

# 钛合金固态相变的归纳与讨论(Ⅶ)——钛合金热处理的归类(续)

辛社伟

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 承接文献《钛合金固态相变的归纳与讨论(Ⅳ)——钛合金热处理的归类》(钛工业进展, 2009, 26(3): 26-29)讨论了钛合金热处理的归类。根据不同热处理工艺的特点和热处理过程中的组织转变原理, 对钛合金的热处理进行了梳理和归类, 对钛合金不同热处理工艺对应的专业术语进行了规范, 并对比解释了不同热处理工艺专业术语的内涵和异同, 建立了钛合金热处理工艺术语与显微组织结构变化的约定关系。

**关键词:** 钛合金; 相变; 热处理; 显微组织

**中图分类号:** TG166.5; TG146.23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9964(2021)06-037-06

## Inductions and Discussions of Solid State Phase Transformation of Titanium Alloy(Ⅶ) — Classifications of Heat Treatment of Titanium Alloy (Continuation)

Xin Shewei

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

**Abstract:** On the basis of reference of “Inductions and discussions of solid state phase transformation of titanium alloy (Ⅳ)— Classifications of heat treatment of titanium alloy” which was published in Vol. 26 No. 3 of “Titanium Industry Progress” in 2009, the heat treatment of titanium alloy was further classified by the heat treatment method. The specialized vocabulary and their relationship of titanium alloy heat treatment were discussed and defined through microstructure evolution during various heat treatments. This paper will offer reference on the heat treatment of titanium alloy for some technologists in titanium field. Also, this paper offers some ideas for the established of some standards about heat treatment of titanium alloys.

**Key words:** titanium alloy; phase transformation; heat treatment; microstructure

钛合金的热处理种类繁多, 有再结晶退火、去应力退火、完全退火、双重退火、三重退火、固溶+时效、双重时效、淬火+时效等<sup>[1-3]</sup>。但目前对钛合金热处理缺乏权威专业的定义, 这些热处理方式因个人习惯的不同而被赋予不同的名称。混乱的焦点在于部分科研人员将钛合金所有热处理的加热过程都称为退火, 比如将高温固溶、淬火称为退火, 低温时效空冷也称为退火, 所以有二重退火、三重退火的热处理工艺。当然, 这与钛合金热处理本身

的特点有关, 钛合金不同于钢和铝合金, 钢的淬火、回火, 铝合金的固溶、时效都伴有典型的特征相变<sup>[4]</sup>, 几乎为大家所共识。而钛合金热处理过程中的相变形式比较复杂, 既有同素异构的马氏体相变, 也有同素异构的扩散相变, 同时钛合金马氏体相变主要依赖于残余 $\beta$ 相的分解强化, 其强化效果不明显, 故导致钛合金热处理术语容易混淆。

文献[5, 6]对比了钢、铝合金和钛合金热处理过程的异同, 给出了3类热处理的区分方法, 并将钛合金的热处理定义为“第三类”热处理。但是, 这种定义仅是相对于钢和铝合金作出区分。为此, 在上述文献论述的基础上, 对钛合金的热处理工艺术语作进一步的梳理和规范, 将有助于从本质上了解不同热处理工艺的工艺特征和工艺关系。笔者根据

收稿日期: 2021-11-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(5207011470); 冲击环境材料技术国家级重点实验室基金项目(61429020101)

通信作者: 辛社伟(1978—), 男, 教授级高级工程师。

钛合金热处理过程中组织和性能的变化规律,对钛合金的热处理工艺进行细分,区分不同热处理工艺对应的组织和性能的变化特点,建立钛合金热处理工艺术语与显微组织结构变化的约定关系,以期为钛合金热处理工艺术语的规范和相关标准的建立提供借鉴。

## 1 钛合金热处理的分类

文献[5,6]对金属材料的热处理分类进行了详细叙述,根据材料在热处理过程中的相变类型和性能特点,金属材料的热处理可以分为3大类:第一类,淬火+回火;第二类,固溶+时效;第三类,淬火+时效。但实际上,由于 $\beta$ 稳定元素含量的不同,钛合金在固溶冷却过程中既可发生非扩散性质的 $\beta \rightarrow \alpha'$ 、 $\beta \rightarrow \alpha''$ 、 $\beta \rightarrow \omega$ 相变,又可发生 $\beta \rightarrow \alpha$ 的扩散相变,因此,钛合金热处理既有第一类热处理的淬火,又有第二类热处理的固溶,这或许是目前钛合金热处理工艺名称较为混乱的主要原因。下文将根据金属材料热处理的分类方法和专业术语的命名规则,对钛合金热处理工艺进行区分和归类。

### 1.1 退火

退火是将合金加热到某一特定温度后冷却,使合金保持一定的组织稳定性和力学性能稳定性。退火的冷却方式一般为空冷或炉冷。根据加热温度和工艺目的的不同,可以将退火工艺分为去应力退火、再结晶退火和等温退火。

#### 1.1.1 去应力退火

去应力退火也称普通退火,其典型特征是将合

金加热到再结晶温度以下,然后进行空冷处理。对于钛合金,一般加热温度在 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。去应力退火过程中发生的 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变可以忽略,组织主要发生回复变化,所以可以认为去应力退火过程中不发生相变,合金的原始组织形态没有改变。去应力退火仅是通过组织回复去除加工过程中的残余应力,消除变形过程中的畸变能,并使合金组织保持一定的稳定性。由于去应力退火主要发生的是组织回复变化,所以合金强度降低,塑性增加,是合金的软化和组织稳定化过程。

#### 1.1.2 再结晶退火

再结晶退火是将合金加热到再结晶温度以上保温,使合金组织发生完全再结晶,然后缓慢冷却,以稳定组织,并获得新的再结晶组织的热处理过程。再结晶热处理过程是承接形变过程进行的,依赖形变过程中的形变能进行再结晶晶粒的形核,热处理过程中主要发生的是再结晶晶粒的形核和长大,不涉及相变。钛合金再结晶退火后组织为完全再结晶组织,合金强度有一定程度降低,塑性增加,也是合金的软化和组织稳定化过程。

对比去应力退火和再结晶退火后组织和性能的变化特点,这2种热处理的典型特征是加热保温和冷却过程中不发生相变,退火后合金得到软化,强度降低,塑性提高。图1为 $3\text{ mm}$ 厚TB8钛合金冷轧板材轧制态(图1a)、去应力退火(图1b)和再结晶退火后的显微组织(图1c)。从图1可以看到,去应力退火后组织形态几乎没有变化,而再结晶后形成完全等轴化的再结晶组织。

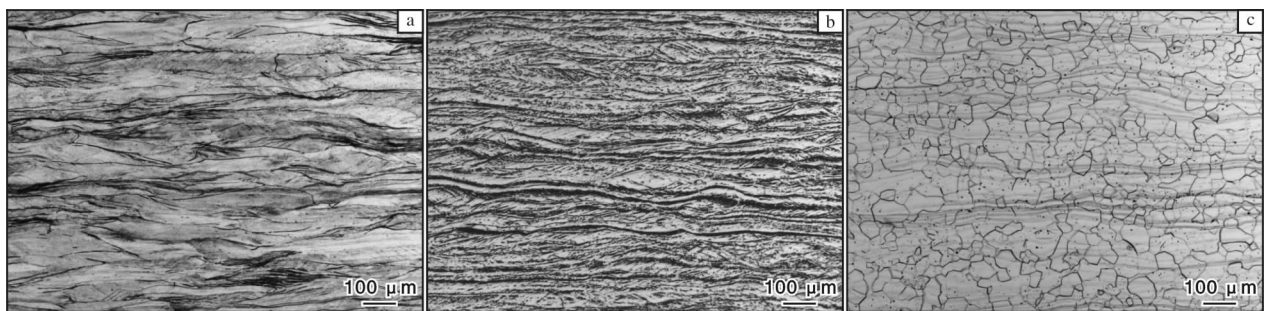


图1 TB8钛合金冷轧板轧制态及退火态显微组织

Fig. 1 Microstructures of cold rolled TB8 titanium alloy sheet at different states: (a) cold rolled state; (b) stress relief annealing treatment at  $760\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (c) recrystallization annealing treatment at  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$

#### 1.1.3 等温退火

等温退火是将合金加热到较高温度,以极其缓慢的速率冷却,让合金充分发生相变,获得充分稳

定的平衡组织的热处理过程。对于钛合金,等温退火温度一般高于再结晶温度,当等温退火温度过低时,很难实现充分的相变,无法达到稳定组织的目

的。等温退火热处理很少应用于钛合金, 因为当钛合金作为结构材料时, 其热处理的目的主要是为了优化力学性能, 而等温退火的主要作用是为了获得极其稳定的室温组织, 强调的是组织和性能的稳定性。对于一些高精密仪器或测量工具, 需要对其制作材料进行等温退火, 以保证后续长期使用过程中不发生由于组织和性能改变而引起的形状改变。虽然等温退火工艺通常不直接应用于结构钛合金的热处理, 但常作为某些特殊热处理的一个阶段, 比如“ $\beta$ 退火缓慢冷却 + 时效”<sup>[7,8]</sup> (BASCA,  $\beta$ -annealing with subsequent slow cooling & ageing) 和某些转炉热处理工艺, 对此后文将有所介绍。

## 1.2 淬火 + 时效

淬火是将钛合金加热到较高温度保温, 然后以较快速度冷却。冷却方式一般为水冷或油冷, 对于部分合金, 也可采用空冷。淬火的特点是冷却过程中不发生扩散相变, 而是通过切变形式发生马氏体或类马氏体相变。根据  $\beta$  稳定元素含量的不同, 依次发生的相变有  $\beta \rightarrow \alpha'$ 、 $\beta \rightarrow \alpha''$  和  $\beta \rightarrow \omega$ 。

时效是针对淬火组织, 进行较低温度的保温并空冷, 一般时效温度低于 700 °C。时效过程中, 发生的相变主要是  $\alpha' \rightarrow \beta + \alpha$ 、 $\alpha'' \rightarrow \beta + \alpha$ 、 $\alpha'' \rightarrow \alpha' \rightarrow \beta + \alpha$  和  $\omega \rightarrow \beta + \alpha$ 。

淬火 + 时效的热处理中, 淬火是为了调整组织形态, 并获得不稳定的过渡相。在相变点以上淬火, 一般获得的是细片层组织或网篮组织, 在相变点以下淬火, 获得的是双态组织或等轴组织。时效是合金强化的主要过程, 时效的强化效果依赖于淬火后组织中过渡相 ( $\alpha'$ 、 $\alpha''$  和  $\omega$ ) 的含量, 过渡相越多, 时效强化效果越明显。所以淬火 + 时效的热处理也称强化热处理。由于淬火后组织不稳定, 主要由过渡相构成, 故淬火后必须进行时效处理。

## 1.3 固溶 + 时效

根据具体工艺的不同, 钛合金的“固溶 + 时效”又可以分为“单重固溶 + 单重时效”、“双重固溶 + 单重时效”和“单重固溶 + 双重时效”。

### 1.3.1 单重固溶 + 单重时效

“单重固溶 + 单重时效”是使用最为广泛的“固溶 + 时效”热处理工艺。固溶是将合金加热到较高温度保温, 然后快速冷却, 其特点是冷却过程中不发生相变。需要说明的是, 虽然我们定义的固溶是冷却过程中不发生相变, 但实际上很难避免相变的发

生, 特别是对于 Mo 当量较低的合金, 对此后文将有所解释。

时效是针对固溶冷却后的组织, 进行较低温度的保温并空冷。时效过程中, 固溶冷却后保留的亚稳  $\beta$  相分解, 形成尺寸较小的片层、条状或纺锤状  $\alpha$  相。时效析出  $\alpha$  相的尺度和形态依赖于时效温度, 一般在较高温度时效, 获得的是在  $\beta$  片层内排列较整齐的细片层  $\alpha$  相, 强化效果较弱。在较低温度时效, 获得的是在  $\beta$  片层内排列较混乱的细条状或纺锤状  $\alpha$  相, 强化效果强。时效析出的  $\alpha$  相称为次生  $\alpha$  相, 也称为时效  $\alpha$  相<sup>[9]</sup>, 残留的  $\beta$  相称为时效  $\beta$  相<sup>[9]</sup>。

固溶 + 时效的热处理中, 固溶是为了调整组织形态, 并获得过饱和固溶体。时效处理是合金强化的主要过程, 时效的强化效果依赖于固溶冷却后残留的亚稳  $\beta$  相的含量和稳定性, 当亚稳  $\beta$  相含量越多且越不稳定时, 强化效果越强。固溶 + 时效热处理后合金得到强化, 也称强化热处理。

### 1.3.2 双重固溶 + 单重时效

对于“双重固溶 + 单重时效”的热处理工艺, 一般第一次固溶在接近  $\beta$  相变点的温度完成, 目的是控制初生  $\alpha$  相的含量, 然后以较快速度冷却, 形成初生  $\alpha$  相 + 马氏体相或针状  $\alpha$  相的组织。第二次固溶温度要低于第一次固溶温度, 固溶后进行空冷处理。在第二次固溶过程中, 初次固溶后组织中的马氏体相或针状  $\alpha$  相将转变为具有一定厚度的片层  $\alpha$  相。两次固溶后将形成初生  $\alpha$  相 + 一定厚度的片层  $\alpha$  相 + 残留  $\beta$  相的组织形态。

之后进行的单重时效处理和“单重固溶 + 单重时效”处理中的时效处理作用和效果是一致的。

双重固溶处理的第一重固溶处理可控制初生  $\alpha$  相的含量, 第二重固溶处理可控制片层状  $\alpha$  相的形态和尺度, 时效处理可进一步强化合金。“双重固溶 + 单重时效”热处理的优势是可以控制两次固溶和时效的温度和时间, 较为精确地控制初生  $\alpha$  相、次生  $\alpha$  相、时效  $\alpha$  相和时效  $\beta$  相的形态、含量和尺度, 获得可控的混合组织。特别是第二重固溶处理, 可以使第一重固溶冷却过程中生成的细片层  $\alpha$  相长大, 形成具有 3 种  $\alpha$  相形态的三态组织, 以提高合金的综合力学性能。图 2 为某钛合金单次固溶 + 时效(图 2a、2b)和双重固溶 + 时效(图 2c)处理后的显微组织。通过对比可以清楚地看到双重固溶处理对组织调控的优势。

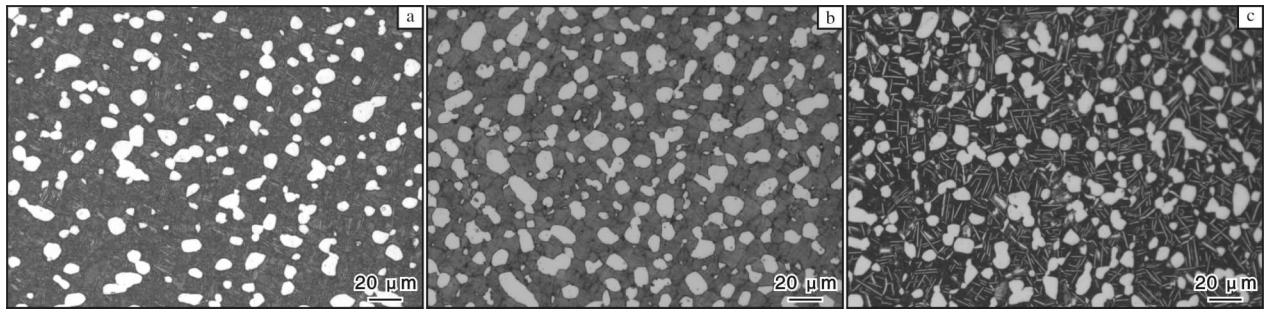


图2 钛合金经过单重固溶+时效和双重固溶+时效处理后的显微组织

Fig. 2 Microstructures of titanium alloy after different heat treatments: (a) 950 °C/3 h/AC + 580 °C/6 h/AC; (b) 935 °C/3 h/AC + 580 °C/6 h/AC; (c) 950 °C/2 h/AC + 935 °C/1 h/AC + 580 °C/6 h/AC

### 1.3.3 单重固溶+双重时效

“单重固溶+双重时效”和“单重固溶+单重时效”中固溶工艺的作用和原理相同。

双重时效工艺中的第一级时效温度一般选择低于普通时效温度。由于温度低，该温度下 $\alpha$ 相无法形核，但相对容易形核的 $\beta'$ 或 $\omega$ 过渡相可以弥散形核，发生 $\beta$ 相向 $\beta'$ 或 $\omega$ 过渡相的转变。第二级时效温度选择普通的时效温度。在第二级时效过程中，一次时效形成的 $\beta'$ 或 $\omega$ 相为 $\alpha$ 相的形核提供了高密度的形核位置，所以双重时效获得的 $\alpha$ 相更加均匀、细小，分布也更加弥散，进而获得更好的综合力学性能。目前，单重固溶+双重时效广泛应用于高强韧钛合金的热处理中<sup>[10,11]</sup>。

## 2 术语的区别与联系

文献[5]中对部分热处理术语的区别与联系进行了论述，但是针对钛合金的实际热处理，尚有更多容易混淆的概念，补充说明如下。

### 2.1 钛合金的退火和固溶

目前钛合金热处理术语混乱的焦点在于退火和固溶的混淆，部分技术人员认为这2种处理工艺没有实质区别，通常混同使用。工程应用中也对这两种处理工艺不加区分，将“固溶+时效”的热处理称为双重退火，将“双重固溶+时效”的热处理称为三重退火或多重退火，这有待商榷。

从前文论述可知，固溶和去应力退火、再结晶退火的目的及所获得的最终组织有较大差别。等温退火的典型特征是提供充分的条件，让合金发生扩散性质的相变，是合金软化、组织稳定化的过程，退火后的钛合金具有稳定的组织。固溶的目的则是为了获得过饱和和亚稳 $\beta$ 相，在此过程中不希望发生

相变。但对于多数钛合金，固溶过程中会不可避免的发生相变，析出片层状 $\alpha$ 相，从表象看与退火没有差别。但固溶处理过程中扩散获得 $\alpha$ 相不是该工艺的目的，其目的是获得过饱和固溶体。固溶后的合金因组织不稳定无法直接使用，必须进行时效处理，使过饱和固溶体脱溶沉淀，形成强化相，强化合金。所以在区别固溶与退火时，需从工艺目的来看，如果是为了强化合金，或是为了脱溶沉淀，就应该称为固溶。如果是为了发生扩散性质的相变，获得稳定的组织，就是退火处理。这种区分与实际过程中是否发生片层 $\alpha$ 相析出以及高温保温后的冷却方式均没有直接关系。例如，对于高Mo当量的亚稳 $\beta$ 钛合金，高温保温后即使在缓慢的速率下冷却，也难以析出过多的 $\alpha$ 相，依然可以保留大量亚稳 $\beta$ 相，在时效过程中这些亚稳 $\beta$ 相可以析出 $\alpha$ 相强化合金，这种处理就应该称为固溶。

一般固溶处理温度高于去应力退火温度和再结晶退火温度，与等温退火温度相当。所以在有些固溶处理过程中，也会发生合金组织的再结晶。对于这种热处理的区分，关键在于加热后的冷却处理，如果冷却速度较快，那么固溶冷却后保留的 $\beta$ 相不稳定，必须再进行一次较低温度的时效处理，使 $\beta$ 组织稳定，同时脱溶沉淀，强化合金，这种热处理则称为固溶+时效。相反，如果冷却速度缓慢，使得冷却后 $\beta$ 相已经充分保持组织和力学性能的稳定性，那么这种热处理就是退火。如果为了进一步稳定组织，在第一步退火的基础上，再进行一次较低温度的保温处理，使组织进一步稳定，那么即使第二次退火过程中有 $\alpha$ 相的沉淀析出，但其目的是稳定组织，而不是强化合金，经过两次处理后合金强度基本不变，塑性略有增加，这种热处理为双重

退火。

## 2.2 钛合金的退火和时效

钛合金时效和退火处理的区别相对较为明显,一般时效处理温度低于退火温度,其目的是为了脱溶沉淀,强化合金。时效处理后合金强度升高,塑性降低。而退火处理是为了稳定合金组织,在一定程度上消除加工缺陷,组织主要发生的是回复(去应力退火)、再结晶(再结晶退火)或者 $\beta \rightarrow \alpha$ 的近平衡相变(等温退火)。但这种转变主要是为了稳定组织,而不是为了强化合金。

## 2.3 术语的组合

从钛合金常用术语搭配来看,“固溶+时效”是准确的,固溶是为了获得过饱和固溶体,时效是为了让过饱和固溶体分解,沉淀析出,属于经典的钛合金热处理术语组合。“淬火+时效”是准确的,结合文献[5]和本文的分析,这是钛合金热处理的一个特征,也是钛合金热处理被称为“第三类”热处理的标志。“固溶+退火”是不准确的,固溶是为了获得过饱和亚稳 $\beta$ 相,目的是为了强化合金,而后续退火是为了稳定组织,降低强度、提高塑性,前后矛盾。“退火+时效”是不准确的,退火是为了充分相变,稳定组织,不希望保留不稳定的过饱和亚稳 $\beta$ 相,而时效却是为了亚稳 $\beta$ 相的分解,强化合金,

两者前后矛盾。“退火+退火”是准确的,通过两级退火,可以充分稳定组织,稳定性能,而不是为了强化合金。“退火+退火+退火”虽然从理论上讲可以认为是准确的,但实际大多是和“双重固溶+时效”和“单重固溶+双重时效”相混淆的,需要根据实际情况仔细区分。

## 3 特殊热处理

除上述退火、固溶+时效、淬火+时效3种热处理工艺外,根据应用性能的需要,还开发出许多特殊的钛合金热处理工艺,最为典型的是高强韧钛合金的BASCA<sup>[7,8]</sup>。该工艺主要是为了满足近年来航空飞行器损伤容限的设计需要。损伤容限设计要求合金受到损伤后依然具有良好的抵抗裂纹扩展能力。对于高强韧钛合金,由于Mo当量高,无论何种热处理, $\beta$ 转变组织中 $\alpha$ 片层尺寸均非常细小,这种尺寸细小的 $\alpha$ 相虽然可以带来较高的强度,但是对应的抗裂纹扩展能力较弱,合金断裂韧性往往较低。BASCA热处理工艺(如图3所示)是在相变点以上温度( $T_1$ )热处理后,缓慢冷却至一定温度( $T_2$ )保温一段时间,然后再冷却至室温,最后进行较高温度( $T_3$ )时效处理后,可以获得粗大片层的魏氏组织。从 $\beta$ 相缓慢冷却到较低温度过程中,由于冷却速度

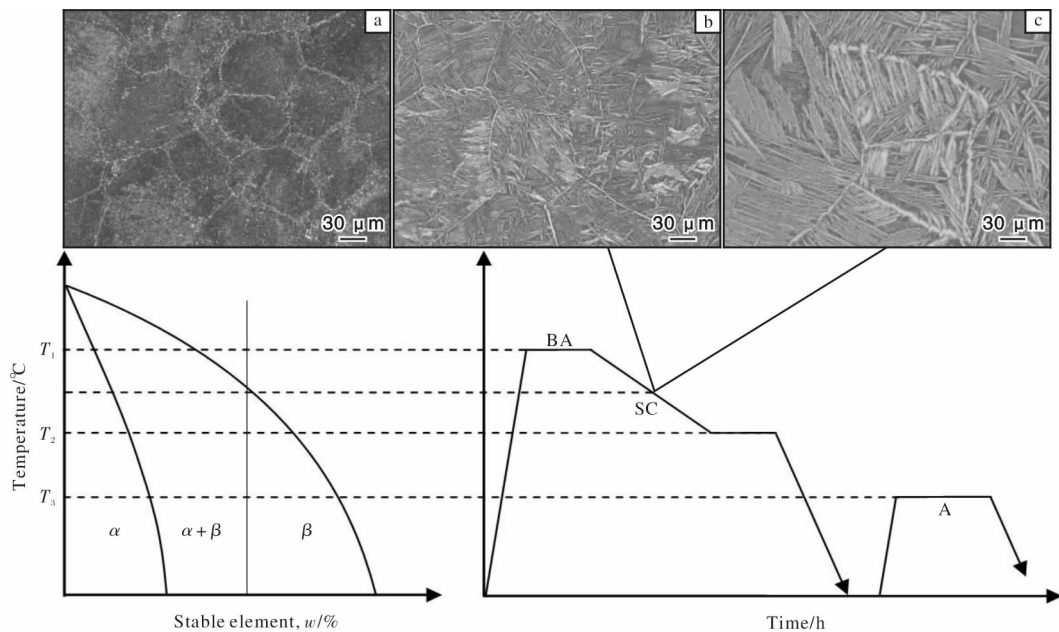


图3 钛合金的BASCA热处理工艺曲线及Ti-5321合金显微组织

Fig. 3 Heat treatment curves of BASCA for titanium and microstructures of Ti-5321 alloy after BASCA treatments: (a) 880 °C/2 h/AC + 620 °C/6 h/AC; (b) (880 °C/2 h) + (3 h/FC→780 °C/AC) + (620 °C/6 h/AC); (c) (880 °C/2 h) + (3 h/FC→750 °C/AC) + (620 °C/6 h/AC)

极慢,  $\alpha$  片层得到充分的析出与长大, 这是 BASCA 热处理工艺的核心。通过这种热处理, 虽然  $\alpha$  相的尺寸会长大, 损失一定的强度, 但可以获得极为优异的断裂韧性。图 3 中还给出了笔者课题组对 Ti-5321 合金进行 BASCA 热处理后的显微组织。从图 3 可以看出, BASCA 工艺的核心是  $T_2$  温度的选择以及从  $T_1$  到  $T_2$  缓慢冷却(SC)的速率。 $T_2$  温度的选择是为了保障合金在平衡相图中有可以供析出  $\alpha$  相的含量,  $T_2$  温度越低, 可以提供  $\alpha$  相析出的含量就越多, 最终才有可能生成较大尺寸的片层  $\alpha$  相。对照前文, 可以认为 BASCA 工艺是固溶 + 时效工艺的一个变异, 即将固溶转变为近似等温退火, 为  $\alpha$  相的充分析出和尺寸长大提供条件。但是, 其并没有缓慢冷却至室温, 保留了一部分可供时效分解的亚稳  $\beta$  相, 故可以称为时效。按照前文原则, 如果 BASCA 热处理的  $T_2$  温度足够低, 缓慢冷却过程中亚稳  $\beta$  相得以充分转变, 那么 BASCA 工艺中最后的字母“A”应该为退火(annealing), 而不是时效(ageing)。如果这样退火处理, 钛合金的强度将会显著降低<sup>[7]</sup>, 失去高强钛合金的本征意义。因此, BASCA 热处理工艺的核心是通过合理选择  $T_1$ 、 $T_2$  和 SC 速率, 从而获得理想尺寸和数量的片层  $\alpha$  相, 以实现高强度、塑性和断裂韧性的匹配。

此外, 转炉热处理也是一种常见的特殊热处理工艺<sup>[1,2]</sup>。大部分转炉热处理工艺可以认为是一种变异的 BASCA 热处理工艺, 其特征是直接转移至二级温度的炉内进行保温, 而不经缓慢冷却, 目的是为了使  $\beta$  相充分分解, 析出尺寸较大的片层  $\alpha$  相。转炉热处理的保温过程近似于等温热处理, 和 BASCA 相似, 主要应用于高强韧钛合金或者对韧性有较高要求的钛合金。

## 4 结 语

热处理是钛合金材料工艺处理中非常重要的环节, 对于改良合金组织、优化合金力学性能必不可少。但关于钛合金热处理的术语却处于一种模糊状态, 对于“退火”、“固溶”、“淬火”、“时效”的使用不够规范, 似乎很难找出它们较为明确的定义和界限。对此可能存在 2 种情况: 第一种情况是大部分科研人员是清楚它们的区别与联系的, 但认为它们的界限不明显, 或者在部分场合, 无需区分, 特别是对于一些处于“边界”的热处理; 第二种情况是

技术人员本身不清楚, 特别是一些刚进入钛合金领域的技术人员, 由于不清楚这些热处理术语的区别与联系, 也就无法充分领会不同热处理的技术内涵以及它们如何作用于钛合金的组织 and 力学性能。对于上述第一种情况, 希望通过本文将此问题提出, 引发共同讨论, 进一步明确和规范钛合金热处理的专业术语。对于上述第二种情况, 希望通过区分不同热处理深入探究钛合金热处理工艺的实质, 为钛合金领域的初学者或从事钛合金热处理的技术人员提供借鉴, 充分领会不同热处理工艺是如何设计和创造具有自己标签的特征组织, 在制定相关热处理工艺时能够有的放矢, 从而更好地服务于最终的力学性能。

## 参考文献 References

- [1] 莫畏. 钛[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 661 - 668.
- [2] 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: 206 - 212.
- [3] 鲍利索娃 E A. 钛合金金相学[M]. 陈石卿, 译. 北京: 国防工业出版社, 1986: 157 - 186.
- [4] 徐祖耀. 相变原理[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 116 - 150.
- [5] 辛社伟, 赵永庆. 钛合金固态相变的归纳与讨论(IV)——钛合金热处理的归类[J]. 钛工业进展, 2009, 26(3): 26 - 29.
- [6] 辛社伟, 赵永庆. 关于钛合金热处理和析出相的讨论[J]. 金属热处理, 2006, 31(9): 39 - 42.
- [7] Zhou W, Zhao Y Q, Xin S W, et al. Lamellar features and mechanical properties of Ti-5321 alloy at different cooling rates of BASCA treatment[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(7): 2314 - 2318.
- [8] Wang H, Zhao Y Q, Xin S W, et al. Fatigue crack propagation behaviors in Ti-5Al-3Mo-3V-2Zr-2Cr-1Nb-1Fe alloy with STA and BASCA heat treatments[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 151: 10638 - 10652.
- [9] 辛社伟, 赵永庆. 钛合金固态相变的归纳与讨论(VI)——阿尔法[J]. 钛工业进展, 2013, 30(4): 1 - 8.
- [10] Nag S, Banerjee R, Srinivasan R, et al.  $\omega$ -Assisted nucleation and growth of a precipitates in the Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-0.5Fe  $\beta$  titanium alloy[J]. Acta Materialia, 2009, 57(7): 2136 - 2147.
- [11] Jones N G, Dashwood R J, Jackson M, et al.  $\beta$  phase decomposition in Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr[J]. Acta Materialia, 2009, 57(13): 3830 - 3839.