

文章编号:1000-582X(2007)03-0120-05

铸造镁合金弹塑性多尺度模型数值分析*

李建军¹,曾祥国²,范镜泓¹,郑恒伟¹

(1. 重庆大学资源及环境科学学院,重庆 400030; 2. 四川大学建筑与环境学院,四川 成都 610065)

摘要:为了实现应力与应变等力学量跨不同尺度的定量转换,并获得跨微/细/宏观的多尺度有效本构方程,利用 MTS 材料实验机对镁合金(AM60)和美国通用汽车公司提供的纯镁基体进行了力学性能测试,得出镁合金和基体材料的力学性能参数,采用混合物定律,得到相应的颗粒材料力学性能。根据镁合金(AM60)结构特点,建立具有复杂内部结构(任意夹杂形状)的镁合金体胞的有限元模型,夹杂和基体的材料性能分别选用颗粒材料和纯镁基体材料力学性能参数。通过对镁合金体胞的有限元数值分析,该方法克服了目前解析法建立多尺度模型的局限性。利用所发展的多尺度本构模型对镁合金 AM60 的单向拉伸过程进行了数值计算,结果与实验数据吻合较好。

关键词:镁合金;多尺度;弹塑性;有限元;实验

中图分类号: O343.2

文献标识码: A

铸造镁合金材料质量轻、比强度高、比刚度高,同时又具有良好的减震性和可以回收等优点,在交通、航空、航天等行业得到广泛的应用^[1-2]。但是铸造镁合金作为新型结构材料也有其自身的弱点,其表面较粗糙,在铸造过程中形成许多夹杂,在夹杂/颗粒附近容易产生应力集中并引发材料损伤(如颗粒的断裂、界面脱粘和基体损伤等)。因此如何弄清铸造镁合金的微观结构及其对宏观力学性能的影响对于优化铸造工艺参数具有重要作用^[3]。虽然人们已经认识到材料的微观结构与宏观性能有着强烈的依赖关系^[4-5],而且从实验上也有相当的进展来清晰再现材料的微结构及各组分的材料机械性能,但缺乏相关的模型与方法以决定在各尺度下,相关力学量的定量关系。研究表明^[4-6]:如果不能将细、微观尺度计算的物理量通过一定的等效方法转换到宏观尺度,就不能准确了解材料整体的力学性能以及材料破坏的机理与微结构的关系。

目前多尺度的研究方法大多通过解析模型建立不同尺度力学量的相互联系,如剪切滞后型模型、自洽模型、Eshelby 模型等,这些理论分析方法不能对材料的各组成相的几何形状尺寸效应及影响进行分析。且在分析之前作了较多假设,不可避免将引起误差。有限元

数值模拟就体现出在这方面的优点。但是大部分研究仍然是基于理想化周期分布的单胞体元模型^[7],在分析中常将模型设计成对称性的,为减少计算量而将其转化为二维问题。这仅仅对某些平面问题有意义,如非连续或连续纤维增强的轴向加载过程。而事实上颗粒在材料中的分布具有任意性,其微观结构具有很强的三维特点^[7],二维任意分布单胞的模拟结果与三维模型有着本质的区别^[8]。因而有必要采用多尺度方法将宏/细/微观材料的特性联系起来直观研究金属基材料破坏机理。

利用 MTS 材料实验机对镁合金(AM60)和美国通用汽车公司提供的纯镁基体进行了力学性能测试,获得镁合金和基体材料的力学性能参数,利用混合物定律,得到相应的颗粒材料机械性能。根据镁合金(AM60)结构特点,建立具有复杂内部结构(任意夹杂形状)的镁合金体胞的有限元模型,夹杂和基体的材料性能分别选用颗粒材料机械性能和纯镁基体材料性能参数。通过对镁合金体胞的有限元数值分析,实现了应力与应变等力学量跨不同尺度的定量转换,并获得跨微/细/宏观的多尺度有效本构方程;该方法克服了目前解析法建立多尺度模型的局限性。利用所发展的

* 收稿日期:2006-10-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10372119);四川大学“985”科技创新平台引进人才资助项目

作者简介:李建军(1981-),男,重庆大学硕士研究生,主要从事工程材料的本构关系、损伤、断裂及疲劳的研究。曾祥国,男,教授,E-mail:xiangguo_zeng@126.com.

多尺度本构模型对镁合金 AM60 的单向拉伸过程进行了数值计算,结果与实验数据进行比较验证.

1 试验设计和结果

1.1 试验方法

针对镁基体、镁合金和镁合金内部颗粒材料性能的研究分别进行了系统的纯镁基体和镁合金力学性能测试,利用混合物理论,得出建立多尺度模型必要的微观材料参数.

1.2 试验设备

试验装置采用 MTS809.10S 系列液压拉扭伺服试验机,如图 1 所示,在试样上装夹引伸计(634.31F-25)测量应变,标距为 20 mm,行程为 ± 4 mm,对整个试验进行闭环控制与数据采集,实时记录轴力、变形等.

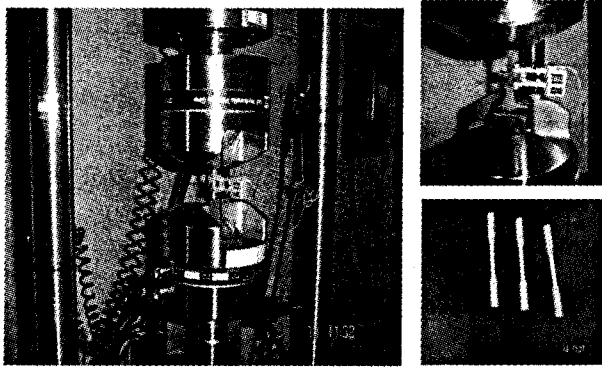


图1 试验装置

1.3 试验材料

镁基体试验选用通用汽车公司提供的纯镁基体,镁合金试验选用 AM60(牌号取自 ASTM 标准)作为试件,其中 AM60 的主要成份见表 1,基本性能参数见表 2.

表1 AM60 的主要成分 wt%

元素	Mn	A	Zn	Si	Cu	Ni	Fe
含量	0.500	6.000	0.200	0.050	0.008	0.001	0.004

表2 室温下镁合金 AM60 的力学性能参数

强度极限/MPa	屈服极限/MPa	杨氏模量/GPa	泊松比
215	125	45	0.277

1.4 试验结果及分析

试验采用应变控制,应变率为 5×10^{-4} /s,镁基体拉伸试验应力应变曲线如图 2 所示,镁合金 AM60 试验曲线如图 3 所示.

在试验的弹塑性范围内可以通过混合物理论得到颗粒材料的性能曲线如图 4 所示.从图 4 可以看出,镁合金的强度和韧性明显高于纯镁基体,因此可以推断

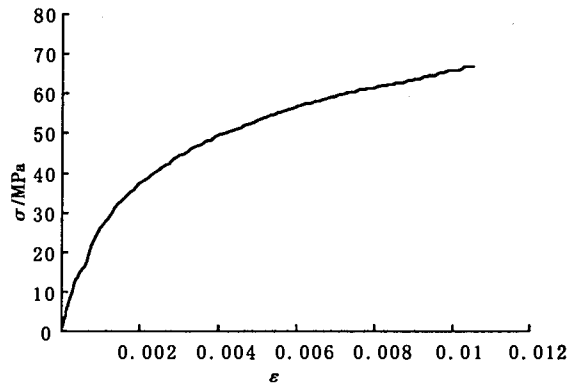


图2 镁基体拉伸应力应变试验曲线

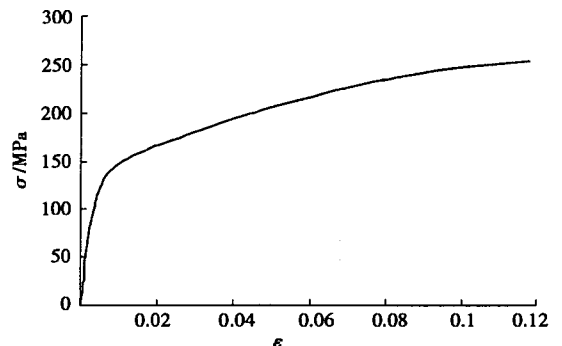


图3 镁合金 AM6 拉伸应力应变试验曲线

镁合金内部结构和二相粒子对镁合金的综合机械性能有很大的影响.

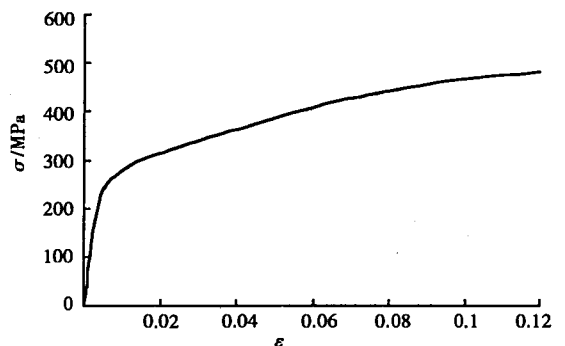


图4 颗粒拉伸应力应变曲线

2 多尺度分析方法

为了更好地模拟微观缺陷,将微观缺陷通过不同的微观结构来反映,采用有限元方法对微观结构进行离散,计算其弹塑性增量应力和应变,从而实现跨尺度间的力学量的转换.

已知宏观应力增量,欲求宏观弹塑性应变增量时,不是直接通过宏观弹塑性本构关系求得,而是由各微观结构的平均应变增量通过加权平均而得到.微观结构的平均应变增量是由将微观结构的应力增量作为载荷作用在微观结构的外表面上,由有限单元法计算得

到的,但细观结构的应力增量又是与宏观应力增量和宏观应变增量相关的.

2.1 宏观细观转换关系

采用文献[9-11]提出的宏观细观转换关系,其主要内容可简述如下:

约定: Δ 为整体坐标系中的增量, d 为局部坐标系中的增量,符号有右上标 c 表示细观量,符号上面有横线表示宏观量.

$$\text{设 } \{\Delta \bar{\sigma}\} = \begin{Bmatrix} \Delta \bar{\sigma}_x \\ \Delta \bar{\sigma}_y \\ \Delta \bar{\sigma}_z \\ \Delta \bar{\tau}_{xy} \\ \Delta \bar{\tau}_{yz} \\ \Delta \bar{\tau}_{zx} \end{Bmatrix} \text{ 为宏观应力增量, } \{\Delta \bar{\varepsilon}\} = \begin{Bmatrix} \Delta \bar{\varepsilon}_x \\ \Delta \bar{\varepsilon}_y \\ \Delta \bar{\varepsilon}_z \\ \Delta \bar{\gamma}_{xy} \\ \Delta \bar{\gamma}_{yz} \\ \Delta \bar{\gamma}_{zx} \end{Bmatrix},$$

$$\{\Delta \bar{\varepsilon}^e\} = \begin{Bmatrix} \Delta \bar{\varepsilon}_x^e \\ \Delta \bar{\varepsilon}_y^e \\ \Delta \bar{\varepsilon}_z^e \\ \Delta \bar{\gamma}_{xy}^e \\ \Delta \bar{\gamma}_{yz}^e \\ \Delta \bar{\gamma}_{zx}^e \end{Bmatrix}, \quad \{\Delta \bar{\varepsilon}^p\} = \begin{Bmatrix} \Delta \bar{\varepsilon}_x^p \\ \Delta \bar{\varepsilon}_y^p \\ \Delta \bar{\varepsilon}_z^p \\ \Delta \bar{\gamma}_{xy}^p \\ \Delta \bar{\gamma}_{yz}^p \\ \Delta \bar{\gamma}_{zx}^p \end{Bmatrix},$$

分别为宏观总应变增量、宏观弹性应变增量和宏观塑性应变增量.

$$\{\Delta \bar{\varepsilon}\} = \{\Delta \bar{\varepsilon}^e\} + \{\Delta \bar{\varepsilon}^p\}.$$

同样地,定义细观结构在局部坐标系中的量为 $\{d\sigma^c\}$ 为细观应力增量, $\{d\varepsilon^c\}$ 为细观平均总应变增量, $\{d\varepsilon^{ec}\}$ 为细观平均弹性应变增量和 $\{d\varepsilon^{pc}\}$ 为细观平均塑性应变增量,他们都是 6×1 的列向量.同样有

$$\{d\varepsilon^c\} = \{d\varepsilon^{ec}\} + \{d\varepsilon^{pc}\}.$$

定义: $\{\Delta \bar{Q}\}_{6 \times 1}$ 为名义载荷,有

$$\{\Delta \bar{Q}\} = \left(1 + \frac{B}{2G}\right) \{\Delta \bar{\sigma}\} + B \{\Delta \varepsilon^p\} + \left(\frac{A}{3K} - \frac{B\mu}{2G(1+\mu)}\right) \Delta \sigma_{kk} \{\delta\}, \quad (1)$$

式中 A, B, G, K, μ 为随宏观应力应变变化的材料参数.

$$\{\Delta \bar{Q}\} \Delta \sigma_{kk} = \Delta \bar{\sigma}_x + \Delta \bar{\sigma}_y + \Delta \bar{\sigma}_z,$$

$$\{\delta\} = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T.$$

由 $\{\Delta \bar{Q}\}$ 经坐标变换到细观结构的局部坐标系下,得细观结构的名义载荷 $\{d\bar{Q}\}$,于是有

$$\{d\bar{Q}\} = \{d\sigma^c\} + Ad\varepsilon_{kk}^e \{\delta\} + B \{d\varepsilon^c\}, \quad (2)$$

其中 $d\varepsilon_{kk}^e = d\varepsilon_x^e + d\varepsilon_y^e + d\varepsilon_z^e$.

每个细观结构的平均塑性应变变量 $\{d\varepsilon^{pc}\}$ 通过坐标变换到整体坐标系下为 $\Delta \varepsilon^{pc}$,再加权平均得宏观塑性

应变增量,即

$$\{\Delta \varepsilon^p\} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n w_i \{\Delta \varepsilon^{pc}\}_i, \quad (3)$$

其中, i 为细观结构的编号, n 为不同方位的细观结构的总数.按文献[9]的研究结果,取 $n=40$,以上宏观细观转换关系可用如下关系如图5所示.

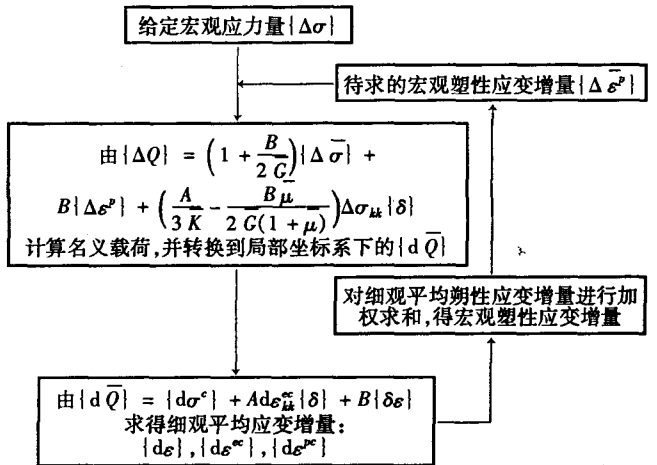


图5 宏观细观转换关系

2.2 宏观细观力学的计算流程图

由图5的宏观细观转换关系,可以看到要实现宏观的转换计算,可以采用如下图6所示的流程.

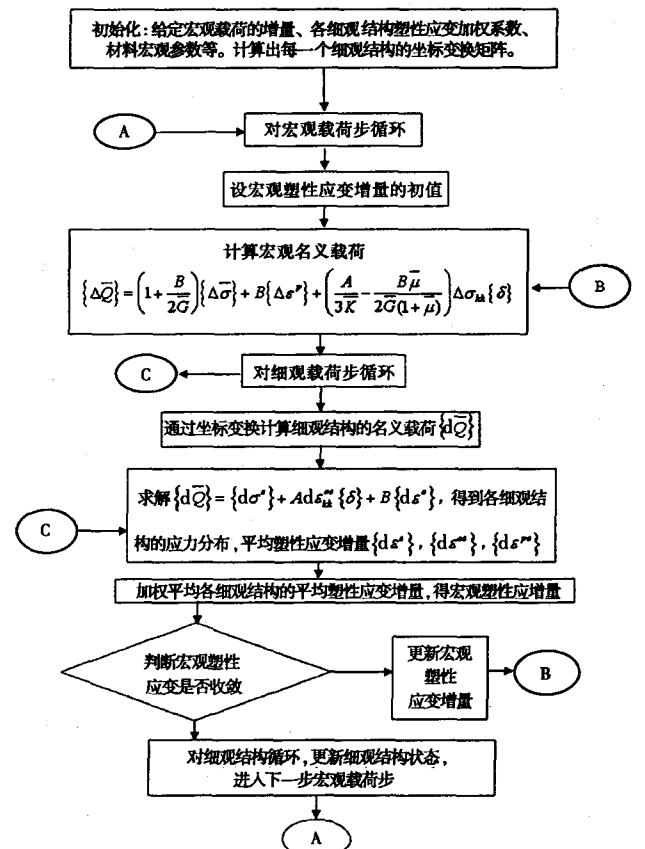


图6 宏观细观力学的计算流程图

笔者借助自编有限元分析程序实现了上述宏观细观的转换关系,从而获得拉伸作用下铸造镁合金材料的宏观应力应变,直观反映了颗粒对镁合金材料力学性能的影响。

3 有限元模型

3.1 有限元分析模型及网格划分

针对前处理所需解决的多尺度分析问题,将夹杂与基体分成不同的材料组元,并分别定义材料的特性,使得分析能够进入微观结构,需建立两个不同的结构单元;同时为了使得计算工作量大为减少,需要对有限元模型分别划分网格.基于有限元分析程序建立三维细观模型,且分成两个结构单元组,其中之一为默认组 *default_group* (即基体),另需新建一个结构以便处理成为微观单元模型(夹杂/颗粒).如图7所示为细观模型,图8为细观模型剖面。

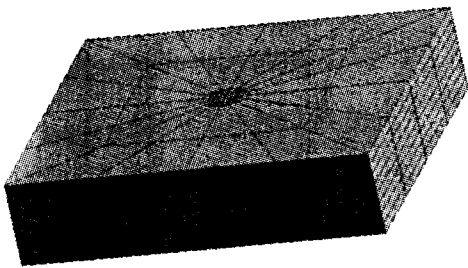


图7 细观模型图

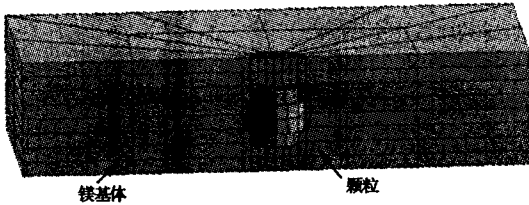


图8 细观模型剖面图

为了真实模拟材料在各尺度上的特性,模型采用8节点等参六面体单元.网格划分后,单元总数为640,节点总数为801,有限元模型在三维数值模拟过程中得到了优化,相应减少了计算量,显示出了一定的前处理优势。

3.2 材料性质

基体和颗粒材料性质如表3所示,采用随动强化模型进行弹塑性计算。

表3 材料性质

Materials	E/GPa	ν	σ_m /MPa
基体 Matrix(Mg)	30	0.3	90
颗粒 Particle	60	0.25	600

3.3 载荷及边界条件

1) 载荷条件.在宏观细观转换计算中,宏观应力应

变指的就是在弹性力学中所称的一点的应力应变状态,而细观结构是一个在三维空间中的六面体,且每个外表面的法线方向是与局部直角坐标系的坐标轴平行的,只是细观结构内部可有不同缺陷(如大小、形状不同的空洞)、不同的材料等,其几何尺寸为细观量级.细观结构所受的载荷就是将细观结构的增量应力 $d\sigma^e$ 作为均布载荷作用在细观结构的6个外表面上,如将 x 方向的正应力 $d\sigma_x$ 作为均布压力载荷分别作用在法线为 x 轴正方向和 x 轴负方向的外表面上,剪应力 $d\tau_{xy}$ 作为面内载荷分别作用为法线 x 轴正方向和 x 轴负方向的外表面上且分别沿 y 轴的正向和负向,其它应力分量也作类似处理,整个六面体外表面的载荷是对称施加的;宏观载荷采用38步单调加载至142.88 MPa.

2) 边界条件.由于有限元计算要求结构没有刚体位移,因此对细观结构施加的位移约束,只是起消除刚体位移的作用,对细观结构的应力、应变不产生影响.对细观结构六面体其中一个外表面的4个角点(即4个节点)作刚体位移约束,如一个角点为固定,另外3个角点约束 z 方向的位移,同时与固定角点非对角的一个角点约束其 x 方向的位移。

3.4 计算结果及分析

在计算开始之前,需要将前处理得到的模型参数进行整理(也可以通过一定的简单程序实现),获得跨尺度间物理量的转换和有限元分析所需要的模型数据。

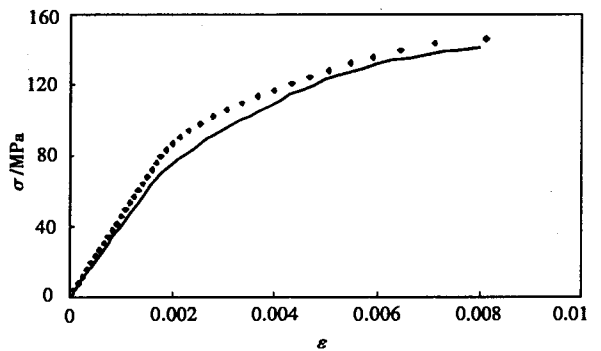


图9 铸造镁合金 AM60 拉伸应力应变曲线

图9所示为计算值与试验值的比较,图9中显示了计算结果和试验结果较为吻合,且随着载荷的逐步加大,两者愈来愈接近,这与实际工程应用背景相符。

4 结论

1) 以铸造镁合金 AM60 作为研究对象,运用有限元分析软件建立了含有一般形状颗粒的三维有限元细观模型,并创新了该类模型四边形网格生成方法,使得进行含复杂微结构金属材料跨3个尺度本构模型的研

究变得更加灵活.

2)将镁合金微观结构各组相本构关系嵌入到相应的有限元模型中,由宏/细观迭代计算过程确定跨尺度间力学量之间的定量关系,计算得到宏观应力应变曲线,结果与实验值吻合较好.

3)传统多尺度分析多数采用解析法对形状规则的颗粒(如球形颗粒)进行理论分析;而文中采用有限元数值模拟了含复杂微结构的多尺度模型,结果表明用有限元数值方法建立铸造镁合金弹塑性多尺度模型,计算效率高,具有理论意义又有实际工程应用价值.

参考文献:

- [1] ALAN LUO, JEAN RENAUD, ISAO NAKATSUQAWA, et al. Magnesium castings for automotive applications [J]. JOM, 1995, 47(7): 28-31. 1qxccc
- [2] 刘正, 王越, 王中光, 等. 镁基轻质材料的研究与应用[J]. 材料研究学报, 2000, 14(5): 449-456.
- [3] 周储伟, 杨卫, 方岱宁. 金属基复合材料的强度与损伤分析[J]. 固体力学学报, 2000, 21(2): 161-165.
- [4] CHEN JIUN-SHYAN, MEHRAEEN SHAFIGH. Multi-scale modelling of heterogeneous materials with fixed and evolving Microstructure [J]. Modell Simul Mater Sci Eng, 2005, 13(1): 95-121.
- [5] SAIKI ISAO, OOUE KEN, TERADA KENJIRO, et al. Multi-scale analysis of cellular materials with frame elements by nonlinear Homogenization [J]. Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu A, 2003, 69(4): 786-793.
- [6] 刘更, 刘天祥, 张征, 等. 宏观-微观多尺度数值计算方法研究进展[J]. 中国机械工程, 2005, 16(8): 1493-1498.
- [7] LEGGOE W J. Finite element modeling of deformation in particulate reinforced MMCs [J]. Acta Mater, 1998, 46(17): 60-76.
- [8] IUNG T, GRANGE M. Mechanical behaviour of two-phase materials investigated by the finite element method: necessity of three-dimensional modeling [J]. Mater Sci Eng A Struct Mater Pro PMicrostruct Process, 1995, A201(10): 8-11.
- [9] FAN J, GAO Z, ZENG X. Cyclic plasticity across micro/meso/macroscale scales. the royal proceeding mathematical [J]. Physical and Engineering Science, 2004, 460(2045): 1477-1505.
- [10] FAN J. Micro/macroscale analysis for cyclic plasticity of dual-phase materials [J]. Journal of Applied Mechanics, 1999, 66(1): 124-136.
- [11] 范镜泓, 高芝晖, 刘天模. 具层状细观结构的PD3珠光体钢的细宏观力学分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 1999, 22(9): 37-46.

Numerical Simulation of Elastoplastic Multi-scales Model for Casting Magnesium Alloy

LI Jian-jun¹, ZENG Xiang-guo², FAN Jing-hong¹, ZHENG Heng-wei¹

(1. College of Resource and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Department of Civil Eng. & Mechanics, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To realize the transforms of stress and strain and obtain the multi-scale constitutive equation across micro/meso/macro scales. strain-stress curves for magnesium alloy (AM60) and magnesium matrix are carried out with the machine MTS. By means of mixture law, mechanical property of particle is obtained. Based on the character of magnesium alloy structure, the finite element model of unit-cell included complex micro-structures is carried out. Via finite element numerical simulation of magnesium alloy unit-cell, the methodology overcome the limitation of present analytical method. Finally the multi-scale constitutive equation has been used for the analysis of the tensile stress vs. strain curve for magnesium alloy. Results show satisfactory agreement between the stress vs strain curve by the present methodology and the experimental data for AM60.

Key words: magnesium alloy; multi-scale; elastoplasticity; finite element; experiment;

(编辑 姚 飞)