

TC11 钛合金显微组织特征参数与拉伸性能 定量关系研究

王伟¹, 罗焯铖¹, 蒋立², 刘丹², 辛社伟³, 于呈呈⁴

(1. 西安建筑科技大学 冶金工程学院, 陕西 西安 710055)

(2. 陕西长羽航空装备有限公司, 陕西 西安 710299)

(3. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

(4. 季华实验室, 广东 佛山 528255)

摘要: 针对TC11钛合金显微组织特征参数与室温拉伸性能定量关系缺失的问题, 对不同热处理制度下TC11钛合金显微组织特征参数进行了定量研究。利用图像分析软件, 定量表征了不同热处理温度下等轴 α 相的含量、等轴 α 相的晶粒尺寸、片层 α 相厚度和片层 α 相长宽比; 建立了室温拉伸性能和热处理温度、显微组织定量参数之间的定量关系。采用多元非线性回归模型分析了室温拉伸性能与显微组织定量参数之间的定量关系。结果表明, TC11钛合金的显微组织取决于热处理制度, 固溶温度每上升10℃, 合金等轴 α 相的含量降低约4.6%, 时效温度每上升10℃, 片层 α 相厚度增加约0.05 μm 。实验和统计分析表明, 随着等轴 α 相含量降低, TC11钛合金的强度先降低后提高, 塑性先提高后降低; 等轴 α 相晶粒尺寸对合金室温拉伸性能影响较小。片层 α 相厚度增加, 合金强度提高, 合金塑性与片层 α 相厚度相关性较小; 片层 α 相的长宽比减少, 合金的强度先降低后提高, 塑性提高; TC11钛合金的显微组织特征参数和室温拉伸性能之间符合多元非线性回归关系。

关键词: TC11钛合金; 拉伸性能; 定量关系; 多元非线性回归

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2025)05-1291-08

1 引言

钛合金具有密度小、比强度高、耐高温、耐蚀、可焊接等优良性能, 广泛应用于航空航天领域^[1-3]。钛合金的组织多种多样, 通常被分为等轴组织、双态组织、网篮组织和魏氏组织^[4], 通过不同的热加工和热处理工艺, 可以得到特定的组织形态。经过研究表明, 钛合金显微组织决定其力学性能, 不同的组织之间的力学性能差异很大, 即使是相同组织, 相含量与大小的变化也会使钛合金的性能发生较大改变^[5]。TC11钛合金成分为Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si, 具有良好的高温强度、耐腐蚀性、可焊性以及生物相容性等优良性能, 并且还具有钢和镁合金等结构材料的众多优良特点, 使其在航空航天领域应用广泛。TC11钛合金主要用于制造航空发动机的压气机盘、叶片、鼓筒等零件, 也被用于制造飞机构件^[6]。

随着航空航天业的发展, 和对钛合金研究的深入, 对钛合金性能的要求越来越高, 为了调控得到综合性能更

加优异的钛合金, 对钛合金显微组织与力学性能的定量研究至关重要。多年来, 许多学者建立钛合金显微组织中的各项参数与各种力学性能的关系。例如, 石晓辉等^[7]利用多项式拟合, 建立了Ti-6Al-4V合金网篮组织中片层 α 相的厚度、长宽比与拉伸性能的定量关系; Wang等^[8]使用多元回归技术, 建立了Ti-22Al-25Nb中O相析出相的体积分数、板条O相的宽度和长度以及等轴晶的直径和显微硬度的定量关系。王凯旋等^[9]运用神经网络建立Ti-17合金组织 α 相的体积分数、厚度以及形态与室温拉伸力学性能的定量关系模型。综上所述, 对于各类钛合金组织与性能定量关系的研究众多; 但对于TC11钛合金显微组织与拉伸性能定量关系的研究, 目前则鲜有报道。

因此本研究以TC11钛合金作为研究材料, 通过不同热处理制度, 获得TC11钛合金在不同的显微组织下的室温拉伸性能; 利用体视学和定量金相学, 并结合Image图像处理软件, 建立合金中各项显微组织参数和室温拉伸

收稿日期: 2024-05-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51975450); 陕西省科技新星基金(2021KJXX-32); 西安市创新能力强基计划-先进制造技术攻关项目(21XJZZ0031); 陕西省教育厅服务地方专项(22JC047); 陕西省自然科学基金(2021JQ-946); 陕西省重点研发项目(2023-YBGY-383)

作者简介: 王伟, 男, 1985年生, 博士, 教授, 西安建筑科技大学冶金工程学院, 陕西 西安 710055, E-mail: gackmol@163.com

性能的多元非线性回归模型,为实际生产研究中 TC11 钛合金综合性能的优化提供参考。

2 实验

试验所用材料为长羽航空装备有限公司提供的 $(\alpha+\beta)$ 两相区锻造 TC11 钛合金棒材,锻造温度为 950 °C,变形量为 35%。其化学成分如表 1 所示。通过金相法测得其 β 转变温度为 (990 ± 5) °C。

为了得到不同的组织形态,对棒材进行不同制度的热处理;将棒材分别在 950、960、970、980 和 990 °C 固溶处理 1 h 后,再分别在 520、530 和 540 °C 时效处理 6 h,得到总计 15 个样品。每个样品进行室温拉伸试验和金相组织观察。使用 INSTRON5985 万能拉伸试验机测试试样的室温拉伸性能;使用 Axio Vert.A1 蔡司光学显微镜和 Gemini SEM 300 场发射扫描电子显微镜进行显微组织观察。使用 Image 软件,统计显微组织中的等轴 α 相含量、等轴 α 相粒径、片层 α 相厚度、片层 α 相长宽比,作为自变量;以室温拉伸性能作为因变量;通过 Origin 软件拟合,以二次多项式为模型,建立显微组织与力学性能之间的多元非线性回归模型。

3 结果与分析

3.1 显微组织

固溶是钛合金的一种强化热处理方式,能显著改变合金的显微组织。图 1 为不同固溶温度下时效温度 540 °C 时的显微组织。固溶温度为 950 °C 时,显微组织

表 1 TC11 钛合金棒材化学成分

Table 1 Chemical composition of TC11 titanium alloy bars (wt%)

Al	Si	Zr	Mo	Ti
6.11	0.35	2.05	5.27	Bal.

中的等轴状的初生 α 相(后文称作等轴 α 相)含量为 46%,此时热处理后 TC11 钛合金的组织为等轴组织;随着固溶温度升高,等轴 α 相减少,合金组织转变为双态组织;当固溶温度达到 990 °C 时,等轴 α 相消失,合金组织变为魏氏组织。

固溶处理对钛合金组织优化起很大作用,固溶可以改变合金中相的含量、大小和形状,进而影响合金的性能^[10]。通过调控热处理工艺参数,可以实现合金中不稳定相的转变或稳定相的析出,从而改善合金的强度、硬度、耐腐蚀性等性能。从图 1 中可以看出,随着固溶温度的提高等轴 α 相含量降低, β 转变组织增多^[11],同时从残余 β 相中析出的片层状的次生 α 相(后文中称作片层 α)含量增多;但固溶温度达到相变点以上时,等轴 α 相消失。使用 Image 软件统计了不同固溶温度下合金的等轴 α 相含量,发现固溶处理温度每上升 10 °C,合金等轴 α 相的含量降低约 4.6%。随着等轴 α 相的减少,残余 β 相中析出的片层 α 相增多,片层 α 相的厚度也增加了,固溶温度由 950 °C 升高到 990 °C 时,片层 α 的厚度由 0.13 μm 增加到 0.47 μm 。

TC11 钛合金的显微组织同时也受到时效温度的影响。如图 2 为 970 °C 固溶时不同时效温度下的显微组

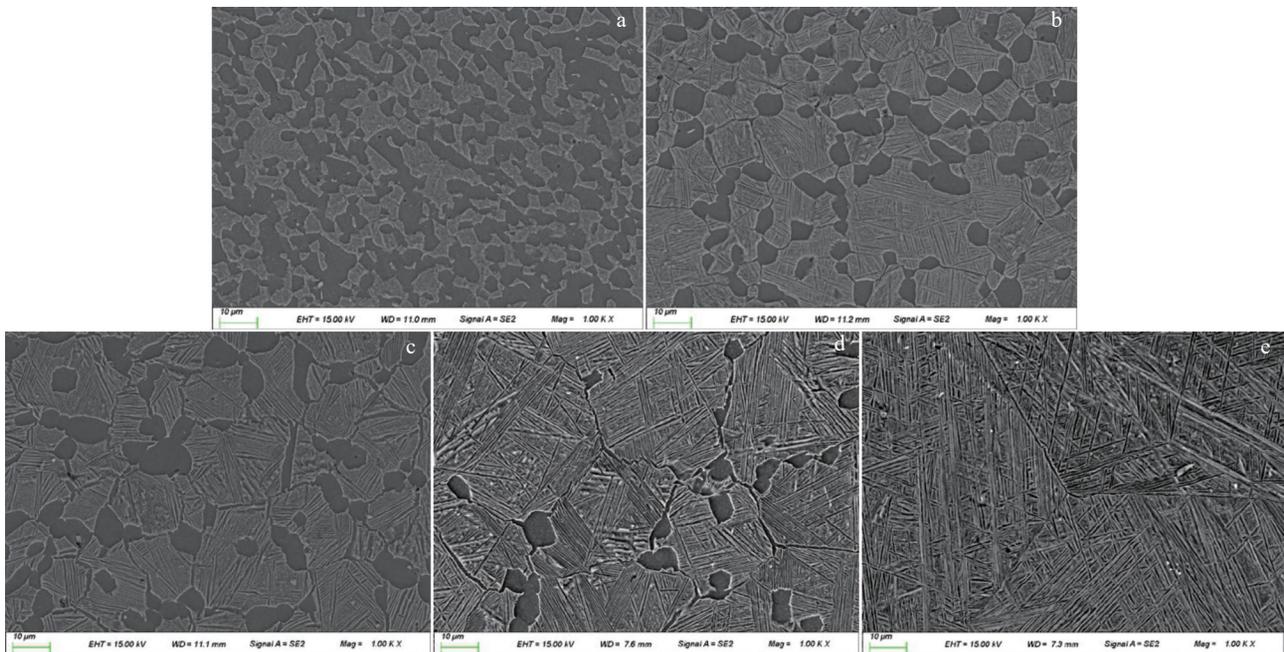


图 1 不同固溶温度 TC11 钛合金 540 °C 时效时 SEM 照片

Fig.1 SEM images of TC11 titanium alloy aged at 540 °C with different solid solution temperatures: (a) 950 °C, (b) 960 °C, (c) 970 °C, (d) 980 °C, and (e) 990 °C

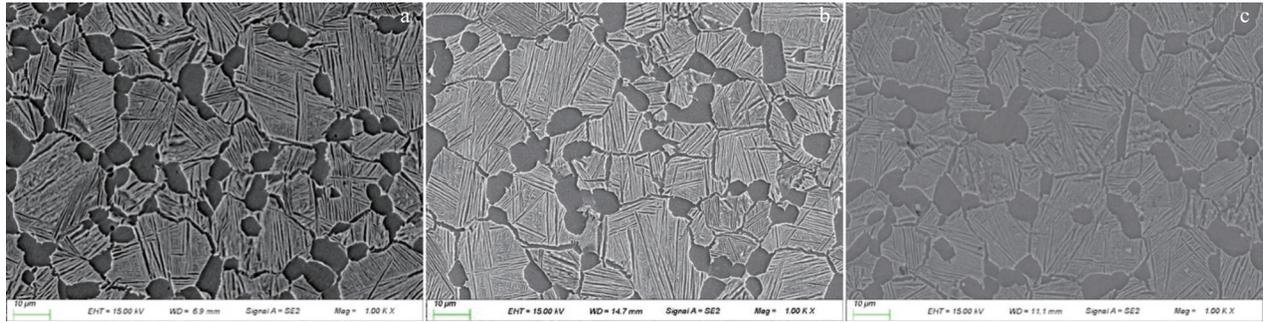


图2 970 °C固溶后不同时效温度TC11钛合金SEM照片

Fig.2 SEM images of TC11 titanium alloy with different aging temperatures after solid solution at 970 °C: (a) 520 °C, (b) 530 °C, and (c) 540 °C

织。随着时效温度的升高,显微组织中的等轴 α 相含量变化不大,这说明时效温度对等轴 α 相含量的影响较小,主要影响片层 α 相的尺寸。随着时效温度的增加,残余 β 相在时效过程中分解增多,使片层 α 相的厚度增加。但片层 α 相的长度受到晶界与亚晶界的限制,时效过程中片层 α 相的长度变化很小,因此随着时效温度的提高,片层 α 相的长宽比降低。

使用 Image 软件,对不同热处理制度下显微组织中 等轴 α 相含量、等轴 α 相晶粒尺寸、片层 α 相厚度和片层 α 相的长宽比进行定量表征,统计数据如表 2 所示。将统计数据绘制成折线图,如图 3 所示,从图中可以看出,等轴 α 相的含量受固溶温度的影响最大;而等轴 α 相的晶粒尺寸受到热处理制度的影响较小,其尺寸大多集中在

4~6 μm 之间。随着时效温度的升高,片层相的厚度增加,温度每上升 10 °C,片层 α 相厚度增加约 0.05 μm ;Gao 等^[12]在研究时效温度对 Ti555211 钛合金的影响时,也发现时效温度越高,片层 α 相的尺寸越大的变化趋势。魏氏组织的片层 α 相厚度和长宽比要显著大于双态组织和等轴组织。

3.2 拉伸性能

表 3 为 TC11 钛合金在不同热处理制度下的室温拉伸性能。通过对比,发现不同热处理制度会显著改变 TC11 钛合金的室温拉伸性能。在所有热处理制度下,TC11 钛合金的极限抗拉强度(ultimate tensile strength, UTS)都在 1100~1200 MPa 之间,变化较小;当固溶温度达到 990 °C 时,TC11 合金的组织由双态组织转变为魏氏组织,合金的塑性骤降^[13]。

表 2 TC11 钛合金不同热处理制度显微组织定量表征

Table 2 Quantitative characterization of microstructure of TC11 titanium alloy with different heat treatment regimes

Solution temperature/°C	Aging temperature/°C	Equiaxed α phase content/%	Equiaxed α phase grain size/ μm	Thickness of platelet α phase/ μm	Aspect ratio of platelet α phase
950		46.08 (± 1.001)	5.35 (± 0.507)	0.10 (± 0.030)	19.21 (± 6.001)
960		27.19 (± 1.006)	5.69 (± 0.512)	0.37 (± 0.051)	35.18 (± 4.504)
970	520	27.24 (± 1.507)	5.52 (± 0.500)	0.36 (± 0.035)	28.58 (± 5.500)
980		8.88 (± 1.121)	5.25 (± 0.520)	0.32 (± 0.057)	66.51 (± 7.006)
990		0	0	0.40 (± 0.035)	242.65 (± 12.500)
950		46.52 (± 2.022)	4.10 (± 1.002)	0.13 (± 0.030)	8.5 (± 4.010)
960		26.20 (± 1.006)	5.30 (± 0.513)	0.41 (± 0.045)	37.34 (± 4.501)
970	530	21.02 (± 1.000)	5.92 (± 1.001)	0.39 (± 0.057)	29.85 (± 4.567)
980		13.31 (± 2.008)	5.66 (± 1.019)	0.39 (± 0.050)	65.75 (± 5.502)
990		0	0	0.48 (± 0.066)	209.61 (± 20.755)
950		46.22 (± 1.509)	4.73 (± 0.517)	0.16 (± 0.045)	1.81 (± 0.915)
960		20.41 (± 1.028)	5.50 (± 0.500)	0.45 (± 0.040)	39.97 (± 5.128)
970	540	20.73 (± 2.044)	5.72 (± 1.013)	0.42 (± 0.061)	30.93 (± 7.630)
980		5.38 (± 1.502)	5.46 (± 1.048)	0.45 (± 0.050)	64.69 (± 6.003)
990		0	0	0.55 (± 0.045)	185.56 (± 18.117)

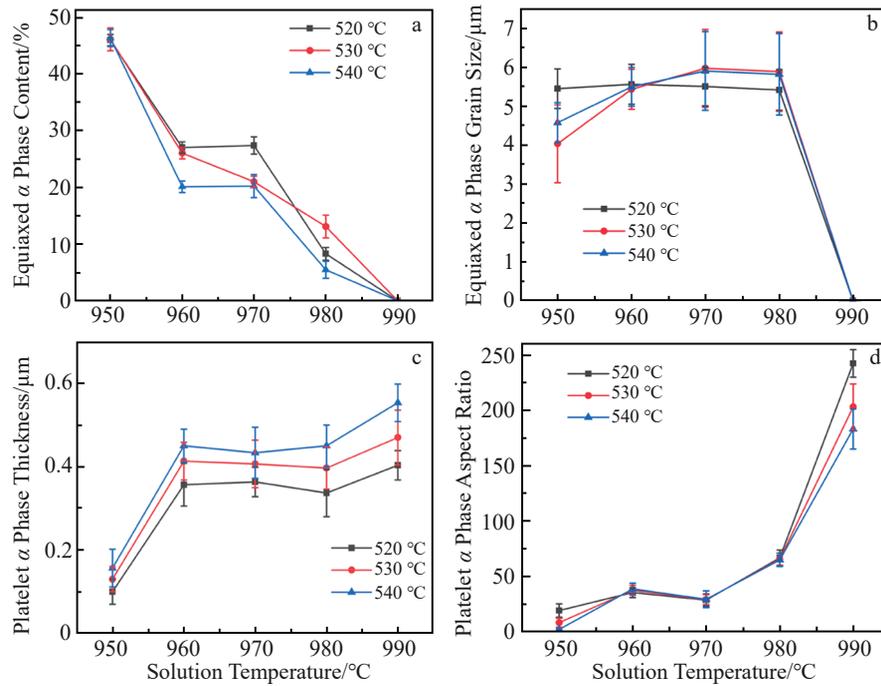


图3 TC11 钛合金不同热处理制度显微组织定量表征

Fig.3 Quantitative characterization of microstructure of TC11 titanium alloy with different heat treatment regimes: (a) equiaxed α phase content, (b) equiaxed α phase grain size, (c) platelet α phase thickness, and (d) platelet α phase aspect ratio

表 3 TC11 钛合金热处理后室温拉伸性能

Table 3 Tensile properties of TC11 titanium alloy after heat treatment

Solution temperature/°C	Aging temperature/°C	Ultimate tensile strength, UTS/MPa	Yield strength, YS/MPa	Elongation, EL/%	Reduction of area, RA/%
950	520	1200	1088	14	40
960		1106	938	18	49
970		1125	971	16.5	45
980		1110	912	14.5	27
990		1169	971	7	11
950	530	1206	1090	15.5	39
960		1137	978	17	47
970		1127	981	17.5	46
980		1113	942	16	39
990		1117	918	11	9.2
950	540	1224	1115	14.5	38
960		1132	990	17.5	43
970		1102	950	19	43
980		1101	925	16.5	40
990		1154	958	10	15

从表3中发现,随着固溶温度的升高,TC11钛合金的强度先降低,后升高;合金的塑性先增加,后降低。随着时效温度的提高,合金的强度略微提高,对塑性影响较小。将TC11钛合金的力学性能和显微组织结合进行分析,发现固溶温度为950 °C时,TC11钛合金组织为等轴组织,等轴 α 相含量较高,为46%,此时合金的主导相为 α 相。钛合金 α 相的晶体结构为密排六方结构,滑移系为

{1120}<0001>,共有3条,滑移系较少,在位错滑移过程中可开动的空间少,因此在950 °C固溶时的抗拉强度最大,塑性较低。当固溶温度提高为960 °C时,合金组织转变为双态组织,等轴 α 相在形变过程中起到协调变形的作用,使合金的强度降低,塑性升高;随着固溶温度进一步提高增加,等轴 α 相含量减少,因此等轴 α 相协调变形的能力减弱,合金的塑性降低。当固溶温度达到990 °C,

等轴 α 相消失, β 相中析出的片层 α 相交错分布, 阻碍位错运动, 显著提高合金的强度; 但合金组织中缺少等轴 α 相协调变形, 合金的塑性显著降低, 因此990 °C固溶时合金的塑性最差。

3.3 显微组织-室温拉伸性能定量分析

确定最佳函数形式是保证所建立TC11钛合金显微组织与室温拉伸性能定量关系预测精度的关键。因此, 本研究通过找到各个单一变量对合金室温拉伸性能的影响趋势, 然后再分析确立TC11钛合金显微组织与室温拉伸性能定量关系的总关系式, 最后通过数据点的拟合建立TC11钛合金显微组织与拉伸性能定量关系。室温拉伸性能包括抗拉强度、屈服强度(yield strength, YS)、延伸率(elongation, EL)和断面收缩率(reduction of area, RA)。

图4为TC11钛合金室温拉伸性能与显微组织中轴 α 相含量的对应关系。图中蓝色区县反应了合金强度随等轴 α 相含量的变化趋势, 发现TC11钛合金的强度与等轴 α 含量呈正相关, 随着等轴 α 相含量的增加, 合金的强度有先增加, 后降低的趋势; 这是由于等轴 α 含量的降低, 使等轴 α 相与残存 β 相的相界面减少, 减弱了相界面对位错的钉扎作用, 从而使合金的强度降低^[14]; 当等轴 α 相消失, 合金组织由双态组织转变为魏氏组织, 片层 α 相

交错分布, 阻碍位错运动, 使合金强度略微提高。图4中红色曲线反应合金塑性的变化, 合金的塑性与等轴 α 含量呈负相关, 即合金的塑性随着等轴 α 相含量的提高, 呈先升高后降低的趋势; 这是因为等轴 α 相含量的增加, 增强了合金的变形协调性, 使其塑性提高^[15]。合金的UTS和YS与等轴 α 相含量的相关系数 R^2 分别为0.79和0.87, EL和RA的相关系数 R^2 分别为0.51和0.71; 可以看出, 等轴 α 相的含量对TC11钛合金的强度影响较大, 在塑性方面主要影响合金的RA。Seok等^[16]也使用相似的数据统计及回归的方式分析了TG6钛合金UTS、EL与等轴 α 相含量之间的线性关系式, 变化趋势类似。

图5为室温拉伸性能与等轴 α 相的晶粒尺寸的对对应关系。由于固溶温度达到990 °C时, 合金组织中不存在等轴 α 相, 因此拟合时未加入该部分数据。从拟合的曲线可以观察到, TC11钛合金的UTS和YS随着等轴 α 相晶粒尺寸的增大而减小, 相关系数 R^2 分别为0.48和0.34; 合金EL和RA随着等轴 α 相的晶粒尺寸的增大而增大, 且相关系数 R^2 分别为0.40和0.09, 相关系数很低。这说明在该热处理温度区间内, 等轴 α 相的晶粒尺寸的变化对TC11钛合金室温拉伸性能的影响很小。

通过对以上对等轴 α 相的分析, 发现在TC11钛合金

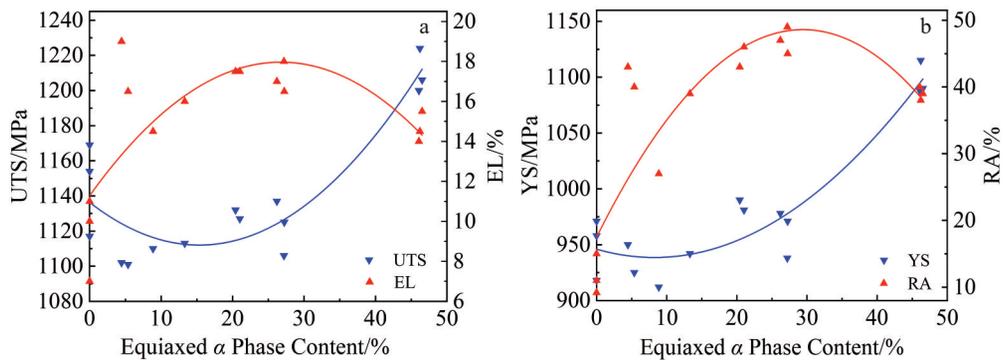


图4 室温拉伸性能与等轴 α 相含量定量关系

Fig. 4 Quantitative relationship between the room temperature tensile property and content of equiaxed α phase: (a) UTS and EL; (b) YS and RA

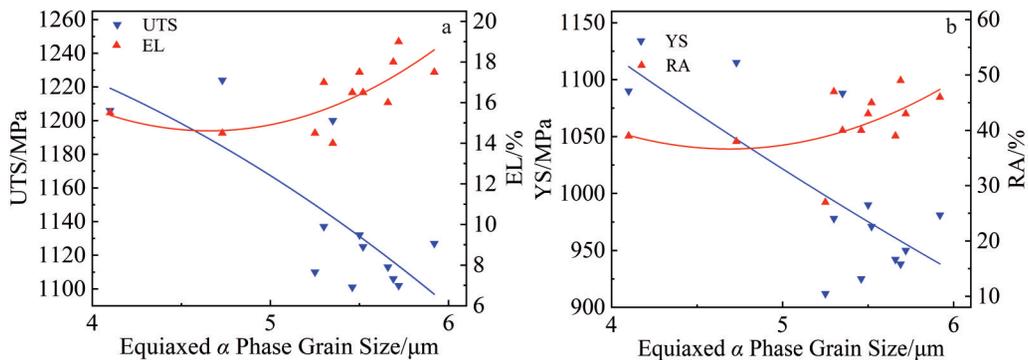


图5 室温拉伸性能与等轴 α 相晶粒尺寸定量关系

Fig. 5 Quantitative relationship between the room temperature tensile property and equiaxed α phase grain size: (a) UTS and EL; (b) YS and RA

变形过程中,等轴 α 相可以在双态组织中起到较好的协调变形的作用,改善合金的塑性,同时等轴 α 相也起到阻碍位错运动的作用,影响合金强度。等轴 α 相的各项参数与热加工和热处理温度密切相关,因此严格控制热加工和热处理时的温度,是调控 TC11 钛合金性能的重要一环。

图 6 为室温拉伸性能与片层 α 相厚度的对应关系。发现随着片层 α 相厚度的增加,合金的强度降低;这是因为,较小的 α 集束和片层 α 相的厚度能增强界面强化效果,提高 β 转变组织的强度^[17],当合金组织中片层 α 相含量不变时,片层 α 相越细小,它与 β 相之间的相界面越多,阻碍位错运动的能力越强,因此合金的强度越高。Mora^[18]研究建立了 β -CEZ 屈服强度与片层 α 相厚度的定量关系经验模型,指出随着片层 α 相厚度的降低,合金的YS将会增加,与本实验结果相近。而合金塑性随着片层 α 相的厚度增加,先增加后减少。拟合之后,合金的片层 α 相厚度与UTS和YS的相关系数 R^2 分别为0.67和0.82,相关性较强;与EL和RA的相关系数 R^2 分别为0.07和0.30,相关性弱,因此塑性指标拟合后曲线与实验数据点匹配度较差;可以发现,在设定温度内,片层 α 相厚度主要影响 TC11 钛合金的YS,其变化对合金塑性影响

很小。

图 7 为室温拉伸性能与片层 α 相长宽比的对应关系。由于固溶温度达到 990 °C 时,合金组织转变为魏氏组织,片层 α 长宽比变化过大,因此拟合时未加入该温度下的特征参数。随着片层 α 相长宽比的增加,合金的强度有先降低后升高的趋势;当合金组织为双态组织时,片层 α 相的长度受到晶界与亚晶界的限制,长度的增长受到限制,片层 α 相的厚度也在增加,大尺寸片层 α 相集束的出现有效促进了位错滑移,使合金的强度降低^[19];当组织转变为魏氏组织时,等轴 α 相消失,合金强度由片层 α 相的特征参数主导,在粗大的 β 晶粒中,片层 α 的长度显著增加,位错难以绕过片层 α 相,在相界面处塞积,使合金强度提高。合金的塑性随着片层 α 相长宽比的增加而降低,这是因为随着等轴 α 相的消失,片层 α 相长度的增加,变形过程中的组织协调性变差^[20]。拟合之后,合金的片层 α 相长宽比与UTS和YS的相关系数 R^2 分别为0.73和0.77,与EL和RA的相关系数 R^2 分别为0.31和0.51;这说明片层 α 相长宽比主要影响合金的强度,对合金塑性的影响弱于等轴 α 相含量。

通过比较多种函数的拟合精度,发现二次多项式能更好地表达室温拉伸性能与各项显微组织参数的关系。

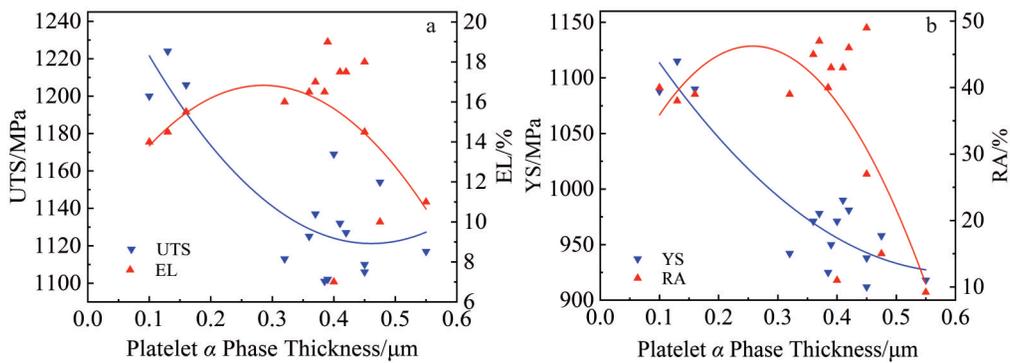


图6 室温拉伸性能与片层 α 相厚度定量关系

Fig.6 Quantitative relationship between room temperature tensile property and platelet α phase thickness: (a) UTS and EL; (b) YS and RA

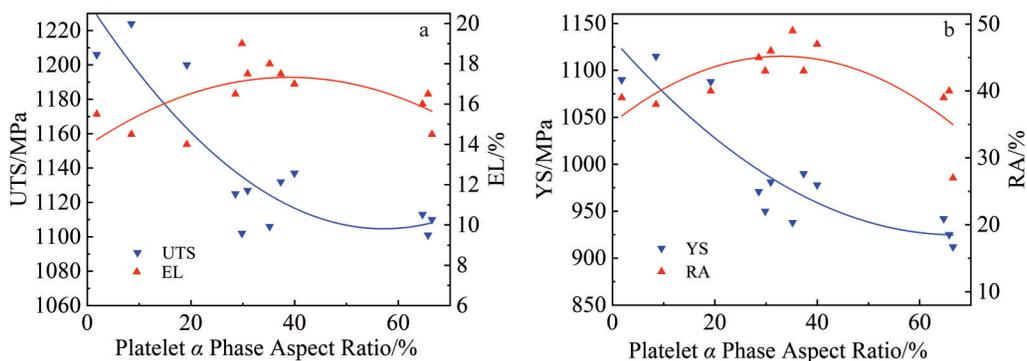


图 7 室温拉伸性能与片层 α 相长宽比定量关系

Fig.7 Quantitative relationship between room temperature tensile property and platelet α phase aspect ratio: (a) UTS and EL; (b) YS and RA

关系式如下:

$$MP=a+b_1x+b_2x^2+c_1y+c_2y^2+d_1z+d_2z^2+e_1m+e_2m^2 \quad (1)$$

式中, MP 为各项力学性能, a 、 b_1 、 b_2 、 c_1 、 c_2 、 d_1 、 d_2 、 e_1 、 e_2 为常数, x 为等轴 α 相含量, y 为等轴 α 相晶粒尺寸, z 为片层 α 相厚度, m 为片层 α 相长宽比。

根据常用的准则, 相关系数 R^2 大于 0.75 时, 代表变量之间强相关, R^2 在 0.35~0.75 之间时代表适中的相关, 0.35 及以下代表弱相关。分析上文中单一自变量与室温拉伸性能的关系, 发现部分特征参数与性能之间属于弱相关, 因此拟合时将弱相关的特征参数移除, 以简化模型, 得到更加精确的定量关系模型。

使用 SPSS 软件对室温拉伸性能和显微组织中的 4 个特征参量数据进行相关性自变量分析和线性回归, 最终得到定量关系如下所示:

$$UTS=1331.01+3.19x-0.078x^2+23.03y-5.08y^2-788.55z+836.57z^2-0.089m+0.004m^2 \quad (2)$$

$$YS=1290.99+4.35x-0.11x^2-1133.07z+1146.64z^2-3.43m+0.022m^2 \quad (3)$$

$$EL=949.06-1.47x+0.11x^2-13.73y+2.18y^2 \quad (4)$$

$$RA=46.74+0.88x-0.021x^2-0.29m+0.001m^2 \quad (5)$$

式(2)~式(5)对数据拟合的相关系数 R^2 分别为 0.896、0.911、0.847 和 0.892, 说明模型对 TC11 钛合金显微组织与拉伸性能定量关系的描述较为精准, 对实际生产中 TC11 钛合金显微组织和室温拉伸性能的调控具有借鉴意义。

4 结论

1) 随着固溶温度的提高, TC11 钛合金的等轴 α 相减少, 固溶温度提高 10 °C, 等轴 α 相含量平均降低 4.6%; 同时析出的片层 α 相厚度增加, 长宽比增加。随着时效温度的提高, 等轴 α 相含量不变, 片层 α 相厚度增加, 长宽比减少。

2) 随着固溶温度的提高, 等轴 α 相含量降低, TC11 钛合金的强度先降低后提高, 塑性先提高后降低; 等轴 α 相晶粒尺寸对合金室温拉伸性能影响较小。随着时效温度的升高, 片层 α 相厚度增加, TC11 钛合金强度提高, 合金塑性与片层 α 相厚度相关性较小; 片层 α 相的长宽比减少, TC11 钛合金的强度先降低后提高, 合金塑性提高。

3) 使用 Image 软件对不同热处理工艺下显微组织参数进行统计。使用二次多项式可以在较高的精度下表示 TC11 钛合金拉伸性能与等轴 α 相含量、等轴 α 相晶粒尺寸、片层 α 相厚度、片层 α 相长宽比的关系; 通过 SPSS 软件进行多元非线性回归拟合, 得到 TC11 钛合金显微组织与室温拉伸性能的回归模型。

参考文献 References

- [1] Williams J C, Boyer R R. *Metals*[J], 2020, 10(6): 705
- [2] Bai Xiaohuan(白晓环), Feng Yongqi(冯永琦), Wang Weiqi(王伟琪) et al. *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2005, 22(5): 37
- [3] Jin Hexi(金和喜), Wei Kexiang(魏克湘), Li Jianming(李建明) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2015, 25(2): 280
- [4] Yan Qian(颜茜), Su Xinzhu(舒鑫柱), Zhu Feixia(祝菲霞) et al. *Journal of Yunnan University*(云南大学学报, 自然科学版)[J], 2016, 38(1): 99
- [5] Zhao Pingluo, Wang Yangwei, Jiang Bingyue et al. *Materials Science & Engineering A*[J], 2023, 879: 145202
- [6] Ji Zhe, Chen Yuhao, Qiang Yinghuai et al. *Materials Science & Engineering A*[J], 2018, 723: 29
- [7] Shi Xiaohui(石晓辉), Zeng Weidong(曾卫东), Sun Yu(孙宇) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(9): 2327
- [8] Wang Wei, Zeng Weidong, Xue Chen et al. *Intermetallics*[J], 2014, 45: 29
- [9] Wang Kaixuan(王凯旋), Zeng Weidong(曾卫东), Zhao Yongqing(赵永庆) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(5): 784
- [10] Xin Shewi(辛社伟), Zhao Yongqing(赵永庆), Zeng Weidong(曾卫东) et al. *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2007, 24(5): 23
- [11] Liu Tao(刘涛), Shao Bo(邵博), Lei Jingfa(雷经发) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(12): 4133
- [12] Gao Yushe, Xue Xiangyi, Liu Xianghong et al. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2024, 53(2): 371
- [13] Cai Jianming(蔡建明), Li Zhenxi(李臻熙), Ma Jimin(马济民) et al. *Materials Reports*(材料导报)[J], 2025, 1: 50
- [14] Li Minna(李敏娜), Wu Chen(吴晨), Ma Baofei(马保飞) et al. *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2022, 39(1): 12
- [15] Chen Yuhao(陈钰浩), Min Xiaohua(闵小华), Zhang Haiyang(张海洋) et al. *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2023, 43(3): 49
- [16] Seok M Y, Zhao Y K, Lee J A et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2016, 649: 123
- [17] Wang Tao, Guo Hongzhen, Wang Yanwei et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2010, 528(2): 736
- [18] Mora L, Quesne C, Haut C et al. *Journal of Materials Research*[J], 1996, 11(1): 89
- [19] Wang Ning(王宁), Jia Weiju(贾蔚菊), Mao Xiaonan(毛小南) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(8): 3077
- [20] Guo Ping(郭萍), Zhao Yongqing(赵永庆), Zeng Weidong(曾卫东) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(4): 1221

Quantitative Correlation Between Microstructure and Tensile Property of TC11 Titanium Alloy

Wang Wei¹, Luo Chicheng¹, Jiang Li², Liu Dan², Xin Shewei³, Yu Chengcheng⁴

(1. School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

(2. Shaanxi Changyu Aviation Equipment Company Limited, Xi'an 710299, China)

(3. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

(4. Ji Hua Laboratory, Foshan 528255, China)

Abstract: The microstructure characteristic parameters of TC11 titanium alloy during different heat treatments were quantitatively investigated, aiming at the lack of quantitative relationship between microstructure characteristic parameters and room temperature tensile properties of TC11 titanium alloy. The content of equiaxed α phase, grain size of equiaxed α phase, thickness of platelet α phase and aspect ratio of platelet α phase at different heat treatment temperatures were quantitatively characterized using image analysis software. Quantitative relationships among heat treatment temperature, quantitative microstructure parameters and room temperature tensile properties were established. And quantitative relationships between quantitative microstructure parameters and room temperature tensile properties were analyzed using a multivariate nonlinear regression model. The results indicate that the microstructure of TC11 titanium alloy depends on the heat treatment regime. For every 10 °C increment in solid solution temperature, the content of the equiaxed α phase decreases by about 4.6%. For every 10 °C increment in aging temperature, the thickness of platelet α phase increases by about 0.05 μm . Experimental and statistical analyses show that with the decrease in the content of the equiaxed α phase, the strength of TC11 titanium alloy firstly decreases and then increases, and the plasticity firstly increases and then decreases. The grain size of the equiaxed α phase has a small effect on the room temperature tensile properties of the alloy. The increase in platelet α phase thickness increases the strength of the alloy. The correlation between alloy plasticity and platelet α phase thickness is relatively small. With the decrease in the aspect ratio of platelet α phase, the strength of the alloy firstly decreases and then increases, and the plasticity increases. The relationship between microstructure characteristics and room temperature tensile properties conform to the multivariate nonlinear regression model.

Key words: TC11 titanium alloy; tensile properties; quantitative relationship; multivariate nonlinear regression

Corresponding author: Wang Wei, Ph. D., Professor, School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China, E-mail: gackmol@163.com