

电铸 Ni-W 合金热压缩变形的流变行为

成生伟, 田文怀

(北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: 采用 Gleeble-1500 型热模拟机对电铸 Ni-W 合金在变形温度为 400~600 °C、应变速率为 0.001~0.1 s⁻¹ 条件下的热压缩变形进行研究, 分析合金变形时的流变应力、应变速率及变形温度之间的关系, 研究变形温度对合金显微组织的影响, 并得到本构方程。结果表明: 应变速率和变形温度对该材料的流变应力有显著影响, 流变应力随变形温度的升高而降低, 随应变速率的提高而增大。当变形温度高于 550 °C 时, 合金流变曲线呈现出明显的动态再结晶特征, 合金显微组织为完全的动态再结晶组织, 该合金的热变形激活能为 411.55 kJ/mol。

关键词: 热压缩变形; 电铸; Ni-W 合金; 变形激活能; 本构方程

中图分类号: TG146

文献标志码: A

Flow stress behavior of electroformed Ni-W alloy under hot compression deformation

CHENG Sheng-wei, TIAN Wen-huai

(School of Materials Science and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The hot compression deformation of electroformed Ni-W alloy was studied in the temperature range of 400~600 °C and strain rate of 0.001~0.1 s⁻¹ by using Gleeble-1500 thermal simulation tester. The relationships among the flow stress, the strain rate and deformation temperature were researched. The effect of deformation temperature on microstructure of the alloy was investigated. The results show that the flow stress decreases with the increase of deforming temperature, while it increase with the increase of strain rate. When the deformation temperature is higher than 550 °C, the flow curves and microstructures present apparent character of dynamic recrystallization. The hot deformation activation energy of the alloy is 411.55 kJ/mol.

Key words: hot compression deformation; electroformed; Ni-W alloy; deformation activation energy; constitutive equation

药型罩做为破甲弹战斗部的核心部件, 其形状、材质、成形工艺等都对破甲效果有直接影响^[1-4]。在成形工艺方面, 最近的研究表明电铸技术是制备药型罩较为合适的方法^[5-7]。在选材方面, 镍及其合金由于具有优良的塑性、冲击韧性和耐腐蚀等特点, 成为制备药型罩的常选材料之一^[8-9]。W 具有高熔点、高密度, Ni 具有高声速、优良的动态变形性能, 二者的结合使得 Ni-W 合金成为一种有潜力的药型罩材料。另外, 药型罩在装药前一般要进行机加工以确保其尺寸精

度, 因而热变形是药型罩制造过程中必不可少的重要环节, 对药型罩的性能有较大的影响。Ni-W 合金作为该类合金的新品种之一, 有关其热变形研究方面还未见报道。

本文作者研究电铸 Ni-W 合金在热压缩过程中的真应力—应变曲线, 以及流变应力与变形速率、变形温度的关系, 确立合金热变形的本构方程, 拟为其热加工工艺的制定以及生产过程中变形组织和性能的预测和控制提供依据。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50671012)

收稿日期: 2012-03-19; 修订日期: 2012-06-17

通信作者: 田文怀, 教授, 博士; 电话: 010-62333934; E-mail: wenhuaitian@sina.com

1 实验

以氨基磺酸镍和钨酸钠为主盐, 柠檬酸为络合剂, 用氨水调节电铸液 pH 为 4, 采用直流电铸法制备 Ni-W 合金, 阳极采用纯度为 99.98% 的镍板, 阴极为单面用过氯乙烯胶绝缘的不锈钢薄片, 电铸温度为 70 °C, 阴极电流密度为 10 A/dm², 电铸时间为 100 h。制备的合金成分如表 1 所列。电铸完成后试样加工成圆柱体, 尺寸为 $d8\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。

表 1 电铸 Ni-W 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of electroformed Ni-W alloy (mass fraction, %)

Co	Fe	Cu	W	S	C	Ni
0.006 3	0.001 0	0.01 7	2.76	0.030	0.017	Bal.

将加工好的试样在 Gleeble-1500 型热模拟机上进行等温压缩试验。压缩温度为 400~600 °C, 应变速率为 0.001~0.1 s⁻¹, 总压缩量达到真应变 0.7。试验时将试样以 5 °C/s 的速度加热到所需温度, 保温 3 min, 在试样两端面涂敷机油石墨润滑剂以减小摩擦力的影响, 压缩后的试样迅速水冷到室温。热模拟试验后的试样沿中面切割、腐蚀, 然后在 OLYMPUS PMG3 显微镜上观察其金相组织。

2 结果与讨论

2.1 应变速率与变形温度对真应力—应变曲线的影响

压缩试验的真应力—应变曲线如图 1 所示。由图 1 可以看出, 在相同温度下, 随应变速率的增加, 材料的真应力值升高; 在相同的应变速率下, 真应力随温度增加而下降。图 1(a)、(b) 中变形速率为 0.001、0.01 s⁻¹ 时 550、600 °C 对应的曲线和图 1(c) 中 450~600 °C 对应的曲线表现为应力达到峰值后下降至一稳定值保持不变, 为动态再结晶型应力—应变曲线; 图 1(a)、(b) 中的 400~500 °C 的曲线其应力值在较大应变下保持不变或者仍上升, 为动态回复型应力—应变曲线。可以推知, 随着变形温度的升高和变形速率的降低, 其真应力—应变曲线由动态再结晶型向动态回复型转变。

应变速率对合金的流变应力影响显著, 在温度一定、材料的组织结构不变的情况下, 随应变速率的增大, 位错结构形成的速度越快, 晶体内部由于原子间和

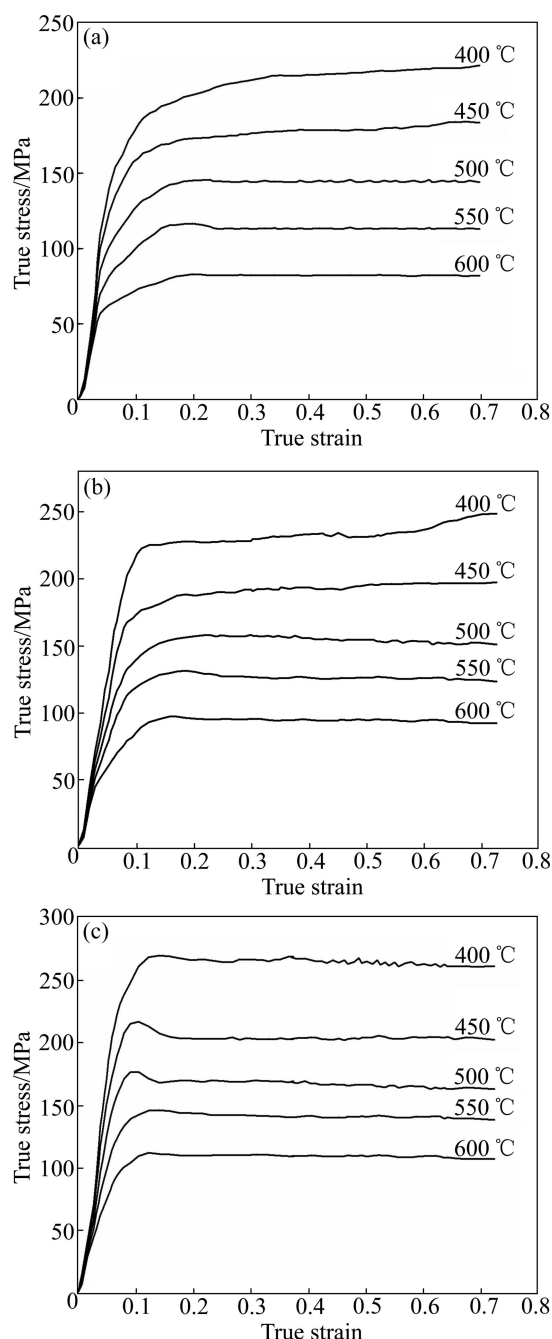


图 1 电铸 Ni-W 合金在不同条件下热压缩变形的真应力—应变曲线

Fig. 1 True stress—true strain curves of electroformed Ni-W alloy during hot compression deformation under different conditions: (a) $\dot{\epsilon} = 0.001\text{ s}^{-1}$; (b) $\dot{\epsilon} = 0.01\text{ s}^{-1}$; (c) $\dot{\epsilon} = 0.1\text{ s}^{-1}$

位错间的相互作用迅速形成内应力场和能量势垒。然而, 变形是由扩散控制的位错攀移引起的或者由割阶攀移控制的螺位错开动引起, 位错运动需要外力和热激活的驱动来克服有内应力构成的障碍和能量势垒, 在温度一定的情况下, 热起伏的作用是有限的, 因此流变应力随应变速率增大而增大^[10-11]。变形温度是影

响流变应力的另一重要因素,随着变形温度的升高,原子活动的动能增加,各种点缺陷的扩散加快,依赖于扩散的位错开动易于进行,热激活能的作用增强,位错运动依靠的有效应力减小致使流变应力降低;另一方面,高温下变形将发生动态回复和动态再结晶,这种软化作用也随着温度的提高而加强,可减轻或消除由于塑性变形而产生的加工硬化^[12]。

峰值应力的出现是由位错堆积造成的硬化和动态再结晶软化共同作用的结果。金属的高温变形是一个热激活过程,温度升高会使热激活过程增强,可以立即引起回复现象的出现而不需要孕育期。在这过程中,由加工硬化造成的位错密度会有所下降,宏观上表现为流变应力下降。

2.2 热压缩变形对合金组织的影响

图2所示为电铸Ni-W合金在变形速率为 $\dot{\epsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$ 和不同温度下的金相组织。从图2可以看出,未压缩时,晶粒尺寸为 $20\text{ }\mu\text{m}$ (见图2(a));当压缩温度较低($400\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,仅能看到沿垂直压缩方向上被拉长的晶粒(见图2(b));当温度升至 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,部分变形晶粒的大角度晶界出现模糊状况,开始局部动态再结晶形核(见图2(c));随着温度的进一步升高,至 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,动态再结晶所形核的区域越来越多,再结晶的形核也越来越多,被拉长的晶粒的境界完全模糊,大部分的变形晶粒基本上已被再结晶晶粒所取代,只能看到很少的拉长晶粒(见图2(d)),当温度达到 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,动态再结晶已基本完成,且动态再结晶晶粒开始长大(见图

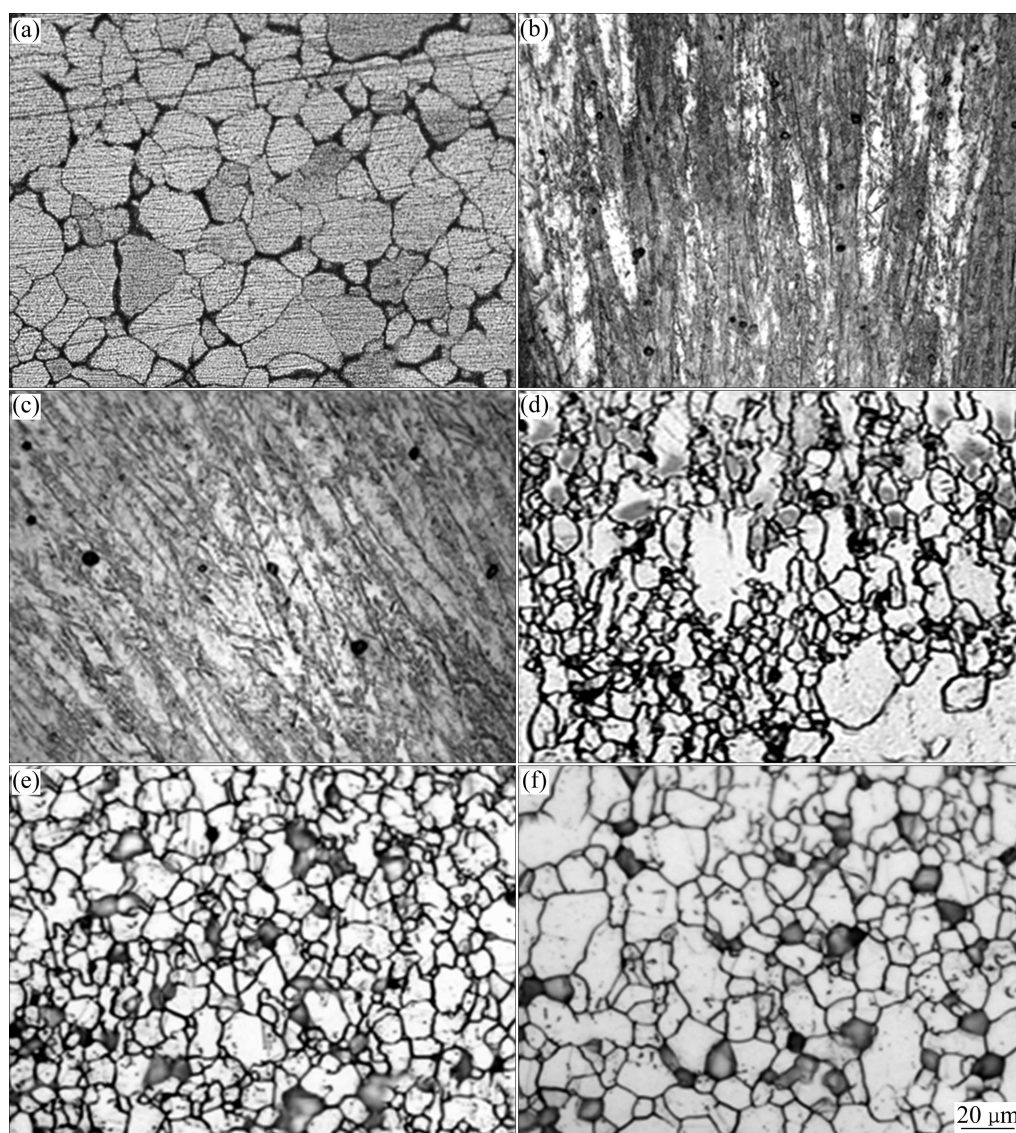


图2 电铸Ni-W合金在 $\dot{\epsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$ 和不同温度下的金相组织

Fig. 2 Metallographic structures of electroformed Ni-W alloy under $\dot{\epsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$ and different temperatures: (a) Uncompressed; (b) $400\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $450\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $500\text{ }^{\circ}\text{C}$; (e) $550\text{ }^{\circ}\text{C}$; (f) $600\text{ }^{\circ}\text{C}$

2(e)), 晶粒尺寸为 $8\ \mu\text{m}$ 左右; 当温度达到 $600\ ^\circ\text{C}$, 动态再结晶晶粒已长大, 成为细小的等轴晶, 且完全取代了被拉长的晶粒(见图 2(f)), 晶粒大小约为 $15\ \mu\text{m}$ 。

2.3 合金热激活能与本构方程

研究表明, 金属热变形和高温蠕变行为类似, 都是一个受热激活控制的过程, 因此金属的热变形可用高温蠕变时的应力—应变关系进行描述, 即应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 、温度 T 与流变应力 σ 可用 Zener-Hollomon 参数 Z 表示^[13-15]:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp(Q/(RT)) \quad (1)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率, s^{-1} ; T 为热力学温度, K; R 为摩尔气体常数; Q 为变形激活能, kJ/mol。

热变形时 $\dot{\varepsilon}$ 、 T 和 σ 之间的数学关系主要有以下 3 种情况。

1) 低应力水平情况下($\alpha\sigma < 0.8$ 时):

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^n \exp[-Q/(RT)] \quad (2)$$

2) 高应力水平下($\alpha\sigma > 1.2$ 时):

$$\dot{\varepsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp[-Q/(RT)] \quad (3)$$

3) 整个应力水平时:

$$\dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp[-Q/(RT)] \quad (4)$$

式中: A_1 、 A_2 和 β 均为与温度无关的常数; σ 为流变应力, MPa; A 为结构因子, s^{-1} ; α 为应力水平参数, MPa^{-1} , $\alpha = \beta/n$; n 为应力值数。

对式(2)和(3)两边取对数, 并取 σ 为稳态流变应力, 分别以 $\ln \dot{\varepsilon}$ 和 $\ln \sigma$ 及 $\ln \dot{\varepsilon}$ 和 σ 为坐标作图, 利用最小二乘法线性回归, 可得图 3。 n 可取图 3(a)中 5 条直线斜率的平均值, 得 $n=15.083$; β 值可取图 3(b)中 5 条直线的斜率的平均值, 得 $\beta=0.157$ 。 $\alpha=\beta/n=0.014$ 。

在整个应力水平下, 对式(4)两边取自然对数的微分可得:

$$Q = R \left\{ \frac{\partial \ln \dot{\varepsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]} \right\}_T \left\{ \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \right\}_{\dot{\varepsilon}} \quad (5)$$

取电铸 Ni-W 合金材料在不同应变速率和温度下的流变应力、应变和各自的应力水平参数, 做出 $\ln [\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$ 以及 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系曲线, 如图 4 图所示。根据图 4(a)可以求得直线的平均斜率为 5.81, 图 4(b)中直线的平均斜率为 8.52, 从而可以得到变形激活能 $Q=411.55\ \text{kJ/mol}$ 。

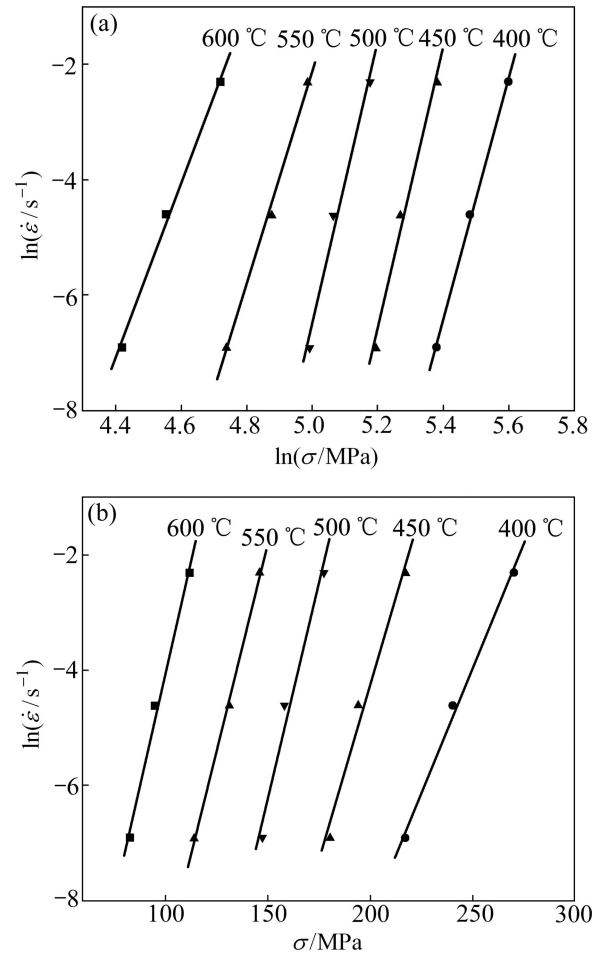


图3 电铸 Ni-W 合金峰值应力与应变速率之间的关系

Fig. 3 Relationship between peak stress and strain rate of electroformed Ni-W alloy: (a) Curves between $\ln \dot{\varepsilon}$ and $\ln \sigma$; (b) Curves between $\ln \dot{\varepsilon}$ and σ

将式(4)带入式(1), 并对式两边取自然对数, 可得

$$\ln Z = \ln \dot{\varepsilon} + Q/(RT) \quad (6)$$

$$\ln Z = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \quad (7)$$

分别将合金的变形激活能 Q 、 R 以及对应的变形温度 T 、应变速率带入式(6)可求得相应的 $\ln Z$ 值。然后分别取不同应变速率和温度下的稳态流变应力、应变值, 作出 $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 的散点图, 并作线性回归, 如图 5 所示。由式(7)可知, $\ln A$ 和 n 分别为 $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系曲线中的截距和斜率, 可得 $n=8.12$, $\ln A=45.6$, 则 $A=6.37 \times 10^{19}$ 。

将求得的各材料参数带入式(4), 得到电铸 Ni-W 合金热压缩时的流变应力方程为

$$\dot{\varepsilon} = 6.37 \times 10^{19} [\sinh(0.014\sigma)]^{8.12} \exp\left(\frac{-411.55 \times 10^3}{RT}\right) \quad (9)$$

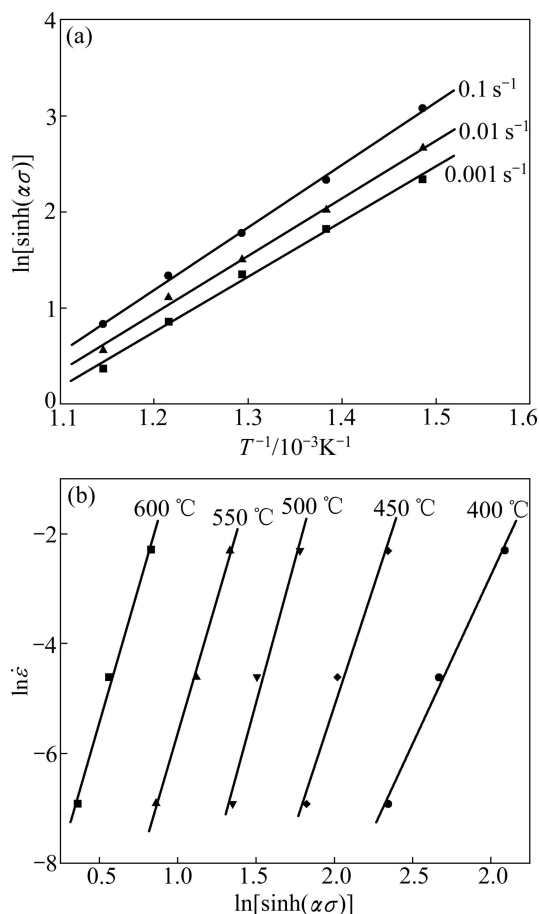


图4 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 与应变速率和变形温度的关系

Fig. 4 Relationship between $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ and strain rate and temperatures: (a) Curves between $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ and $1/T$; (b) Curves between $\ln \dot{\epsilon}$ and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

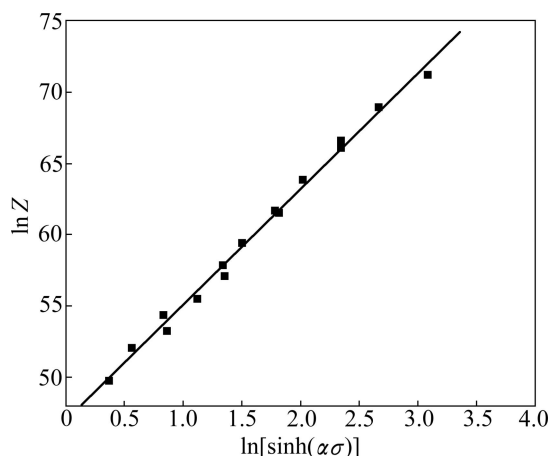


图5 参数Z与 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的关系

Fig. 5 Relationship between Zener-Hollomon parameter and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

利用式(9)可为电铸 Ni-W 合金变形组织的预测、控制及热加工工艺的制定提供理论依据。

3 结论

1) 电铸 Ni-W 合金热压缩变形时的流变应力随应变速率提高而增大, 随变形温度升高而降低。当温度高于 $550^{\circ}C$ 和应变速率为 $0.01 \sim 0.1 s^{-1}$ 时, 合金流变曲线呈现明显的动态再结晶特征。

2) 变形温度对电铸 Ni-W 合金显微组织有较大影响, 当应变速率为 $0.01 s^{-1}$ 、变形温度高于 $550^{\circ}C$ 时, 合金发生了完全的动态再结晶。

3) 电铸 Ni-W 合金热压缩变形时的热变形激活能为 $411.55 kJ/mol$, 流变应力方程为 $\dot{\epsilon} = 6.37 \times 10^{19} \cdot [\sinh(0.014\sigma)]^{8.12} \exp\left(\frac{-411.55 \times 10^3}{RT}\right)$ 。

REFERENCES

- [1] 赵 腾, 罗 虹, 贾万明. 影响药型罩材料使用性能的因素研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2007, 30(5): 82-86.
ZHAO Teng, LUO Hong, JIA Wan-ming. Influencing factors analysis of the application performance of shaped liner material [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2007, 30(5): 82-86.
- [2] 胡忠武, 李中奎, 张廷杰. 药型罩材料的发展[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(10): 1009-1014.
HU Zhong-wu, LI Zhong-kui, ZHANG Ting-jie. Advanced progress in materials for shaped charge and explosively formed penetrator liners [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(10): 1009-1014.
- [3] 高晓军, 徐 宏, 郭志俊. 爆炸成形弹药型罩材料的现状和趋势[J]. 兵器材料科学与工程, 2007, 30(2): 85-91.
GAO Xiao-jun, XU Hong, GUO Zhi-jun. Development of material in shaped liner for EFP [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2007, 30(2): 85-91.
- [4] 贾万明, 张全孝, 白志国. 药型罩制造技术的发展[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(9): 1511-1516.
JIA Wan-ming, ZHANG Quan-xiao, BAI Zhi-guo. Progress on manufacturing techniques of shaped charge liners [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(9): 1511-1516.
- [5] TIAN W H, FAN A L, GAO H Y. Comparison of microstructures in electroformed copper liners of shaped charges before and after plastic deformation at different strain rates [J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 350: 160-166.
- [6] FAN Ai-ling, LI Shu-kui, TIAN Wen-huai, WANG Fu-chi. Comparison of microstructures in electroformed and spin-formed copper liners of shaped charge underwent high-strain-rate

- deformation [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(6): 1447–1451.
- [7] 李小庆, 田文怀, 杨 峰. 电铸镍药型罩的微观组织及结构分析[J]. 兵器材料科学与工程, 2004, 27(2): 29–32.
LI Xiao-qing, TIAN Wen-huai, YANG Feng. Microstructure and penetration property of electroformed nickel shaped charge liner [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2004, 27(2): 29–32.
- [8] 李春华, 成生伟, 王 雷, 田文怀. 电铸镍药型罩侵彻体的高速变形行为[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(1): 53–59.
LI Chun-hua, CHENG Sheng-wei, WANG Lei, TIAN Wen-huai. High speed deformation behavior of the electroformed nickel liner of shaped charge [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(1): 53–59.
- [9] 王 雷, 李 珍, 李春华, 田文怀. 退火处理对电铸镍药型罩组织与性能的影响[J]. 功能材料, 2010, 41(12): 2049–2054.
WANG Lei, LI Zhen, LI Chun-hua, TIAN Wen-huai. The influences of heat treatment on structure and property of electroforming nickel liners of shaped charges [J]. Journal of Functional Materials, 2010, 41(12): 2049–2054.
- [10] MEYERS M A. 材料的动力学行为[M]. 张庆明, 刘彦, 黄风雷. 北京: 国防工业出版社, 2006: 260.
MEYERS M A. Dynamic behavior of materials [M]. ZHANG Qing-ming, LIU Yan, HUANG Feng-lei. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 260.
- [11] 袁武华, 周 恒, 傅 强. 微合金中碳钢的热压缩变形流变行为研究[J]. 材料科学与工程, 2011, 19(1): 21–27.
YUAN Wu-hua, ZHOU Heng, FU Qiang. Flow stress behavior of microalloying medium carbon steel under hot compression deformation [J]. Materials Science and Technology, 2011, 19(1): 21–27.
- [12] 黄长清, 刁金鹏, 邓 华. 铝合金热变形的本构模型研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(12): 3702–3707.
HUANG Chang-qing, DIAO Jin-peng, DENG Hua. Constitutive model for hot deformation of aluminum alloy [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(12): 3702–3707.
- [13] 李红英, 欧 玲, 张建飞. 一种新型 Al-Cu-Li 系合金的热压缩流变应力[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(8): 750–753.
LI Hong-ying, OU Ling, ZHANG Jian-fei. Flow stress of a new type Al-Cu-Li system alloy during hot compression deformation [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(8): 750–753.
- [14] 臧金鑫, 郑林斌, 张 坤, 陶乐晓. 新型超高强 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金热压缩变形的流变应力行为[J]. 航空材料学报, 2011, 31(3): 35–39.
ZANG Jin-xin, ZHENG Lin-bin, ZHANG Kun, TIAO Le-xiao. Flow stress behavior of a new high strength Al-Zn-Mg-Cu alloy during hot compression deformation [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(3): 35–39.
- [15] 张丁非, 方 霖, 段红玲, 戴庆伟. ZM61 镁合金的热变形行为[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(4): 25–29.
ZHANG Ding-fei, FANG Lin, DUAN Hong-ling, DAI Qing-wei. Constitutive equation of thermal compression deformation for ZM61 magnesium alloy [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(4): 25–29.

(编辑 何学锋)