

航空发动机用 β 锻 TC17 钛合金 时效析出行为研究*

邓雨亭, 李四清, 黄旭, 弭光宝, 王旭

(1. 中国航发北京航空材料研究院先进钛合金航空科技重点实验室, 北京 100095;
2. 中国航空发动机集团先进钛合金重点实验室, 北京 100095)

[摘要] 采用扫描电子显微镜对 β 锻 TC17 钛合金的时效析出行为进行研究, 并以拉伸性能和断裂韧性试验表征不同时效处理对其力学性能的影响。研究表明: 经两相区固溶 + 不同时效温度热处理后, α 相在 β 相基体上析出、形核、长大。随着时效温度的升高, 次生 α 相含量逐渐降低且分布不弥散, 抗拉强度线性下降, 塑性升高, 断裂韧性线性升高。经 630℃ 不同保温时间的时效, 短时间次生 α 相呈针状, 随着保温时间的延长, 次生 α 相厚度 d 从 42nm 粗化至 138nm, 含量 ω_a 从 12.6% 下降至 4.5%。抗拉强度 R_m 与次生 α 相厚度、含量呈 $R_m=1.01\omega_a-0.95d+1274.1$ 关系变化。次生 α 相的厚度降低和含量增加均能使抗拉强度提高, 塑性和断裂韧性降低。

关键词: TC17 钛合金; 时效温度; 时效时间; 次生 α 相; 力学性能

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.09.059



邓雨亭

硕士、助理工程师, 研究方向为高温钛合金。

TC17 钛合金是一种使用温度为 427℃ 的高强、高韧和高淬透性的富 β 相的两相钛合金, 名义成分为 Ti-5Al-4Mo-4Cr-2Sn-2Zr^[1]。添加 Mo 元素既能有效强化 β 相, 又可以提高合金的淬透性。加入 Cr 元素稳定的 β 相比其他同晶型 β 稳定元素使合金具有更高的塑性和韧性。采用 Mo 和 Cr 同时稳定 β 相, 能阻止共析合金分解形成的 TiCr₂ 金属间化合物, 从而提高了合金的热稳定性^[2]。 β 锻工艺制备的 TC17 钛合金具有良好的断裂韧性和蠕变性能, 被广泛用于制造航空发动机风扇和压气机盘件^[3-4]。

β 稳定元素含量较多的钛合金具有较高的拉伸强度主要源于过饱和固溶体中析出的弥散分布的第二相粒子对位错的阻碍作用。尤其与析出相的第二相粒子的性质、尺寸、含量、形貌及分布密切相关, 其强化

机理及性能调控方面的研究一直以来备受关注^[5-6]。遗憾的是, 对于 β 锻造 TC17 钛合金时效析出行为的系统性研究报道很少, 有待于进一步完善。因此, 本文针对需求背景, 较为系统研究时效温度和时间对 β 锻 TC17 钛合金时效析出行为的影响。这对于进一步认识 TC17 钛合金的相转变机制及调控组织性能具有重要意义。

试验方法

试验所用材料为 β 相区锻造成形的 TC17 钛合金圆形饼坯, 其锻造温度为相变点以上 20~30℃。锻造设备为二重万航的 200MN 压机, 模具加热温度为 850~870℃。饼坯直径约为 520mm、高为 170mm, 变形量约为 50%, 应变速率为 0.01s⁻¹。锻造成形后经 800℃ 固溶 4h, 固溶后水冷, 固溶 + 时效后组织为典型的

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51471155)。

网篮组织。时效热处理加热设备为箱式电阻炉,其中时效温度试验用坯料为 1/8 件饼坯,时效温度范围为 590~690℃,温度间隔为 20℃,保温时间为 8h。时效时间工艺用坯料为 (13×72)mm 毛坯,在 630℃ 温度下,保温时间分别为 10min、30min、1h、2h、4h、6h、8h、12h 和 24h。显微组织分析样品分别使用 200 目、400 目、800 目和 1200 目的水砂纸进行打磨,磨光后在绒布上进行机械抛光,抛光剂为 SiO₂ 悬浮液。采用 Kroll 腐蚀液对金相试样进行浸蚀,腐蚀液由 5% 的氢氟酸、10% 硝酸和 85% 水 (体积分数) 配比而成,腐蚀时间为 3~5s。室温拉伸选取圆形试样,测试标准按照标准 GB/T228.1-2010 在中国航发北京航空材料研究院检测中心 Instron4507 电子万能材料试验机上进行。室温断裂韧度 (K_{IC}) 选取标准紧凑拉伸试样,开口方向为 R-C,测试标准按照标准 GB/T4161-2007 进行,取样部位均为饼坯芯部。次生 α 相含量和厚度在金相分析软件 IPP6.0 上测量分析,每种热处理制度选取 5 个视场进行统计并取其平均值。

结果分析

1 时效温度对组织和性能的影响

图 1 为 β 锻 TC17 钛合金不同时效温度的显微组织。显微组织由晶界 α 相和 β 基体上分布的晶内片层初生 α 相和针状次生 α 相组成。不同时效温度下的晶界 α 相和晶内片状初生 α 相形态均无明显变化。在时效处理过程中,亚稳定的 β 相开始析出次生 α 相,针状的次生 α 相尺寸、形貌随着时效温度变化而变化。时效析出主要由形核和长大两个过程组成,在较低温度时效时,次生 α 相析出形核驱动力大,形核较多,但次生 α 相析出相受原子扩散速率的影响。时效温度由 590℃ 提高到 630℃ 时,体积分数发

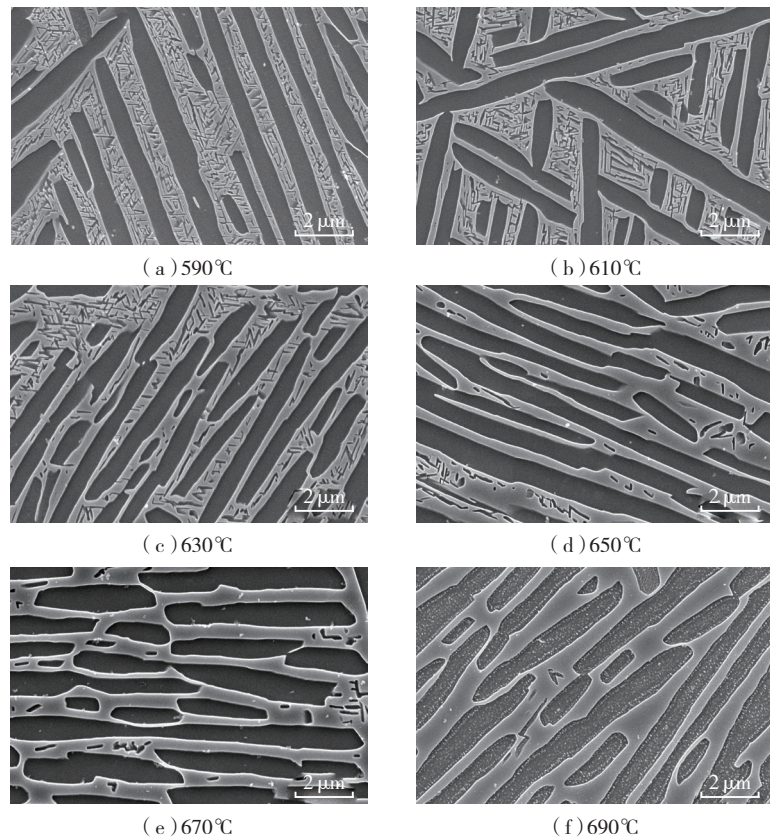


图1 不同时效温度的显微组织

Fig.1 Microstructure of different aging temperature

生小幅度下降,分布逐渐不弥散。而在较高温度下时效,次生 α 相析出驱动力较小,限制了次生 α 相形核速率,但原子扩散速率较快,次生 α 相长大速率增加,形成的次生 α 相呈短棒状。时效温度由 630℃ 提高到 670℃ 时,次生 α 相含量显著下降并且分布更不弥散。当时效温度达到 690℃ 时,合金组织接近固溶态组织,只有极少量次生 α 相析出。

TC17 钛合金经固溶处理后,具有很高的塑性,但是强度不足 1000MPa,且亚稳 β 相极易分解,不能在高温下稳定使用。而经过时效处理后,强度可达 1200MPa 以上,并有较好的强塑性配比。图 2 (a) 为 β 锻 TC17 钛合金不同时效温度的室温拉伸力学性能。从图 2 (a) 中可以看出,时效温度与抗拉强度呈线性关系变化。当时效温度由 590℃ 上升到 690℃ 时,抗拉强度由 1205MPa 降低到 1035MPa,延伸率

则由 11.8% 提高到 18.0%,断面收缩率由 22.1% 提高到 36.3%。通过强度数据的拟合分析,当时效温度在 590~690℃ 范围内,每升高 20℃,则抗拉强度下降约 35MPa。当时效温度升高至 670℃ 以上时,塑性基本保持不变,塑性指标上升温度区间为 630~670℃,在低温时效处理时,温度升高对塑性仅有小幅度的提升。

时效温度越低,次生 α 相越细小且弥散,含量越多。次生 α 相作为 TC17 钛合金组织中的强化相,能阻碍位错滑移,其含量的增加会增加 α/β 界面,减少位错的有效滑移长度,最终显著提升强度,降低塑性。

图 2 (b) 为 β 锻 TC17 钛合金不同时效温度的室温断裂韧度。可见,时效温度与断裂韧度基本呈线性关系。时效温度从 590℃ 升高至 650℃,断裂韧度不断升高,两组试样断裂韧度平均值从 68.35MPa·m^{1/2} 升高至 103.33MPa·m^{1/2}。通过数据

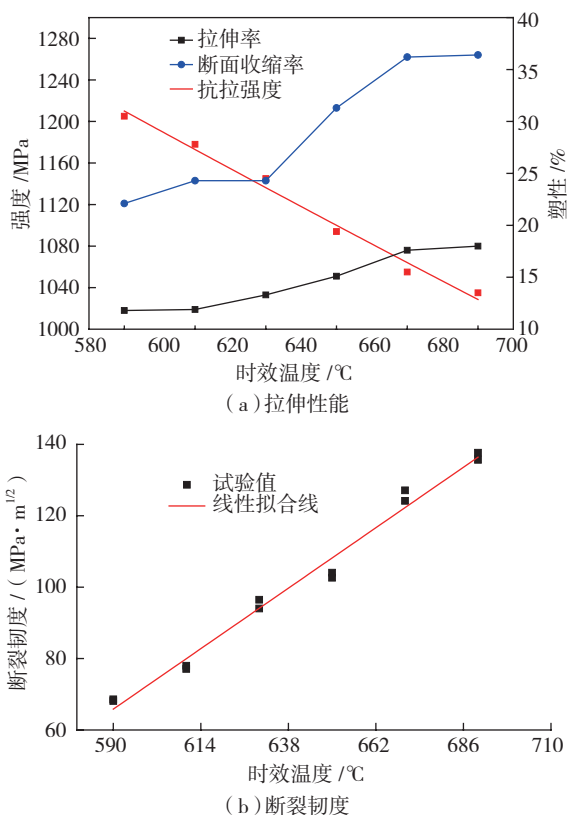


图2 不同时效温度的室温力学性能

Fig.2 Mechanical property of different aging temperature

拟合,当时效温度在 590~690 °C 范围内,每上升 20 °C,断裂韧度大约升高 9 MPa·m^{1/2}。这与 Fan^[7] 和 Shi^[8] 等研究 Ti-7Mo-3Nb-3Cr-3Al 和 Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe 合金的断裂韧性时,断裂韧度随着时效温度的升高增加的现象相一致。

β 锻造的网篮组织中 α 片层相互交错,裂纹在扩展过程中不可避免要穿过 α 片,这时在裂纹尖端附近的 α 片内形成一个塑性变形区,且该区域体积大于 β 基体内形成塑性变形区,将消耗更多的塑性变形功,阻碍裂纹扩展,提升裂纹扩展所需要的能量。 α 片的厚度和含量也是影响钛合金断裂韧性的重要因素。断裂韧性随着 α 片厚度和含量的增加而增加。Wood^[9] 和 Richards^[10] 等认为随着 α 片的厚度的增加,裂纹尖端在 α 相内的塑性变形区体积也会增加。因而更多的能量将会消耗于 α 相内的塑性变形区,进而引起

裂纹尖端的钝化。裂纹进一步扩展所需要的应力强度增加,裂纹扩展受到抑制,最终导致断裂韧性增加。

2 时效时间对组织和性能的影响

图 3 为 β 锻 TC17 钛合金不同时效时间的微观组织形貌和次生 α 相片层厚度和含量。从图 3 可见,当保温时间为 10min 时,亚稳定 β 相析出细小弥散针状次生 α 相。次生 α 相片层厚度仅为 30~40nm。随着时效时间到 30min,片层厚度迅速粗化至 50~70nm。当时效时间增加至 1h、2h、4h 和 8h 时,次生 α 相弥散程度逐渐下降,片层厚度大约长大到 80~120nm,片层厚度长大趋势趋于稳定。当时效时间增加至 12h 和 24h 时,次生 α 相分布不弥散,片层厚度仅仅长大到 150nm。

随着时效时间延长,次生 α 相的含量不断下降,下降趋势与厚度增加趋势类似。这主要是由于次生 α 相长大过程是一个扩散相变过程,随

着保温时间延长,次生 α 相之间相互抑制,长大速率也受到限制,在长大稳定阶段,为降低次生 α 相界面能,次生 α 相开始粗化,片层厚度增加,含量下降。因此,TC17 钛合金时效析出过程是一个典型的扩散型相变过程。首先母相中的原子通过成分起伏形成与新相相同的晶胞,随后通过原子重新分配形成新相的点阵结构,其相变驱动力是新相与母相之间的吉布斯自由能差^[11]。

图 3 (c) 和 (i) 为晶界附近的次生 α 相,时效过程中该次生 α 相的脱溶析出是以依附于初生 α 相长大、粗化的方式进行,而不是从 β 基体中自由形核析出次生 α 相,片层厚度较晶内次生 α 相更厚。这是由于等温析出的相变驱动力不同,晶界作为原子的错排区为次生 α 相析出优先提供形核区域,所以发生了较明显的粗化现象^[12]。次生 α 相析出顺序决定了晶内和晶界附近尺寸和形貌的差距。

图 4 为 TC17 钛合金不同时效时间的室温拉伸力学性能。从图 4 中可以看出,合金固溶处理态抗拉强度和屈服强度仅为 1010MPa 和 970MPa,但延伸率和断面收缩率达到 12.8% 和 28.9%; 当时效保温时间为 10min 时,合金抗拉强度迅速上升至 1250MPa,达到较高的数值,但延伸率和断面收缩率仅为 7.5% 和 16.2%。可见,随着时效时间不断延长,拉伸强度开始先缓慢下降,当时效时间超过 12h,抗拉强度和塑性基本稳定。试验表明 TC17 钛合金热稳定性较好,长时间时效不会造成合金拉伸性能明显下降,能够长时间在中高温下稳定服役。

析出相强化效果取决于析出产物的强度、结构、形状、分布和尺寸等因素,在保证析出相形状及与基体的位向关系等条件不变的情况下,则析出强化作用仅与粒子分布和尺寸有关^[13]。TC17 钛合金中次生 α

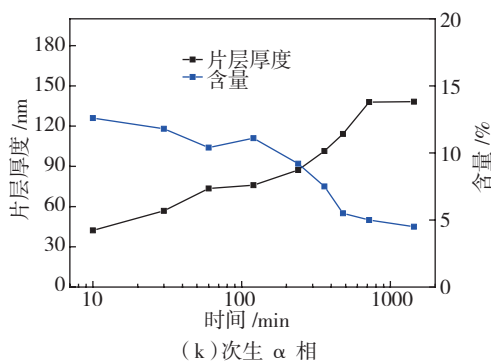
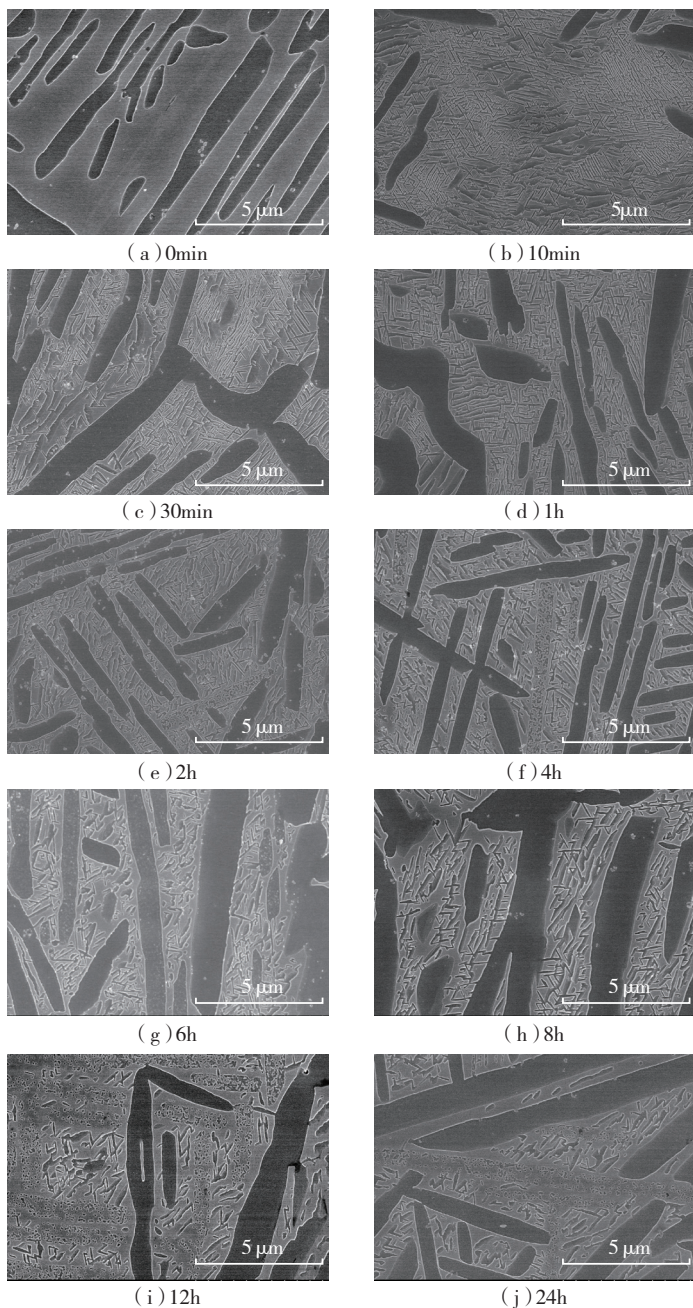


图3 不同时效时间的显微组织形貌及次生 α 相片层厚度和含量
Fig.3 Microstructure and lamellar thickness and fraction of secondary α phase of different aging time

相的厚度和含量等组织参数是影响拉伸强度的两个主要因素,结合图3(k)和图4(a)可知,随着时效时间的延长,次生 α 相有足够的时间粗化长大,弥散强化效果逐渐下降,抗拉强度不断下降。随着时效时间的延长,抗拉强度不断下降,次生 α 相厚度从42nm粗化至138nm,含量从12.6%下降至4.5%。通过数据拟合计算可以得到:抗拉强度与次生 α 相厚度、含量呈 $R_m=1.01\omega_a-0.95d+1274.1$ 的规律变化。

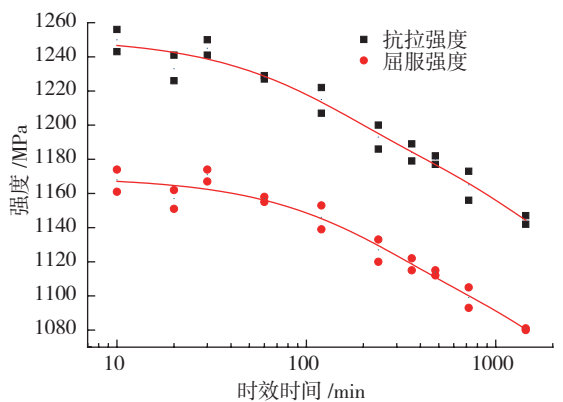
结论

(1) 随着时效温度的升高和时效时间的延长, β 锻 TC17 钛合金的次生 α 相片层厚度不断增加,含量不断下降;随着时效温度的升高,抗拉强度线性下降,塑性升高,断裂韧度线性升高;随着时效时间延长,抗拉强度迅速升高然后缓慢下降直至稳定,塑性先缓慢提升后迅速升高。

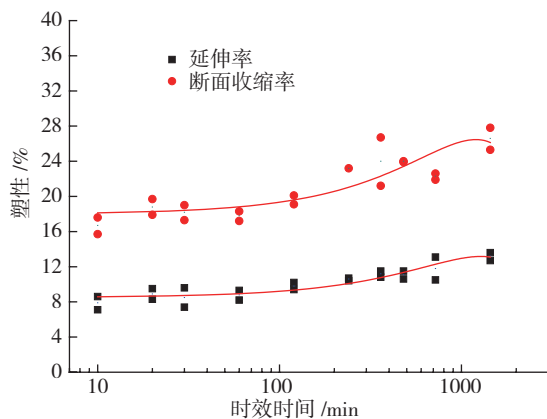
(2) β 锻 TC17 钛合金时效过程中,析出的次生 α 相是影响 TC17 钛合金拉伸强度的主要因素,组织中弥散分布的次生 α 相使合金形成了一种片层的弥散强化微观结构;在塑性变形过程中,次生 α 相通过阻碍位错的运动而提高合金强度;次生 α 相片层厚度的降低和含量的增加均能使抗拉强度提高、塑性和断裂韧度降低;抗拉强度与次生 α 相厚度、含量呈 $R_m=1.01\omega_a-0.95d+1274.1$ 关系变化。

参考文献

[1] REDDEN T K. Processing and properties of the Ti-17 alloy for aircraft gas turbine application: 20070175546[R]. The Metallurgical Society, 1984.
[2] 周军. Ti-17 钛合金片状组织球化规律研究[D]. 西安:西北工业大学, 2005.
ZHOU Jun. Study on globularization mechanism of lamellar microstructure in Ti-17 titanium alloy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.
[3] BARUSSAUD A, DESVALLEES



(a) 拉伸强度



(b) 塑性

图4 不同时效时间的室温拉伸性能

Fig.4 Tensile property of different aging time

Y, GUEDOU J Y. Control of microstructure in large titanium discs application to high pressure compressor of the GE90 aero engine[C]// Proceedings of 8th Titanium. Birmingham: Institute of Materials, 1996: 1599-1608.

[4] JHA G, DAS S, SINHA S. Design and development of precipitate strengthened advanced high strength steel for automotive application[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 561(3): 394-402.

[5] 王哲, 王新南, 朱知寿, 等. TB17

钛合金等温时效析出行为[J]. 航空材料学报, 2016, 36(5): 1-6.

WANG Zhe, WANG Xinnan, ZHU Zhishou, et al. Isothermal aging precipitate of TB17 titanium[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(5): 1-6.

[6] IVSISHIN O M, MARKOVSKY P E, YU V. A comparative study of the mechanical properties of high-strength β titanium alloys[J]. Journal of Alloy and Compounds, 2008, 457: 296-309.

[7] FAN J K, LI J S, KOU H C, et al. The interrelationship of fracture toughness and microstructure in a new near β titanium alloy Ti-7Mo-3Nb-3Cr-3Al[J]. Materials Characterization, 2014, 96: 93-99.

[8] SHI X H, ZENG W D, SHI C L, et al. The fracture toughness and its prediction model for Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe titanium alloy with basket-weave microstructure[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 632: 748-755.

[9] WOOD J R, RUSSO P A, WELTER M F, et al. Thermomechanical processing and heat treatment of Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-Si for structural applications[J]. Materials Science and Engineering A, 1998, 243(1): 109-118.

[10] RICHARDS N L. Quantitative evaluation of fracture toughness-microstructural relationships in alpha-beta titanium alloys[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2004, 13(2): 218-225.

[11] 常辉, ELISABETH G, 周廉. 一种亚稳 β 钛合金的相变动力学[J]. 科学通报, 2014, 59(10): 854-858.

CHANG Hui, ELISABETH G, ZHOU Lian. Phase transformation kinetics for a metastable titanium alloy[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(10): 854-858.

[12] JONES N, DASHWOOD R, JACKSON M. β phase decomposition in Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr[J]. Acta Materialia, 2009, 57(13): 3830-3839.

[13] ESMAEILI S, LLOYD D, POOLE W J. A yield strength model for the Al-Mg-Si-Cu alloy AA6111[J]. Acta Materialia, 2003, 51(8): 2243-2257.

通讯作者: 弭光宝, 博士、高级工程师, 研究方向为高温钛合金及纳米复合材料, E-mail: miguangbao@163.com。

Aging Precipitate of Beta Forged TC17 Titanium Alloy for Aero-Engine

DENG Yuting, LI Siqing, HUANG Xu, MI Guangbao, WANG Xu

(1. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Titanium Alloys, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2. Aviation Key Laboratory on Advanced Titanium Alloys of AECC, Beijing 100095, China)

(下转第70页)

[ABSTRACT] In this paper, the current manufacturing status of aero-engine blades is taken as the research object. We made a brief overview of ECM, CNC machining, precision forging, the key technologies and measurement methods used in manufacturing of aero-engine blades. The implementation of coordinate positioning, measurement trajectory planning and noise reduction of coordinate measurement is also considered. And then we analyze the influence of laser probe installation accuracy, laser projection angle, depth of field on laser scanning measurement, which has certain guiding significance to the development of precision manufacturing and efficient testing technology of aero-engine blades.

Keywords: Aero-engine blade; Manufacturing process; Coordinate measurement; Laser scanning; Data acquisition

(责编 大漠)

(上接第51页)

Research on Shrinkage Rate Prediction Method of Casting Based on BP Neural Network

TIAN Guoliang, BU Kun, QIU Fei, ZHANG Xiandong, ZHANG Yali, REN Shuaijun

(The Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] In the design process of die cavity of investment casting, the inaccurate enlarged die cavity that based on shrinkage rate can lead the die need mold-repair for many times. As an initial study, a shrinkage rate prediction method of typical structure casting in the solidification process is proposed in this article. The method can provide a way of thinking for shrinkage rate prediction of casting. As BP neural network has strong fault tolerance and robustness function. Thus, the mapping model between geometric parameters that attach to the structure and shrinkage rate is built based on BP neural network. As there is no determination criterion for the number of the hidden layer neurons of the BP neural network in different cases, thus, the influence of the number of neurons in the hidden layer on the accuracy of modeling is researched. The result is that for the typical structure casting, when the number of neurons in the hidden layer is three, the mapping model has the least prediction error. In this case, the shrinkage rate average deviation of the predicted and measured values is 0.09%. The mapping model can better realize shrinkage rate prediction of the casting in solidification process.

Keywords: Shrinkage rate; BP neural network; Prediction method; Structure; Casting

(责编 大漠)

(上接第63页)

[ABSTRACT] Scanning electron microscopy was employed to investigate the aging precipitation behavior of beta process TC17 titanium alloy. Tensile properties and fracture toughness were used to characterize the effect of different aging treatment on mechanical property. The results show that the secondary α phase was nucleated, precipitated and grew on the β phase matrix. The fraction of secondary α phase and tensile strength decreased, secondary α phase did not diffuse and fracture toughness increased with the increase of aging temperature after solution in two phase region. The tensile strength linearly decreased, plasticity reduced and fracture toughness linearly increased. The secondary α phase was acicular after aging in a short time at 630°C. The thickness of secondary α phase (d) was coarsened from 42nm to 138nm and fraction (ω_a) decreased from 12.6% to 4.5% which can increase the tensile strength, reduce the plasticity and fracture toughness. The relationship between the tensile strength R_m and the thickness and fraction of secondary α phase was $R_m=1.01\omega_a-0.95d+1274.1$.

Keywords: TC17 titanium alloy; Aging temperature; Aging time; Secondary α phase; Mechanical property

(责编 大漠)