

TA15 钛合金的相变、组织与拉伸性能

张旺峰, 王玉会, 李 艳, 马济民

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘 要: 研究 TA15 合金在 4 个典型温度 1 020、1 000、900、800 以及水淬、空冷和炉冷 3 种冷却方式下的相变、组织与性能的关系。结果表明: 随着冷却速度的降低, 1 020 热处理合金的显微组织由马氏体 α' 相向针状($\alpha+\beta$)相和片状($\alpha+\beta$)相转变, 970 及 900 热处理后则由初生 α +马氏体 α' 相向初生 α +针状($\alpha+\beta$)和等轴 α +晶界 β 演变, 800 热处理后只有 α 和 β 两相组织; 在 1 020~900 热处理后, TA15 合金的室温和高温强度随冷却速度降低有明显下降, 冷却速度相同时, 强度随温度升高而提高, 而在 800 热处理后的强度和塑性与冷却方式无关。

关键词: TA15 钛合金; 热处理; 相变; 组织; 拉伸性能

中图分类号: TG 146.23, TG113.25

文献标志码: A

Phase transformation, microstructures and tensile properties of TA15 titanium alloy

ZHANG Wang-feng, WANG Yu-hui, LI Yan, MA Ji-min

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The relationship between phase transformation, microstructures and tensile properties of TA15 titanium alloy at four typical heat treatment temperatures 1 020, 970, 900 and 800 in water quenching, air cooling and furnace cooling conditions was studied. The results show that the microstructure transforms from martensite α' to acicular ($\alpha+\beta$) to chiplike ($\alpha+\beta$) after heat-treatment at 1 020, from primary α + martensite α' to primary α + acicular ($\alpha+\beta$) to equiaxed $\alpha+\beta$ on the grain boundaries at 970 and 900, and is α and β dual phases only at 800, when decreasing the cooling rate. The room and high temperature tensile properties of TA15 titanium alloy decrease obviously with the decrease of cooling rate, and increase with the increase of temperature under the same cooling rate, when the heat treatment temperature is from 1 020 to 900. The correlation between the tensile properties and cooling method is not obvious at 800.

Key words: TA15 titanium alloy; heat treatment; phase transformation; microstructure; tensile property

随着 TA15 钛合金在飞机和发动机中的应用日益广泛, 其半成品的品种不断增加(如板材、棒材和锻件等), 并且制造工艺也趋于多样化。在 TA15 半成品的研制过程中出现了很多新现象, 这些现象需要从相变和组织的层面来解释。钛及钛合金具有同素异构转变, TA15 钛合金主要包括体心立方结构 β 相和密排六方结构 α 相及 α' 相。在不同温度区间、不同冷却条件下变形和热处理, 得到的组织与性能差别很大^[1-4]。因此, 很有必要系统地研究不同温度区间、不同冷却条件下 TA15 合金的相组成、形态及相应性能间的关系。

本研究把工艺—相组成—显微组织—性能结合起来, 对不同温度、不同冷却方式后的相成分、形态及相应的力学性能形成较系统的认识, 以用于指导 TA15 合金的半成品生产、质量控制及失效分析。

1 实验

实验用 TA15 钛合金为直径 15 mm 轧棒, β 转变温度为 987, 其主要化学成分(质量分数, %)为:

Al 6.56, Mo 1.74, V 2.29, Zr 2.20, O 0.12, N 0.003, H 0.004 6, 余量 Ti。

首先从合金相组成的角度考虑,选择 β 区(1 020)、 $\alpha+\beta$ 区上部(970)、 $\alpha+\beta$ 区中部(900)及 $\alpha+\beta$ 区下部(800)的 4 个典型温度,保温 1 h 后以 3 种冷却方式(即水淬(WQ)、空冷(AC)和炉冷(FC))进行实验,研究温度与冷却方式对相组成和显微组织的影响。力学性能测试试样都经过 800 , 1 h, AC 处理。

试样经热处理后加工成标准的拉伸试样,然后进行力学性能测试与观察,在 Instron-4507 试验机上测试拉伸性能,在 FEI Quanta600 扫描电子显微镜上进行组织观察分析。材料的相组成分析通过 X 射线衍射并结合金相观察完成。X 射线衍射仪器型号为 D8 Advance,实验条件为 Cu K α 、40 kV、40 mA,对照卡片:密排六方 α -Ti 为 44-1294、体心立方 β -Ti 为

65-5970。

另外,马氏体 α' 相和 α 相有相同的密排六方点阵,而且点阵常数相近,在实验中 α' 相和 α 相的 X 射线谱没有差别。据文献[5]: α' 相的特点只是相干涉的最大强度线较模糊,但是 α 相在冷作硬化或表面吸收气体时也可以观察到线条很模糊。因此, α 相与 α' 相在衍射中是难以区分的,但可以结合金相观察加以确认。

2 结果与讨论

2.1 热处理对组织结构的影响

图 1 所示为不同温度、不同冷却条件下 TA15 钛合金的相组成和显微组织。结合衍射结果(见图 2)和金相观察(见图 1),可见 TA15 轧棒在 4 种温度下的空冷、

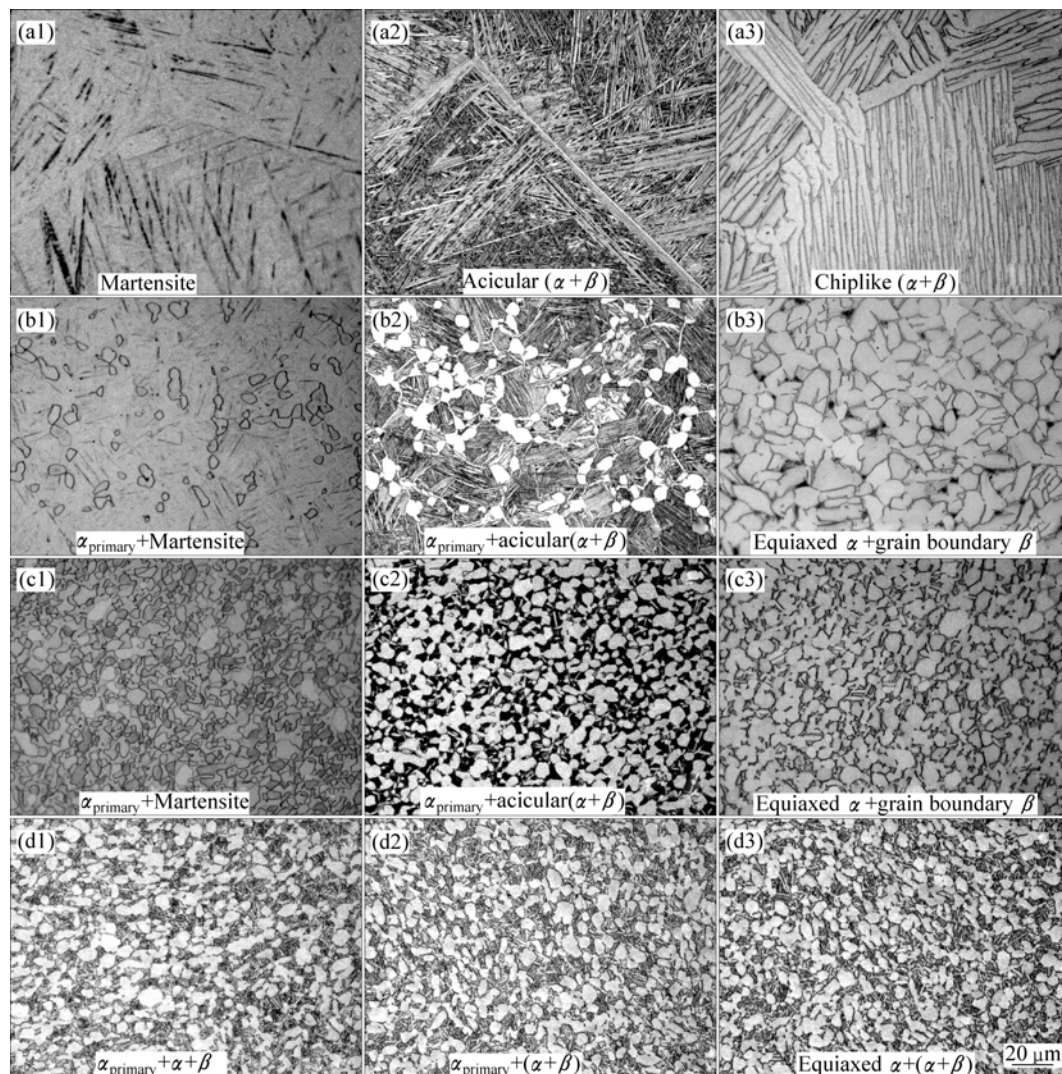


图 1 TA15 合金在不同温度、不同冷却条件下的显微组织

Fig.1 Microstructures of TA15 alloy at different temperatures and cooling conditions: (a1) 1 020 , WQ; (b1) 970 , WQ; (c1) 900 , WQ; (d1) 800 , WQ; (a2) 1 020 , AC; (b2) 970 , AC; (c2) 900 , AC; (d2) 800 , AC; (a3) 1 020 , FC; (b3) 970 , FC; (c3) 900 , FC; (d3) 800 , FC

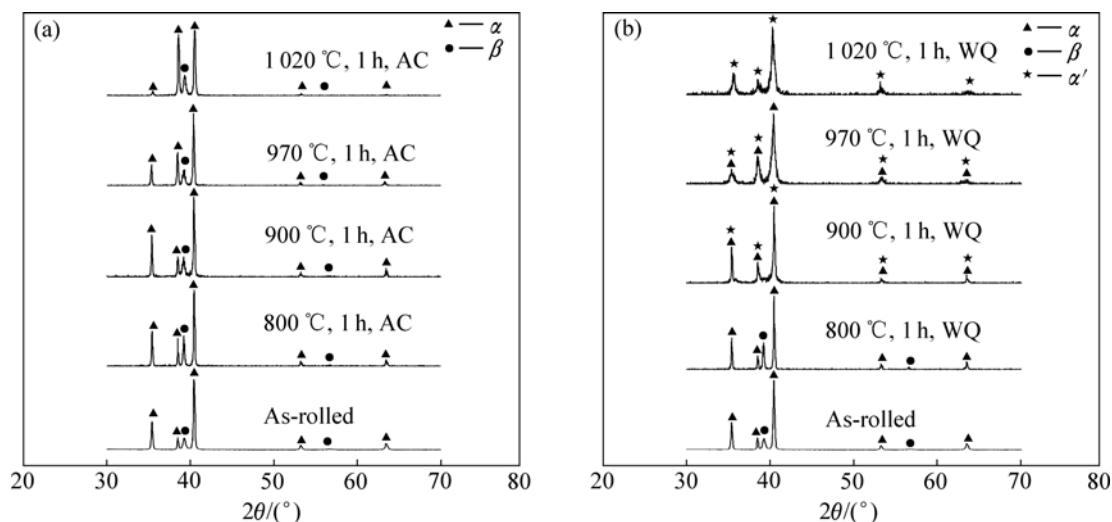


图 2 TA15 钛合金不同温度热处理后的 XRD 谱

Fig.2 XRD patterns of TA15 alloy at different heat treatment temperatures: (a) Air cooling; (b) Water quenching

炉冷组织都是 $\alpha+\beta$ 两相组织,但是组织参数、形貌及初生 α 的体积分数有很大区别,炉冷状态下的 β 相基本上都是晶间 β 的形貌。1020 水淬为全马氏体,没有残余 β 相,而在相变温度以下的 970 和 900 水淬后都得到 $\alpha_{\text{初}}+\text{马氏体}\alpha'$ 。

由图 1 可知,随着冷却速度的降低,在 β 区(1020)处理时,材料的显微组织由马氏体 α' 相向针状($\alpha+\beta$)相和片状($\alpha+\beta$)相转变;而在($\alpha+\beta$)区上部(970)及中部(900),组织则由初生 α +马氏体 α' 相向初生 α +针状($\alpha+\beta$)和等轴 α +晶界 β 演变。在 800 处理,以不同速度冷却后其相组成都是 α 和 β 两相组织,即在约 800 的温度以下加热即使快速水淬也得不到马氏体 α' 。说明其合金冷却线不可能与马氏体转变起始线(M_s)相交,研究表明第二临界温度约为 830,与 TC4 合金的相近(相应温度为 815 左右)^[6]。

2.2 热处理对力学性能的影响规律

TA15 钛合金不同温度水淬、空冷及炉冷条件下的力学性能变化见图 3 和 4。总体来说:在 β 区(1020)、($\alpha+\beta$)区上部(970)及中部(900)处理时,TA15 合金的室温和高温强度随冷却速度降低而下降,尤其是在 1020 及 970 处理时最为明显;而在相同的冷却条件下,随着热处理温度的提高,TA15 合金的室温和高温强度明显提高。而在($\alpha+\beta$)区下部(800)处理时,其强度几乎与冷却方式无关,800 热处理合金的室温强度甚至高于 900 热处理合金的室温强度。

其中,在 1020 热处理时,合金塑性最差(见图

3(c)和(d)、图 4(b)和(c))。合金塑性随温度变化没有明显规律。

由图 3 和图 4 可知,在全面的实验方案中,970 时的空冷方案具有最佳的强度与塑性匹配。

2.3 组织、相变与力学性能的关系

无论是在 β 区还是在 $\alpha+\beta$ 区处理,加快冷却速度对合金的强化效果符合近 α 和 $\alpha+\beta$ 型钛合金的一般规律:即水淬的强度高于空冷的,更高于炉冷的(见图 3 和 4)。但是应当注意到 TA15 合金即使是在水淬条件下其强化效果也很有限,与空冷条件下相比提高幅度约在 80 MPa 以内,强化效果不足 10%,且主要体现在 1020 和 970 等高温段的处理。据文献[6],Ti6Al4V 合金(退火状态 β 相含量约 10%~15%)的最高强化效果不到 25%;BT16 合金(Ti-2.5Al-5Mo-5V)的最高强化效果为 75%;BT22 合金(Ti-5Al-5Mo-5V-1Fe-1Cr)的最高强化效果达 80%~85%。可见,TA15 的强化效果是相当弱的。随着热处理温度的降低,强化效果将进一步下降。这种有限的强化效果主要是与 TA15 合金属于合金化程度低、 β 稳定元素含量相对较少(β 相的含量 5%~7%)的近 α 合金有关,而马氏体 α' 的强化效果不显著。CAMPBELL 等^[7]的研究结果指出:近 α 钛合金的热处理强化效果较低,但随着 β 稳定元素的增加,热处理强化效果逐渐增加, β 相约在 50%时可得到最高的强化效果。

本研究中 800 热处理下 TA15 合金的强度几乎与冷却方式无关,并且出现了室温下 800 热处理的

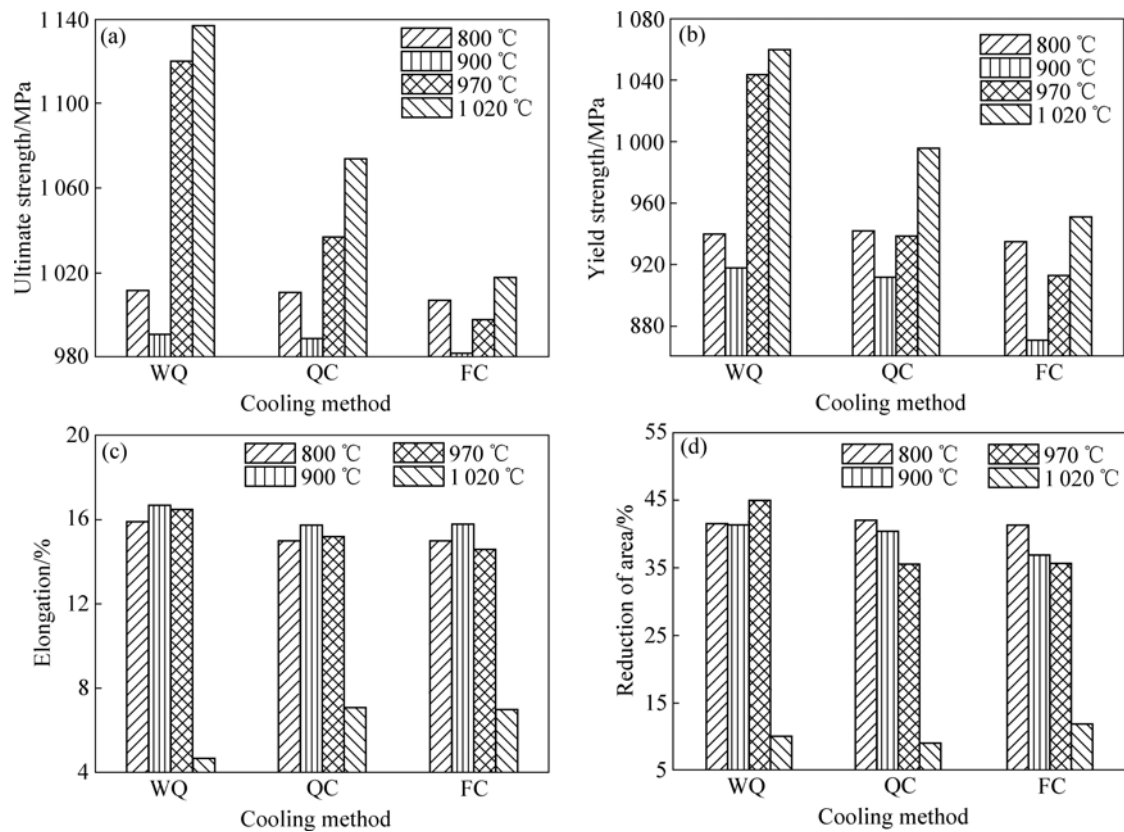


图 3 不同冷却方式对 TA15 合金室温拉伸性能的影响

Fig.3 Effect of different cooling methods on room temperature tensile properties for TA15 titanium alloy: (a) Ultimate strength; (b) Yield strength; (c) Elongation; (d) Reduction of area

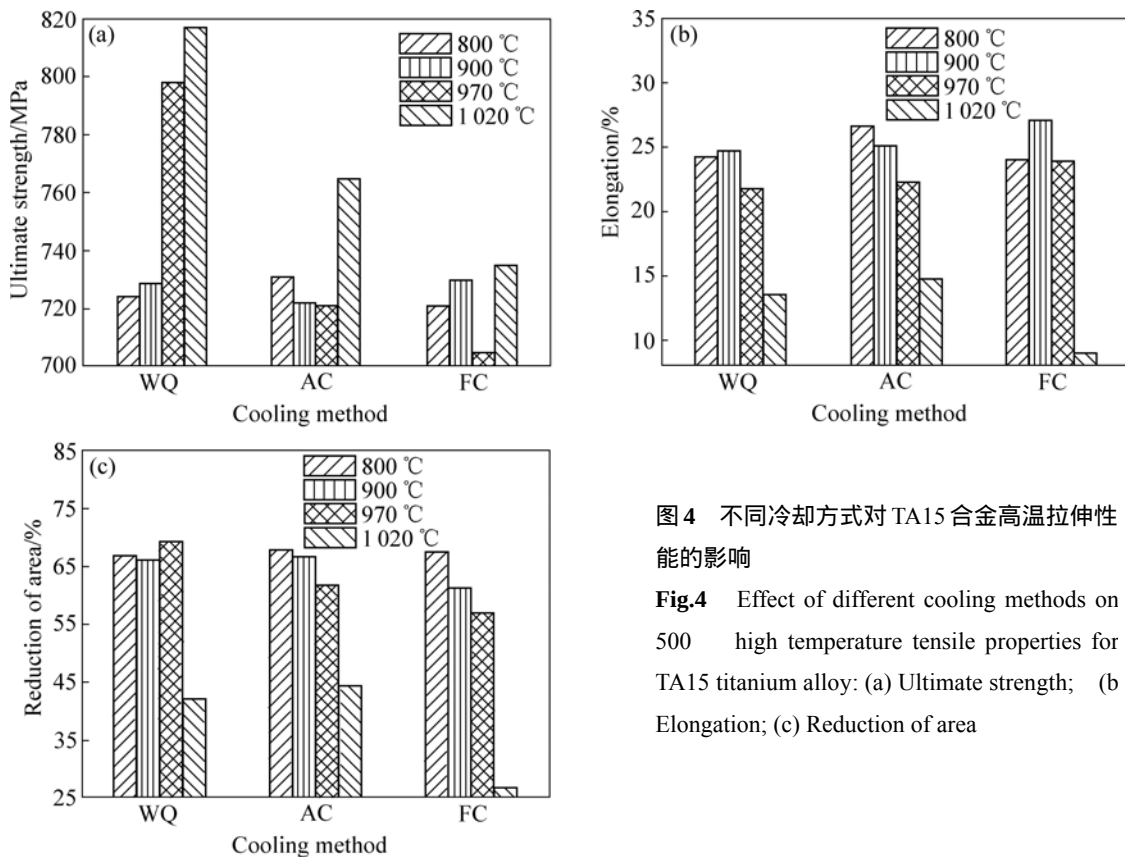


图 4 不同冷却方式对 TA15 合金高温拉伸性能的影响

Fig.4 Effect of different cooling methods on 500 °C high temperature tensile properties for TA15 titanium alloy: (a) Ultimate strength; (b) Elongation; (c) Reduction of area

强度高于900 °C热处理的情况。这主要是因为800 °C温度比较低,属于不完全退火温度,800 °C热处理的显微组织无论是水淬还是炉冷都与空冷相似,都没有发生明显的相变,即加热过程既没有明显的 α 相向 β 相的转变,冷却过程也没有明显的 β 相向 α 相的析出,而900 °C处理则已经发生了明显的再结晶。这种现象在TA15小直径棒材退火中普遍存在。

相变点以上的1020 °C的空冷(见图1(a2))或炉冷组织(见图1(a3))是不正常的过热组织,这可能是由于加热温度过高或局部激烈变形时变形热超过相变点造成的。970 °C的空冷组织(见图1(b2))属于双态组织,初生等轴 α (15~30 μm)体积分数在25%左右,有细小的次生再结晶 β 晶粒,以及编织有序的 β 转变组织,是锻件中最常得到的,具有优异的综合性能。

3 结论

1) 在1020~900 °C热处理,随着冷却速度的降低,1020 °C热处理时TA15合金的显微组织由马氏体 α' 相向针状($\alpha+\beta$)相和片状($\alpha+\beta$)相转变,970 °C及900 °C热处理时组织则由初生 α +马氏体 α' 相向初生 α +针状($\alpha+\beta$)和等轴 α +晶界 β 演变;相应的室温和高温强度随冷却速度降低明显下降,冷却速度相同时,强度随温度升高而提高。

2) 在800 °C热处理时,不同冷却方式下合金均为 α 和 β 两相组织,其强度和塑性与冷却速度关系不大。

3) TA15合金在970 °C加热时,空冷得到的组织属于双态组织,具有优异的综合性能。

REFERENCES

- [1] 李士凯, 惠松晓, 叶文君, 于洋, 熊柏青. 冷却速度对TA15 ELI合金组织与性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(5): 786-789.
LI Shi-kai, HUI Song-xiao, YE Wen-jun, YU Yang, XIONG Bai-qing. Effect of cooling rate on the microstructure and properties of TA15 ELI alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(5): 786-789.
- [2] FILIP R, KUBIAK K, ZIAJIA W. The effect of microstructure on the mechanical properties of two-phase titanium alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 133: 84-89.
- [3] 朱景川, 王洋, 尤逢海, 刘勇, 来忠红. TA15钛合金的形变热处理[J]. 材料热处理学报, 2007, 28(增刊): 106-109.
ZHU Jing-chuan, WANG Yang, YOU Feng-hai, LIU Yong, LAI Zhong-hui. Microstructure and mechanical properties of thermal deformed TA15 titanium alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2007, 28(supple): 106-109.
- [4] LIU Yong, ZHU Jing-chuan. Effects of triple heat treatments on stress relaxation resistance of BT20 alloy[J]. Mechanics of Materials, 2008, 40(10): 792-795.
- [5] 鲍利索娃 E A, 等. 钛合金金相学[M]. 陈石卿, 译. 北京: 国防工业出版社, 1986: 80.
BORISOVA E A, et al. Metallography of titanium alloys[M]. CHEN Shi-qin, transl. Beijing: National Defence Industry Press, 1986: 80.
- [6] 王金友, 葛志明, 周彦邦. 航空用钛合金[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985: 204.
WANG Jin-you, GE Zhi-ming, ZHOU Yan-bang. Aeronautical titanium alloys[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985: 204.
- [7] CAMPBELL F C. Manufacturing technology for aerospace structural materials[M]. Elsevier Ltd, 2006: 127.

(编辑 袁赛前)