

近 β 锻造推翻陈旧理论发展了三态组织

周义刚, 曾卫东, 俞汉清

(西北工业大学, 西安 710072)

[摘要] 将坯料置于相变的临界点附近 $10\sim 15^{\circ}\text{C}$ 加热、锻造、锻后水冷, 随后, 不是采用时效处理, 而是先进行高温韧化再低温强化处理。近 β 锻造的组织不再是等轴 α 量过多, 或是为零的网篮条状 α 的结构模式; 而是约含20%等轴 α 、50%~60%条状 α 构成的网篮和 β 转变基体组成的三态组织。这种结构不仅丰富和发展了国际上钛合金已有的4种组织类型(等轴、双态、网篮和并列), 而且将等轴和网篮组织的性能优势集于一身, 由此带来的力学性能超过了国内外相关技术的性能水平: 能在不降低塑性, 不丧失热稳定性的条件下, 提高材料的高温性能、低周疲劳性能和断裂韧性, 在改善性能的同时提高使用温度。近 β 锻造适用于 $(\alpha+\beta)$ 型合金, 还可应用于 α 、近 α 和近 β 型合金, 其研究成果已用于制造了多种发动机盘件、飞机和导弹等重要结构件。

[关键词] 钛合金; 近 β 锻造; 三态组织

前言

国内外钛合金传统的变形理论, 是在相变点以下 $40\sim 50^{\circ}\text{C}$ 加热、变形, 谓之常规锻造。常规锻造得到的是等轴组织 [图1(a)], 虽有高的塑性和热稳定性, 但材料的高温性能、抗疲劳裂纹扩展能力和断裂韧性较差^[1]。20世纪50年代后期, Groan等人提出相变点以上 β 锻造理论^[2], β 锻造得到网篮组织 [图1(b)], 与前者相比, 提高了材料的抗蠕变性能, 抗冲击和断裂韧性, 但是明显降低塑性和热稳定性, 导致“ β 脆性”和“组织遗传性”^[3]。60年代初, Sheegarev等人, 又提出形变热处理理论^[4], 由于尚未摆脱形变温度和热处理制度传统观念的束缚, 因之, 钛合金形变热处理仍然没有根本改变显微组织的结构模式和相成分的比例匹配, 只是改变了转变 β 基体, 是时效 β 基体+等轴 α [图2(a)], 或时效 β 基体+条状 α [图2(b)]。这种组织有效地提高了材料的强度, 但热稳定性更差。

在笔者提出近 β 锻造理论之前, 国际上已有的钛合金变形理论所能获得的组织特征, 不外乎前文列举的两类, 再加上双态和并列组织4种类型。性能决定于组织, 所以, 力学性能的合理匹配始终没有很好解决。近 β 锻造推翻了陈旧理论, 发展的三态组织使材料的强度、塑性、韧性兼得, 从而克服了以往研究的不足。

1 近 β 锻造设计的理论和实验基础

在常规的热加工条件下, $(\alpha+\beta)$ 两相合金的强度主要建立在固溶强化和沉淀强化基础上, 是 α 、 β 两种不同晶体结构的复合强化作用。Fentman和Goosey指出材料的抗蠕变性能与等轴 α 和魏氏 α 相的相对含量有关, 而魏氏 α 比等轴 α 有较好的抗蠕变能力^[5]。文献[6, 7]证实, 材料的断裂韧性和抗裂纹扩展能力是与转变 β 中片状 α 的含量和 α 集束的位向变化有关系。因而, 改变材料显微组织中中等轴 α 和转变 β 组织的相对含量及 α 片的厚度和编织程度, 必然导致力学性能特别是高温性

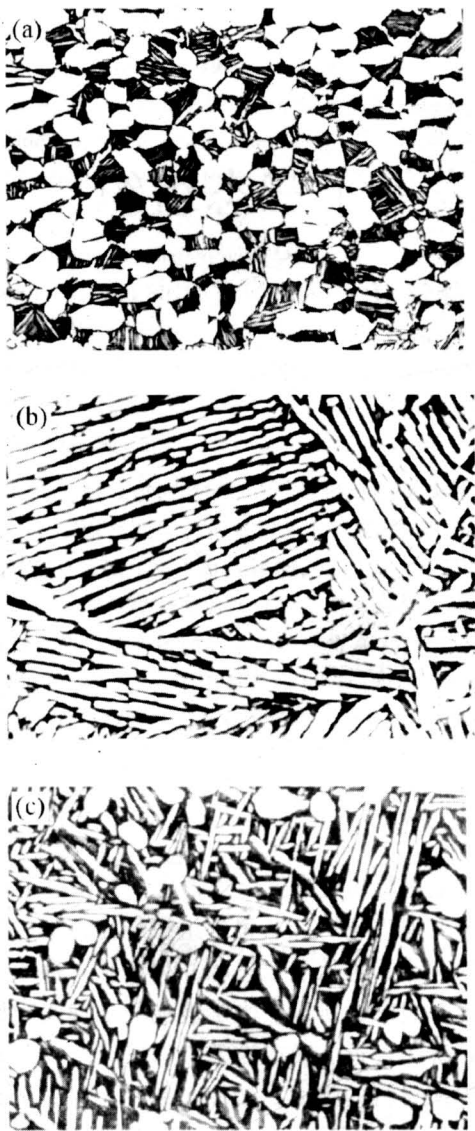


图1 常规、β和近β锻造的显微组织

Fig.1 Optical microstructures developed by conventional, β and near β forging

- (a) —Equiaxed microstructure developed by conventional forging;
- (b) —Lamellar microstructure developed by β forging ; (c) — Tri-modal microstructure developed by near β forging

能、断裂韧性和抗裂纹扩展能力的变化。

基于钛的多晶转变特性，提高变形前的加热温度可使更多的初生α相转变为β转变组织。从图3笔者测定的TC11 (Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si) 两相钛合金，在不同温度加热所得显微组成物的比例可以看到，加热温度低于960℃时，初生α含量随温度的变化不大；只有当温度升至相变点以下10~15℃，初生α相才能迅速降至10%

左右。但因变形和相变再结晶以及热处理的球化作用，还会约增10%等轴α量，从而使等轴α总量控制在20%左右的最佳配比。

可见，加热温度接近相变点才能有效调节材料组织中等轴α相和β转变组织的相对含量。大量试验与生产实践发现，只要组织中保留即使很少量等轴α相，塑性降低就不会太大。图4曲线表明^[8]，等轴α在10%，材料的塑性(ψ值)仍保持30%以上；超过20%，实际上对塑性贡献并无裨益，相反，抑制了其他性能的发挥。近β锻造的提出正是基于以上理论基础和实验验证。

2 研究结果与分析

由于加热温度接近而没有超过相变点，坯料组织中保留了一定量的初生α相，因而高温β晶粒受两相制约不会过于长大，低倍仍为均匀细小的模糊晶；高倍中也不会有晶界α和大块α出现。

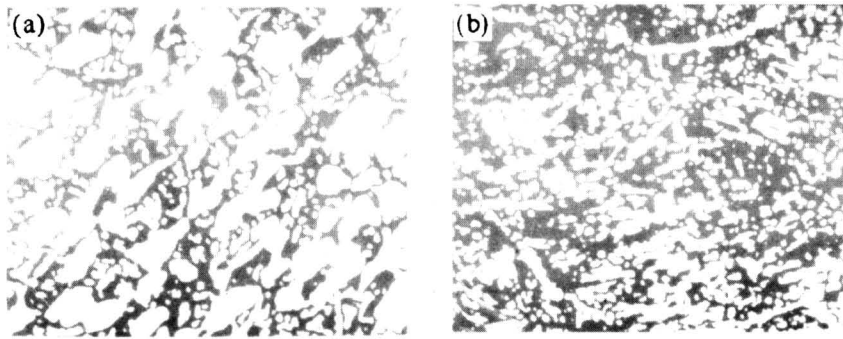
锻后水冷只是利用形变热处理的作用，籍以增加结晶核心，储存变形能和变形产生的晶体缺陷以获得短、细、乱的β转变组织。

经水冷的锻件不是进行时效处理，而是施予高温甚至两次高温回化处理。乍看起来是违背了形变热处理的经典理论，却取得了十分理想的技术效果：充分消除了淬火应力；减少和改善了淬火马氏体的不稳定性；残余β相的分解，从而显著提高材料的热稳定性；特别重要的是，高温处理引发相变再结晶使显微组织发生两个明显的变化，等轴α的球化和长大，并形成一定比例的条状α。

由此，铸就了约含20%等轴α、50%~60%条状α构成的网篮和β转变基体组成的三态组织 [图1(c)]。

三态组织发展了国际上已有的4种典型组织，是钛合金组织结构工程领域中的重大突破。由于将等轴组织和网篮组织的性能优势集于一身，由此带来的力学性能超过了国内外同类研究、同类技术的性能水平，见表1~4。

由表1可见，除形变热处理直接时效的强度明显提高外，显微组织中等轴α含量对室温强度无明显影响，常规、β和近β锻造基本处于同一水平，与Henning等人的研究结果相一致^[9]。但对高温性能的影响有明显差异：近β锻造试样520℃的高温强度相当于常规锻造和IMI685合金β锻造500℃性能水平；520℃，100h，343MPa条件下



(a) —Age β matrix + equiaxed α (b) —Age β matrix + lamellar α

图 2 形变热处理的显微组织

Fig.2 Optical microstructures developed by thermomechanical treatment

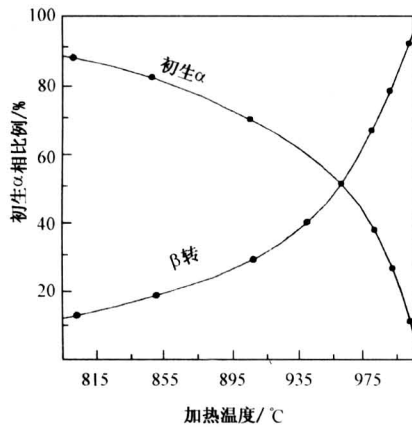


图 3 TC11 合金加热温度与初生 α 含量的关系
Fig.3 Correlation between the volume fraction of equiaxed α and the heating-temperature of Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si alloy

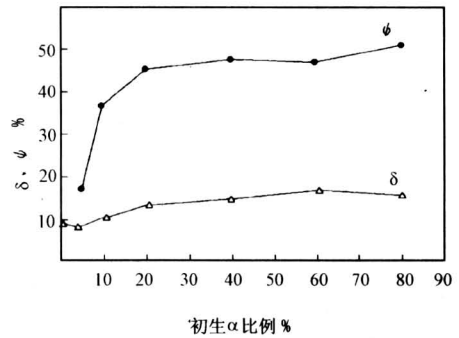


图 4 等轴 α 含量对 Ti-6Al-4V 合金室温塑性的影响

Fig.4 Effect of the volume fraction for equiaxed α on tensile plasticity of Ti-6Al-4V alloy

的蠕变强度明显优于常规锻造，接近于 BT9 合金形变处理时效强化试样 500℃ 性能水平（表 3）。近 β 锻造的塑性和热稳定性与常规锻造处于同一数量级，即使试样经 520℃，100 h 热暴露后， ψ 值仍保持在 30% 以上，未见脆性和失稳表现，比 β 锻造组织更具稳定性（表 1、2）。近 β 锻造的疲劳-蠕变交互作用寿命高于常规锻造，断裂韧性值与 β 锻造基本相当。可见，近 β 锻造获得的三态组织由于组织结构发生了根本的改变和相成分比例的合理匹配，其力学性能具有明显的优越性。

文献 [10、11] 指出，等轴和片状组织拉伸塑性明显差异的原因，是两者变形机制不同，等轴组织试样拉伸变形是在 α 相的个别晶粒中以滑移开

始的，随着变形程度增加，滑移将占据越来越多的 α 晶粒，并向周围的 β 转变组织扩展，因而空洞形核、连接和扩展较迟，断裂前将产生更大的变形，从而获得更高的塑性。网篮片状组织中，由于同一 α 集束具有相同的惯析面，滑移一开始就能毫无阻碍地穿过互相平行的 α 束而形成粗滑移带，且在晶界 α 处极易产生位错塞积出现微区变形不均匀，促进空洞的形成和发展，导致试样过早断裂。三态组织中既有等轴 α ，又有片状 α ，是上述两种变形机制的综合，20% 等轴 α 晶粒足以起到变形协调作用；50%~60% 网篮交织的片状 α ，降低了等轴 α 间的平均自由程^[12]，使滑移带间距减小，位错线分布均匀、细密，没有局部位错严重塞积现象（图 5），推迟了空洞的形核与发展，显示较高的塑性。

表1 室温拉伸性能

Table 1 Tensile properties of room-temperature

材料	锻造方法	锻后冷却	热处理	室温拉伸性能			
				σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	ψ /%
TC11 (中国)	常规	空冷	双重退火 ^②	1061	1018	14.8	46.2
	β	水冷	双重退火 ^②	1083	990	12.8	19.8
	近 β	水冷	强韧化 ^③	1098	1049	16.8	43.8
IMI685 ^① (美国)	β	空冷	固溶时效 ^④	1060	1000	10.0	18.6
BT9 (原苏联)	形变热处理	水冷	时效 ^⑤	1080~1220	1020~1090	10.0~12.0	18.0~20.0

①—英国材料美国加工；②—950℃，1 h，AC + 530℃，6 h，AC；③—965℃，1 h，AC + 950℃，1 h，AC + 530℃，6 h，AC；④—1050℃，2 h，OC + 550℃，24 h，AC；⑤—570℃，2 h，AC

表2 热稳定性能

Table 2 Thermal stability Properties

材料	锻造方法	锻后冷却	热处理	热稳定性能					
				500℃，100 h			520℃，100 h		
				σ_b /MPa	δ /%	ψ /%	σ_b /MPa	δ /%	ψ /%
TC11 (中国)	常规	空冷	双重退火	1087	14.0	38.8	1081	12.0	31.7
	β	水冷	双重退火	1069	11.3	17.0	1094	10.2	16.4
	近 β	水冷	强韧化	1109	15.0	37.0	1153	16.6	36.6
IMI685 (美国)	β	空冷	固溶时效	1015 ^⑥	8	16.5	—	—	—

⑥—540℃/100，300 MPa 试验数据

表3 高温拉伸、持久和蠕变强度

Table 3 High-temperature tensile, duration and creep strength

材料	锻造方法	锻后冷却	热处理	高温拉伸		持久强度		蠕变性能	
				500℃	520℃	500℃， 100 h	520℃， 100 h	500℃， 100 h	520℃， 100 h
				σ_b /MPa	σ_b /MPa	σ_b /MPa	σ_b /MPa	ϵ /%	ϵ /%
TC11 (中国)	常规	空冷	双重退火	748	698	598	—	0.129 ^⑦	0.224 ^⑦
	β	水冷	双重退火	772	761	706	608	0.063 ^⑦	0.125 ^⑦
	近 β	水冷	强韧化	774	749	706	607	0.103 ^⑦	0.134 ^⑦
IMI685 (美国)	β	空冷	固溶时效	750	—	700	—	0.084 ^⑦	—
BT9 (原苏联)	形变热处理	水冷	时效	870	—	610	—	—	0.122 ^⑧

⑦—蠕变应力 343 MPa；⑧—蠕变应力 300 MPa，蠕变温度 520℃

表4 低周疲劳、疲劳-蠕变寿命和断裂韧性

Table 4 Low-cycle fatigue life, fatigue-creep life and fracture Toughness

材料	锻造方法	锻后冷却	热处理	低周疲劳性能		疲劳-蠕变寿命	断裂韧性
				20℃，715 MPa		520℃，3 min，480 MPa	K_{IC}
				N_f , cyc.		N_f , cyc.	MPa \sqrt{m}
TC11 (中国)	常规	空冷	双重退火	6658		2529	73.1
	β	水冷	双重退火	7631		11780	91.9
	近 β	水冷	强韧化	14376		8298	88.6
IMI685 (美国)	β	空冷	固溶时效	—		—	74.7 (横) 98.5 (纵)

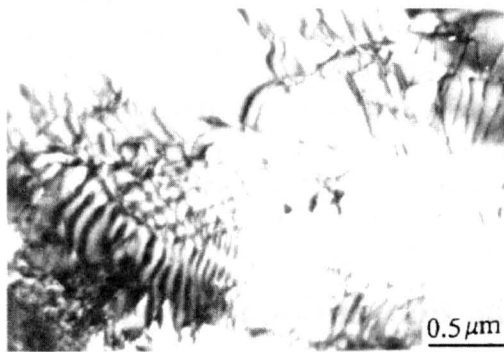
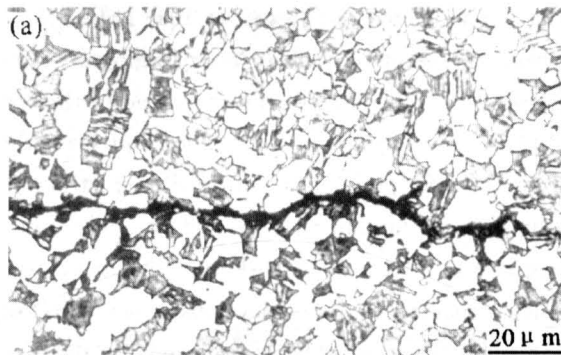
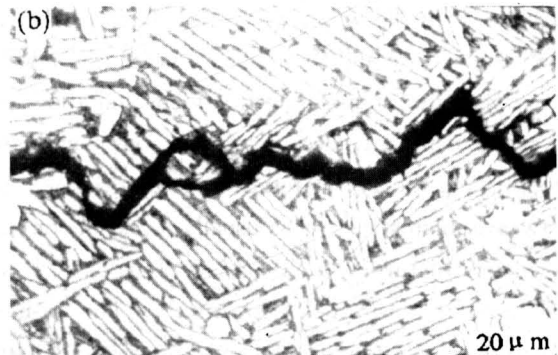


图 5 三态组织的位错形貌

Fig.5 Dislocation morphology in tri-modal microstructure



(a) —Winding crack propagation path in equiaxed microstructure



(b) —Winding crack propagation path in tri-modal microstructure

图 6 不同显微组织中的裂纹扩展路径

Fig.6 Winding crack propagation path in different microstructure

基于上述原因，三态组织不仅具有好的塑性，同时具有高的热强性和断裂韧性，综合性能优于当前国内外相关技术的水平。

4 结语

钛合金的发展受到高温下表面氧化和内部组织分解——所谓“热障”的影响，其使用温度一直停留在 600℃ 的水平。国际钛科学界，特别是工程界已开始重视从钛合金组织结构工程领域来挖掘材料的性能潜力和提高材料使用温度。近 β 锻造的提出正是跟踪了学科前沿领域。作者经过十多年的努力，从学科交叉、理论渗透的角度出发，打破已有的传统锻造方法，创造性地发展了新的钛合金变形理论。它的研究成功不仅解决了我国新机种研制对高温用钛的急需；更为重要的科学意义是在国际上首创了三态组织，丰富和发展了已有组织类型，是

造成片状和等轴组织断裂韧性不同的原因，主要与裂纹扩展中路径的曲折程度有关^[6]。三态组织中，50%~60%厚度为 3~5 μm 的网篮交织的片状 α ，裂纹不能象在等轴组织中那样平直地沿着等轴 α 相界和穿过转变 β 基体中的魏氏 α 相图 [6 (a)]；只能沿着 α/β 相界面扩展或穿过 α 集束，若 α 集束的位向与主裂纹扩展方向相近，裂纹沿 α 片间通过，若 α 集束的位向与主裂纹走向很不一致，裂纹穿过集束，但裂纹扩展至集束边界，将产生停滞效应或被迫改变方向 [图 6 (b)]。所以片状 α 越混乱，交织程度越高，裂纹路径越曲折，扩展速率越低，断裂韧性就越高。

钛合金组织结构工程领域中的重大突破。其研究成果已用于制造我国多种发动机盘件和飞机、导弹等重要结构件，并收到了重大的经济效益和社会效益。

参考文献

- [1] Okada M. In: Froes F H, Caplan I L eds., Titanium science and technology, San Diego, California, TMS 1992, 1551
- [2] Croan L S, Rizzitana F J. WAL report 401/268, watertown Arsend Laboratories, Mass, 1958
- [3] 周义刚. 金属学报, 1980, 16(3): 302
- [4] Sheegarev A S, Glyaooev A P. Research on high-strength alloys and refined grain, Moscow, Academy of Science Press, 1963, 142
- [5] Fentman W P, Goosey R E. In: Jaffee R I, Promisel N E eds., The science technology and application of titanium, London: Pergamon Press, 1970. 987

- [6] Minomi M, Kobayashi T. ISIJ Int, 1991, 31: 488
- [7] 周义刚, 曾卫东, 曹春晓等. 金属学报, 1999, 35(1): 45
- [8] 王金友, 葛志明. 航空用钛合金, 上海: 上海科学技术出版社, 1985. 221
- [9] Henning H J. DMIC Report S-24, Defense Metals In-
- formation Center, Bottelle Memorial Institute, 1968
- [10] B.K. 亚力山大. 钛合金半成品[M], 宁龙兴译. 宝鸡有色金属研究所出版, 1984. 38
- [11] Zhou Y G, Zeng W D, Yu H Q. Materials science and engineering, 1996, A221: 59
- [12] Tobin A. AD-A007427, 1975

The Near β Forging Overthrows the Conventional Forging Theory and Develops a New Tri-modal Microstructure

Zhou Yigang, Zeng Weidong, Yu Hanqing

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[Abstract] The near beta forging for titanium alloys proposed by the authors has overthrown the conventional forging theory in the following two aspects: firstly, the material is heated and forged at 10~15°C below beta transus temperature and then water cooled; secondly, the heat treatment technology after forging consists of a high-temperature toughening treatment and a low-temperature strengthening treatment instead of the conventional aging treatment. Because of ingenious combination of phase transformation, deformation and strengthening and toughening theory, materials forged by the near beta forging do not produce an equiaxed microstructure or a basketweave microstructure as usually found in conventionally forged titanium alloy, but do produce a new tri-modal microstructure, which consists of about 20% equiaxed alpha, 50%~60% basketweave formed by striature alpha and transformed beta matrix. The tri-modal microstructure not only develops a new type of microstructure in addition to the existing four titanium alloy microstructures (i.e. equiaxed, bi-modal, basketweave and lamella), but also has the advantages that both the equiaxed microstructure and the basketweave microstructure have, so it shows excellent mechanical properties. It shows an increased high-temperature property, a high low-cycle fatigue property and a high fracture toughness without decreasing ductility and thermal stability. Moreover, it can raise the service temperature from 500°C to 550°C. The near beta forging is applicable not only to alpha-beta alloy, but also to alpha, near alpha and near beta titanium alloys. This method has been used to forge several engine compressor disks and some important structure components of missiles and airplanes.

[Key words] titanium alloy; near beta forging; tri-modal microstructure

《中国工程科学》(月刊)是中国工程院院刊

欢迎读者直接向本刊编辑部订阅