

钛合金固态相变的归纳与讨论 (VIII) —— 利用 三类 α 相设计三态组织

辛社伟

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘要: 针对钛合金复杂显微组织结构和认识需求, 在传统钛合金金相学理论知识基础上, 对钛合金的显微组织结构进行了进一步解析, 指出钛合金的显微组织结构可以从形态学和结构学两个方面理解。以形态学为基础, 提出钛合金中的 α 相可以根据生成阶段的不同, 分为一次 α 相、二次 α 相和三次 α 相, 并对三类 α 相进行了定义。最后, 以两相钛合金为例, 说明如何利用三类 α 相设计三态组织, 从而更好地协调不同性能对组织要求的冲突性。

关键词: 钛合金; α 相; 形态学; 三态组织

中图分类号: TG146. 23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2022)04-044-05

Inductions and Discussions of Solid State Phase Transformation of Titanium Alloy (VIII) —Preparation of Triple-modal Microstructure According to Three Kinds of α Phase

Xin Shewei

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

Abstract: According to the structure design and understanding requirements of complex microstructure of titanium alloy, the microstructure of titanium alloy is further analyzed on the basis of conventional titanium metallography. It is pointed out that the microstructure of titanium alloy can be comprehended by two sides of morphology and structure. On the basis of the morphology of α phase, α phase can be distinguished to three kinds of first α , secondary α and third α according to their transformation process. And then the three kinds of α phase are interpreted and defined. Lastly, taking two phase titanium alloy as an example, it is explained that how to design triple-modal microstructure using three kinds α phase, which will effectively coordinate the conflict of different mechanical properties on microstructure.

Key words: titanium alloy; α phase; morphology; triple-modal microstructure

工艺决定组织结构, 组织结构决定力学性能。因此, 显微组织结构一直是钛合金研究的核心。从第一个工业化应用钛铸锭开始, 到现在已经过 70 余年的发展, 钛合金金相学形成了较为完整的理论体系, 也出版了大量的文献^[1-4]。在这些文献中, 对不同类型钛合金的组织形态、相种类、相结构以及不同相之间的晶体学转变关系都有较为详细的解释。

尽管如此, 相对于传统钢铁材料数千年的发展历史, 钛合金知识体系仍然非常年轻。随着工程应用要求的不断提高和新工艺的不断出现, 现有的钛合金金相学知识有时难以满足我们更细致地理解复杂工艺带来的特殊组织。再加之现今国内钛产业处于爆发式增长期, 从事相关科研和生产的人员越来越多, 因受众群体知识层次的不同, 对钛合金显微组织结构相关知识提出了越来越精细的要求。特别是对于广大工程技术人员, 亟需对钛合金显微组织结构进行更为清晰的阐释, 对一些相形态的命名更细致、具体, 从而更好地指导工程实践。基于以上目的, 本文在现有钛合金金相学知识体系的基础上, 对钛

收稿日期: 2021-11-06

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(5207011470); 装备预研冲击环境材料技术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。

合金显微组织结构进行了解析,对钛合金中的 α 相进行了更为具体的区分,最后以工程应用为目标,利用不同类型 α 相设计了一种三态组织。所阐述内容对于钛合金领域初学者和工程技术人员理解和设计钛合金显微组织结构具有一定的指导意义。

1 钛合金显微组织结构的解析

从表述上来讲,金属材料的显微组织结构都倾向于使用一个词汇“microstructure”。实际上从对金属材料组织的理解来说,该词汇包含两层含义。第一层含义是基于形态学(morphology)的理解,可以用图像、影像(image)来表述,它代表的是组织形态,是通过肉眼、光学显微镜、扫描电镜直观地反映于人的脑海,具有主观性,只有定性的描述,没有精确的定义。目前,钛合金中典型的四大组织分类——等轴组织、双态组织、网篮组织和魏氏体组织即是组织形态的典型代表。这4种组织是伴随钛合金相学的长期发展而约定俗成的,其名称充分体现了形态学的概念。比如网篮组织,其全称是“片层 α 相相互交织成像网篮形状一样的组织”,是为了从形态上区分有明显晶界 α 相、并且晶内片层 α 相呈平行排列成不同集束的魏氏体组织。再比如双态组织,是2种状态(等轴和片层) α 相同时存在,并且具有均衡的地位,是为了区别以等轴 α 相为主,片层 α 为辅(片层 α 相太少,无法独立支撑一种状态)的等轴组织。上述钛合金的组织形态是基于形态学的区分,没有严格的定义,因此从组织形态角度出发,也会有其他不同的命名,比如混合组织、三态组织等。甚至由于个人主观性,同一种组织出现不同的命名。

“microstructure”的第二层含义即“结构”,英文词汇为“structure”,这个词描述的是相(phase)。提到structure,想到的是晶格结构,原子排列方式不同构成不同的晶格,属于晶体学(crystallography)的范畴。对它的描述准确、科学,没有任何似是而非的东西。对于钛合金,涉及到结构学(晶体学)的主要结构(相)有 α 、 α' 、 α'' 、 α_2 、 ω 、 β' 、 β 等7种相,他们不但具有自己严格的晶体学结构,而且相互转换符合一定的晶体学关系。

由此可见,组织形态与相结构是完全不同的两个概念,一个属于形态学(morphology),一个属于晶体学(crystallography),它们共同构成了材料的显微

组织结构(microstructure)。因此,对于钛合金,如果提到“双相”组织,则是从结构学上对组织进行命名,与形态无关,凡是含有 α 相和 β 相的所有组织都是双相组织,其中等轴组织、双态组织、网篮组织和魏氏体组织都属于双相组织。这种命名主要是区别于纯钛、近 α 钛合金的全 α 相组织和 β 钛合金的全 β 相组织。而双态组织则是从形态学上对组织进行区分,不涉及结构学,指的是片层状 α 相(一种形态)和等轴 α 相(第二种形态)共同存在,并且形成均势。其主要是为了区别于等轴组织、网篮组织和魏氏体组织。

2 基于形态学的三类 α 相的定义

从上述钛合金显微组织结构解析中可以看到,对于普通的钛合金组织,结构学区分相对简单,仅涉及 α 和 β 两个相,分为双相组织($\alpha+\beta$ 相)和单相组织(单独 α 相或 β 相)。而形态学相对复杂,因为在实际中由于加工和热处理工艺的不同,造成 α 相的形态千差万别,但是这些千差万别的 α 相形态总体可以归为两类,一类是长轴和短轴差别较大的片层状,另一类是长轴和短轴几乎相等的等轴状。前文提到的4类组织就是根据片层状和等轴状 α 相含量和排列方式的不同而进行区分的。

从形态学来说, α 相形态几乎决定了钛合金的组织形态,它是钛合金组织形态区分的基础。而造成 α 相形态千差万别的主要原因是工艺过程的不同。目前,现有资料根据工艺过程将 α 相区分为初生 α 相和次生 α 相。多数情况下材料的终锻在双态区进行,初生 α 相对应等轴状,次生 α 相对应片层状。而实际上,广义的片层 α 相根据长轴和短轴的不同包含更多形态,比如针状、粗片层状、细片层状、竹叶状、纺锤状等。所以,为了更清楚地基于 α 相形态学表述钛合金的显微组织,文献[5]仿照钢中渗碳体的命名,根据热处理过程中 α 相生成阶段的不同,将钛合金的 α 相更细致地区分为三类,分别为一次 α 相、二次 α 相和三次 α 相,或者初生 α 相、次生 α 相和时效 α 相。具体定义归纳如下。

一次 α 相:在固溶阶段保留的 α 相为一次 α 相,也可称为初生 α 相。这种 α 相大都遗传于锻造过程,其形态也依赖于锻造过程。由于现有的钛合金锻坯大都是在双态区锻造,因此初生 α 相形态大多为等轴状。当锻坯在 β 相区锻造时初生 α 相为片层状。

不同工艺锻造的钛合金经过固溶处理后, 初生 α 相的含量与固溶温度有关, 其形态与固溶前原始组织形态有关。

二次 α 相: 钛合金固溶后, 在冷却过程中除初生 α 相以外的组织会析出 α 相, 这个过程生成的 α 相为二次 α 相, 或称为次生 α 相。根据经典的形核和长大理论, 这部分 α 相生成时由于冷却速率大, 其形态一般呈片层状。片层长轴和短轴比由冷却速率决定, 冷却速率越大, 片层越细, 排列交错程度越高。

三次 α 相: 固溶冷却生成二次 α 相以后, 除一次 α 相以外的组织是一个混和组织, 由片层状的二次 α 相和二次 α 层间的残留 β 相组成。组织中残留的 β 相在时效过程中会发生分解, 形成 α 相和残留 β 相, 这种 α 相称为三次 α 相, 也可以称为时效 α 相, 残留 β 相称为时效 β 相。对于给定的合金, 时效 α 相的形态和含量由固溶温度、固溶后冷却速率、时效温度和时效时间确定, 当固溶温度和冷却方式固定后, 三次 α 相形态和含量由时效温度和时间确定, 符合经典的形核和长大理论。

这种对 α 相的区分和传统钛合金组织命名中只有初生 α 相和次生 α 相的表述不同, 其将次生 α 相更细致的区分为二次 α 相和三次 α 相, 更有利于对钛合金显微组织的分析与解析。

3 利用三类 α 相设计三态组织

目前在钛合金组织命名上, 通用的方法是以等轴 α 相和片层 α 相的比例和排列方式进行区分, 因此, 同时具备等轴 α 相和片层 α 相的所谓混合组织就是双态组织, 其对应的 2 种 α 相分别为传统意义的初生 α 相和次生 α 相, 通过固溶 + 时效来实现。在这种工艺条件下本文定义的二次 α 相和三次 α 相形态相似, 无法在形态上独立, 形成所谓的三态组织。然而随着现代高强韧钛合金的发展, 材料自身需要同时满足强度、塑性、断裂韧性和疲劳性能的要求, 具有良好的综合力学性能。从金属学原理上讲, 合金的强度、塑性、韧性对组织的要求是冲突的^[6], 所以为适应现代航空材料的发展要求, 合金需要具有更加混合折中的组织, 这样才能协调不同性能对组织要求的冲突性。而传统热处理获得的混合组织(双态组织)无法对二次 α 相和三次 α 相进行设计和形态区分, 仅能形成等轴和片层 2 种形态的混合组织, 这或许也是目前传统组织命名中将二次

α 相和三次 α 相统称为次生 α 相的原因。

针对传统热处理工艺的局限性, 在前文三类 α 相定义的基础上, 设计出一种近 β 双重固溶处理工艺。该工艺可以分别有效控制一次 α 相、二次 α 相和三次 α 相的形态和含量, 将二次 α 相和三次 α 相从形态上独立出来, 形成一种三态组织。选择某两相高强韧钛合金为目标, 首先对该合金进行从相变点以上到相变点以下不同温度的固溶处理, 获得 α 相与固溶温度的曲线关系, 如图 1 所示。以该关系图作为后续固溶温度的选择依据, 进行以下固溶处理。

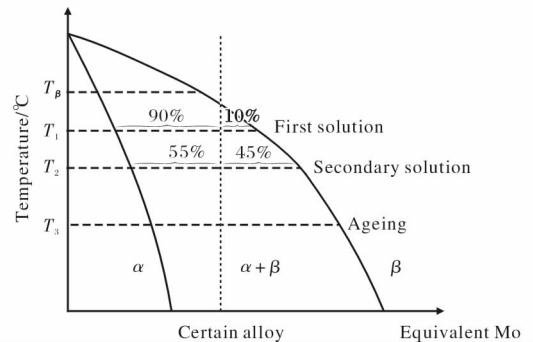


图 1 某双相钛合金近 β 双重固溶处理工艺图

Fig. 1 Process diagram of double solution treatment at near β temperature for certain two-phase titanium alloy

(1) 选择在相变点以下接近相变点的 T_1 温度进行一次固溶处理。 T_1 的选择依据是一次 α 相的含量, 一般将一次 α 相控制在 10% ~ 15% 为佳。由于已经通过实验获得了合金 α 相含量与固溶温度的关系曲线, 因此通过 T_1 的选择很容易精确控制一次 α 相的含量。一次固溶后合金的显微组织示意图如图 2a 所示。

(2) 对一次固溶后的合金进行空冷处理, 合金中将会析出细针状二次 α 相。一次固溶冷却后合金的显微组织示意图如图 2b 所示。

(3) 选择低于一次固溶温度的 T_2 温度对合金进行二次固溶处理。该固溶温度下一次 α 相基本保持不变(尺寸稍有增加), 二次 α 相长大。二次 α 相含量是该固溶温度下 α 相的总含量减去一次 α 相的含量。根据图 1 曲线关系很容易获得到 T_2 温度下 α 相的总含量, 而一次 α 相含量是已知的, 因此很容易根据需要控制二次 α 相含量。二次固溶后合金的显微组织示意图如图 2c 所示。

(4) 二次固溶过程中, 由于残留 β 相尺寸小(图 2c), 组织稳定性提高, 冷却过程中几乎不形成或者

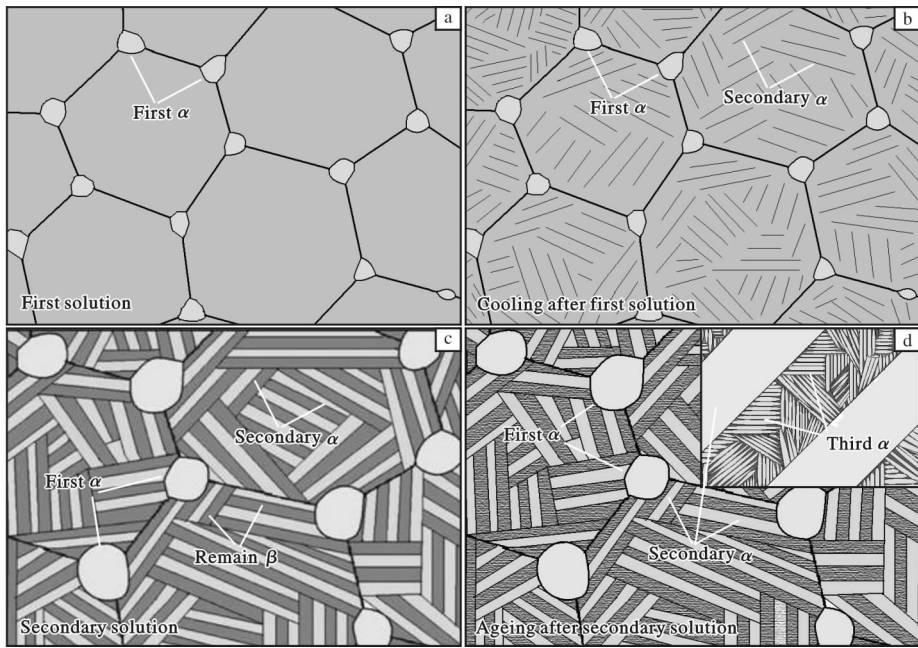


图2 某双相钛合金近 β 双重固溶处理过程中不同阶段的组织示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of microstructures at different stages of certain two-phase titanium alloy after double solution treatment at near β temperature; (a) first solution treatment; (b) cooling after first solution treatment; (c) secondary solution treatment; (d) ageing after secondary solution treatment

形成的针状析出相很少, 无法独立形成状态。

(5) 对二次固溶后的样品进行 T_3 温度的时效处理, 时效过程中残留 β 相会分解形成三次 α 相, 三次 α 相的尺寸和含量依赖时效温度和时效时间。时效后的组织示意图如图 2d 所示。

由以上可以看到, 这种专门针对三类 α 相的近 β 双重固溶处理, 第一重固溶处理可以有效将合金中的一次 α 相含量控制在最佳范围内。第一重固溶处理后采用空冷方式冷却, 可保证冷却过程中产生的主要是针片状 α 相, 而且针片状 α 相呈一定集束排列。第二重固溶处理, 可以有效地使第一重固溶处理冷却过程中产生的集束状排列的针片状 α 相长

大成为一定尺寸的片层状 α 相。同时, 第二重固溶温度可以保证片层 α 相的含量在理想范围内 (10% ~ 15%), 达到有效控制次生 α 相形态、尺寸和含量的效果。此后, 时效可以有效使第二重固溶处理后残留的 β 相分解为形态明显有别于二次 α 相的更细小尺寸的三次 α 相。最终形成一种可控的具有 15% ~ 20% 初生 α 相、10% ~ 15% 次生片层 α 相、65% ~ 75% 的“三次 α 相 + 时效 β 相” (由于三次 α 相尺寸过于细小, 无法单独统计含量) 的三态混合组织, 这种混合组织具有更为优异的综合力学性能。图 3a 为该两相高强度钛合金经传统固溶 + 时效处理获得的该显微组织, 组织是一种典型的双态组织, 无法区分

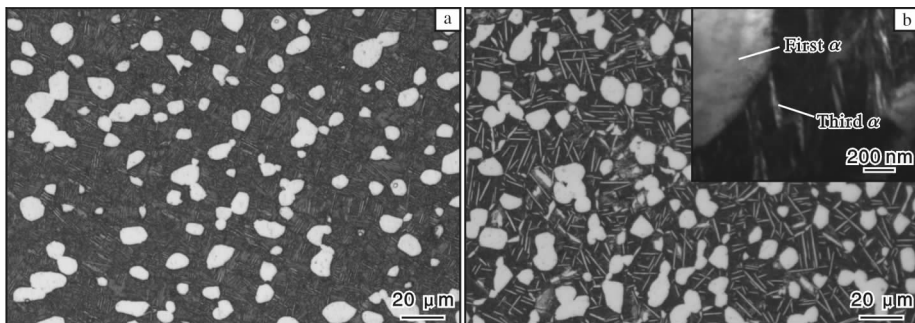


图3 某双相钛合金经不同工艺热处理后获得的双态组织和三态组织

Fig. 3 Bimodal microstructure and triple-modal microstructure of certain two-phase titanium alloy heat treated by different processes; (a) general solution + ageing treatment; (b) double solution treatment at near β temperature

二次 α 相和三次 α 相。图3b为经近 β 双重固溶处理获得的组织,其中右上角TEM组织显示三次 α 相形貌。从图3b可以明显看到,一次、二次和三次 α 相形态完全不同,各有独立的形态,形成了不同于传统组织的三态组织。

4 结 语

相对于钢铁材料而言,钛合金金相学依然是一门年轻的学科。随着钛合金应用的发展,对其显微组织的理解提出了更高的要求,本文在现有知识体系的基础上,对钛合金显微组织结构提出了更细致的解释,具体如下。

(1) 提出钛合金的显微组织结构(microstructure)分为两个方面理解,一个是形态学(morphology),其对应的表述是影像(image);一个是结构学(structure),其对应的表述是相(phase)。这种解析对于工艺(热加工或热处理)对钛合金显微组织的选择与控制的科学原理以及钛合金显微组织结构分析测试方法的选择具有基础的指导意义。

(2) 以形态学(morphology)为基础,提出钛合金中的 α 相根据生成阶段的不同,分为一次 α 相、二次 α 相和三次 α 相,或者称为初生 α 相、次生 α 相

和时效 α 相,这种区分方法更能清楚地对钛合金不同组织形态进行区分和解析,为清楚认识钛合金显微组织提供了有益的指导。

(3) 基于三类 α 相的区分和阐释,以典型双相高强韧钛合金为例,设计出一种近 β 双重固溶处理工艺,该热处理可以有效控制一次 α 相、二次 α 相和三次 α 相的形态和含量,从而形成一种不同于传统组织的三态组织。

参考文献 References

- [1] 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,1980:187.
- [2] Leyens C, Peters M. Titanium and Titanium Alloys [M]. Wiley-VCH: Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003.
- [3] Lütjering G, Williams J C. Titanium [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007
- [4] 赵永庆,辛社伟,陈永楠,等. 新型合金材料——钛合金[M]. 北京:中国铁道出版社,2017.
- [5] 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.
- [6] 辛社伟,周伟,李倩,等. 1500 MPa 级新型超高强中韧钛合金[J]. 中国材料进展,2021,40(6):441-445.

行业动态

2022 年钛锆铅分会年会暨钛锆铅产业发展高峰论坛在宝鸡召开

7月28日,2022年钛锆铅分会年会暨钛锆铅产业发展高峰论坛在“中国钛谷”宝鸡举行。本次大会以“坚持绿色发展,推动技术创新”为主题,由中国有色金属工业协会主办,宝钛集团有限公司、西北有色金属研究院联合主办,中国有色金属工业协会钛锆铅分会承办,并得到了新疆湘润新材料科技有限公司、攀钢集团有限公司、湖南湘投金天科技集团有限责任公司等国内多家知名企业以及中国有色金属报社、《钛工业进展》、钛微媒等行业媒体的大力支持。本次大会吸引了来自国内高校、科研院所和钛锆铅行业企业的300余名代表参加。

大会开幕式由中国有色金属工业协会钛锆铅分会会长王文生主持,全国政协常委,中国有色金属工业协会党委书记、会长葛红林;宝鸡市委书记杨广亭;西北有色金属研究院党委书记、院长张平祥;宝钛集团有限公司党委副书记、总经理雷让岐先后为大会致辞。葛红林在致辞中讲到,钛作为我国重要的基础原材料产业,不仅在国防科技、航空航天、深海开发等国家重大工程中扮演着越来越重要的角色,而且近年来在民品应用上也不断取得新的突破,不断呈现蓬勃发展的新态势。我国钛产业规模不断扩大,行业龙头企业作用凸显,装备和工艺技术不断进步,“专精特新”企业不断涌现。然而,我国钛产业发展仍面临着产业高端不能完全满足需求、钛加工产业中低端产能过剩、产业集中度不高、资源瓶颈依旧存在等问题与挑战。

开幕式后,钛锆铅分会副会长兼秘书长安仲生对《2021年中国钛工业发展报告》进行了详细解读,宝钛研究院新材料实验室副主任刘继雄、攀钢集团攀枝花钛材有限公司二级专家姜宝伟、新疆湘晟新材料科技有限公司总经理罗衡、北京科技大学冶金与生态工程学院院长焦树强等先后围绕钛合金科研生产、低成本制备技术、绿色低碳发展、全钛产业链高质量发展、钛电化学提取等主题作了精彩的大会报告。

7月29日上午召开了油气开采用钛合金管技术交流会;下午与会代表先后参观了宝钛集团宝钛工业园、宝鸡宝钛精密锻造有限公司、陕西大力神航空新材料科技股份有限公司和宝鸡核力材料科技有限公司。(本刊通讯员)