

• 实用成型技术 Practical Shaping Technology •

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2020.05.019

304L 不锈钢等径角挤压有限元模拟研究

杨智强¹, 赵华荣², 吕潍威¹, 苏 晨¹

(1. 昆明工业职业技术学院 电气学院, 云南 安宁 650302; 2. 昆明理工大学 材料科学与工程学院, 云南 昆明 650093)

摘 要: 在不同温度下对 304 不锈钢进行等径角挤压有限元模拟, 对挤压变形特点及不同温度下的挤压力及等效应力进行对比分析。结果表明, 800 ℃时的最大挤压力是最低的, 该温度下挤压对模具有利。工件温度在 800 ℃时, 其等效应力最大为 267 MPa, 在 400 ℃时其等效应力最小为 224 MPa, 最大变化幅度为 43 MPa, 整体上看工件等效应力受温度影响较小。304 不锈钢在低温条件下进行等径角挤压变形后加工硬化非常严重, 随着挤压温度进一步增加, 拉伸曲线形貌基本上一致。

关键词: 304 不锈钢; 等径角挤压; 有限元模拟; 拉伸曲线

中图分类号: TG376

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2020)05-0490-05

Finite Element Simulation Study on Equal Channel Angular
Extrusion of 304L Stainless SteelYANG Zhiqiang¹, QI Huarong², LYU Weiwei¹, SU Chen¹

(1. Electrical College, Kunming Vocational and Technical College of Industry, Anning 650302, China; 2. School of Material Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The finite element simulation of 304 stainless steel was carried out at different temperatures and the extrusion deformation characteristics and the extrusion force and equivalent stress at different temperatures were compared. analysis. It was found that in the above extrusion temperature, the maximum pressing force at 800 ℃ is the lowest at all temperatures, and extrusion at this temperature is advantageous for the mold. When the workpiece temperature is 800 ℃, the equivalent stress is 267 MPa. At 400 ℃, the equivalent stress is 224 MPa, and the maximum variation is 43 MPa. The overall equivalent stress of the workpiece is less affected by temperature. After 304 stainless steel is subjected to equal-diameter angular deformation under low temperature conditions, the work hardening is very serious. As the extrusion temperature is further increased, the tensile curve morphology is basically the same.

Key words: 304 stainless steel; equal channel angular extrusion; finite element simulation; tensile curve

304 不锈钢因耐蚀、耐热、加工性能好、韧性高、无热处理硬化现象等优异表现, 在工业领域、家具装饰行业和食品医疗行业得到广泛使用。细化 304 不锈钢微观组织结构可提高其综合性能, 扩大其工业应用范围。借助大塑性变形技术可以细化金属材料微观组织, 使其结构强度得到有效提高。等径角挤压工艺(Equal Channel Angular Pressing, ECAP) 工艺能制备具有优异物理和力学性能的无疏松孔洞的金属超细晶块体材料^[1,2], 该工艺优点是在不改变加工试样横截面积的情况下, 使块体金属材料获得 45°纯剪切应变^[3,4], 通过反复大塑性变形积累应变而使块体材料晶粒得到细化。近年来, 国内外专家对

制备 304 不锈钢块体超细晶材料进行了广泛研究^[5-11], 但是对 ECAP 法制备 304 不锈钢超细晶材料的成形机理、变形过程仍研究较少。由于 ECAP 变形过程和结果受到挤压模具的内角 ϕ 、圆心角 ψ 、变形路径、摩擦系数、挤压速度等工艺参数的影响^[12,13], 传统的“经验法”对 ECAP 制备 304 不锈钢超细晶材料变形过程中金属流动的规律、应力及应变实时变化难以把握, 工作量大, 采用有限元模拟技术则可以解决上述中存在的问题^[14]。本文借助成熟的有限元模拟软件平台 DEFORM-3D, 研究不同变形工艺参数下对 304 不锈钢 ECAP 变形过程和变形结果的影响, 为优化 304 不锈钢等径角挤压工艺过程提供参考。

1 等径角挤压工艺概述

图 1 为等径角挤压模具及变形原理示意图。模具具有相等截面积的垂直与水平两个通道, 通道轴线之间以一定交角相连接, 其中内转角用符号“ ϕ ”表

收稿日期: 2020-02-10

基金项目: 云南省教育厅 2017 年度资助性项目(2017ZZX129)

作者简介: 杨智强(1983-), 云南宾川人, 工学硕士, 金属材料工程师。研究方向: 金属材料成型及有限元模拟。

电话: 13608854776, E-mail: yzq2007202074@163.com

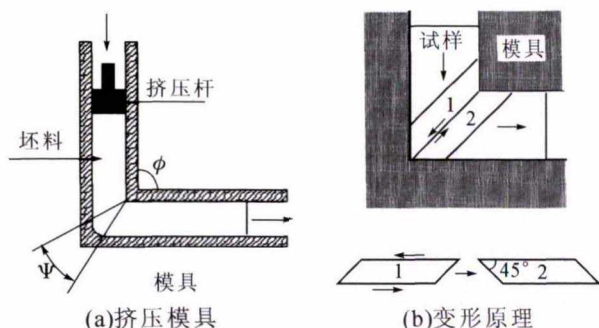


图1 等径角挤压法纯剪切示意图

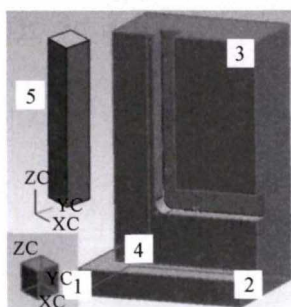
Fig.1 Principle of shearing on passage through the ECAP die

示,外转角用符号“ ψ ”表示。挤压变形前,将尺寸规则的块状金属材料放入润滑良好的模具垂直通道中,块状金属受到挤压杆垂直向下的压力并随之向下运动,由垂直通道匀速缓慢进入水平通道,由水平通道挤出,此时,整个块状材料在经过转角处时获得 45° 纯剪切应力,促使块体金属在不改变横截面积的情况下获得近似理想的纯剪切变形^[15]。因此,可采用多道次挤压变形积累应变量,得到亚微米甚至纳米级的超细晶粒的块状金属材料^[16]。

2 304 不锈钢等径角挤压有限元模拟分析

2.1 304 不锈钢等径角挤压有限元模拟模型建立与参数设置

根据挤压变形工艺需要,借助三维建模软件 UG 绘制出模具与金属块体材料的三维模型,并将金属块体材料、挤压杆和凹槽模型保存成 DEFORM-3D 支持的 .stl 格式文件。为方便多道次挤压模拟,本文挤压模具水平与垂直通道截面均为正方形,尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,长度均为 100 mm ,挤压杆与金属试块截面尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,模具内角 ϕ 为 90° 、圆心角 ψ 为 37° ,如图 2 所示。



1- 压杆;2- 底座;3- 模具上模;4- 模具下模;5- 挤压试样

图2 模具示意图

Fig.2 The schematic diagram of die

挤压试样材料属性定义为 AISI-304 不锈钢,几何尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 。304 不锈钢物理性能^[17]即力学性能参数为:密度为 7.93 g/cm^3 ,弹

性模量 $E=199\text{ GPa}$,泊松比 $\mu=0.247$,屈服强度 $\sigma_s=205\text{ MPa}$,切变模量 $G=79.38\text{ GPa}$,硬化指数 $n=0.193$;变形过程中试块遵循塑性应力应变关系曲线:

$$\bar{\sigma} = c \bar{\epsilon}^n \frac{m}{\epsilon} + y \quad (1)$$

图 3 为 304 不锈钢流变应力曲线。其中 $C=170\text{ MPa}$, $n=0.24$,应变率指数 $m=0$,常数 $y=0$;挤压杆压下速度 $v=2\text{ mm/s}$,金属试块与挤压模具之间的摩擦为剪切摩擦,系数 $m=0.15$ ^[17],挤压杆压下行程为 80 mm ,计算步长 $\text{step}=600$,步长为 0.2 mm 。

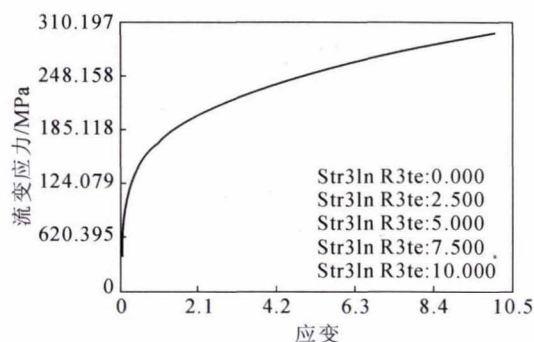


图3 304 不锈钢流变应力曲线

Fig.3 Flow stress curve of 304 stainless steel

金属件的加工温度直接影响加工效果,挤压温度过高会导致金属件在挤压过程中发生回复再结晶,使得晶粒平均尺寸下降;挤压温度太低会导致金属件在挤压过程中产生较大变形抗力。为分析坯料温度对等径角挤压产品质量的影响,文中分别将坯料温度选用 20 、 100 、 400 、 600 和 800°C 进行挤压模拟对比,AISI-304 不锈钢的热学参数选用软件自带的参数。图 4 为材料热膨胀系数、热导系数和热容随温度变化曲线。文中以挤压结束时,对各物理场量进行对比分析。

在前处理设置中,金属试块的网格划分采用四面体单元,单元数为 50 000 。等径角挤压属于剧烈塑性变形,初始划分的网格在变形过程中会产生严重畸变,发生畸变后如果计算继续进行会降低计算精度,计算量变大,甚至出现死循环。所以在挤压模拟运行过程中,当网格畸变干涉深度超过单元体边长 70% 时,设置网格自动重划分。借助 DEFORM-3D 平台刚塑性有限元法对 304 不锈钢块体进行等径角挤压时,在前处理模块参数设置中还应进行以下假设:

(1) 304 不锈钢块体材料体积不可压缩,均质且各向同性,变形过程中不考虑其弹性变形,变形过程中的金属流动遵循增量型 Levy-Mises 本构关系,等向强化。

(2) 挤压杆及模具选用 AISI-D3 钢,为刚性体。

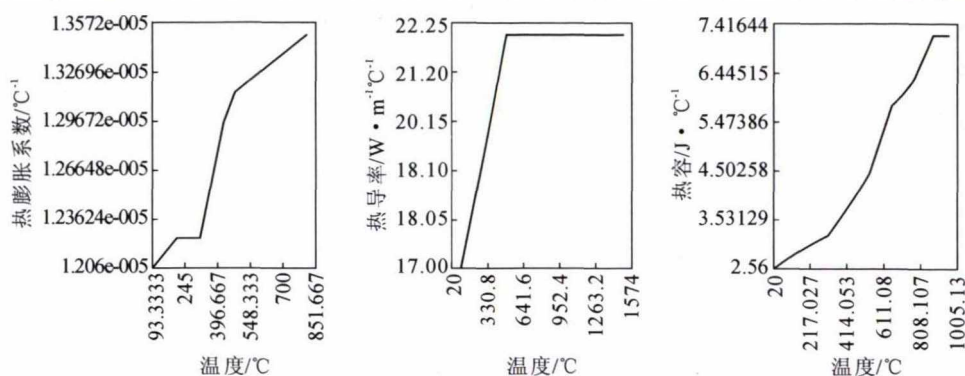


图4 热力学参数设置

Fig.4 Thermodynamic parameter settings

2.2 304 不锈钢等径角挤压有限元模拟结果及分析

2.2.1 304 不锈钢等径角挤压变形过程及特点

304 不锈钢块体在等径角挤压一个道次变形中要经历初期、稳定和终止 3 个阶段。初期载荷增加迅速, 不锈钢块体在模具垂直通道内受压垂直压力, 块体底端率先通过模具拐角, 块体内部受到三向压应力, 端部开始变形, 金属沿着通道出口方向流动。初期变形不剧烈, 主要以弹性变形力为主, 这是载荷曲线呈线性增加的原因, 如图 5(a) 所示。稳定是等径角挤压变形的主要阶段, 以塑性变形为主。块体材料在挤压杆作用下逐渐通过通道扇区并发生剪切变形, 块体上端与模具水平通道顶部完全接触, 内部受到的三向压应力持续增强, 在剪切力作用下发生剧烈塑性变形, 挤压力达到挤压全过程最大; 此时, 金属继续向通道出口流动, 块体前端上部和模具上表面接触逐步脱离, 与模具接触面积持续减小, 摩擦减小, 在载荷-行程曲线中体现为挤压力达到峰值以后缓慢减小。随着挤压继续进行, 块体上端与水平通道上部接触面积增加, 试样所受摩擦力也逐渐增加。在转角处, 试样依然在剪切力的作用下继续发生塑性变形, 当试样逐渐进入水平通道, 摩擦力不断增加而剪切变形的范围不断减小, 此时变形力主要以摩擦力为主, 剪切力在减小, 挤压力随之缓慢减小并上下起伏。随着挤压行程的增加, 金属试样等效应变随之增加。如图 5(b) 所示。当

块体完全进入水平通道, 变形停止, 挤压过程终止。此时, 载荷曲线急剧下降, 如图 5(c) 所示。

2.2.2 不同温度 304 不锈钢等径角挤压变形过程挤压力对比分析

不同挤压温度下的 Z 轴挤压力曲线如图 6 所示。可以看出, 各温度下, 挤压开始阶段挤压力迅速上升, 到达 8.4 s 左右达到最大。这是因为等径角挤压时在拐角地方, 材料流动方向发生大角度变化的原因所致。在 8.4 s 后挤压力逐渐下降, 进入稳定挤压阶段。其中室温(20 °C)和 100 °C 时的最大挤压力为 37.946 kN, 挤压力受温度影响不大; 中间 400 °C 和 600 °C 的最大挤压力为 41.480 kN, 虽然相对前面两个低温有所提高, 提高的幅度只有 3.534 kN, 而 800 °C 时的最大挤压力降为 35.472 kN, 是所有温度下最低的挤压力, 该温度下挤压对模具有利。

2.2.3 不同温度挤压变形过程等效应力对比分析

不同挤压温度下, 工件的最终等效应力云图如图 7 所示。可以看出, 各个温度下应力分布具有相同规律, 均在工件与上模冲头 90°转角接触部位存在应力集中, 该部位应力较大, 为模具转角设计提供依据。在工件由竖直挤压转为水平挤压后, 工件的上表面的两条棱边与模具接触位置出现小部分应力突变, 该应力突变为模具棱边设计提供依据。工件温度在 800 °C 时其等效应力最大为 267 MPa, 在 400 °C 时其等效应力最最小为 224 MPa, 最大变化



图5 304 不锈钢等径角挤压变形过程

Fig.5 Isometric deformation of 304 stainless steel

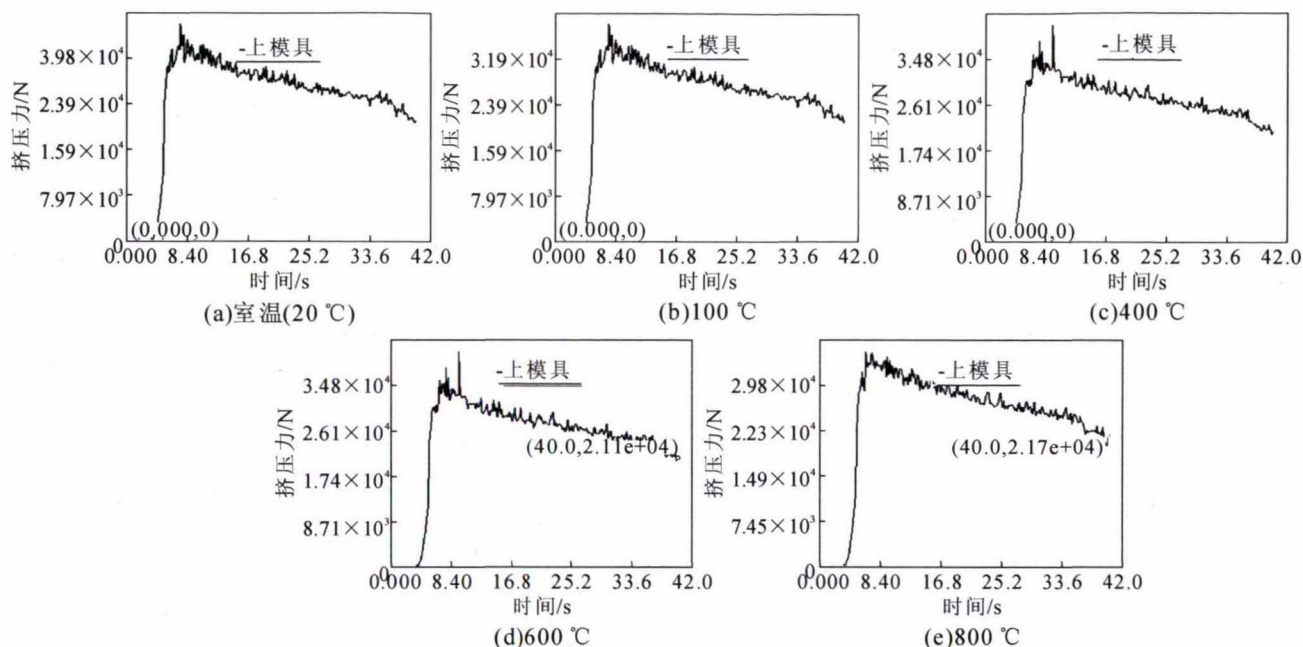


图6 不同温度 304 不锈钢等径角挤压变形过程挤压力曲线

Fig.6 Squeezing force curve of equal-temperature angular extrusion deformation process of 304 stainless steel at different temperatures

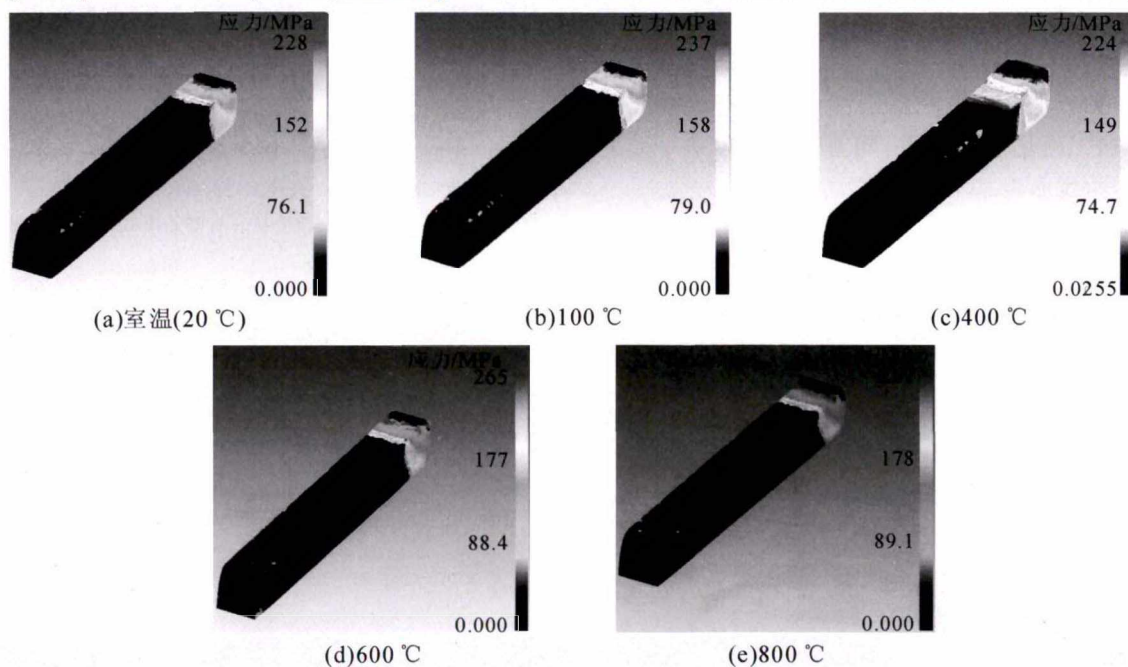


图7 等效应力云图

Fig.7 Equivalent stress cloud

幅度为 43 MPa,整体上看工件等效应力受温度影响较小。

3 等通道挤压试验及结果分析

3.1 304 不锈钢等径角挤压试验

304 不锈钢等径角挤压分别在 20、100、400、600 和 800 °C 进行下,试样通借助数控线切割机将不锈钢材料加工为 10 mm×10 mm×80 mm 的长方体;挤压实验是在 2 000 kN 四柱液压机上进行,等径角挤压模具内角、圆心角角度分别为 90°和 37°,润滑剂为 MoS₂ 与机油的混合涂料。

3.2 不同温度挤压结果室温拉伸分析

如图 8 所示,在室温下挤压后的试块,流变应力在很小应变量下快速上升。随着颈缩的同时出现,流变应力迅速下降。说明 304 不锈钢在室温条件下进行等径角挤压变形,晶粒发生滑移,出现位错的缠结,晶粒被拉长、破碎和纤维化,金属内部产生了残余应力,试块内部应变储能增加,加工硬化非常严重^[8]。与低温挤压不同的是,在 400 °C 温度下挤压变形后的 304 不锈钢块体,在开始出现颈缩之前,拉伸曲线经过较大的应变。随着挤压温度进一步增加,拉伸曲线形貌基本上一致。

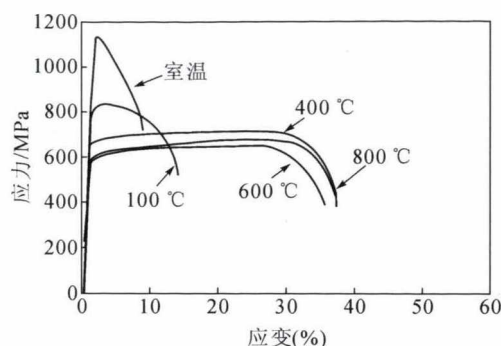


图8 不同温度挤压结果室温拉伸应力-应变曲线
Fig.8 Tensile stress-strain curve at room temperature for different temperature extrusion results

4 结论

(1)800 °C时的最大挤压力是所有温度下最低的,该温度下挤压对模具有利。

(2)工件温度在 800 °C时其等效应力最大为 267 MPa,在 400 °C时其等效应力最最小为 224 MPa,最大变化幅度为 43 MPa,整体上看工件等效应力受温度影响较小。

(3)304 不锈钢在低温条件下进行等径角挤压变形后加工硬化非常严重,随着挤压温度进一步增加,拉伸曲线形貌基本上一致。

参考文献:

- [1] Azushima A, Kopp R, Korhonen A, et al. Severe Plastic Deformation (SPD) Processes for Metals [J]. CIRP Annals- Manufacturing Technology, 2008, 57(2): 716-735.
- [2] 起华荣,史庆南,陶新姚,等. 6061 铝合金双向等通道挤压金属流动规律研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2016(9): 2317-2321.
- [3] Valiev R Z, Islamgaliev R K, Alexandrov I V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation[J]. Progress in Materials Science, 2000, 45: 103-189.
- [4] Segal V M, Reznikov V I, Drobyshevskiy A E, et al. Metallurgy [J]. Russian Metal lurgy, 1981(1): 99-105.
- [5] 丁利,李怀学,王玉岱,等. 热处理对激光选区熔化成形 316 不锈钢组织与拉伸性能的影响[J]. 中国激光, 2015(4): 187-193.
- [6] 方晓英,刘志勇, Tikhonova M, 等. 多向锻造和单向轧制 304 不锈钢高温退火后的晶界面分布[J]. 金属学报, 2012(8): 895-906.
- [7] 杨钊,黄建龙. 304 奥氏体不锈钢应变诱发马氏体的研究[J]. 材料热处理学报, 2012(3): 104-109.
- [8] 申勇峰,李晓旭,薛文颖,等. 304 不锈钢拉伸变形过程中的马氏体相变[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012(8): 1125-1128.
- [9] 田野,李萍,王久林,等. 高压扭转压力对 304 不锈钢组织及性能影响[J]. 塑性工程学报, 2016(2): 98-102.
- [10] 杨辉,夏爽,张子龙,等. 晶界工程对于改善 304 奥氏体不锈钢焊接热影响区耐晶间腐蚀性能的影响 [J]. 金属学报, 2015(3): 333-340.
- [11] 麻永林,宫美娜,邢淑清,等. 304 不锈钢带板形控制的有限元分析[J]. 钢铁, 2015(2): 48-53.
- [12] 苏静. 超细晶 Cu 的剧塑性流变行为及本构理论 [D]. 西北工业大学, 2015.
- [13] 雷维维. 室温等通道转角挤压后纯镁的微观组织与力学性能研究[D]. 太原理工大学, 2016.
- [14] 刘扬柏,吴长水,鲁胜,等. 单道次 ECAP 黄铜 H63 的有限元模拟及实验研究[J]. 铸造技术, 2016(10): 2154-2159.
- [15] 杨智强. 大塑性变形复合挤压有限元模拟研究 [D]. 昆明理工大学, 2010.
- [16] 史庆南,王效琪,起华荣,等. 大塑性变形(severe plastic deformation, SPD)的研究现状[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2012(2): 23-38.
- [17] 刘胜新. 实用金属材料手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.
- [18] 刘天佑. 金属学与热处理[M]. 北京:冶金工业出版社, 2009.

技术资料邮购

《铸造实用生产技术集锦》

《铸造实用生产技术集锦》本书由李德臣教授级高工编著。共七章：1、重大铸件生产技术；2、耐热耐磨产品生产技术；3、耐蚀耐磨产品生产技术；4、耐磨产品生产技术；5、铸造工艺设计；6、铸造用辅助产品生产技术；7、铸造与哲学。特快专递邮购价：97元。

邮购咨询：李巧凤 电话/传真：029-83222071