

关于 Ti 合金界面相的研究进展

刘 勇 朱景川 尹钟大

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院 哈尔滨 150001)

摘 要 回顾了有关钛合金界面相研究的情况,包括界面相的微观形态及与基体的位相关系、界面相的形成及对力学性能的影响,并对各种观点进行了初步的评述。

关键词 钛合金,界面相,力学性能

Research Progress of Titanium Alloy Interface Phase

Liu Yong Zhu Jingchuan Yin Zhongda

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology Harbin 150001)

Abstract Study of interface phase in Ti alloy is reviewed, including microscopic pattern of interface phase and orientations with other phases, and the effects of interface phase formation on mechanical properties. Various viewpoints are initially summarized.

Key words Titanium alloy, Interface phase, Mechanical property

1 前言

钛合金因具有高的比强度、耐腐蚀性而受到人们的青睐,在航天、航空、化工设备等领域得到广泛的应用^[1]。界面相是人们近年来感兴趣的问题之一,界面相可能成为裂纹萌生的地点或易于扩展的途径,从而对力学性能产生很大的影响,因此研究界面相不仅有很重要的理论意义,而且对改善钛合金的力学性能有重要的意义,但目前学术界对界面相的结构、形成及对力学性能的影响仍有很大的争议。

2 界面相的微观形态及与基体的位向关系

界面相指钛合金中 α 相及 β 相之间的结构,又称为界面层(interfacial layer)。Rhodes^[2]等最先报道了有关 Ti - 6Al - 4V 中界面相的研究。他们认为界面相是由高密度的条纹组成,它们源于 α/β 相交界面处,向 α 相内部生长。界面处并不单纯是高密度位错区,因它给出了完整的衍射图。界面相有两种形态:一种为条纹状(striated layer),是一种位相关系不

同于原来 α 相的新相,可以称为 β' 型(原来的 α 相为 α 型);二是板块状结构(Monolithic layer),这种结构为面心立方型,点阵常数为 4.2×10^{-10} m。

Rhodes 及 Paton 在另一篇文章里延续了上述部分论点,但又有一些发展和改进的地方^[3]。他们认为,在 Ti - 6Al - 4V 中,界面相有两种形态,包括内部结构较多的条纹状界面相及内部结构较少的板块状界面相;后者具有面心立方结构的界面相结构。在板块状界面相中,点阵参数为 4.26×10^{-10} m,且存在位相关系:

$$\begin{aligned} (110) & (1-11)_{\text{fcc}}, [-111] [110]_{\text{fcc}} \\ (0002) & (1-11)_{\text{fcc}}, [11-20] [110]_{\text{fcc}} \end{aligned}$$

位相关系说明,板块状界面相和母相中 α 相呈 K-S 关系,和母相中的 β 相之间也存在对应的原子密排面相互平行,密排方向相互平行的关系。有时,

收稿日期:2001-06-13

刘勇,1975年出生,博士研究生,主要从事钛合金应力松弛行为及界面相的研究工作

板块状界面相中也可发现少量的内在条纹,迹线分析表明,这些条纹分布在面心立方结构界面相(111)平面上,可能为孪晶或堆垛层错。条纹状界面相由密排的平面状物组成,向相内部生长。迹线分析表明,它们平行于相的基面。虽然它们和已被观察到的型相相似,但在这应被标定为具有孪晶变形和未经孪晶变形的面心立方结构,且有如下位相关系:

$$[111] \quad [11 - 20] \quad [110]_{fcc}$$

Banerjeer 等认为^[4~6],界面相具有密排六方与面心立方两种结构。对密排六方结构的界面相,与原柏格斯相成(10 - 11)的孪晶关系的有6种变体,分别记为A、A',B、B',C、C',其中仅有A、A'与相成柏格斯关系;另外,还有一种与原柏格斯相成(10 - 12)孪晶关系。

对于面心立方结构的界面相,它与原柏格斯相的关系有:

$$(1 - 10)_{fcc} \quad (1 - 100) \quad [001]_{fcc} \quad [0001]$$

$$(111)_{fcc} \quad (0001) \quad [1 - 10]_{fcc} \quad [11 - 20]$$

上述两种面心立方结构的界面相可以分别称为型和型。在BT9中,型有三种变体,只有一种变体A存在于/相界面上,与相保持特殊位向关系,另外两种穿过相层。在IM685合金中,只有A型变体;型面心立方结构的界面相以相(0001)面上有关的孪晶形式存在,其形成可能与相基面上的层错有关。在界面相相貌观察上,板条状界面相往往与型面心立方结构的界面相相联系,条纹状界面相与型面心立方结构的界面相有关。

Margolin 指出^[7],相与相界面处不仅取向关系与原相不同,而且有高度密集的位错。并且认为界面相中由取向关系不同的另一种六方相组成。在界面处及基体相之间可能存在(10 - 11)的孪晶关系。

关于界面相的微观形貌及位相关系的研究还有很多,国内也有学者展开研究^[8],不同的研究者得出的结果有相同的地方,也有许多争议。

3 界面相的形成

关于界面相的形成,公认有以下的特点。

(1)与冷却速度有关。冷速快,易于出现条纹状界面相;冷速慢,易于出现板块状界面相。淬火时,

没有界面相的生成。可见,界面相的生成与原子的扩散有关。

(2)界面相有相当的热稳定性。如果在一定的温度之内加热,界面相并不消失。

(3)界面相的生长与相的数量有关。相多,则界面相宽度变大。

Mahajan^[9]用场离子显微镜进行了有关的成分分析,研究表明,Mb、Al等成分在界面相及其附近呈很大的浓度梯度分布,而Zr、Sn浓度变化不明显。

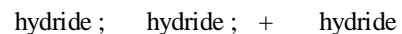
Rhodes^[3]认为界面处化学成分的浓度梯度分布是形成界面相的必要条件。他认为面心立方结构的界面相是体心立方相向密排六方相转变的过渡相。这种界面相产生(111)孪晶而形成条纹状物。无论是在发生孪晶变形的面心立方结构的界面相中,还是在未发生孪晶变形的面心立方结构的界面相中原子均沿112向切变,从而在母相及孪晶体中产生相。二者和由他们产生的相的位相关系分别如下(P代表母相,T代表孪晶相):

$$(0001) \quad (111)_P \quad (1 - 11)_T$$

$$[1 - 20] \quad [110]_P \quad [110]_T$$

而化学成分的不均匀性为其提供了驱动力。另外由于转变时相、相晶格常数的差异,转变时相产生压应力,为了松弛应力,导致了有关fcc结构界面相中孪晶的产生。总之,这种观点认为界面相为界面特性而带来的过渡结构。

Banerjee^[4~6]认为:六方结构的界面相是应力诱发相,是由于试样减薄时吸氢而导致相的体积扩张产生的。相晶格的扩张,使相处于压缩状态,而导致此相进行孪晶或滑移。因为,如果相对于周围的相体积很小时,孪晶是合适的变形方式。对于fcc结构的界面相,作者认为是钛的氢化物。相图分析表明下列反应是可能的:



作者进一步提出,这种氢化物的生成可能为块状转变机制或切变机制。

这种观点的最大的问题在于这种转变需要相当高浓度的氢,如何解释氢的浓度达到这么高的水平?按照此观点,如果氢含量特别低,那么相转变时应该只观察到hcp界面相而没有fcc界面相,可否用实验验证?另外,相变时,两相受不同的应力状态,应是有两相晶格常数的差异及其他元素的不均

匀分布引起的,不仅仅是氢的作用。

Margolin 研究成果表明^[7],在 Ti - 43Mn 中,界面相中六方相不仅取向关系不同于母相,而且是位错密度极高。在 Ti - 6Al - 2Sn - 4Zn - 6Mo 合金中,六方界面相及基体相之间存在{101 - 1}孪晶关系。并且进一步指出,界面相的生成合金在钛合金冷却过程中相析出时的伴生现象。由于相向相的扩张伴有体积扩张,体积应变导致了界面相的产生。

T. T. Te 及 H. Ling^[10,11]研究表明机械孪晶是密排六方结构界面相形成的机制之一。在 Ti - 5Zr - 3Nb 中,进行低温拉伸试验,发现母相中柏格斯相有{11 - 22}及{10 - 12}两种孪晶形态。{11 - 22}孪晶可能穿过相;而{10 - 12}孪晶如果呈带状沿相与相的界面分布,则形成界面相。

Spurling^[12,13]特别研究了透射电镜试样减薄过程对界面相的影响,认为界面相可能是试样减薄时形成的人工产物或假象。

4 界面相对力学性能的影响

大部分观点认为界面相作为裂纹萌生的地点或裂纹易于扩展的途径。Rhodes 及 Paton^[14]认为,当界面相宽度大于 250 nm 时,屈服强度随着界面宽度的增大而增大;延伸率则表现出相反的趋势。而当宽度小于 250 nm 时,屈服强度和延伸率随界面相宽度变化而变化的趋势并不明显。电子显微分析表明,当界面相宽度大于 250 nm 时,随界面宽度的增大,会呈现更多的平面滑移带。更多的平面滑移带表现了应变强化,而位错前端高应力的集中导致了裂纹的萌生。当宽度小于 250 nm 时,滑移带易于通过界面。

Magolin^[7]认为界面相对韧性影响很小。滑移带可以很容易地通过界面相。Moody^[15]认为,与界面相相关的是氢致解离和沿晶断裂方式,高的含氢量导致了宽的界面相,提高了{111}面的变形,如果{111}面不是有利的变形取向,则裂纹会沿 β/α 相界成长。

总之,关于界面相对力学性能影响这方面的研究进行得很少,并且方法也存在不少问题,有些实验数据不存在可比性。

5 结论

界面相问题是钛合金中存在争议的问题之一,深入研究界面相的形成机理与其对力学性能的影响,人为地控制界面相的形态、分布、数量,无论对于工程实践还是丰富理论知识,均有重要的意义。

参考文献

- 1 Froes F H et al. Titanium products and applications. Journal of Metals. 1987; 3: 12
- 2 Rhodes C G et al. Observations of an interface phase in the β/α boundaries in titanium alloys. Metall. Trans., 1975; 6A: 1 670
- 3 Rhodes C G et al. Formation characteristics of the β/α interface phase in Ti - 6Al - 4V. Metall. Trans., 1978; 10A: 209
- 4 Banerjee D et al. A resolution of the interface phase problem in titanium alloys. Acta. Mater., 1988;36(1): 125
- 5 Banerjee D et al. On the β/α interface phase in Ti alloys. Acta. Mater., 1981; 29:1 685
- 6 Banerjee D. Identification of the interface phase in titanium alloys. Metall. Trans., 1982; 13A: 681
- 7 Margolin Harold et al. The interface phase in Alpha-Beta titanium Alloys. Metall. Trans., 1977; 8A: 373
- 8 林永新,胡跃君. 钛合金界面相的电子研究进展. 金属热处理,1988;11:21
- 9 Mahajan Y et al. Interface phase in Ti - 6242 alloy. Scripta. Metall. Mater., 1982; 16:375
- 10 Ye T T et al. A new mechanism of the hexagonal interface phase formation. Scripta Metall. Mater., 1989;23:1 755
- 11 Ye T T et al. Morphological observation and analysis of the {10 - 12} mode hexagonal interface phase. Scripta Metall. Mater., 1990; 24:21
- 12 Spurling R A. A technique for preparing thin foils of Ti and Ti alloys for transmission electron microscopy. Metall. Trans., 1975; 6A:1 660
- 13 Spurling R A et al. The microstructure of Ti alloys as influenced by thin-foil artifacts. Metall. Trans., 1974; 5:1 794
- 14 Rhodes C G et al. The influence of β/α interface phase on tensile properties of Ti - 6Al - 4V. Metall. Trans., 1978; 10A: 1 979
- 15 Moody N R et al. The influence of hydrogen and the interface phase on fracture in Ti code 12. Metall. Trans., 1983; 15A: 1 984