

速率 $G \cdot R$ 获得的枝晶超细化对单晶高温合金组织性能的影响作用。

合金 CMSX-2 的成分为 Ni-8Cr-8W-4.8Co-0.6Mo-5.6Al-1.0Ti-6Ta (wt, %), 单晶生长在 250K/cm 温度梯度的定向凝固装置上进行。随着冷却速率的提高, 枝晶间距迅速减小, 当冷却速率达到 15K/s 时, 一次枝晶间距小于 50 μm , 仅为 HRS 单晶的十分之一左右, 形成了超细枝晶组织。

随着枝晶间距的减小, 偏析程度先增加后减小。其原因在于高的冷却速率下, 枝晶细化将元素扩散距离显著降低(提高了扩散均匀程度), 抵消和超过了扩散时间不充分(降低扩散程度)的影响。因为凝固时共晶形成于枝晶间, 当枝晶明显细化时, 枝晶间的残余液相熔池的体积和尺寸均得到有效减小, 所以在枝晶间距小于 80 μm 后, 单晶中的共晶含量及尺寸随枝晶间距减少而显著减小。与粗枝晶组织比较, 超细枝晶组织使热处理的均匀化效果更加充分, 表现在成分偏析和共晶几乎完全消除, 而且在整个单晶组织中形成了均匀一致的 γ' 析出。此外, 枝晶超细化还有效地提高了合金的初熔温度。

在铸态和热处理状态下, 超细枝晶单晶的持久寿命(1050 $^{\circ}\text{C}$, 160MPa 应力条件下)分别为粗枝晶单晶的 1.45 和 1.95 倍。对热处理状态单晶的变形组织分析表明: 超细枝晶单晶由于有着更加均匀的初始组织, 因此持久变形过程中在等应变部位形成了均匀排列和分布的 γ' 筏形组织。相反, 在粗枝晶单晶中, 枝晶间保留的较高程度的偏析以及未能完全消除的粗大 γ' 相使 γ' 难于稳定地定向粗化以形成完整的筏形组织, 因此导致枝晶干和枝晶间的变形不均匀。同时, 不同应变部位的变形组织比较还显示出, 枝晶超细化使 γ' 筏形组织抵抗变形的能力和稳定性得到提高。

作者简介 张万明, 男, 1969 年 9 月 3 日生。在西北工业大学凝固技术国家重点实验室从事博士后研究, 讲师, 主要从事高温合金和金属间化合物的凝固组织性能的研究。地址: 西安市西北工业大学 403 教研室, 邮编 710072; 电话 (029)8493942

颗粒增强金属基复合材料的尺寸依赖强化律

戴兰宏

近年来, 越来越多的实验研究证实, 颗粒尺寸对颗粒增强金属基复合材料(MMCp)的变形与断裂的影响显著。已有的颗粒强化机制的定性认识和各种基于均匀化思想的细观力学理论无法预报复合材料的尺寸效应。为此, 本文发展了一种尺寸依赖强化律来理解和预报这种尺寸效应。

对受载后试样进行微观观测发现, 复合材料中基体的

塑性变形极不均匀, 而这种变形不协调正是颗粒复合材料强化及尺寸效应原因所在。几何必需位错密度高低可以反映变形不协调程度的大小。考虑球形颗粒增强金属基复合材料单轴压缩, 颗粒和基体模量的不匹配导致在颗粒周围积聚一定数量的几何必需位错。采用类似于 Eshelby 等效夹杂思想并根据变形几何条件, 得到几何必需位错密度为 ρ_G :

$$\rho_G = \frac{6f_p \epsilon}{bd_p} \quad (1)$$

其中 b 为 Burgers 矢量, f_p 和 d_p 分别为颗粒体积分数及直径, ϵ 为宏观应变。从式中可以看出, 对于一定体积分数的颗粒增强金属基复合材料, 协调小颗粒变形的几何必需位错密度比大颗粒要高。

根据 Taylor 位错强化关系, 复合材料塑性流动应力 σ_c 为

$$\sigma_c = \sqrt{3} \alpha \mu_m b \sqrt{\rho_T} = \sqrt{3} \alpha \mu_m b \sqrt{\rho_G + \rho_S} \quad (2)$$

其中 μ_m 和 σ_m 分别为基体剪切模量和流动应力, α 为一比例系数, ρ_S 为统计储存位错密度, 它与 σ_m 有如下关系: $\sigma_m = \sqrt{3} \alpha \mu_m b \sqrt{\rho_S}$ 。

经过推导, 可得到颗粒增强金属基复合材料尺寸依赖强化律

$$\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_m}\right)^2 = 1 + \beta \eta \quad (3)$$

其中 $\eta = \epsilon/\lambda_p$ 为应变梯度, λ_p 为颗粒统计平均间距, 而材料微结构特征几何参数 \check{l} 定义为:

$$\check{l} = b \frac{\lambda_p}{\lambda_c} \left(\frac{\mu_m}{\sigma_m}\right)^2 \quad (4)$$

其中 $\lambda_c = d_p/2f_p$ 为几何滑移距离。

由尺寸依赖强化律可以得到如下结论: ①颗粒强化的尺寸效应主要是通过应变梯度效应来表现的, 当颗粒体积分数一定, 颗粒越小, 应变梯度越高, 强化效果越好。②随基体不断硬化逐渐变小, 这说明变形后期基体的应变梯度必须维持较高的水平才能达到与变形初期相同的强化效果, 而一旦材料开始软化出现变形局部化, \check{l} 将随之变大, 颗粒的强化再次增强, 从而抑制变形局部化的进一步发展。因此, 增强颗粒的加入不仅能强化材料的屈服和流动强度, 同时也可以抑制变形局部化的发生和发展。③应变梯度可能是控制材料变形与断裂行为的重要因素之一。经检验, 上述理论结果与已有的实验结果相符。

作者简介 戴兰宏, 男, 35 岁。博士, 中国科学院力学研究所副研究员, 为 LNM 冲击动力学实验室主任。主要研究领域为复合材料冲击力学、细观复合材料力学、涂层与薄膜力学等。发表学术论文 20 余篇。

注: 国家自然科学基金(项目编号: 19902017)、国家自然科学基金“九五”重大项目(19891180)和中国科学院“九五”重大项目(KJ-951-201)资助课题。