透性高, 热加工工艺性能和机加工性能优异, 加工温度以及变形抗力较低等一系列优点, 是理想的结构材料^[2-6]。

断口分析, 是指通过对材料断口的观察, 分析其形貌组成, 研究材料的断裂方式及力学性能。通过断口分析, 可判定材料断裂性质、裂纹源位置、裂纹源扩展方向及性能评估。目前, 对断口的分析, 多集中在疲劳断口或焊接断口方面^[7-9], 而且多是对 TC4 合金或 TB6 合金的断口进行研究^[10-13], 对拉伸断口的研究较少, 如朱宝辉等对 TC1 钛合金的棒材的拉伸性能及断口形貌进行了研究^[14], 吴崇周对 TA16 合金的室温拉伸组织与断口进行了分析^[15], 黄利军等研究了 Ti-1023 合金的拉伸断口, 认为高强度 Ti-1023 合金的断裂模式为沿晶断裂, 低强度 Ti-1023 合金的断裂模式以韧性断裂为主沿晶断裂

为辅的断裂^[16], 而对高强高韧 Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al 合金, 目前未见有报道对其拉伸断口进行分析。

本研究通过对固溶时效后的 Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al 钛合金 $\phi 10$ mm 棒材拉伸断口和显微组织进行分析, 研究该合金断口形貌与显微组织特征, 研究固溶时效制度对断口形貌与显微组织及其力学性能的影响规律。

1 实验

实验所用的原料选用高品位海绵钛、MoAl, VAl 等中间合金, 压制电极后, 通过三次熔炼成尺寸为 $\phi 380$ mm 铸锭, 成分如表 1 所示, 在 1000 ~ 1100℃ 之间开坯锻造成 $\phi 170$ mm 棒材, 下料后打磨掉氧化皮, 在 900 ~ 1000℃ 之间锻造成 $\phi 48$ mm 棒材, 然后再下料、打磨掉氧化皮, 在 850 ~ 950℃ 之间轧制成 $\phi 10$ mm 棒材。

棒材的固溶温度分别为 750℃, 780℃, 810℃, 840℃, 保温时间为 30min, 在水中冷却, 时效温度为 520℃, 保温时间为 8h, 在空气中冷却。断口形貌与显微组织的观察在 CAMBRIDGE-2 型扫描电镜上进行, 力学性能的测试在 AG-50KNE 试验机上进行 (GB/T228—2002), 拉伸标准试样如图 1 所示, Al, Cr, V, Mo 元素测定采用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-AES), Fe 元素测定采用光度法 (GB/T4698—1996), C 元素测定采用高频燃烧-红外法

收稿日期: 2014-05-28 ; 修改日期: 2014-08-11

基金项目: 中国博士后科学基金 (20080440334)

通讯作者: 魏衍广 (1976—), 男, 博士, 高级工程师, 从事高性能钛及钛合金研究, (E-mail) weiyg99@163.com。

(ASTME1941—2004), H元素测定采用惰气脉冲红外法(ASTME1447—2005), O和N元素测定采用惰

气脉冲红外热导法(ASTME1409-2005)。通过金相水淬法,测得该铸锭的相变点为815℃。

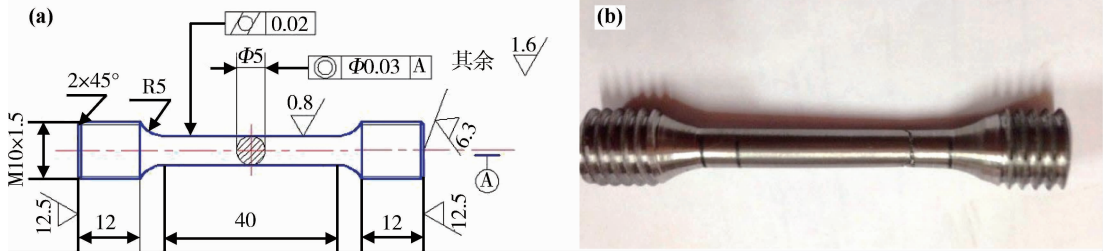


图1 Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al钛合金 $\phi 10$ mm棒材拉伸试样

Fig.1 Tensile test sample of $\phi 10$ mm bars of Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al titanium alloy (a) drawing sheet; (b) tensile specimen

表1 合金铸锭化学成分(质量分数/%)

Table1 Chemical composition of ingot (mass fraction/%)

Region	Mo	V	Cr	Al	Fe	C	N	H	O	Ti
Up	4.72	4.95	1.85	3.31	0.041	0.021	0.022	0.0040	0.13	Bal
Mid	4.71	4.89	1.98	3.29	0.042	0.016	0.021	0.0041	0.11	Bal
Down	4.74	4.92	2.01	3.33	0.044	0.021	0.021	0.0030	0.12	Bal

2 结果与讨论

2.1 断口形貌

图2为T固溶时效后的拉伸断口形貌。由图2a,b可知,当固溶温度为750℃与780℃、时效温度为520℃时,裂纹源于试样表面缩颈处,由外向内扩展,断口比较平整,纤维区已经消失,断口由较浅的小韧窝组成,属于准解理断裂。当固溶温度为840℃、时效温度为520℃时,裂纹源于试样加工螺纹处,断口粗糙,分布着硬质颗粒,颗粒的小晶面棱角清晰,属于典型的沿晶断裂。

围边缘为剪切唇区,起伏较大。当固溶温度为810℃、时效温度为520℃时,裂纹源于试样加工螺纹处,由外向内扩展,断口比较平整,纤维区已经消失,断口由较浅的小韧窝组成,属于准解理断裂。当固溶温度为840℃、时效温度为520℃时,裂纹源于试样加工螺纹处,断口粗糙,分布着硬质颗粒,颗粒的小晶面棱角清晰,属于典型的沿晶断裂。

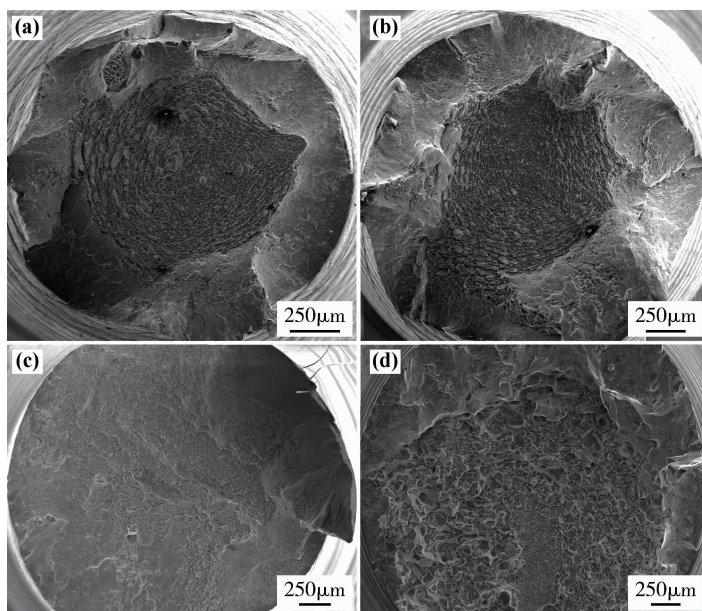


图2 Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al钛合金 $\phi 10$ /mm棒材的断口形貌

Fig.2 Fracture morphology of $\phi 10$ /mm bars of Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al titanium alloy

(a) 750℃/30min + 520℃/8h; (b) 780℃/30min + 520℃/8h;

(c) 810℃/30min + 520℃/8h; (d) 840℃/30min + 520℃/8h

图 3 为上述断口中心部位放大 1000 倍的形貌。当固溶温度为 750℃, 780℃ 时, 韧窝形貌差别不大, 都是由不规则形状的撕裂韧窝组成, 这些韧窝大小不同、形状各异、位向不一。当固溶温度为 810℃ 时, 断口内出现明显的大韧窝, 尺寸约为 30μm。当固溶温度为 840℃ 时, 断口由许多沿晶断裂的晶面

及晶面之间的小韧窝组成, 此时, 材料的断裂属于脆性沿晶断裂。

2.2 显微组织与力学性能

图 4 为试样显微组织的扫描照片。当固溶温度为 750℃, 时效为 520℃ 时, α 相呈现针状与孔状, 细小弥散分布, 在放大 2000 倍的照片上, 难以找到明

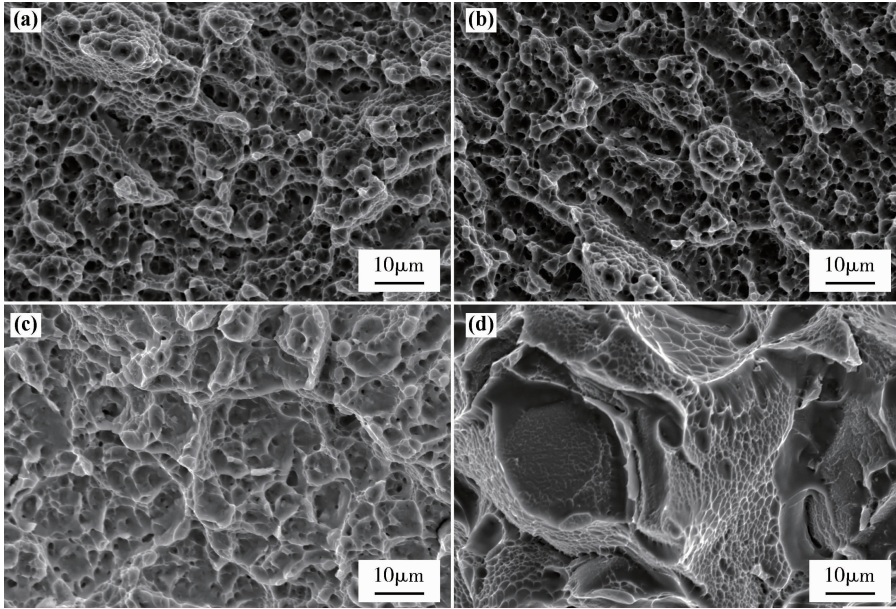


图 3 Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al 钛合金 φ10/mm 棒材中心部位的断口形貌

Fig. 3 Fracture morphology in the central part of φ10/mm bars of Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al titanium alloy

(a) 750℃/30min + 520℃/8h; (b) 780℃/30min + 520℃/8h;
(c) 810℃/30min + 520℃/8h; (d) 840℃/30min + 520℃/8h

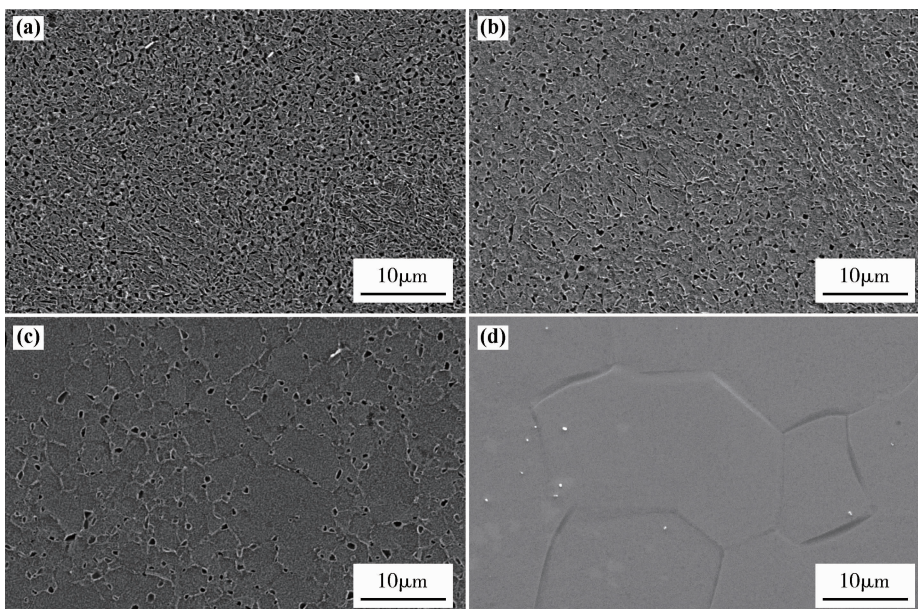


图 4 Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al 钛合金 φ10mm 的 SEM

Fig. 4 SEM of φ10mm bars of Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al titanium alloy

(a) 750℃/30min + 520℃/8h; (b) 780℃/30min + 520℃/8h;
(c) 810℃/30min + 520℃/8h; (d) 840℃/30min + 520℃/8h

显的 α 晶界, α 相约占40%,平均尺寸不到 $1\mu\text{m}$ 。当固溶温度为 780°C ,时效为 520°C 时, α 相数量减少,约占30%, α 相形态变化不大,仍是针状与孔状,晶内 α 相与晶界 α 相的区别仍不明显。当固溶温度为 810°C ,时效为 520°C 时, α 相形态有较大变化,多为孔形,针状 α 相很少, α 晶界呈现多边形化, α 相约占8%。当固溶温度为 840°C ,时效为 520°C 时,由于在相变点以上固溶,材料重新形核长大, β 晶粒为规则的多边形,尺寸较大,约在 $100\mu\text{m}$ 左右,因此,放大2000倍的扫描照片,只能观察到一个晶

粒,而采用放大500倍的照片,能观察多个 β 晶粒的形貌与尺寸,如图4d所示,时效后, β 晶粒内没有发现 α 相析出。

表2为固溶时效后的力学性能。由表2可知,随着固溶温度升高,材料的抗拉强度与屈服强度升高,塑性下降。当固溶温度由 750°C 升至 780°C 时,材料的塑性变化不大,强度略微升高,当固溶温度为 810°C 时,材料的塑性急剧降低,强度快速升高,当固溶温度为 840°C 时,材料强度在 1500MPa 以上,塑性极低,断后伸长率为2%,断面收缩率为5%。

表2 Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al钛合金 $\phi 10/\text{mm}$ 棒材力学性能

Table 2 Mechanical properties of $\phi 10/\text{mm}$ bars of Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al of titanium alloy

Condition	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation/%	Section shrinkage/%
750°C (30min) + 520°C (8h)	1233	1201	12	57
780°C (30min) + 520°C (8h)	1289	1265	11	56
810°C (30min) + 520°C (8h)	1427	1414	6	18
840°C (30min) + 520°C (8h)	1532	1532	2	5

2.3 讨论

通过对图2、3与表2的分析,当固溶温度为 750°C 、 780°C ,时效温度为 520°C 时,断口的纤维区为不规则形状的撕裂韧窝组成,韧窝的撕裂棱是由于塑性变形而产生的,表明材料塑性较好。当固溶温度为 810°C ,时效温度为 520°C ,断口平整,纤维区消失,韧窝较浅,断裂方式为准解理断裂,此时材料的塑性下降。当固溶温度为 840°C ,时效温度为 520°C ,断口平整,断口上分布着棱角清晰的小晶面,此时材料的强度更高,塑性更低,断裂为典型的脆性沿晶断裂。

显微组织能够影响材料的力学性能: α 相多,材料的塑性高,强度低; α 相少,材料的塑性低,强度高。通过对图4与表2的分析,当固溶温度为 750°C 、 780°C 时,时效温度为 520°C , α 相细小弥散分布,比例在30%以上,材料的塑性较高,强度相对略低。当固溶温度为 810°C ,时效温度为 520°C , α 相显著减少,材料的强度迅速升高,塑性下降较大。当固溶温度为 840°C ,时效温度为 520°C ,显微组织中并没有发现 α 相析出,强度更高,塑性极低。

当材料在相变点以上固溶时,初生 α 相回溶,随着固溶温度的升高,回溶的 α 相越多,初生 α 相减少,当固溶后的材料在 520°C 保温8h时,有次生 α 相析出,然而,在图4a,b,c中,初生 α 相和次生 α 相难以分辨清楚。当固溶温度在相变点以上时,如 840°C ,材料重新形核并长大,在 520°C 保温8h时,

在图4d中没有发现次生 α 相,只有尺寸在 $100/\mu\text{m}$ 左右的 β 晶粒。比较图2、图3与表2,可知,初生 α 相属于能够塑性变形的相,而次生 α 相属于硬质点,强化相,不能塑性变形,因此,图2中的撕裂韧窝棱是初生 α 相,韧窝是包含次生 α 相的 β 晶粒。在相变点以下固溶,随着温度的升高,回溶的 α 相越多,初生 α 相减少,在时效时析出的次生 α 相就越多,同时,由于空位、位错等缺陷的消失, β 晶粒缓慢长大,因此,随着固溶温度的升高,韧窝增大,强度升高,塑性下降,尤其当固溶温度为 810°C 时,时效后的材料断口平整,韧窝浅且大,强度较高,塑性较差。在相变点以上固溶,晶粒重新形核长大,没有了撕裂韧窝,只有棱角清晰的小晶面组成的硬质颗粒,这些颗粒是次生 α 相聚集长大而成的,材料的强度更高,塑性更低。

3 结论

(1) Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al钛合金 $\phi 10\text{mm}$ 棒材在固溶温度为 750°C 与 780°C ,时效温度为 520°C 时,裂纹源于试样表面,纤维区近圆形,由撕裂性韧窝组成,为典型的韧性断裂。当固溶温度为 810°C 、时效温度为 520°C 时,裂纹源于试样加工螺纹处,断口比较平整,纤维区已经消失,断裂方式为准解理断裂。当固溶温度为 840°C 、时效温度为 520°C 时,断口出现棱角清晰的小晶面颗粒,为典型的沿晶脆性断裂;

(2) Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al 钛合金 $\phi 10\text{mm}$ 棒材在固溶温度为 750°C 与 780°C , 时效温度为 520°C 时, α 相呈现针状与孔状, 细小弥散分布, 难以分辨初生 α 相和次生 α 相, α 相分别约占 40% 与 30%, 材料塑性好, 强度高。当固溶温度为 810°C , 时效温度为 520°C 时, 晶界呈现多边形化, α 相多为孔形, 约占 8%, 材料塑性降低, 强度升高。当固溶温度为 840°C , 时效温度为 520°C 时, 材料重新形核长大, β 晶粒为规则的多边形, 没有发现 α 相析出, 材料塑性更低, 强度在 $1500/\text{MPa}$ 以上。

(3) 断口形貌中的撕裂棱为初生 α 相, 能够塑性变形, 提高材料的塑性, 断口形貌中的韧窝为包含次生 α 相的 β 晶粒, 这些次生 α 相属于硬质点, 不能塑性变形, 提高材料的强度。

参考文献:

- [1] 黄伯云, 李成功, 石力开, 等. 中国材料工程大典: 第4卷: 有色金属材料工程(上)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [2] 张翥, 惠松骁, 刘伟. 高强高韧 TB10 钛合金棒材研究[J]. 稀有金属, 2006, 30(2): 221-225.
(ZHANG Z, HUI S X, LIU W. High strength and high toughness TB10 titanium alloy bars[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30(2): 221-225.)
- [3] 尤振平, 叶文君, 惠松骁等. TB10 钛合金的动态力学性能及绝热剪切分析[J]. 稀有金属, 2008, 32(6): 799-802.
(YOU Z P, YE W J, HUI S X, *et al.* Study on dynamic mechanical properties and adiabatic shearing of 33110 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2008, 32(6): 799-802.)
- [4] 毛柏平, 郭胜利, 沈健. Ti-5523 钛合金热变形流变行为的研究[J]. 稀有金属, 2008, 32(5): 674-678.
(MAO B P, GUO S L, SHEN J. Study on hot deformation behavior of Ti-5523 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2008, 32(5): 674-678.)
- [5] 魏衍广, 陶海明, 陈海珊. 固溶温度对 TB10 钛合金力学性能的影响[J]. 稀有金属, 2010, 34(1): 6-9.
(WEI Y G, TAO H M, CHEN H S. Effect of solid solution temperature on mechanical property of TB10 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2010, 34(1): 6-9.)
- [6] 魏衍广, 陶海明, 陈海珊. Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al 合金热压缩变形行为[J]. 稀有金属, 2011, 35(3): 349-351.
(WEI Y G, TAO H M, CHEN H S. Hot compressive behavior of Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2011, 35(3): 349-351.)
- [7] 赵光菊, 钟蜀晖, 邓建华. TA6V 钛合金疲劳断口形貌及断口分析[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2007, 36(6): 25-28.
(ZHAO G J, ZHONG S H, DENG J H. Study on the fatigue fracture in TA6V titanium alloy[J]. Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition), 2007, 36(6): 25-28.)
- [8] 张聃, 陈文华, 王成国, 等. TA12 钛合金电子束焊接接头性能和断口分析[J]. 电焊机, 2011, 41(10): 80-83.
(ZHANG D, CHEN W H, WANG C G, *et al.* Analysis on the properties and fracture of welding joints of TA12 alloy electron beam[J]. Electric Welding Machine, 2011, 41(10): 80-83.)
- [9] 秦斌, 盛光敏, 黄家伟, 等. 钛合金与不锈钢扩散焊接接头断口分析[J]. 钢铁钒钛, 2005, 26(4): 55-57.
(QIN B, SHENG G M, HUANG J W, *et al.* Fracture analysis of diffusion-bonded joint between titanium alloy and stainless steel[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2005, 26(4): 55-57.)
- [10] 刘鹏涛, 赵秀娟, 刘昕, 等. 氢对 TC4 钛合金电子束焊接接头疲劳断裂特性的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(13): 130-134.
(LIU P T, ZHAO X J, LIU X, *et al.* Effects of hydrogen on fatigue fracture characteristics of TC4 alloy welded joint by electron beam[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(13): 130-134.)
- [11] 金宜振, 温家伶, 常明, 等. TC4-DT 钛合金电子束焊接接头接头的疲劳断口研究[J]. 焊接, 2012(11): 55-58.
(JIN Y Z, WEN J L, CHANG M, *et al.* Research on fatigue fracture characteristics of TC4-DT alloy welded joint by electron beam[J]. Welding & Joining, 2012(11): 55-58.)
- [12] 姚倡锋, 武导侠, 靳淇超, 等. TB6 钛合金高速铣削三维表面形貌及疲劳行为[J]. 中国有色金属学报(英文版), 2013, 23(3): 650-654.
(YAO C F, WU D X, JIN Q C, *et al.* Influence of high-speed milling parameter on 3D surface topography and fatigue behavior of TB6 titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(English), 2013, 23(3): 650-654.)
- [13] 李怀学, 巩水利, 费群星. 热等静压对激光直接沉积 TB6 钛合金组织和拉伸性能的影响[J]. 应用激光, 2011, 31(1): 45-48.
(LI H X, GONG S L, FEI Q X. Effects of hot isostatic pressing on microstructure and tensile properties of direct laser deposited TB6 alloys[J]. Applied Laser, 2011, 31(1): 45-48.)
- [14] 朱宝辉, 胡晓晨, 吴孟海, 等. TC1 钛合金精锻棒材的拉伸性能及断口形貌[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20

(B10);144-147.

(ZHU B H, HU X C, WU M H, *et al.* Tensile properties and fractographs of finish forged of TC1 titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20 (B10);144-147.)

[15] 吴崇周. TC16 钛合金断口分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(增刊3):226-229.

(Wu C Z. The analysis of fracture surfaces of TC16 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(Suppl 3):226-229.)

[16] 黄利君, 齐立春, 刘昌奎, 等. Ti-1023 钛合金的疲劳极限与拉伸强度的关系[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20

(Specail. 3);s54-s58.

(HUANG L J, QI L C, LIU C K, *et al.* Relationship between fatigue limit and tensile strength of Ti-1023 titanium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(Specail. 3);s54-s58.)

[17] 全国有色金属标准化技术委员会, 中国标准出版社第五编辑室. 钛及钛合金标准汇编[M]. 北京: 中国标准出版社, 2008, 12:25-26.

[18] 崔约贤, 王长利. 金属断口分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.

[19] 张翥, 王群骄, 莫畏. 钛的金属学和热处理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.

Effect of Solution-ageing on Microstructure and Properties of Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al Titanium Alloy

WEI Yan-guang, TAO Hai-ming, LUO Zheng, CUI Xue-fei

(Powder Metallurgy and Special Materials Research Department, Beijing General Research Institute for Non-ferrous Metals, Beijing 100088, China)

Abstract: The tensile fracture morphology and microstructure of the $\phi 10$ mm bars of Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al titanium alloy were analyzed under different solution-ageing conditions, and the effects of which on mechanical properties were studied. The results show that when the alloy is heated below the transition point, primary α decreases and β grain increases with the increase of solution temperature. Consequently, the fibrous zone in fracture morphology decreases and the dimple becomes big but shallow. Ways of fracture change from dimple to quasi-cleavage with the increase of strength and decrease of plasticity. Moreover, when the alloy is heated above the transition point, primary α disappears and β grain re-nucleates and grows. The fracture is made up of small crystal planes with clear edges, which suggests that the alloy fracture is typical intergranular brittle fracture with the strength over 1500/MPa and elongation 2%.

Key words: Ti-5Mo-5V-2Cr-3Al titanium alloy; solution-ageing; fracture morphology; microstructure; mechanical property; intergranular fracture