

纯铝粉末等径角挤压固结模拟及实验研究

李凌风, 巩子天纵, 李萍

(合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009)

摘要: **目的** 研究纯铝粉末在等径角挤压 (ECAP) 工艺下的固结行为。**方法** 采用 Deform 软件对铝粉的 ECAP 工艺进行热力耦合有限元模拟分析, 研究粉末致密情况、静水压力情况以及温度场分布情况等, 剖析铝粉的固结行为。通过铝粉的 ECAP 实验对粉末的固结质量进行综合评定。**结果** 有限元模拟表明, ECAP 剪切转角处静水压力最大, 温度最高, 相对密度接近 0.97, 接近完全致密材料, 为粉末固结提供了必要前提。实验结果表明, 在 200 ℃ 条件下, 可以通过 ECAP 工艺将铝粉固结成为块体材料。**结论** ECAP 变形过程能够在较低的温度条件下实现粉末的固结行为。

关键词: 纯铝粉末; 等径角挤压; 固结成形

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.04.005

中图分类号: TG376

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2014)04-0024-07

Consolidation Simulation and Experimental Research of Pure Aluminum Powder Materials during Equal Channel Angular Pressing

LI Ling-feng, GONG Zi-tian-zong, LI Ping

(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

ABSTRACT: **Objective** To study pure aluminum powder consolidation behavior under ECAP process. **Methods** The software Deform was used for thermodynamic coupling finite element simulation analysis of the aluminum powder ECAP process. The density, force and temperature distribution of the powder were studied to analyze the consolidation behavior of aluminum powder. The quality of powder consolidation was evaluated through the ECAP experiment of aluminum powder. **Results** Based on the compressible continuous medium theories, thermodynamic coupling finite element simulation of the aluminum powder ECAP process showed that the hydrostatic pressure of the sample reached the maximum when it passed through the intersection part. There was a significant effect of shear heating at the intersection part, resulting in the peak temperature. The relative density could reach 0.97, and the almost fully dense material provided favorable conditions for powder consolidation. Experimental results showed that pure aluminum powder could be successfully consolidated into fully dense bulk material at 200 ℃ using ECAP. **Conclusion** The ECAP deformation process was conducive to consolidate the powder under the condition of low temperature.

KEY WORDS: pure aluminum powder; equal channel angular pressing; consolidation forming

收稿日期: 2014-04-22

基金项目: 霍英东教育基金会资助项目 (121053)

作者简介: 李凌风 (1989—), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 主要研究方向为精密塑性成形工艺及仿真。

在全球经济及科学技术高速发展的今天,材料作为机械、汽车、电子、自动化等各行各业的载体,体现出越来越明显的重要性。现有材料的性能改善和新型材料的研发研制,不仅体现了国家及地区的经济实力和科技水平,更是航空、航天、船舶、兵工等国防支柱的重要保证。作为新型材料研制的一种极为重要的方法,粉末冶金技术因其具有高效节能、绿色环保、近净成形的工艺特点,使之在诸多领域都获得了高度的关注和广泛的应用^[1-4]。

考虑到传统的粉末冶金工艺无法获得高致密度以及高性能的功能材料,自20世纪中后期以来,粉末塑性加工技术得到了长足的发展^[5]。在保留传统粉冶工艺实用性的前提下,将塑性加工技术的优越性融入其中,从而形成的新型固结技术,成为了当下制造各类零部件及工业产品的最为重要的技术之一。^[6-9]

等径角挤压工艺(ECAP)作为一种先进的大塑性变形法,不仅在有效细化块体材料的晶粒上得到了充分的肯定,同样也越来越多地直接适用在粉体原材料上^[10]。目前学术界已经开展了铜、铝、钨等粉末材料的ECAP实验及研究,但当前仍处于初期探索阶段^[11-14]。现阶段的各种关于ECAP的研究,都是集中在针对充分细化的晶粒,改善其组织结构以及全面提高材料的综合性能等方面,对于粉体固结行为等方面的研究还很少有相关的报道。文中以纯铝粉末为研究对象,利用有限元分析软件Deform,针对ECAP变形过程进行数值模拟,全面分析变形过程中的温度场、静水压力场及致密度变化规律等,分析铝粉的固结行为。随后进行ECAP的实验研究,对粉末的固结质量进行综合评定。

1 有限元模型的建立

1.1 几何模型的建立

ECAP的三维几何模型如图1所示。在等径角挤压变形过程中,材料经过ECAP的通道时,由于模具特殊的结构设计,变形主要在Y面上产生,材料的X面上形状基本保持不变,因此可以近似地忽略掉材料在X面上的流动。基于这种近似假设,单一道次ECAP的变形过程可以看作为一个平面应变问题,因此可以通过二维的几何模型对其进行研究。

通过采用这种三维向二维几何模型的合理转化,不仅同样能够对实际问题进行表述,还极大地节省了ECAP模拟过程的计算成本以及时间成本。简化后的二维ECAP几何模型由下模具、冲头及坯料组成,具体如下图2所示。二维几何模型中设定坯料尺寸为50 mm×10 mm的规格,定义下模具内部交角为90°,外部圆角设置为37°。

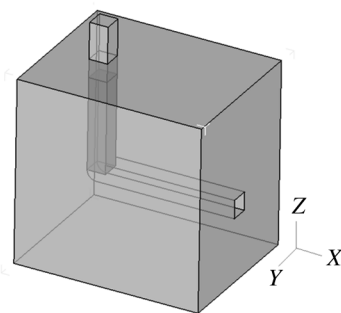


图1 ECAP 三维几何模型

Fig. 1 3D geometric model of ECAP

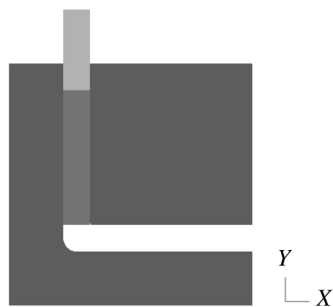


图2 ECAP 二维几何模型

Fig. 2 2D geometric model of ECAP

1.2 模拟参数的设置

采用热力耦合的计算方法,综合考虑坯料在变形过程中温度的变化,坯料受压后变形量的大小,以及坯料发生大变形的速率问题。坯料的材料选用纯铝(Al1100),选择温度适用区间为150~550℃的类型,由于是针对松散的粉末体进行模拟,因此设置材料种类为多孔体,初始的坯料致密度设置为0.75。由于在实验过程中冲头以及下模具部分发生的弹性变形量可以忽略不计,因此在软件中定义其为刚体,材料定义为H13模具钢。由于在后处理的输出结果中,需要针对温度场进行分析,因此除了给坯料划

分网格和定义初始温度以外,冲头和下模具也进行网格的划分及温度初始值的给定。对坯料划分的网格数量为2000个,对冲头及下模具划分的网格数量分别为600及8500个。定义铝粉坯料及整体模具的温度同为200℃。合理的摩擦参数及类型的定义有利于真实反映实际实验中的情况及确保计算程序正确迭代运算,定义坯料与模具之间的摩擦因子为0.15,为常剪切摩擦处理。冲头下行的速度定义为10 mm/s。

2 模拟结果分析与讨论

2.1 致密情况分析

粉末材料的塑性加工工艺中一个重要的环节即为提高材料的致密程度,通过孔隙的减少及消除来提高材料的相对密度,对于获得高力学性能的制品具有重要的意义;同时,致密度的提高也是粉末原材料实现固结的前提条件。图3所示的是纯铝粉末体在ECAP的不同变形阶段的相对密度分布等值线图。

随着变形粉末体的头部部分进入水平通道部

分,出现了明显的复杂密度梯度,如图3a所示。初始压缩阶段中粉末颗粒之间的点接触在这一阶段逐渐转变为面接触,颗粒之间存在的孔隙形状发生了很大的变化,孔隙由大而不规则的形状分割成为小而连通的孔隙,孔隙的总量也大为减少。当变形过程进入到稳定变形阶段时,出现一个相对稳定的致密区间,高密度区域的致密度可以高达0.97左右,接近为完全致密材料,如图3c所示。粉末体的孔隙由于剪切作用沿着剪切方向被压扁和拉长,随着孔隙数量进一步大量减少,连通的孔隙也转变为独立的封闭小孔。铝粉颗粒在通过剪切区域作用后完成固结。

2.2 静水压力分析

纯铝粉末体在ECAP的变形过程中的静水压力,将直接决定能否获得较好的固结结果。图4所示的是材料在ECAP变形不同阶段的静水压力分布情况。从图4中可以看出,冲头的下行运动给纯铝坯料施加了很大的静水压力作用,粉末体处于压制状态。由于在模具的内部交角处的金属流动最为困难,因此该处一直保持很大的压力值。

从冲头行程为20 mm开始到变形过程结束,在

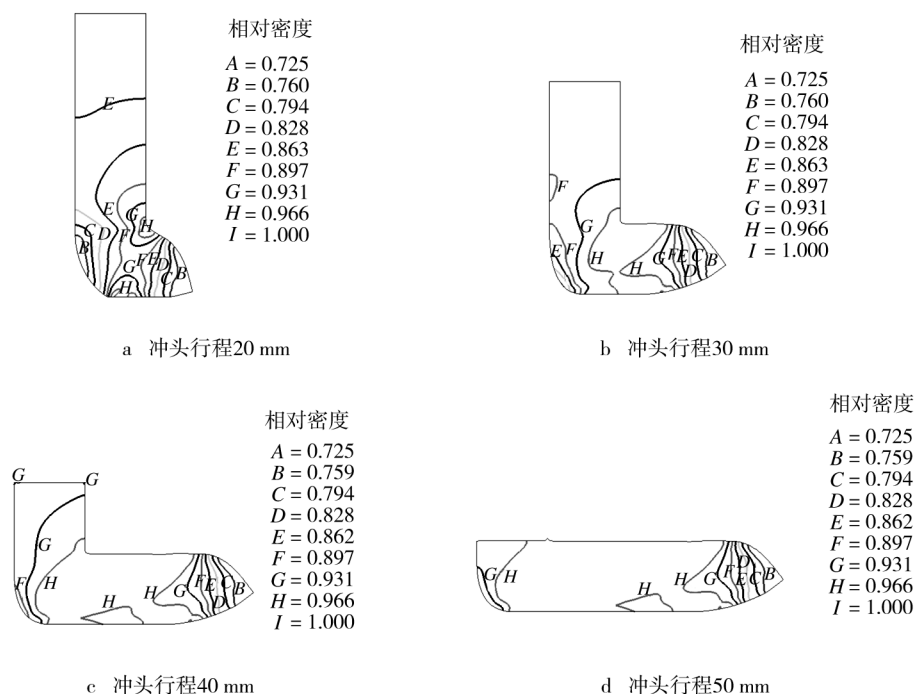


图3 纯铝粉末体在不同阶段的相对密度分布

Fig. 3 Distribution of relative density of pure Al powder at different stages

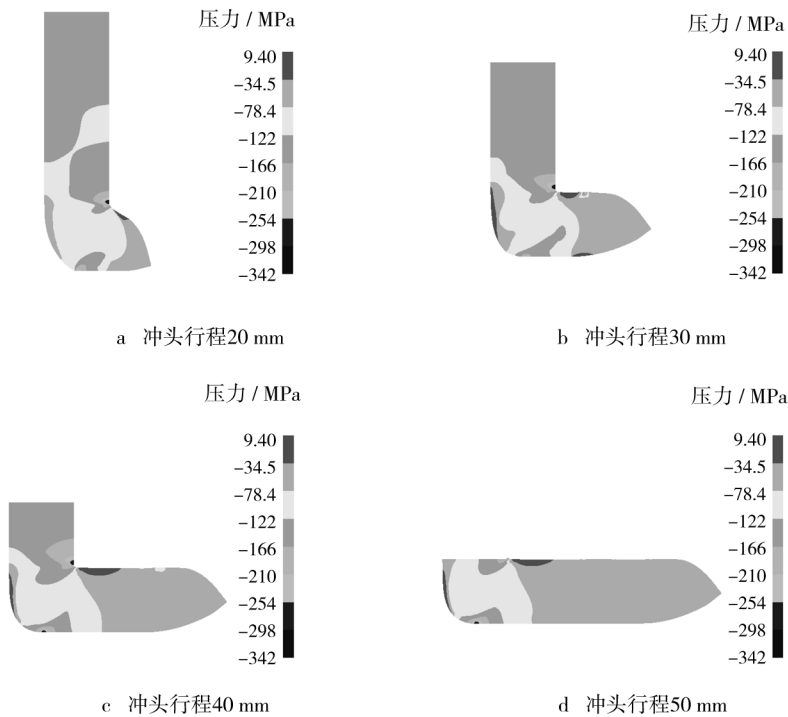


图4 纯铝粉末体在不同阶段的静水压力分布

Fig. 4 Distribution of hydrostatic pressure of pure Al powder at different stages

通道的剪切转角处一直维持着稳定的高静水压力状态。从受力分布云图上可以看出,剪切区域的平均压力值约为 120 MPa,由前面的致密情况分析可知,正是在这一区域中变形粉末体的致密程度获得极大的增幅。高的静水压力能够有效地压缩粉末体体积,闭合粉末体内部的孔隙。从固体扩散理论可以知道,压力和温度为影响扩散现象的最主要因素,高静水压力状态有利于提高原子的扩散系数值,促进相邻颗粒间原子界面的扩散过程的发生,配合通道转角处的剧烈剪切作用产生的大程度变形,原子界面处将产生越来越多的空位及缺陷等,表面能的提高将提供颗粒之间界面扩散的原驱动力;另外一方面,高的静水压力状态将进一步增大粉末颗粒的接触面积,从而可以实现在较低的温度下直接将粉末固结为高致密材料。

2.3 温度场分析

温度场是 ECAP 变形过程中极为重要的参量。纯铝粉末材料在合适的温度下发生变形,其塑性变形能力将会有较大的提高。同时由于温度为影响固相扩散的另外一个重要因素,相对较高的温度下粉

末颗粒之间发生扩散固结的能力也会越大。分析纯铝粉体在 ECAP 的变形条件下的温度场分布,对于全面研究粉末体的固结行为具有重要意义。图 5 所示的是在不同的阶段,变形粉体的温度场瞬时分布情况。

由图 5 可以看出,温度场表现出明显的层状分布。在模拟中所给出的变形条件下,温度最高的区域集中在 ECAP 模具的转角部分,同时该部分也是剪切塑性变形发生得最为剧烈的部分,该部分的温度区间为 282 ~ 310 ℃,其平均值约为 300 ℃,相比较于变形坯料初始的 200 ℃,有了很大的升高。粉末材料进入转角部分后,变形能转换为热能,通过温度提升的形式得以体现,从图中温度标尺可以看出,ECAP 变形会在转角部位产生十分明显的剪切热效应。粉末颗粒通过该处的温度场及压力场的共同作用,最终固结形成高致密材料。经过转角处后,材料进入水平通道,粉体材料的温度值逐步下降,这是由于水平通道部分的平移阶段中,没有变形能继续向热能的转化,材料在与模具体以及空气等的传热及散热作用下,温度逐步降低。

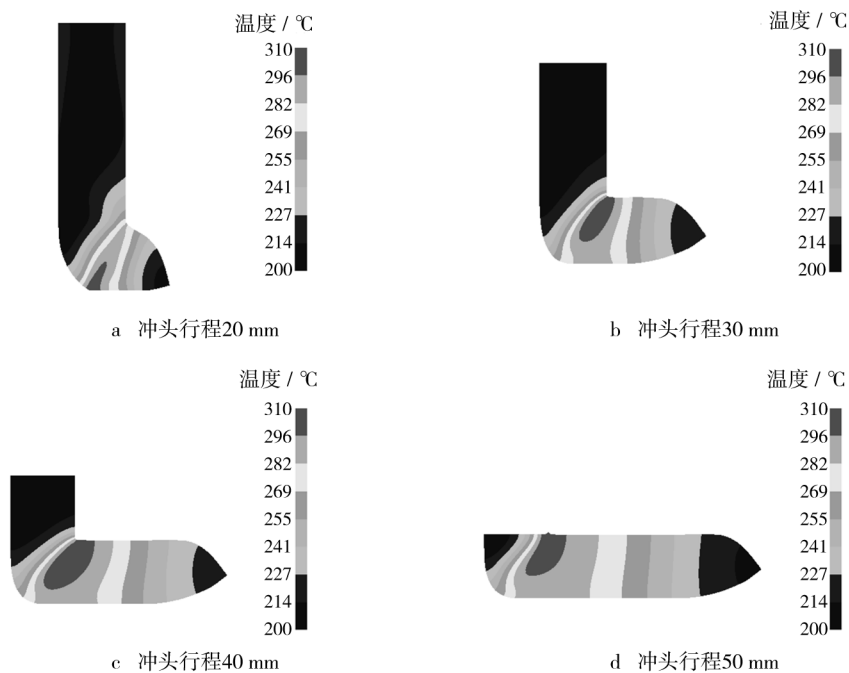


图 5 纯铝粉末体在不同阶段的温度场瞬时分布

Fig.5 Distribution of temperature field of pure Al powder at different stages

3 固结成形实验研究

3.1 实验准备及过程

实验采用了塑性较好的工业纯铝粉末作为实验材料,粉末的粒度为 325 目。纯铝粉末的成分如表 1 所示。

表 1 纯铝粉末的主要元素(质量分数,%)

Table 1 The main components in aluminum powder

元素	Fe	Si	Cu	其他	Al
含量	≤0.6	≤0.3	≤0.05	≤0.01	剩余

为了保证粉末体在 ECAP 变形过程中能够获得较大的塑性变形,实验前一般要将粉末体置于包套内。包套的存在能够防止粉体挤压过程中发生氧化及破裂等不利现象,同时可以将粉末体与外界环境隔离开来,防止外界对粉体产生污染。包套实物图如图 6 所示。

ECAP 模具的整体实物图如图 7 所示。模具的内部交角为 90°,外部圆角为 37°,内角圆弧为 0.5 mm,外角圆弧为 5 mm。本实验中控制模具温度为

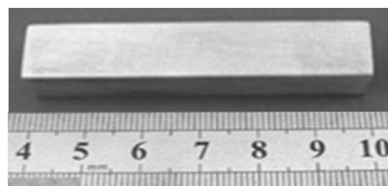


图 6 包套实物

Fig.6 The real product of the sheath



图 7 ECAP 模具

Fig.7 The mold of ECAP

200 °C,通过热电阻圈对模具进行加热保温。试样在真空炉中加热至 200 °C,并保温 0.5 h。随后将试

样充分润滑后置于 ECAP 模具中进行挤压。冲头的下行速度为 10 mm/s。实验中采用的润滑剂为 MoS_2 -石墨润滑剂。

3.2 实验结果分析

完成 ECAP 变形过程的实物图如图 8 所示。通过机加工的方法将表层的包套部分去除。对试样部分进行切割和标记处理,为后续测试部分作准备,切割试样如图 9 所示。

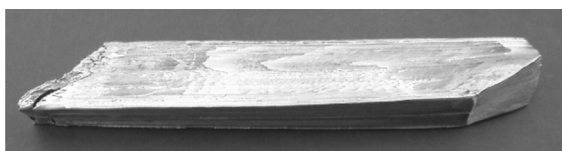


图 8 变形完成后的实物

Fig. 8 The real product after deformation

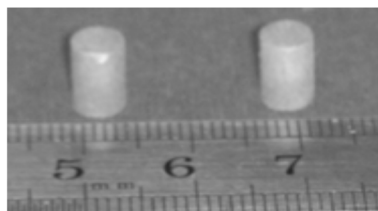


图 9 切割试样

Fig. 9 The cutting sample

为综合评定 ECAP 变形工艺固结纯铝粉末的质量,在 MTS 试验机上进行室温压缩实验,用扫描电镜观察压缩断口形貌。图 10 所示的是不同放大倍数下纯铝粉末体经过 ECAP 变形后,试样的压缩断口 SEM 形貌。观察图 10 可以得出,变形后的试样体现了较为良好的塑性,断口形貌比较光滑,材料断裂形式为片状,基本观察不到明显的铝粉颗粒,固结形式较为良好。通过对断口的观察可充分表明,经过 ECAP 变形作用后,纯铝粉末颗粒之间能够较为理想地实现固结。

为了研究 ECAP 工艺对铝粉致密程度的影响,采用排水法对切割试样的相对密度进行测定。计算得出实验后铝粉的致密度可达 0.945,与 0.75 的初始值相比提高了 26%。ECAP 变形可以消除孔隙,极大地提高粉体的致密程度。图 11 为 ECAP 工艺下烧结铝相对密度变化的文献值^[15]与本实验粉末铝相对密度变化的对比。

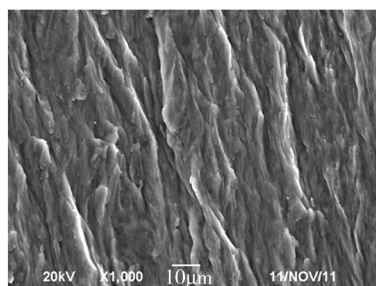
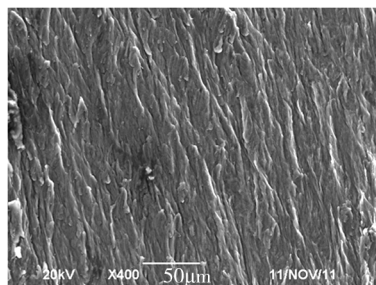


图 10 ECAP 变形试样压缩断口形貌

Fig. 10 Compression fracture morphology of ECAP

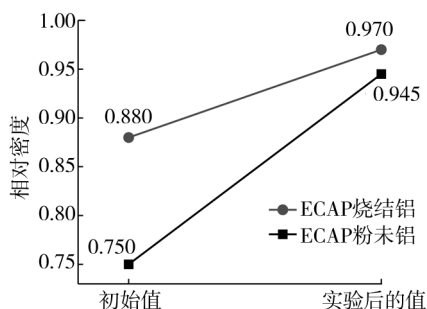


图 11 相对密度对比

Fig. 11 The comparison of relative density

从图 11 中可以看出,经 ECAP 工艺后,粉末铝的相对密度值高于固结态烧结铝的初始值,且与烧结铝变形后的相对密度值接近,即粉体实现了较好的固结。

4 结论

针对粉末等径角挤压固结行为,采用数值模拟的方法研究了纯铝粉末 ECAP 变形过程中的致密度、静水压力及温度场等场量关系,并开展了相应的实验,研究结果表明:

1) 致密度的提高是粉末原材料实现固结的前提条件,坯料相对密度平均值接近 0.97,近乎为完

全致密的材料。

2) 剪切转角的高静水压力状态增大了粉末颗粒的接触面积,其平均压力值约为 120 MPa,通过剪切区域作用后在较低的温度下完成了固结。

3) ECAP 变形会在转角部位产生十分明显的剪切热效应,温度最高的区域集中在 ECAP 模具的转角部分,其温度平均值约为 300 ℃。粉末颗粒通过该处的温度场及压力场的共同作用,最终固结形成了高致密材料。

4) 通过对压缩断口的 SEM 形貌分析,得出了在实验所设定的条件下,纯铝粉末体能够实现较为理想的固结。通过 ECAP 工艺下烧结铝及粉末铝的相对密度的对比,进一步说明可以通过 ECAP 实现粉末的较好固结。

参考文献:

- [1] 黄伯云,易健宏. 现代粉末冶金材料和技术发展现状(二)[J]. 上海金属,2007,29(4):1—5.
HUANG Bai-yun, YI Jian-hong. Current Development of Modern Powder Metallurgy Materials and Technologies (II) [J]. Shanghai Metals, 2007, 29(4):1—5.
- [2] 李元元,肖志瑜,刘允中,等. 粉末短流程成形固结技术的研究及展望[J]. 中国材料进展,2011,30(7):1—9.
LI Yuan-yuan, XIAO Zhi-yu, LIU Yun-zhong, et al. Research on Powder Metallurgy Short Process Forming and Consolidation Technique and Its Prospects[J]. Materials China, 2011, 30(7):1—9.
- [3] 韩凤麒. 世界粉末冶金零件工业动态[J]. 粉末冶金技术,2001,19(4):225—232.
HAN Feng-qi. The Trend of Global PM Parts Industry [J]. Powder Metallurgy Technology, 2001, 19(4):225—232.
- [4] 郑雪萍,李平,曲选辉. 世界粉末冶金行业的发展现状[J]. 稀有金属快报,2005,24(3):6—9.
ZHENG Xue-ping, LI Ping, QU Xuan-hui. The Present Situation of the Powder Metallurgy industry[J]. Rare Metals Letters, 2005, 24(3):6—9.
- [5] 钟仁显,卢百平. 金属粉末成形技术若干进展[J]. 材料导报,2008,22(3):40—43.
ZHONG Ren-xian, LU Bai-ping. Some Development of Metal Powder Forming Technology[J]. Materials Review, 2008, 22(3):40—43.
- [6] 李元元,肖志瑜,陈维平,等. 粉末冶金高致密化成形技术的新进展[J]. 粉末冶金材料科学与工程,2005,

10(1):1—9.

- LI Yuan-yuan, XIAO Zhi-yu, CHEN Wei-ping, et al. Progress in High Density Powder Metallurgy Forming Technology [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2005, 10(1):1—9.
- [7] LU W, YAN B, TANG R J. Bulk Metglas, Finemet and Nanoperm Soft Magnetic Alloys Prepared by Ultra-high-pressure Consolidation[J]. J Alloys Compd, 2006, 425:406.
- [8] TANG Cui-yong, XIAO Zhi-yu, CHEN Jin. Compaction Experiment on the Newly Designed High Velocity Warm Compaction Equipment [J]. Advanced Materials Research, 2010, 139—141:485—488.
- [9] DROZDZ D, LATUCH J, KULIK T. Bulk Amorphous Cast Iron with Small Boron Addition, Produced by Powder Compaction at High Pressure[J]. J Alloys Compd, 2005, 395:59.
- [10] VALIEV R Z, ISLAMGALIEV R K, ALEXANDROV I V. Bulk Nanostuctured Materials from Severe Plastic Deformation[J]. Progress in Materials Science, 2000, 45:103—189.
- [11] HAOUAOUI M, KARAMAN I, MAIER H J, et al. Microstructure Evolution and Mechanical Behavior of Bulk Copper Obtained by Consolidation of Micro- and Nanopowders Using Equal-channel Angular Extrusion[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35:2936—2949.
- [12] WU X, XIA K. Synthesis of Aluminium Based Bulk Materials from Micro and Nano Particles Using Back Pressure Equal Channel Angular Consolidation[J]. Materials Science Forum, 2006, 519—521:1215—1220.
- [13] 李萍,王雪,薛克敏. 纯钨粉末-包套等径角挤压的多尺度研究[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2013, 18(3):452—458.
LI Ping, WANG Xue, XUE Ke-min. Multi-scale Study of Pure Molybdenum Powder Material in Tubes during Equal Channel Angular Pressing[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2013, 18(3):452—458.
- [14] NAGASEKHAR A V, TICK-HON Y, RAMAKANTH K S. Mechanics of Single Pass Equal Channel Angular Extrusion of Powder in Tubes[J]. Applied Physics A, 2006, 85(2):185—194.
- [15] 李萍,黄科帅,薛克敏,等. 纯铝粉末多孔烧结材料等通道转角挤压[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(5):881—886.
LI Ping, HUANG Ke-shuai, XUE Ke-min, et al. Equal Channel Angular Pressing of Pure Al Powder Sintered Material [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(5):881—886.