

文章编号:1673-9981(2010)01-0013-06

钛合金片层组织球化规律及模型的研究进展

方军¹, 王克鲁², 鲁世强², 卢险峰¹

(1. 华东交通大学理工学院机电工程分院, 江西 南昌 330100;
2. 南昌航空大学材料科学与工程学院, 江西 南昌 330063)

摘要:介绍了目前国内外在钛合金片层组织的球化规律及模型方面的研究成果. 主要探讨了热变形参数、原始晶粒大小、加工方式对钛合金片层组织球化规律的影响及几种主要的球化机制模型.

关键词:钛合金; 片层组织; 球化规律; 球化机制模型

中图分类号: TG146.2 **文献标识码:** A

钛合金具有密度小、强度高、耐高温及抗腐蚀性能好的特点,在航空航天、化工、造船等领域中得到了广泛地应用^[1]. 钛合金的微观组织决定了它的力学性能,而它的微观组织主要依赖于化学成分、热加工历史和热处理过程^[2]. 对于化学成分一定的钛合金,热机械加工是获得最终产品前的一种重要加工方法,也是改善合金微观组织的一种非常有用的手段,如控制 α 相和 β 相的大小、比例及微观形态等^[3,4]. 由于钛合金在 β 单相区进行热加工后,其组织通常为片层状,随冷却速率快慢呈现出不同的形态,快冷得到细片层组织,慢冷得到粗片层的魏氏组织^[4-5],且钛合金的这种片层组织比钢中的珠光体稳定,一般不能通过热处理改变其片层形貌,只能通过 $(\alpha+\beta)$ 两相区大变形来实现球化或等轴化^[6],因此钛合金片层组织球化规律及球化机制模型的研究引起了国内外学者的关注^[7-16]. 本文主要介绍影响钛合金片层组织球化规律的因素及球化机制模型的研究现状.

1 钛合金片层组织球化规律的影响因素

钛合金的片层组织是非常稳定的,通过热处理很难改变钛合金中的片层组织,只能通过相变点以

下大塑性变形才能使其球化.

1.1 变形程度对片层组织球化的影响

片层组织发生球化必须达到一定的变形量,即临界形变,并且随变形程度的增加球化程度提高. Semiatin 等人^[8]进行了等温恒应变速率压缩试验,研究了两种晶粒尺寸片层组织的 Ti-6Al-4V 合金的变形软化机制及组织球化动力学过程,得出当应变速率为 0.001 s^{-1} 、应变变量约达 1.0 时,片层组织发生球化,而应变变量达 2.5 左右时球化过程结束. 周军等人^[17]在研究 Ti-17 合金球化规律时也得到类似结果,当变形温度为 $830 \text{ }^\circ\text{C}$ 、应变速率为 1 s^{-1} 、应变量为 0.6 时,合金球化过程开始,当应变变量达到 0.8 时球化过程结束.

1.2 变形温度及应变速率对片层组织球化的影响

变形温度及应变速率对片层组织球化的影响比较复杂,对不同的钛合金片层组织球化的影响不尽相同. 周军和曾卫东等人^[17]在研究热变形参数对 Ti-17 合金的片状 α 相球化过程的影响时发现,片状 α 相球化程度随应变速率的增加而增大,随变形温度的提高而降低;在相同温度下提高应变速率能够加快片状组织完全球化的速率. 门菲和王忠堂等人^[18]在对 TC11 合金片状组织球化规律的研究时发现,不同初始片层厚度的组织,其球化程度随应变

收稿日期:2009-12-02

作者简介:方军(1984—),男,江西上饶人,助教,硕士.

速率的降低而增加;变形温度对两者球化程度的影响存在不同的规律,粗片层组织的球化程度随温度的升高而增加,细片层组织的球化程度随温度的升高而降低.孙新军^[19]对 TC11 合金的片状组织在高温变形中等轴化(球化)的机理进行了研究.结果表明,变形温度越高越有利于等轴化的进行,而应变速率对等轴化的影响比较复杂;应变速率过高或过低,都不利于等轴化的进行.

1.3 晶粒尺寸大小对片层组织球化的影响

原始片层组织晶粒的大小对组织球化率及球化速率有影响. Semiatin 和 Seetharaman^[20]对晶粒尺寸分别为 100 μm 和 500 μm 的 Ti-6Al-4V 合金魏氏组织的球化规律进行了研究,结果发现在应变量为 1.05、晶粒大小为 500 μm 时,片层组织的球化率为 40%,而晶粒大小为 100 μm 时片层组织的球化率达到 90%,即细晶组织能够提高组织的球化率.文献^[18]对 TC11 合金的细片层组织和粗片层组织的球化规律进行了研究,结果表明,在相同的变形条件下,细片层组织的球化程度大于粗片层组织的球化程度,在应变量为 1.2 时粗片层组织发生部分球化,而细片层组织已经完全球化,形成细小均匀的等轴组织.

1.4 加工方式对片层组织球化的影响

不同的加工方式对组织球化过程有很大的影响. Korshunov 等人^[21-22]研究了多种不同的加工方式对 VT9 合金(Ti-6.6Al-3.5Mo-1.7Zr-0.27Si)原始 β 相组织球化的影响.试验在 960 $^{\circ}\text{C}$ 、应变速率为 0.001 s^{-1} 条件下进行,使用的加工方式有扭转、反复扭转及拉伸.结果表明,在相同的变形条件下,当加工方式为扭转时合金组织的球化率为最大,反复扭转时球化率最小,拉伸时球化率介于两者之间.

2 钛合金片层组织球化机制的模型

片层组织具有较好的抗裂纹扩展能力及高温蠕变性能,而球状组织具有良好的塑性及抗疲劳性能.如何将片层组织转化为球状组织及片层组织球化机制方面的研究一直受到各国学者的关注,并提出了一些片层组织球化机制的模型.

2.1 Rayleigh 表面张力扰动模型及晶界分离模型

英国的 Lord Rayleigh 教授早在 1879 年就从理论上指出,液体圆柱破碎后为一连串球形液体,这一现象称为 Rayleigh 失稳^[23].图 1 为 Rayleigh 扰动模型示意图,该图描述了长柱状组织在表面张力作用下,发生扰动而导致球化的过程.从理论及试验中证明,长杆形状的物体在长度达到某一临界长度 λ_c 时,必然会发生正弦扰动,然后会逐渐自发地断裂成为一串球状颗粒,其最大长度间距为 λ_{max} ,而 λ_c 和 λ_{max} 的值取决于物质迁移机制.例如,对于表面扩散的速率控制机制,无限长杆的 $\lambda_c = 2\pi r$, $\lambda_{\text{max}} = 2\pi\sqrt{2}r$,其中 r 为杆的半径.该模型比较适合于液相成形.

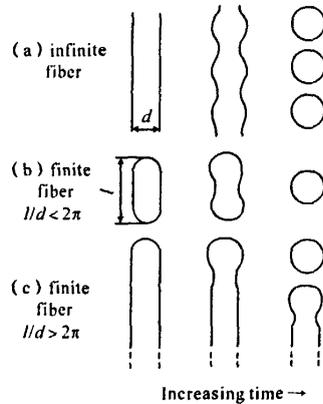


图 1 Rayleigh 张力扰动球化模型

Fig. 1 The tension disturbance globularization model of Rayleigh

晶界分离模型是目前普遍接受的钛合金片层组织球化模型,在 1980 年 H. Margonlin 和 P. Cohen^[24]提出了该模型,后来 I. Weiss 和 M. Peters^[25-27]又对该模型进行了补充及完善,并且 Weiss 还提出了发生球化的两种方式,图 2 为晶界分离模型的示意图.该理论认为,经冷或热加工达到一定变形量后,在原始 α 相片层组织中会形成亚晶界(图 2(a)),或由于剪应力的作用,部分晶界发生滑移(图 2(b)).由于该亚晶界形成的界面,其二面角为 90° 很不稳定,为了降低表面张力,该角度会逐渐减小.在驱动力的推动下部分 β 相移动到 α/β 相界内,即所谓地 β 相楔入 α 相片层,同时 α/β 相界向相反的方向转动,最终片层组织将转化为球状组织,达到球化的目的(图 2(d)).

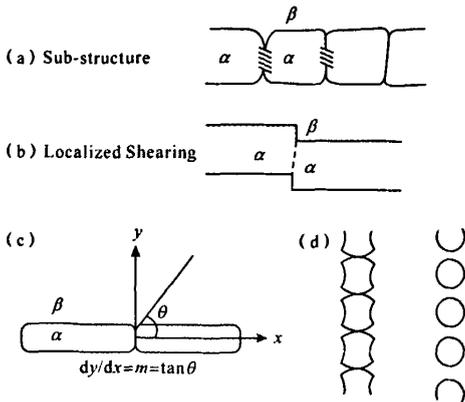


图2 晶界分离模型

Fig.2 Boundary separation model

2.2 片状结构末端物质迁移模型及板条剪切球化模型

片状结构末端物质迁移模型是将片状组织作为一个整体考虑,而前面所描述的模型都是单个片状或条状 α 相的球化规律.图3为片状结构末端物质迁移模型的示意图.由于构成 α 相、 β 相的元素含量不同,从而存在一定的浓度梯度,这种浓度梯度作为驱动力使得片层组织间原子发生相互扩散,随着时间的增加,使得部分片层组织发生粗化,另外一些片层组织变短,发生球化现象^[23].这种物质迁移在片层组织的末端发生的更为明显. Stefansson^[25,28]用该模型解释静态球化过程,并认为该模型是重要的静态球化机制模型.

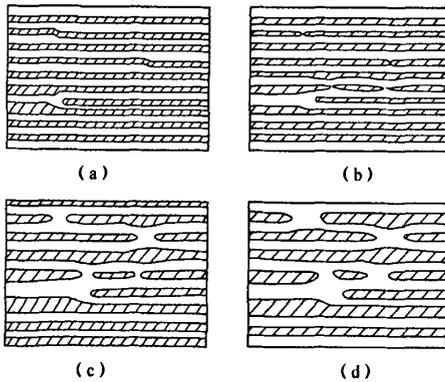


图3 片状结构末端物质迁移模型

Fig.3 The end of the lamellar structure material transport model

板条剪切球化模型是 T. Seshacharyulu 等人^[29]在研究超低间隙级 Ti-6Al-4V 合金的热变形机制时提出的,该模型的球化过程如图4所示.板条受剪切应变作用而发生剪切变形,在这一过程中处于有利位向的新 α 簇将加入到剪切变形中,并使相邻的处于不利位向的 α 相发生转动,为进一步的剪切提供条件(图4(a));位错将沿剪切线产生(图4(b));由交滑移产生的回复导致交滑移面上的异号位错相互抵消,同号位错剪切线形成界面(图4(c));界面迁移使表面能最小,形成球状组织(图4(d)).该球化过程涉及到形核率及迁移率两方面的竞争,T. Seshacharyulu 认为该球化过程是一种典型的动态再结晶过程.



图4 板条剪切模型

Fig.4 Lath shear model

2.3 片状 α_2 相的球化模型

片状 α_2 相的球化模型是 J. G. Wang 等人^[30]在研究 TiAl 基合金的蠕变过程中提出的(图5),其球化机理为蠕变过程中变形和回复导致 α_2 相片层内形成亚晶界,为了平衡表面张力,亚晶界会穿过 α_2 相片层形成三叉交点,在 α_2 相的片层边界和亚晶界之间的三叉交点处达到局部平衡,同时将曲率引入片层内,形成一定化学势能梯度.该化学势能梯度将促使扩散进行,使三叉交点处的凹槽发生迁移,最终导致片层 α_2 相的球化.其球化驱动力来源于变形过程中产生的亚界面的消失.

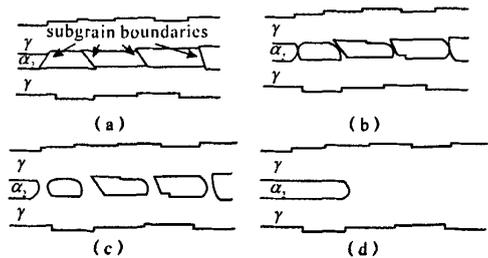


图5 TiAl 基合金中片状 α_2 相的球化模型

Fig.5 Globularization model of TiAl alloy with lamellar α_2 phase

2.4 其它球化模型

周军^[31]对 Ti-17 合金的片层组织的球化规律进行了研究,发现其球化机制与晶界分离模型类似(图 6)。片层 α 相组织球化的微观过程是动态再结晶,从而使片层形成晶粒串, α 相和 β 相相互楔入,片层内晶界及晶界滑动导致大片层解体为若干个小片层,最终小片层球化。

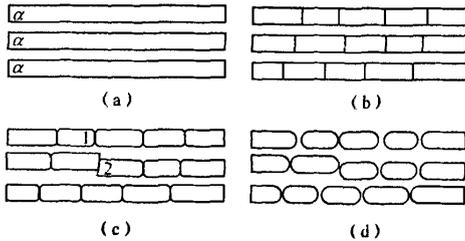


图 6 周军的片状组织球化模型

Fig. 6 Globularization model of lamellar structure of ZHOU Jun

赖运金^[32]在研究 Ti-17 合金高温变形时,也提出了 Ti-17 合金的片状组织的球化模型(图 7),指出变形使晶界 α 相发生滑移,造成片状 α 相转向,使平行于压缩轴方向的片状 α 相产生片层弯曲,并在 α 相片层内形成位错亚晶界; β 相楔入 α 片层的内晶界,弯曲分离和平直分离导致大片层解体为若干个小片层;小片层的界面因扩散而迁移,使表面能最小,组织球化。

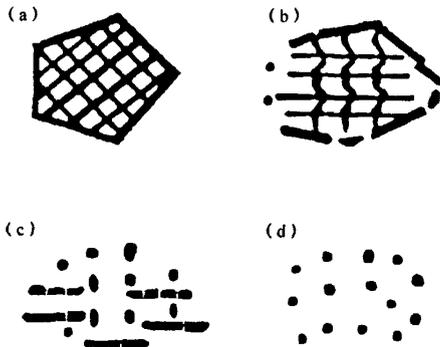


图 7 赖运金的片状组织球化模型

Fig. 7 Globularization model of lamellar structure of LAI Yun-jin

3 结 语

钛合金片层组织球化程度随着热变形参数、原始晶粒尺寸及热加工方式不同而有所不同,同时微观组织也经历了不同的演变规律。目前,国内外对钛合金的片层组织球化规律及球化机制的研究相对不足,有待于加强;由于钛合金片状组织球化规律及球化机制的复杂性,目前的研究成果多数还处于定性阶段。因此,进一步研究钛合金片状组织球化规律及球化机制,对于优化钛合金热加工工艺参数、预测及控制钛合金热加工组织及提高钛合金产品性能具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 熊爱明,黄维超,陈胜晖,等. 高温变形参数对 TC6 钛合金微观组织的影响研究[J]. 航空材料学报, 2003, 23(1): 11-15.
- [2] DING R, GUO Z X, WILSON A. Microstructure evolution of Ti-6Al-4V alloy during thermo-mechanical processing [J]. Materials Science and Engineering, 2002, A327: 233-245.
- [3] 李鑫,赵为纲,鲁世强,等. TC11 合金 β 相区大应变热变形行为及组织研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2007, 30(3): 28-32.
- [4] VASSEL A, FROES F H, HERTEMAN J P, et al. Influence of processing and heat treatment variables on the mechanical properties of two advanced high temperature titanium alloys [C]// International Titanium Conference 4, Titanium Science and Technology. Oberursel: Deutsche Gesellschaft Für Metallkunde E V, 1980: 515-521.
- [5] LÜETJERING G. Influence of processing on microstructure and mechanical properties of ($\alpha + \beta$) titanium alloys [J]. Materials Science and Engineering, 1998, A243: 32-45.
- [6] 王金友,葛志明. 航空用钛合金[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
- [7] SEMIATIN S L, THOMAS J F, DADRAS P. Processing microstructure relationships for Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si [J]. Metallurgical Transactions, 1983, 14A: 2363-2374.
- [8] SEMIATIN S L, SEETHARAMAN V, WEISS I. Flow behavior and globularization kinetics during hot working of Ti-6Al-4V with a colony alpha microstructure [J]. Materials Science and Engineering, 1999, A263:

- 257-271.
- [9] WEISS I, FROES F H, EYLON D, et al. Modification of alpha morphology in Ti-6Al-4V by thermomechanical processing [J]. Metallurgical Transactions, 1986, 17A: 1935-1947.
- [10] MLLER R M, BIELER T R, SEMIATIN S L. Flow softening during hot working of Ti-6Al-4V with a lamellar colony microstructure [J]. Scripta Materialia, 1999, 40(12): 1387-1393.
- [11] SEMIATIN S L, BIELER T R. The effect of alpha platelet thickness on plastic flow during hot working of Ti-6Al-4V with a transformed microstructure [J]. Acta Materialia, 2001, 49: 3565-3573.
- [12] SESHACHARYULU T, MEDEIROS S C, FRAZIER W G, et al. Microstructure mechanism during hot working of commercial grade Ti-6Al-4V with lamellar starting structure [J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 325: 112-125.
- [13] SALISHCHEV G A, ZEREBTSOV S V, MIRONOV S Y, et al. Formation of grain boundary mis-orientation spectrum in alpha-beta titanium alloys with lamellar structure under warm and hot working [J]. Materials Science Forum, 2004, 467-470: 501-506.
- [14] 陈慧琴, 郭灵, 曹春晓. TC11 钛合金片层组织热变形行为及组织演变 [J]. 航空材料学报, 2008, 28(1): 18-22.
- [15] 杨义, 徐锋, 黄爱军, 等. 全片层 BT18Y 钛合金在 $\alpha + \beta$ 相区固溶时的显微组织演化 [J]. 金属学报, 2005, 41(7): 713-720.
- [16] 姚泽坤, 苏华, 苏祖武, 等. 热加工工艺参数对 TC11 钛合金叶片显微组织细化、球化的影响 [J]. 热加工工艺, 1995(1): 6-10.
- [17] 周军, 曾卫东, 舒澄, 等. 热变形参数对 Ti-17 合金的片状 α 球化过程的影响 [J]. 热加工工艺, 2005(1): 16-19.
- [18] 门菲, 王忠堂, 宋鸿武, 等. TC11 合金片状组织球化规律的研究 [J]. 机械工程与自动化, 2008(2): 113-116.
- [19] 孙新军. 钛合金片层组织的等轴化规律及超细晶钛合金超塑性的研究 [D]. 北京: 清华大学, 1999.
- [20] SEETHARAMAN V, SEMIATIN S L. Effect of the lamellar grain size on plastic flow behavior and microstructure evolution during hot working of a gamma titanium aluminide alloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33A: 3817-3830.
- [21] KROSHUNOV A A, ENIKEEV F U, SALISHCHEV M I, et al. Effect of method of high temperature loading on transformation of lamellar structure in VT9 titanium alloy [J]. Russia Metallurgical, 1994(3): 103-108.
- [22] POTHS R M, ANGELLA G, WYNNE B P, et al. Effect of strain reversal on the dynamic spheroidization of Ti-6Al-4V during hot deformation [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35A: 2993-3001.
- [23] TIAN Y L, KRAFT R W. Mechanisms of pearlite spheroidization [J]. Metallurgical Transactions, 1987, 18A(8): 1403-1414.
- [24] MARGOLIN H, COHEN P. Evolution of the equiaxed morphology of phase in Ti-6Al-4V [C]// Titanium '80: Science and Technology. Warrendale: TMS, 1980: 1155-1161.
- [25] STEFANSSON N, SEMIATIN S L. Mechanisms of globularization of Ti-6Al-4V during static heat treatment [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2003, 34A: 691-698.
- [26] WEISS I, WELSCH G E, FROES F H, et al. Mechanisms of microstructure refinement in Ti-6Al-4V [C]// International Titanium Conference 5, Titanium Science and Technology. Oberursel: Deutsche Gesellschaft Für Metallkunde E V, 1985: 1503-1510.
- [27] WELSCH G E, WEISS I, EYLON D, et al. Shear deformation and breakup of lamellar morphology in Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy [C]// Sixth World Conference on Titanium. Les Ulis Cedex, France: Societe Francaise de Metallurgie, 1988: 1289-1293.
- [28] STEFANSSON N, SEMIATIN S L, EYLON D. The kinetics of static globularization of Ti-6Al-4V [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33A: 3527-3534.
- [29] SESHACHARYULU T, MEDEIROS S C, MORGAN J T, et al. Hot deformation mechanisms in ELI grade Ti-6Al-4V [J]. Scripta Materialia, 1999, 4(3): 283-288.
- [30] WANG J G, HSIUNG L M, NIEH T G. Microstructure instability in a crept fully lamellar TiAl alloy [J]. Intermetallics, 1999(7): 757-763.
- [31] 周军. Ti-17 钛合金片状组织球化规律研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [32] 赖运金. 钛合金片状组织演变机制与球化动力学研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.

Progress on globularization mechanisms and models in titanium alloys with lamellar structure

FANG Jun¹, WANG Ke-lu², LU Shi-qiang², LU Xian-feng¹

(1. College of Electrical and Mechanical, Institute of Technology East China Jiao Tong University, Nanchang 330100, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Nanchang HangKong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Research progress about the globularization mechanisms and models in titanium alloys with lamellar structure both abroad and at home currently are summarized. The influence of hot deformation parameters, prior grain size and processing methods on globularization mechanisms in titanium alloys with lamellar structure and several major globularization models were discussed mainly.

Key words: titanium alloy; lamellar structure; globularization mechanisms; globularization mechanisms models

广州有色金属研究院分析测试中心

建于1971年广州有色金属研究院分析测试中心,是我国南方地区从事金属材料、矿物、化工材料等无机化学检验、物理性能测试的第三方实验室。拥有层次合理的人才队伍和60余台套进口的大中型检测设备如等离子发射光谱仪、徕卡大型透射反射两用显微镜、FEI工艺矿物自动检测仪、电子探针、扫描电镜、直读光谱仪、拉力实验机、盐雾实验机、X-衍射仪、金相显微镜等。是国内首批通过国家、省两级计量认证和获得国家认可和国际互认的实验室之一。被中国质量管理协会全国用户委员会授予“全国用户满意服务”的称号。

依托建立了“中国有色金属工业华南产品质量监督检验中心”、“广东省有色金属产品质量监督检验站”、“广东省金属材料综合利用检测与评价中心”、“中国方圆标志认证委员会确认为认证产品检验实验室”等检测平台。



地址:广州市天河区长兴路363号 广州有色金属研究院内
联系电话:020-37239206/37239202 传 真:020-37238633
网 址:http://www.gzfenxi.com