

# 纯钼板材真空环境高温拉深性能研究

孟 宝, 万 敏, 吴向东, 周应科, 彭静文, 蒋 政

(北京航空航天大学, 北京 100191)

**摘 要:** 在 25~870 °C 温度范围内进行了厚度为 2.0 mm 纯钼板的单向拉伸试验, 建立了高温拉深有限元分析模型。通过数值模拟与试验对比分析, 确定了纯钼板高温变形摩擦与温度的关系, 研究了成形温度、润滑、压边间隙和模具尺寸对热拉深工艺的影响, 并采用优化的工艺参数进行了平底杯形冲头热拉深试验。结果表明, 润滑条件对纯钼板热拉深影响最显著, 其次是成形温度; 在成形温度 870 °C, 拉深速度 30 mm/min, 有润滑, 压边间隙 2.5 mm 的参数组合下, 最大拉深比可达 1.94。

**关键词:** 钼板; 拉深性能; 高温拉深; 极限拉深比; 真空环境

**中图分类号:** TG306

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2015)06-1385-06

由于钼及钼合金具有熔点高 ( $2620 \pm 10$  °C), 弹性模量高 (丝材, 285~300 GPa), 线胀系数小 ( $20 \sim 700$  °C,  $5.8 \times 10^{-6} \sim 6.2 \times 10^{-6}$  °C<sup>-1</sup>), 高温强度大, 导电、导热性能优良以及良好的耐酸碱性能, 被广泛应用于各个工业领域<sup>[1-5]</sup>。近年来, 随着等离子体液晶显示器和蓝宝石单晶等制造业的迅速发展, 对纯钼板材制品需求越来越迫切。

鉴于纯钼材料低温塑性差、高温易氧化的特性, 目前成形制造纯钼板拉深件的方法主要有两种: 一种是常温下多道次普通拉深工艺, 另一种是带保护气体或真空环境下的热拉深技术。利用多道次常温拉深方法成形纯钼零件已被广泛研究。韩国学者 K. K. Park 等<sup>[6]</sup>通过电子背散射衍射 (EBSD), X 射线衍射和取向分布函数 (ODF) 定量分析了 0.4 mm 厚纯钼板材常温拉深过程中织构演变规律, 得出冷拉深过程中钼板织构变化不大, 但晶粒尺寸在材料 45° 方向的凸缘和直壁区呈增大趋势。H. K. Kim 等<sup>[7]</sup>将常温拉深与变薄拉深工艺相结合, 通过 8 道次拉深工序组合将 0.2 mm 厚纯钼板材拉深为高度 5 mm, 外径 1.6 mm, 厚度为 0.1 mm 的钼杯, 并通过有限元分析确定了各道次拉深的工艺参数组合。国内的石佩珍<sup>[8]</sup>介绍了采用留凸缘拉深工艺, 用交叉辗压钼片拉深出内径最小为 1.1 mm 的细钼筒。江苏大学的张青来等<sup>[9]</sup>采用交叉轧制技术以提高钼带的冷拉深性能, 并利用多道次连续冷深冲方法将交叉轧制钼带拉深为外径 2.0 mm, 高度 10 mm 的钼杯。

由于钼材料高温极易氧化, 尤其是温度在 700 °C

以上时将发生致命氧化, 导致利用温热拉深技术获取钼材料产品的研究相对较少。国内的杨钰<sup>[10]</sup>介绍了将厚钼板在 500 °C 以下冲压成钼坩埚的工艺, 以取代原有车削加工方法, 提高材料利用率。金堆城钼业股份有限公司的韩强<sup>[11]</sup>研究了钼钨合金板热冲压件变温变载下的力学行为, 得出 550 °C 是所研究钼钨合金板产生冲压最大变形率的最佳加热温度。由于纯钼的完全再结晶温度在 900 °C 以上<sup>[12]</sup>, 加热温度过低对其塑性提高影响不大, 且多道次冷拉深工艺只适合成形常规形状零件, 因此研究纯钼板材高温拉深工艺 (700 °C 以上) 及工艺参数影响规律具有重要意义。

本实验通过单向拉伸试验研究纯钼板在不同温度下的力学性能。采用试验与有限元分析相结合的方法, 分析主要工艺参数对热拉深工艺的影响规律, 为合理控制和优化纯钼板材高温拉深工艺提供理论和试验依据。

## 1 实 验

### 1.1 材料

试验材料为株洲硬质合金集团有限公司提供的厚度为 2.0 mm 的 Mo1 纯钼板材, 其主要化学成分如表 1 所示。其初始热处理状态为热轧后退火。

### 1.2 单向拉伸试验

试验在热环境下的 Zwick/Roell Z100 单向拉伸试验机上进行。试样的标距和宽度分别为 25 和 12.5 mm。试验温度分别为 25, 720, 770, 820 和 870 °C, 加热到试验温度保温 10 min 后以恒定的应变速率 ( $\dot{\epsilon}=0.02$  s<sup>-1</sup>) 对试样进行拉伸。为了防止试样在高温下氧化或

收稿日期: 2014-06-20

作者简介: 孟 宝, 男, 1985 年生, 博士, 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191, 电话: 010-82338788, E-mail: mengbao@me.buaa.edu.cn

挥发，在试样两面均喷涂高温抗氧化剂。试验过程中实时记录拉伸位移及载荷值，并转化为真实应力-应变曲线，如图 1 所示。由图可知，随着温度的升高，纯钼板材的流动应力明显降低，塑性大幅提升。

### 1.3 真空环境热拉深试验

为研究纯钼板的高温拉深性能，在 720~870 °C 温度范围内进行了平底杯形冲头拉深试验。模具材料采用高温不锈钢 Cr25Ni20，凸模直径为 50 mm，凹模内径为 55.2 mm。试验在自主开发的 BCS-50AR 真空环境热拉深设备上上进行，试验装置如图 2 所示<sup>[13]</sup>。试验过程中，压边圈与凹模之间的间隙固定，且通过压边圈定位凸模，以保证凸模与凹模的同心度。设备提供的 3 个测温热电偶分别测量凹模、板料和压边圈的温度，待 3 者温度均匀并保温 15 min 后，压边圈和凸模相继动作，完成拉深过程。此外，真空环境能够有效阻止纯钼板高温氧化，保证拉深过程顺利完成。

表 1 试验材料的化学成分

Table 1 Chemical composition of test material (ω/%)

Fe	Al	Si	Mg	Ni	O	Ca	C	N	Mo
0.002	0.0007	0.001	0.0007	0.0007	0.002	0.001	0.001	0.001	Bal.

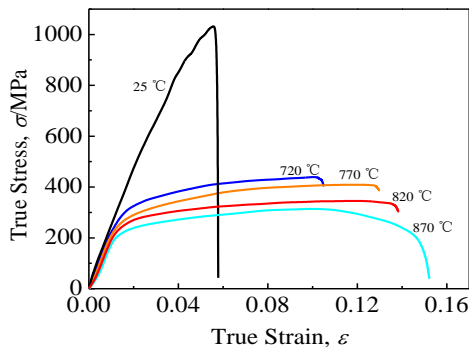


图 1 不同温度下纯钼板材的流动曲线

Fig.1 Flow curves of pure molybdenum sheet at various temperatures

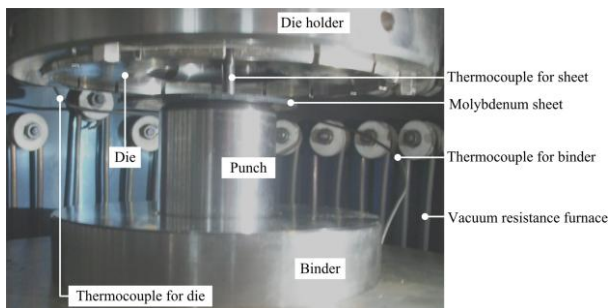


图 2 高温拉深试验装置

Fig.2 Testing apparatus for high-temperature deep drawing

为分析工艺参数对热拉深性能的影响，采用极限拉深比 (LDR) 和最大减薄率 ( $\psi_{max}$ ) 作为评价指标：

$$LDR = \frac{D_{max}}{d_p} \tag{1}$$

$$\psi_{max} = \frac{t_0 - t_{min}}{t_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中， $d_p$  为拉深凸模直径 (mm)， $D_{max}$  为凸模直径一定时所能拉深出完整筒形件的最大毛料直径 (mm)， $t_0$  为初始板料厚度 (mm)， $t_{min}$  为零件最小壁厚 (mm)。

## 2 高温拉深有限元分析模型

### 2.1 有限元分析模型的建立

在纯钼板热拉深成形数值模拟建模中，分析软件采用 ABAQUS/Standard，材料力学性能来自单向热拉伸试验。同时考虑板材与模具的对称性，取模具和板材的 1/4 部分进行有限元建模，如图 3 所示。

### 2.2 高温变形摩擦系数的确定

在板料拉深成形过程中，摩擦系数的改变会造成板料流入凹模中的拉深抗力的变化，从而导致拉深力的改变，并最终影响零件成形。但是，在板料真空高温成形过程中，摩擦系数的确定十分困难。本实验采用以拉深力作为考察指标，运用试验与数值模拟相结合的方法研究纯钼板真空高温成形中的摩擦问题。首先进行纯钼板在不同温度和润滑条件下的高温拉深试验，以获取相应的拉深力曲线，而后设计一系列不同的摩擦系数，利用建立的有限元分析模型，按照试验时的温度和变形条件进行纯钼板高温拉深数值模拟。通过比对数值模拟结果和试验所得的拉深力曲线，两者吻合较好时的设计摩擦系数即可作为不同温度和润滑条件下的真实摩擦系数。图 4 为利用上述方法确定的纯钼板与模具间摩擦系数与温度的关系曲线。可见，摩擦系数随着温度的升高而增大，且无润滑条件下的摩擦系数远大于有润滑条件。

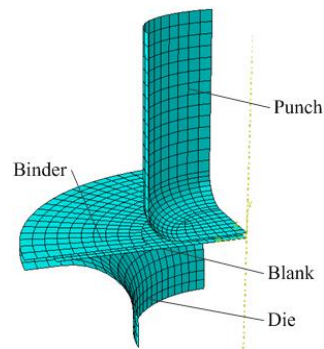


图 3 高温拉深有限元分析模型

Fig.3 Finite element model for high-temperature deep drawing

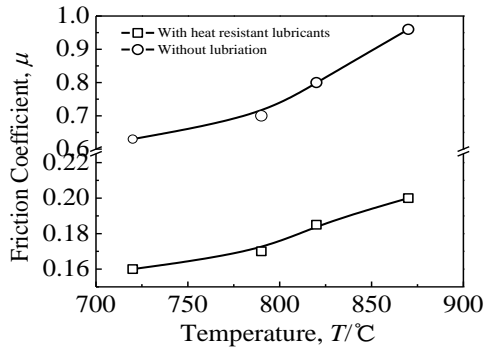


图 4 摩擦系数与温度的关系

Fig.4 Relationship between friction coefficient and temperature

### 3 结果与讨论

影响热拉深成形的工艺因素主要有成形温度、压边间隙、润滑条件以及模具尺寸等。为研究各工艺参数对纯钼板拉深性能的影响，在拉深成形数值模拟中采用了一系列不同的工艺参数分别进行计算。

#### 3.1 成形温度对拉深性能的影响

为研究成形温度对纯钼板 LDR 的影响，在室温及 720~870 °C 温度范围内，有润滑的条件下对纯钼板平底杯形冲头拉深进行数值模拟，并利用最大减薄率判断不同温度下的拉深破裂失效，得到纯钼板不同温度下的 LDR 如图 5 所示，其中 25 °C 时的摩擦系数由图 4 中的拟合曲线计算而得。总体来看，纯钼板的 LDR 随着温度的升高而不断增大，在 25~770 °C 范围内增幅较大，820~870 °C 增加较平缓。这是因为温度升高一方面使得纯钼板材塑性变好，强度降低，延伸率增加，成形能力得到提高，但同时温度的进一步升高也使得加工硬化不断减弱，导致变形传力区相对法兰变形区的强度逐渐降低，限制了板材的拉深成形能力。

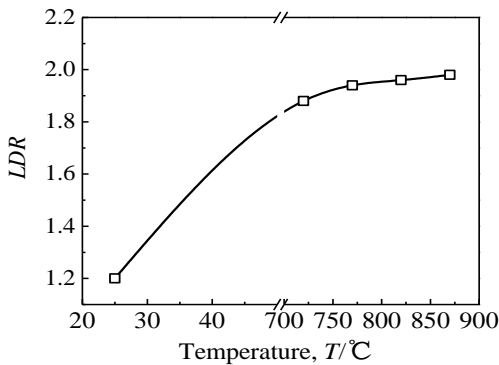


图 5 成形温度对极限拉深比的影响

Fig.5 Effect of forming temperature on the limiting drawing ratio

#### 3.2 润滑条件对拉深性能的影响

为分析润滑条件对纯钼板高温拉深的影响，按照图 4 选取有润滑和干摩擦条件下板料与模具间的摩擦系数，并导入有限元分析模型中进行计算。图 6 为有润滑和无润滑条件下纯钼板高温拉深 LDR 的对比情况。可见，在 720~870 °C 范围内，有润滑时 LDR 明显高于无润滑条件，且有润滑时，LDR 随着温度的升高而增大，而无润滑时，LDR 随温度变化不大，在 770~870 °C 范围内呈稍微降低趋势。由图 4 可知，无润滑时摩擦系数随温度的升高而增大，造成拉深过程中摩擦阻力增加，从而降低纯钼板的拉深性能，而温度升高会提高材料塑性和延伸率，这两方面的相互作用造成无润滑条件时，LDR 变化不大。通过与有润滑时的 LDR 对比可知，润滑条件对高温拉深的影响较成形温度显著。

#### 3.3 压边间隙对拉深性能的影响

在成形温度 870 °C，毛料直径 98.0 mm，其它参数固定不变时，通过改变压边间隙来研究其对零件壁厚分布的影响规律。图 7 为不同压边间隙下零件壁厚分布云图。从图中可以看出，随着压边间隙的增大，零件最小壁厚不断增加，最大减薄率减小，法兰区材料则呈增厚趋势。在压边间隙 3 mm 时，由于法兰增厚严重，出现起皱现象。因此，较优的压边间隙为 2.5~2.8 mm。

#### 3.4 模具尺寸对拉深性能的影响

为消除其它参数的影响，模拟中采用相同的成形温度 870 °C、压边间隙 2.5 mm 及毛料直径 98.0 mm，且在其它参数不变的条件下，仅改变凸模圆角半径或凹模圆角半径，并以最大减薄率为考察指标，来研究模具尺寸对纯钼板高温拉深成形的影响。

##### 3.4.1 凹模圆角半径的影响

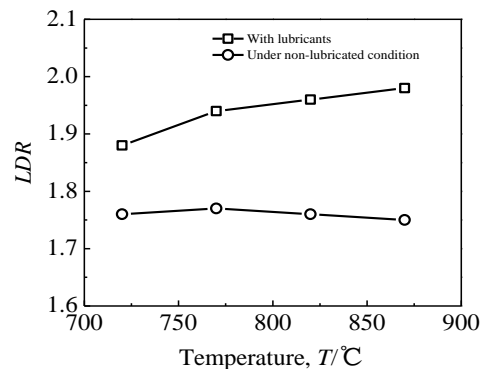


图 6 润滑条件对极限拉深比的影响

Fig.6 Effect of lubricating condition on the limiting drawing ratio

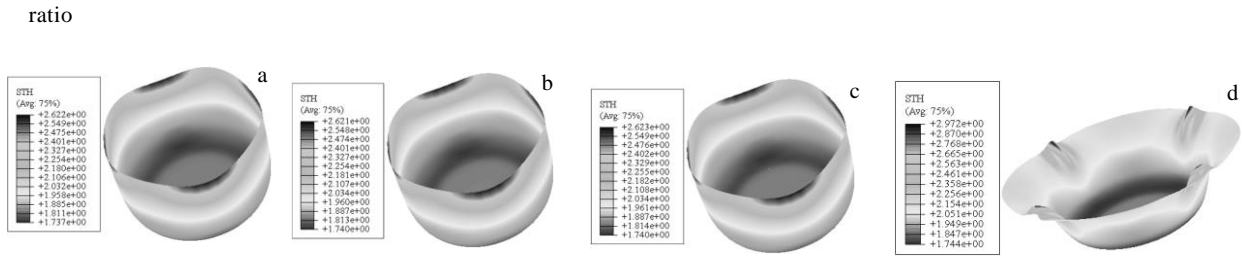


图 7 压边间隙对壁厚分布的影响

Fig.7 Effect of blank-holder gap on the wall thickness distributions: (a) 2.2 mm, (b) 2.5 mm, (c) 2.8 mm, and (d) 3.0 mm

保持凸模圆角半径 8.0 mm 不变, 分别取大小为 5, 8, 10, 15, 18.6 和 25 mm 的凹模圆角半径, 得到凹模圆角半径对最大减薄率的影响如图 8 所示。由图可知, 最大减薄率随着凹模圆角半径的增大而减小, 但增加到一定程度后 (18.6~25 mm), 凹模圆角半径对壁厚减薄的影响变弱。

### 3.4.2 凸模圆角半径的影响

取有利于成形的凹模圆角半径 18.6 mm, 其它条件不变, 仅改变凸模圆角半径, 其值分别取 3, 5, 8, 10 和 15 mm, 模拟研究得到的不同凸模圆角半径下零件最大减薄率如图 9 所示。由图可见, 随着凸模圆角半径的增大, 最大减薄率呈先减小后增大的趋势。凸模圆角过小, 增大了板料绕凸模弯曲的拉应力, 从而使危险截面易于破裂; 而凸模圆角过大, 则会减少凸模与板料的接触面积, 增大毛料的悬空区域, 容易产生内皱。在凸模圆角半径为 15 mm 时, 由于悬空区较大, 产生内皱导致拉深后期减薄严重。

### 3.5 结果对比分析

根据有限分析结果, 确定纯钼板材在 25~870 °C 温度范围内拉深成形的最佳工艺参数如表 2 所示。为验证有限元分析的准确性, 采用表 2 中的参数, 在真空环境热拉深设备上对纯钼板材的极限拉深比试验。

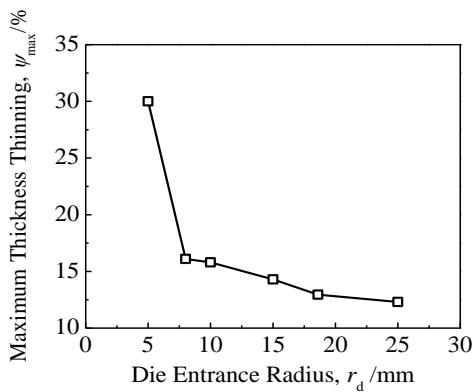


图 8 凹模圆角半径对厚度分布的影响

Fig.8 Effect of die entrance radius on the wall thickness distributions

纯钼板材的热拉深在模具和工艺设计上与传统冷拉深不一样, 在高温环境下模具结构应尽量简单, 同时又要满足各种功能需求, 模具的选材和接触面的润滑都有一定的要求。为减小起皱趋势, 试验中取压边间隙 2.5 mm, 凸模圆角半径 8 mm, 凹模圆角半径 18.6 mm, 拉深模具尺寸如图 10 所示。其它试验参数如表 3 所示。

在上述试验条件下, 试验件和拉深力曲线如图 11 所示。由图可知, 试验件表面质量较好, 无氧化斑点, 表明真空环境能够有效阻止材料高温氧化, 且随着毛料直径  $d_0$  的增大, 拉深力不断增大, 当  $d_0$  增大到 100 mm 时, 拉深力增加到一定值后突然降低, 表明零件开裂。

为定量分析有限元模拟结果与试验结果的误差, 选取不同位置的测量点, 采用 PX-7DL 超声波测厚仪测量试验件的壁厚分布。在初始毛料直径  $d_0=95$  mm

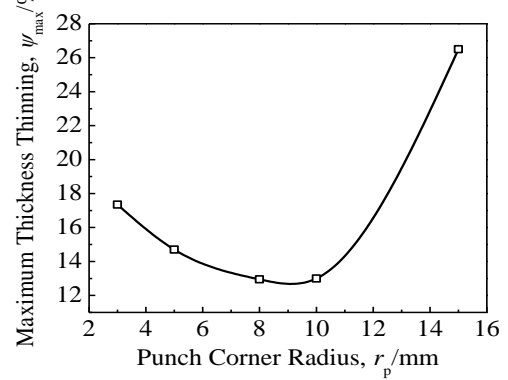


图 9 凸模圆角半径对厚度分布的影响

Fig.9 Effect of punch corner radius on the wall thickness distributions

表 2 数值模拟最佳工艺参数

Table 2 Optimum process parameters of numerical simulations

Temperature/ °C	Blank-holder gap/mm	Die entrance radius/mm	Punch corner radius/mm
870	2.5~2.8	18.6~25	8~10

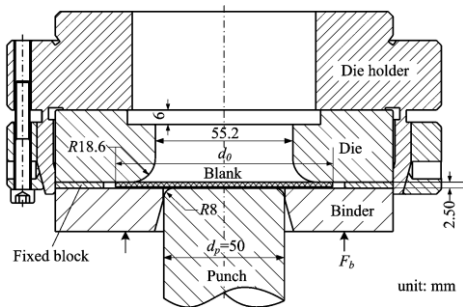


图 10 试验模具尺寸

Fig.10 Dimensions of die tools for experiments

表 3 试验参数

Table 3 Experimental conditions

No.	Temperature /°C	Blank size/mm	Drawing speed/mm min <sup>-1</sup>	Vacuum/Pa
1	870	91	30.0	10 <sup>-2</sup>
2	870	95	30.0	10 <sup>-2</sup>
3	870	97	30.0	10 <sup>-2</sup>
4	870	100	30.0	10 <sup>-2</sup>

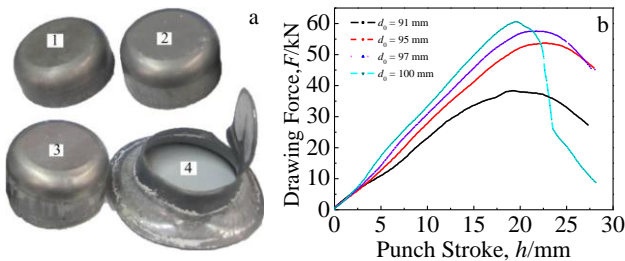


图 11 试验结果

Fig.11 Test results: (a) deep drawn parts and (b) the drawing force of high-temperature deep drawing of molybdenum sheet

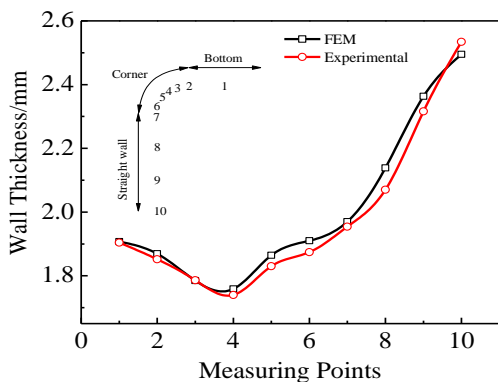


图 12 有限元分析与试验结果对比

Fig.12 Comparisons between FEM and experimental results  
 的零件上选择 1~10 个测量点，其中，1, 2 位于筒底，3~7 位于圆角区，8~10 处于直壁区，2 和 7 是不同区域的交界点，测量结果与有限元分析结果对比情况如图 12 所示。可见，数值模拟结果与试验结果基本一致。零件在圆角区壁厚最小，是成形过程中的危险区域，直壁区靠近壁筒边沿位置在切向压应力作用下增厚明显。

对照图 5 和图 11 可知，870 °C 时有润滑条件下纯钼板材拉深成形的 LDR 有限元分析结果和试验结果分别为 1.98 和 1.94，较为接近，表明建立的高温拉深有限元分析模型能够准确模拟纯钼板材的高温拉深变形行为。

### 4 结 论

1) 一定温度范围内，在有、无润滑条件下，纯钼板与模具间摩擦系数均随着温度的升高而增大，但无润滑条件的摩擦系数远大于有润滑条件。

2) 25~870 °C 温度范围内，纯钼板的极限拉深比随着成形温度的升高而增大，最大减薄率随着压边间隙和凹模圆角半径的增大而减小，随着凸模圆角半径的增大呈先减小后增加的趋势。

3) 润滑条件对纯钼板高温拉深成形影响最显著，其次是成形温度。对于成形  $\Phi 50$  mm 的圆筒形件，纯钼板拉深成形的最佳工艺参数组合为变形温度 870 °C、毛料两侧喷涂润滑剂、压边间隙为 2.5 mm。在最佳工艺参数条件下，纯钼板的极限拉深比达到了 1.94。

### 参考文献 References

[1] Yin Weihong(殷为宏), Zheng Han(郑 汉), Zhang Deyao(张德尧). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1989, 6: 40

[2] Tabernig B, Reheis N. *Int J Refract Met Hard Mater*[J], 2010, 28: 728

[3] Sinha V P, Prasad G J, Hegde P V *et al. J Alloy Compd*[J], 2009, 473: 238

[4] Shield J A, Rozak G A. *Int J Powder Metall*[J], 2005, 41: 21

[5] Wang D H, Yuan X B, Li Z K. *Rare Met Lett*[J], 2006, 25: 1

[6] Park K K, Cho J H, Han H N *et al. Key Eng Mater*[J], 2003, 233-236: 567

[7] Kim H K, Hong S K. *J Mater Process Technol*[J], 2007, 184: 354

[8] Shi Peizhen(石佩珍). *Journal of Electronics*(电子学通讯)[J],

- 1980, 2(3): 146
- [9] Zhang Qinglai(张青来), Li Min (李 敏), Han Yinben(韩寅奔) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(12): 2009
- [10] Yang Yu(杨 钰). *China Molybdenum Industry*(中国钼业)[J], 1992, 4: 30
- [11] Han Qiang(韩 强). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(9): 1564
- [12] Primig S, Leitner H, Clemens H *et al. Int J Refract Met Hard Mater*[J], 2010, 28(6): 703
- [13] Meng B, Wan M, Wu X D *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2012, 22: s254

## High-temperature Deep Drawability of Pure Molybdenum Sheet in Vacuum Environment

Meng Bao, Wan Min, Wu Xiangdong, Zhou Yingke, Peng Jingwen, Jiang Zheng  
(Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Uniaxial tensile tests for pure molybdenum sheets with thickness of 2.0 mm were conducted in a temperature range between 25 and 870 °C, and the finite element model for hot deep drawing of molybdenum plate was established. Based on the contrastive analysis of FEM and experiments, the relationship between friction coefficient and temperature was confirmed, and the effects of forming temperatures, lubricating conditions, blank-holder gap and die dimensions on deep drawing process were investigated, and then the vacuum hot deep drawing tests were carried out with optimized process parameters. The results indicate that lubrication has the most prominent effect on the deep-drawing process, followed by the forming temperature. The limiting drawing ratio can be raised up to 1.94 with the optimum parameters including forming temperature 870 °C, drawing speed 30 mm/min and blank-holder gap 2.5 mm under lubricated condition.

**Key words:** molybdenum sheet; deep drawability; hot deep drawing; limiting drawing ratio; vacuum environment

---

Corresponding author: Wan Min, Ph. D., Professor, School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, P. R. China, Tel: 0086-10-82338788, E-mail: mwan@buaa.edu.cn