

半固态 7075 铝合金组织的连续切片三维重构

刘洪军 张东旭 张靖宇

(兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室)

摘要 基于连续切片的金相照片,采用数字化处理技术对半固态 7075 铝合金的组织进行了三维重构。首先对再结晶重熔法制备的半固态 7075 铝合金进行分层制样和二维金相组织采集;然后经过图像定位、对齐、二值化、多层堆叠等数字化处理,进行三维组织重构,从而完成从二维信息到三维信息的转换,实现了显微组织三维可视化表征与三维观测。通过三维组织重构发现,所制备的半固态 7075 铝合金微观结构为固相颗粒状晶粒间隙中填充连通或孤立液相。用三维组织重构可以很方便地获取组织的空间结构特征,使组织表征更为准确和具体。

关键词 三维重构;组织;7075 铝合金;半固态合金

中图分类号 TG146.21;TG249.2⁺6

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2017.04.002

Three-dimensional Reconstruction of Microstructure of Semi-solid 7075 Al Alloy Based on Tomographic Images

Liu Hongjun, Zhang Dongxu, Zhang Jingyu

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology)

Abstract: Based on metallograph of tomographic slices, the 3D reconstruction method was applied for analyzing the microstructure characteristics of semi-solid 7075 Al alloy by the digital processing technique. The samples of semi-solid 7075 Al alloy were prepared by the recrystallization and partial remelting process, and then the two-dimensional photos of tomographic slices were obtained by metallographic microscope. After the digital processing process including locating, aligning, thresholding and stacking of multilayer images, the 3D microstructure was reconstructed by converting the two-dimensional information to three-dimensional information. From the reconstructed 3D microstructure, it is found that the microstructure of semi-solid 7075 Al alloy prepared is connected or isolated liquid phase filled in the gaps among the solid phase. The space structure feature of microstructure of semi-solid alloys can be characterized easily by 3D microstructure, so the microstructure can be characterized more accurately.

Key Words: Three-dimensional Reconstruction, Microstructure, 7075 Al Alloy, Semi-solid Alloy

金属材料的显微金相是研究其内部微观组织的有力工具,传统的材料组织分析一般是通过研究二维金相照片推测材料的三维微观结构,但是这种分析方法主要依赖于经验和主观推测,在判断三维微观结构时与真实组织往往存在一定的差异。金属材料组织的三维重构技术可以直观地观察三维微观组织形貌,更清楚地显示内部结构的空间细节,从而为准确分析材料的组织提供了更有效手段^[1,2]。

半固态金属的组织特点是成形时材料为颗粒状非枝晶固相和液相的混合物,与全液态铸造成形和全固态塑性成形不同,固相和液相的形态和分布对成形工艺和零件性能的影响非常大^[3,4]。采用连续切片的三维重

构方法,描述半固态金属微观组织三维重构的过程,构建再结晶重熔法制备的半固态 7075 铝合金三维显微组织模型,以便更准确地反映高固相率半固态金属组织的微观结构和组成分布。

利用再结晶重熔(Recrystallization and Partial Remelting, RAP)法制备半固态 7075 铝合金试样。该方法是将铸造坯料进行大变形量的热塑性变形(再结晶温度以下),然后再加热至半固态温度区间并保温一定时间,从而得到具有非枝晶固相颗粒组织的半固态坯料^[5]。由于很多商用铝合金在出厂前已进行过等温挤压处理,这种挤压态铝合金原料只需在半固态温度区间下加热保温即可获得可用于触变成形的半固态坯料,因

收稿日期:2016-12-09;修改稿收到日期:2016-12-21

基金项目:甘肃省自然科学基金资助项目(145RJZA082)

第一作者简介:刘洪军,男,1974年出生,教授,兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室,兰州(730050),电话:0931-2973563,13669345430, E-mail: hongjun_liu@hotmail.com

此,该方法具有工艺流程短、生产效率高的优点。采用 RAP 法制备的半固态坯料中固相率较高,适于触变成形工艺。目前已经有将连续切片法用于固相率较低流变成形半固态浆料组织分析中^[6,7],本课题采用该方法制备半固态 7075 铝合金试样,进行微观组织的三维重构分析。旨在为固相率较高的触变成形半固态坯料进行组织分析,进一步拓展三维重构技术在半固态铝合金组织分析中的应用。

1 半固态 7075 铝合金试样制备

选用 $\phi 60$ mm 的 7075 铝合金挤压棒材,沿挤压方向截取 $\phi 15$ mm \times 19 mm 的试样,置于 SX2-2.5-12 箱式电阻炉中,采用 PID 设备控制二次加热温度为 600 $^{\circ}\text{C}$,保温 5 min 后迅速取样水淬^[8]。试样经打磨后采用科勒试剂腐蚀 40 s。在 4XC-PC 金相显微镜下观察二维金相组织并进行拍照。

与常规金相观察不同的是,三维重构金相照片需要特征标记以便进行对齐和层厚计算,本课题采用显微硬度计实现这一目的。由于显微硬度计压头一般为四棱锥型,所压出的压痕既可以用于定位图像,又可以通过压痕在抛光前后的尺寸变化计算出相邻两层图像之间的距离。图 1 为压头压痕示意图,图中, L 为施加的负荷; a 为压痕边长; d_1 和 d_2 为两个方向的压痕对角线长度,四棱锥对角线角度 θ 为 136° 。通过 $h = \frac{d}{2 \tan \frac{\theta}{2}} =$

$0.202d$ 来计算压痕深度,其中, h 为压痕深度; d 为 d_1 , d_2 的平均值。可以计算压痕深度,两层切片图像之间的厚度可以通过压痕深度差值计算得到。用金相显微镜对每层二维组织进行观察并拍摄合适位置的金相照片,然后抛光腐蚀后再观察和拍摄下一层金相组织照片,重复操作,获得一系列二维金相图片,对每层的厚度进行计算,用于微观组织三维重构的处理。

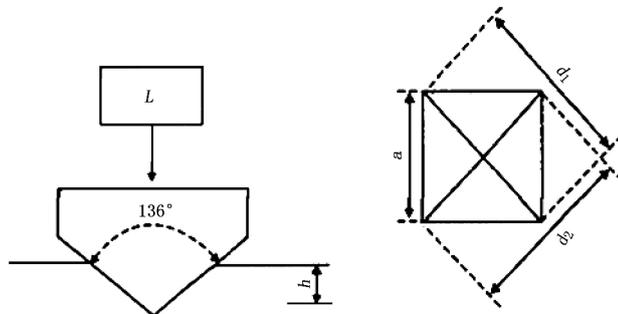


图 1 显微硬度计压头压痕示意图^[9]

2 连续切片三维重构过程

连续切片三维重构就是将一系列平行的二维图像通过计算机图像处理技术叠加合成三维立体图像的过程,其原理示意图见 2。本课题用这种方法进行半固态 7075 铝合金三维组织微观结构的表征。

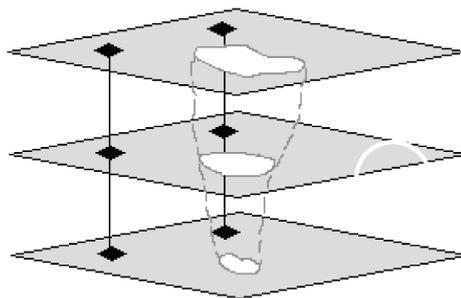


图 2 连续切片三维重构原理示意图

2.1 图像采集

半固态 7075 铝合金试样经磨平、抛光、腐蚀后,以半固态组织中特征明显的固相颗粒为目标观察组织进行三维重构视场的选择,拍摄一系列金相照片,拍摄数量为 40 张。每张金相照片中必须保持相邻两张图像至少有 3 个相同晶粒,且要尽量保持 3 个相同晶粒在视野中的位置相近。图 3 为一系列二维金相照片中的一张,图中黑色菱形为显微硬度压痕。

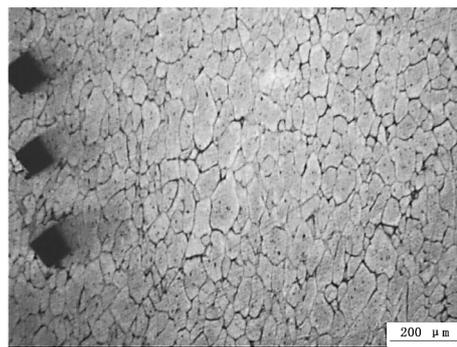


图 3 二维金相照片示例

2.2 图像对齐和裁剪

三维重构过程中,很重要的一点是如何保证不同层金相照片的对齐。对齐的关键在于不同照片中同一压痕的中心点对齐。由于每张照片中至少都有两个压痕,因此可以通过旋转照片使压痕中心点的连线重合,从而保证多张照片的对齐。图 4 为金相照片旋转的示例。

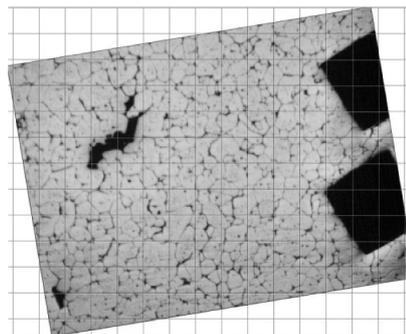


图 4 金相照片的旋转

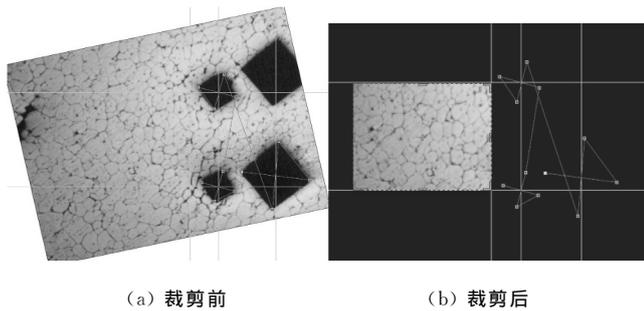
通过图像处理软件(如 Photoshop、ACDSee 等)中的旋转操作工具,按压痕中心点位置绘制直线,旋转图像,并保留调正后的图像。由于不同图片中,显微压痕在抛光后会减小,因此标定中心点的过程需要特别仔细。

金相照片对齐后,选择目标观察组织周围固定大小对所有照片进行裁剪,得到用于三维重构的系列照片。首先标定出压痕中心点在图像处理软件水平标尺和竖直标尺上的位置,分别确定出裁剪区域的上下左右边缘在标尺上的位置及其与压痕中心线的距离,然后画出裁剪辅助线,锁定约束比例为 4 : 3 进行裁剪。图 5 为金相照片裁剪前后的示例。从图 5a 可以看出,组织中存

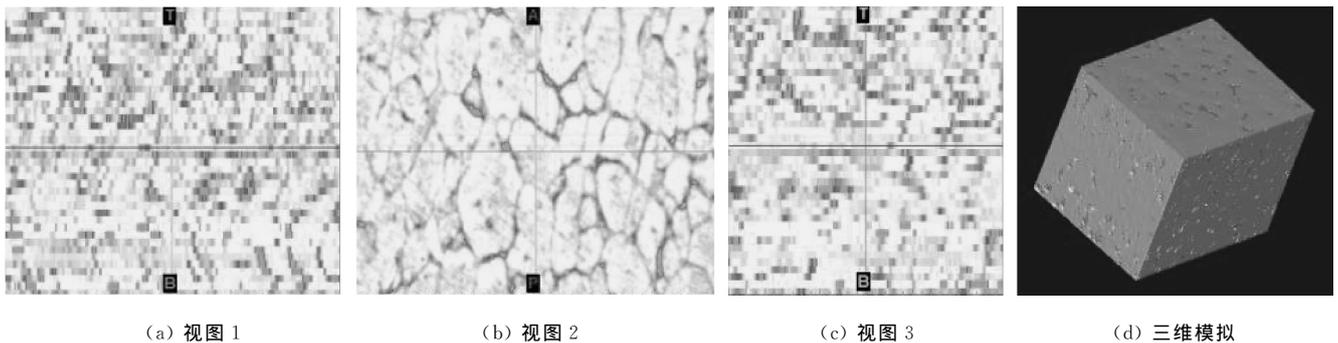
在大小不一的两种显微压痕。由于显微压痕随着每层的磨抛后尺寸会减小,当压痕快消失时,需要重新压制显微压痕,一般是将新的压痕压到快要消失的压痕旁边。因此,新旧压痕的定位在图像对齐过程中很关键,如果操作不合适,将直接影响三维重构的质量。图 5a 显示新旧压痕同时存在于同一图像中,左侧的小黑色菱形为旧压痕,右侧的大黑色菱形为新压痕,测量出旧压痕中心线做垂直直线图像向左偏转 11.7° ,新压痕中心线做垂直直线图像向左偏转 12.4° ,因此当旧压痕消失后,以新压痕定位时向右偏转 0.7° 就可以将图像进行对齐。

2.3 金相组织的三维重构

将处理过的一系列二维金相照片以 bmp 格式导入 Mimics 软件,利用其中的 Calculate 3D 功能自动将二维信息转换成三维信息。图 6 为半固态 7075 铝合金的三维组织重构时 Mimics 操作区的 4 个不同视角窗口,视图 1 为重组冠状面(XZ 平面),视图 2 为原始横截面(XY 平面),视图 3 为重组矢状面(YZ 平面),通过滚动条的移动可以看见各个面的变化情况。图 6d



(a) 裁剪前 (b) 裁剪后
图 5 金相照片的裁剪



(a) 视图 1 (b) 视图 2 (c) 视图 3 (d) 三维模拟
图 6 Mimics 操作区的视角窗口

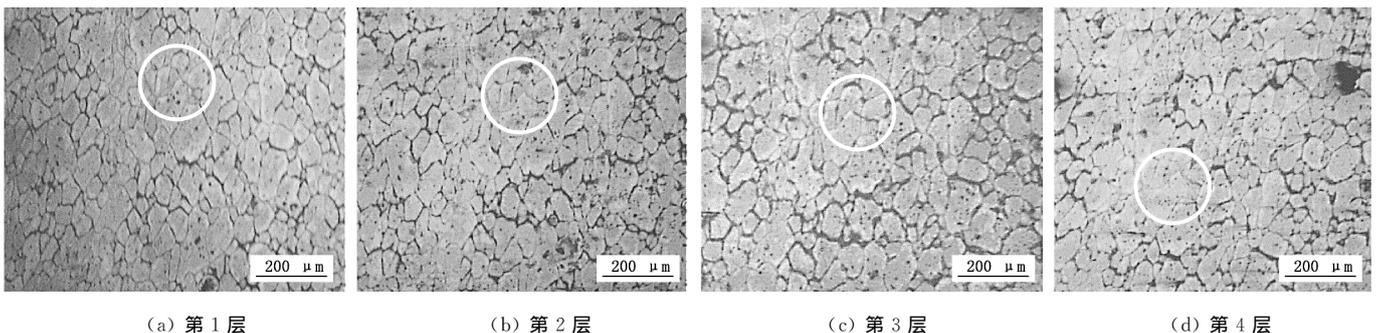
为重构后的三维组织,三维重构计算完成后,观察生成的三维图像,调整软件参数,获得合适的三维组织,用于三维显微组织特征分析。

3 半固态 7075 铝合金的三维组织重构

3.1 半固态 7075 铝合金的二维组织分析

在半固态 7075 铝合金试样中采集一系列平行截面的金相照片,其中连续 4 层见图 7。可以看出,其微观

组织为少量液相分布于颗粒状固相之间,固相形态不一,固相颗粒间最后凝固的液相组织清晰可见(此处的固相和液相指的是水淬组织在半固态温度时的状态)。图 7 的圆圈标记出了三维重构时跟踪的特征固相颗粒。对特征固相颗粒尺寸进行测量计算,第 1~4 层依次为 $38, 35, 33, 29 \mu\text{m}$,随着层数的增加,特征固相颗粒逐渐变小。但标记区域右上部的两个固相颗粒变为 4 个小固相颗粒,说明组织中的固相发生了分裂或者聚合。

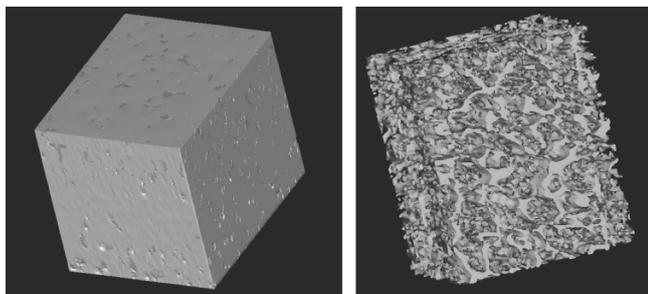


(a) 第 1 层 (b) 第 2 层 (c) 第 3 层 (d) 第 4 层
图 7 半固态 7075 铝合金试样中 4 层平行截面的金相照片

但是,在二维金相照片中很难分析半固态组织中固相分裂组合规律和液相间的连通特征。虽然用多个平行截面的二维金相可以分辨出固相颗粒之间的大致关系,但是还是很难辨别颗粒之间、固液相之间的空间分布特征。因此需要对系列平行截面的金相照片进行三维重构,分析组织中固液相的空间分布规律和相互关系,从而更好地研究半固态 7075 铝合金的微观组织特征。

3.2 半固态 7075 铝合金的三维重构组织分析

半固态 7075 铝合金试样的组织进行三维重构,见图 8a。可见三维组织中绝大部分为固相,固相间隙内填充着液相,共同组成半固态 7075 铝合金的微观组织。与图 7 的二维组织对比,半固态组织的空间形貌更形象,观察微观结构更全面。从三维组织模型中也可以很方便地计算固液相率:液相的体积 $V_L = 877\ 286\ \mu\text{m}^3$,固相的体积 $V_S = 4\ 187\ 855\ \mu\text{m}^3$,则液相率 $f_L = 17.3\%$,固相率 $f_S = 82.7\%$ 。



(a) 三维组织模型 (b) 单独提取的液相组织

图 8 半固态 7075 铝合金的三维重构组织模型及其液相组织

另外,三维重构组织为液相空间结构的分析提供了很方便的方法,可以从模型中直接提取液相进行观察。图 8b 为单独提取的液相组织,可见液相呈现非常复杂的空间形态,大部分液相组织相互连通,也有少部分液相为孤立存在。

在三维重构组织模型中可以很容易地提取某个固相颗粒进行分析。图 9 是图 7 中所标记的特征固相颗粒的三维模型,可见其外观形貌接近椭圆形状,计算得出其体积 $V = 7\ 260\ \mu\text{m}^3$,表面积 $S = 2\ 354\ \mu\text{m}^2$,进而可以根据下式^[7]分别求出该颗粒的形状因子 F 和近球晶



图 9 单个晶粒的三维模型及其几何参数

当量直径 D 分别 0.46 和 $24\ \mu\text{m}$ 。

$$F = \frac{36\pi V^2}{S^3} \quad (1)$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} \quad (2)$$

4 结 论

用连续切片的三维重构技术分析半固态铝合金组织,并构建了用 RAP 法制备的半固态 7075 铝合金的三维组织模型,获得了对高固相率半固态金属坯料显微组织三维形态的直观认识。发现所制备的半固态坯料的空间结构为固相间隙内填充液相,液相以相互连通或孤立存在的形式呈现非常复杂的空间形态,液相率为 17.3% ,利用该方法还可以很方便地定量分析单个固相颗粒。

参 考 文 献

- [1] ULLAH A, LIU G Q, WANG H, et al. Optimal approach of three-dimensional microstructure reconstructions and visualizations [J]. Materials Express, 2013, 3(2): 109-118.
- [2] 韩远飞,曾卫东,赵永庆. 显微组织三维重构技术在材料科学研究领域中的应用[J]. 材料导报,2012,26(21):113-118.
- [3] 李明,李元东,邱谨,等. 保温参数对 A356 铝合金半固态组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2016,36(1):35-39.
- [4] CANYOOK R, PETSUT S, WISUTMETHANGOON S, et al. Evolution of microstructure in semi-solid slurries of rheocast aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(9):1 649-1 655.
- [5] TAO J Q, WAN Y Y, SUN C J, et al. Microstructure evolution of an Mg-Zn-Nd-Zr magnesium alloy during recrystallization and partial remelting process[J]. China Foundry, 2013, 10(4):244-247.
- [6] 吴保亮,杨湘杰,王明,等. 基于 Mimics 的 A356 铝合金微观组织结构的三维重构[J]. 铸造,2014,35(11):1 118-1 123.
- [7] 朱会. 铝合金流变铸造组织三维重构及空间结构表征[D]. 南昌:南昌大学,2013.
- [8] 张靖宇,刘洪军. 挤压态 7075 铝合金半固态加热过程中的组织演变[J]. 特种铸造及有色合金,2016,36(7):717-721.
- [9] ALKEMPER J, VOORHEES P W. Quantitative serial sectioning analysis[J]. Journal of Microscopy-oxford, 2001, 201(3): 388-394.

(编辑:袁振国)

欢迎使用在线稿件处理系统
投稿、查稿、审稿
敬请登录 www.special-cast.com