

两相钛合金超塑性变形机理的研究

马济民

本文通过对Ti-6Al-4V (modi.) 和 Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si(IMI550)等 α - β 钛合金的超塑性(SP)研究, 讨论了两相钛合金超塑性变形(SPD)的数学描述和超塑性变形机理。

研究SPD过程中 σ 和 $\dot{\epsilon}$ 的关系, 采用应变速率循环法(Strain rate cycling)。一般进行三个周期。用松弛法(Cross-head reversal experiment)测定内应力 σ_i 和应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的关系。

公式(1)十分精确地反映了超塑性三个阶段中 σ 和 $\dot{\epsilon}$ 的关系。

$$\sigma = A + B [\log(\dot{\epsilon} \times 10^7)]^C \quad (1)$$

式中A、B、C为拟合系数, 与实验结果相比较, 其相关系数、平均误差均在1~0.999。当 $\dot{\epsilon}$ 足够小时, 如 $\sim 10^{-7} 1/s$, 则 σ 就十分接近 σ_i (门坎应力), 且等于“A”。其物理意义为: 当外应力低于 σ_i ($\approx A$)时, 就不能发生超塑性变形。所以公式(1)提供了理论计算 σ_i 的方法, 较之常用的线性外推法大为精确。

众所周知, 位错蠕变中有内应力 σ_i 存在, 在SPD过程中也同样存在内应力, 即在SPD过程中唯外应力 σ 超过 σ_i , 超塑才能继续进行, 研究表明 $\log \sigma_i - \log \dot{\epsilon}$ 基本上是线性关系:

$$\sigma_i = D \dot{\epsilon}^F \quad (2)$$

D和F也是拟合系数, F就是 $\log \sigma_i - \log \dot{\epsilon}$ 曲线的斜率, 是个常数, ($m' = F = d \log \sigma_i / d \log \dot{\epsilon}$)与 $\log \dot{\epsilon}$ 无关, 很大程度上取决于显微组织特征。实际上 σ 中包含有 σ_i , 利用计算出 $\log(\sigma - \sigma_i) - \log \dot{\epsilon}$ 和对应的 $m^* - \log \dot{\epsilon}$ (m^* 为 $\log(\sigma - \sigma_i) - \log \dot{\epsilon}$ 曲线斜率)曲线族, 它们将提供对SPD的新认识, 如当前人们衡量SPD好坏的 m 值, 实际上是由两部分组成的, 即 m' 和 m^* , (故且把 m^* 称为有效应变速率敏感系数)。

在机理的研究中, 含快扩散元素Co, Ni的Ti-6Al-4V合金SPD明显改善。在分析1%Co和1.8%Ni的Ti-6Al-4V合金850℃SPD后的组织表明, 在变形前后保持 β 含量基本不变的情况下, α 相晶粒度由4~4.6 μm 长大至 $\sim 7\mu m$, 且仍保持等轴, 而 β 相呈连续的网络。在TEM和SEM的EDAX大量分析比较变形前后 α 、 β 相内的成分及其分布规律时发现: 唯独变形后的 β 相内, 一些快扩散元素(Co、Ni)发生了定向的有规律的“偏析”, 即在垂直于外应力的 β 晶界附近富集了快扩散元素, 而在平行的 β 晶界附近贫乏, 这可以从比较CoK α 、NiK α 的谱线强度的明显差别看出。 β 晶粒中部元素成分基本不变, 这种“偏析”现象尤以薄膜试样反映更明显, 因为减少了在深度上晶粒间的干扰。

在分析两个相的蠕变强度时发现, SPD后试样纵截面上有垂直于外应力的显微裂纹, 见图1。有趣的是这些裂纹总是发生在 α 相内, 而终止于 α/β 的界面处, 或绕过 β 相后在另一个 α 晶粒中传播, 可以推断: β 相在试验温度下的蠕变强度相对较低, 易变形。



图1 Ti-6Al-4V-1.8Ni SPD后的微裂纹

Ti-6Al-4V箔材试样在先进的光致电镜进行SPD时 ($T=900^\circ C$, $\dot{\epsilon}$ 为 $5 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-3} s^{-1}$ 之间) 进行连续观察和摄影, 图2选登了三张说明试样表面在SPD过程中晶粒运动概貌

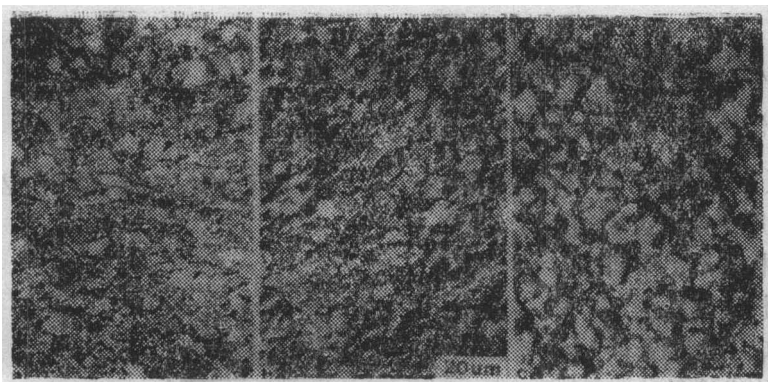


图2 光致电镜 (Photoemission E.M.)
记录的Ti-6Al-4V SPD过程
T=900°C

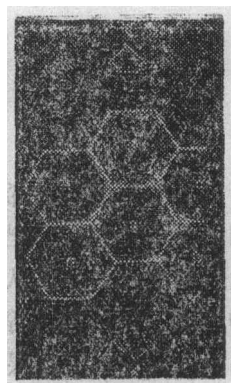


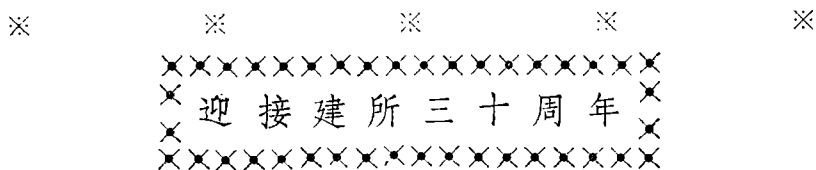
图3 β相的晶界偏析导致在斜边上把α相分离、滚动的模型

的相片。可见α颗粒在三维空间滚动且保持等轴，而β相，特别是α相之间的β不断变形的过程。根据上述分析，我们认为两相钛合金的SPD机制的基本模式如图3。在外应力 σ 作用下，β相中的快扩散元素向垂直于 σ 的晶界定向迁移，并使α/β界面分离，而α相不断地发生晶界的滑动和滚动，造成连续的β网络；也即两

相钛合金的SPD机制是α相的滑动/滚动和β相的扩散调节过程。

两相钛合金中增加快扩散元素可望提高合金的超塑性能。

作者衷心感谢英国皇家金属学会主席、里兹大学冶金系J.Nutting教授与C.Hammond博士的指导和在设备、器材方面所提供的方便。



我所自一九五六年建所以来，经过三十年的艰苦创业，已发展成为一个专业齐全、设备先进、技术力量雄厚的综合性材料应用研究所。三十年来，为航空工业、航空科研做出了应有的贡献，取得了丰硕的成果。在建所三十周年之际，我们要通过各种所庆活动，回顾总结三十年来我所 在科研、生产及各项工作中所取得的成绩，对航空工业发展和国民经济建设作出的贡献。通过三十周年纪念活动，进行一次生动的爱所、建所教育，调动全所职工的积极性，推动我所科研体制改革工作的进行，为完成“七五”规划任务奠定基础。

这次所庆准备开展各种学术活动，将举办第七届学术年会，邀请有关专家、学者参加，进行学术讨论研究，促进交流发展。与此同时，成立第五届科技委及各专业委员会和各专业分会；并组织航空材料技术发展策略讨论会。为纪念建所三十周年，出版《第七届学术年会论文集》、《获奖科研成果汇编》、六二一

所所史及六二一所简介等。《航空材料》、《环山报》、《信息快报》出版所庆专刊。

在所庆中，举办六二一所科技成果交易会。这次交易会将展出我所的各项科研成果和军民品开发项目，表现出我所的专业特长和技术水平，起到宣传和交流的作用。这次交易会，邀请各地有关单位参加，交流技术，推广新品，洽谈业务，促进我所军民结合体制的迅速发展。

在建所三十周年之日，召开全所庆祝大会，邀请上级主管部门、部机关、在京兄弟单位领导参加，邀请调离我所的老领导和有关同志参加。

这次所庆活动，要利用各种形式，总结建所三十年来各项工作的成果，表彰先进人物、先进集体，树立信心，明确方向，为我所光明美好的明天，奋发努力，再展宏图。

六二一所三十周年所庆筹备组 徐俊丽