

# 挤压参数对 TC16 合金紧固件冷挤压过程的影响

## Effect of Extrusion Parameters on Cold Extrusion Process of TC16 Titanium Alloy Fastener

张 驰<sup>1</sup>, 曾卫东<sup>1</sup>, 李兴无<sup>2</sup>, 沙爱学<sup>2</sup>

(1 西北工业大学 材料学院, 西安 710072; 2 北京航空材料研究院, 北京 100095)

ZHANG Chi<sup>1</sup>, ZENG Wei-dong<sup>1</sup>, LI Xing-wu<sup>2</sup>, SHA Ai-xue<sup>2</sup>

(1 School of Materials Science and Engineering,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**摘要:** 提出了一个反映挤压件前端内缩程度的参数——前端内缩量( $\Delta h$ ), 作为紧固件挤压成形效果的评价标准之一。基于弹塑性有限元数值模拟技术, 采用 DEFORM-3D 软件对不同挤压参数(挤压速度  $V$ 、凹模半锥角  $\alpha/2$ ) 下 TC16 紧固件冷挤压成形过程进行了数值模拟研究, 获得了挤压力、温度场分布、平均温升和前端内缩量随挤压参数变化的规律, 为 TC16 紧固件挤压参数优化提供了理论参考。

**关键词:** 前端内缩量; 冷挤压; 数值模拟; 挤压参数; TC16 紧固件

中图分类号: TG376 文献标识码: A 文章编号: 1004-4381(2008)08-0035-05

**Abstract:** A new parameter, namely concavity, was proposed for cold extrusion process of titanium alloy fastener to describe the degree of concavity in the front of the workpiece. With the help of the DEFORM-3D, the elastic-plastic finite element method was used to carry out the numerical simulation research on the cold extrusion process of the fastener with different extrusion parameters (such as extrusion speed, half cone angle of female die). The change of the extrusion load, distribution of temperature fields, average temperature rise and the concavity were obtained. It provided a theoretic reference to optimize the extrusion parameters on TC16 fastener cold extrusion.

**Key words:** axial concavity; cold extrusion; numerical simulation; extrusion parameter; TC16 fastener

TC16(Ti-2.5Al-5Mo-5V) 合金是一种马氏体型  $\alpha + \beta$  两相钛合金, 在退火状态下, 塑性特别好, 其室温超常变形能力非常大, 但强度相对较低<sup>[1]</sup>。冷挤压是利用“加工硬化”来强化金属的先进生产技术, 具有高精、高效、优质低耗的特点, 在中小型锻件的规模化生产中应用较多<sup>[2]</sup>。紧固件冷挤压方法有两种, 封闭式挤压和无约束正挤压。考虑到本实验毛坯的高径比较大, 受模具尺寸限制, 以及无约束正挤压具有成形力小<sup>[3]</sup>的特点, 本课题选用无约束正挤压研究 TC16 合金紧固件的制备。

TC16 紧固件冷挤压生产过程中, 挤压力、温升和模具应力等成形参数对成形工艺的优劣至关重要, 然而这些数据在生产中往往很难通过实际测量获得, 目前主要凭借经验和借助理论计算等手段得到<sup>[4]</sup>, 对于解决实际问题存在很大的局限性。近年来, 随着数值模拟技术的发展和应用于模具设计和工艺优化提供了强有力的支持<sup>[5-9]</sup>。此外, 在无约束正挤压生产工艺

中, 由于前端内缩量不明显而常常被忽略掉, 但相关文献资料<sup>[10]</sup>表明, 前端内缩量对挤压件的质量和性能存在影响。本工作采用 DEFORM-3D 有限元分析软件对不同挤压参数下 TC16 合金紧固件冷挤压成形过程进行了数值模拟研究, 获得了挤压力、温度场分布、平均温升和前端内缩量随挤压参数的变化规律, 并对挤压参数进行了优化, 为 TC16 合金紧固件冷挤压成形工艺的制定提供理论依据和参考。

### 1 分析方法和有限元模型建立

在紧固件冷挤压过程中, 内外层金属流速的不均衡往往会导致前端出现内缩现象。因此, 为了有效控制挤压时金属流动的不均匀性, 本工作提出了一个反映挤压件前端内缩程度的参数——前端内缩量( $\Delta h$ )。前端内缩量定义为前端内凹的最低点到前端最突出点的距离, 如图 1 所示。

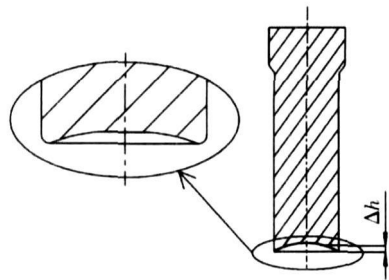


图 1 前端内缩量示意图  
Fig. 1 The value of axial concavity ( $\Delta h$ ) in the front of the deformable body

紧固件冷挤压生产过程中, 挤压凹模几何形状(见图 2)对成形的影响很大, 图 2 中  $D$  为挤压筒内径,  $H$  为挤压筒过渡段长度,  $h$  为出口部分定径带长度,  $d$  为出口部分内径,  $\alpha/2$  为凹模半锥角。其中  $\alpha/2$  作为挤压凹模最主要的几何参数, 对成形的影响最大<sup>[11]</sup>。

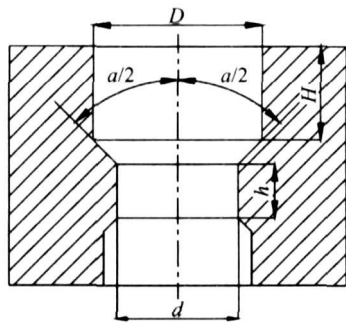


图 2 挤压凹模的几何形状示意图  
Fig. 2 Geometry of female die

模拟紧固件挤压成形过程, 拟采用弹塑性有限元法, 视工件为变形体, 模具为刚体, 采用 DEFORM-3D 软件对挤压过程进行数值模拟。由于挤压件为轴对称零件, 取四分之一模型进行计算, 以减少计算工作量。模拟时凹模固定, 凸模推动坯料通过凹模, 其有限元模型及坯料初始网格如图 3 所示, 由于本实验中的冷挤压过程为表面局部变形, 所以对坯料划分网格时采用局部加密技术, 将坯料外边缘网格进行了局部加密, 如图 3b 所示。

毛坯材料为 TC16 钛合金, 模具材料为 YG20 硬质合金, 原始坯料尺寸为  $\phi 6.5\text{mm} \times 30\text{mm}$ , 挤压比  $G = D^2/d^2 = 1.17$ ; 挤压初始温度为  $20^\circ\text{C}$ ; 本工作采用库仑摩擦模型, 即

$$\tau = \mu \sigma_n \tag{1}$$

式中:  $\tau$  为摩擦切应力;  $\mu$  为摩擦系数, 其极限值为  $0.5 \sim 0.577$ <sup>[12]</sup>;  $\sigma_n$  为接触面上的正压应力。实验中毛坯经过磷化皂化处理, 且在挤压过程中使用石墨+ 动植物油作为润滑剂, 摩擦非常小, 与相关文献<sup>[11]</sup> 比照后,

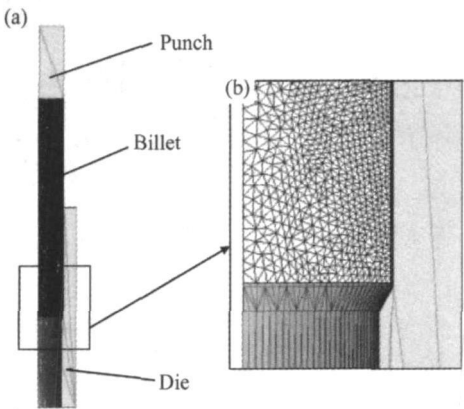


图 3 有限元模型 (a) 整体图; (b) 局部放大图  
Fig. 3 FEM model of cold extrusion  
(a) entire detail; (b) partial enlarged detail

本工作在模拟中将毛坯与模具间的摩擦系数  $\mu$  选为  $0.05$ ; 根据钛合金冷挤压工艺参数确定原则<sup>[13, 14]</sup> 结合生产技术要求, 同时考虑更全面地研究挤压参数的影响规律, 将需要研究的挤压参数选取范围适度放大, 具体参数如下: 挤压速度为  $10 \sim 200\text{mm/s}$ ; 凹模半锥角为  $15^\circ \sim 75^\circ$ ; 变形结束时压下量为  $30.0\text{mm}$ 。

2 数值模拟结果与分析

2.1 挤压速度对冷挤压成形的影响

在摩擦系数  $\mu = 0.05$ , 凹模半锥角  $\alpha/2 = 30^\circ$  条件下, 设定挤压速度分别为  $10, 50, 100, 150, 200\text{mm/s}$  时, 对冷挤压过程进行模拟, 得到图 4~ 8 的结果。

图 4 为不同挤压速度下挤压力随行程变化曲线。可以看出, 整个冷挤压过程分为三个阶段。挤压初始阶段, 毛坯开始接触凹模, 产生塑性变形, 挤压力急剧增高; 挤压稳定阶段, 材料不断从工作带流出, 变形区不再变化, 挤压力稳定; 挤压终了阶段, 凸模继续下行, 稳定变形区被破坏, 变形区开始减小, 挤压力减小。从图 4 还看到, 挤压速度由  $10\text{mm/s}$  增加到  $200\text{mm/s}$ ,

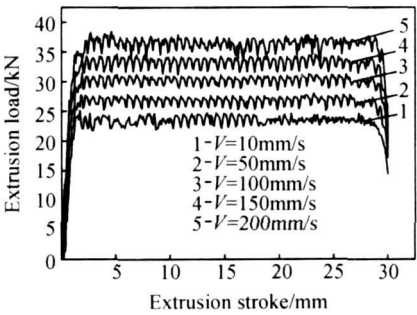


图 4 不同挤压速度下挤压力随凸模行程变化曲线  
Fig. 4 The extrusion load with stroke under different extrusion speeds

挤压力则由 24.5kN 增加到 36.5kN,增加了 49.0%,速度对挤压力的影响较敏感。这主要是由于钛合金是对应变速率较敏感的材料<sup>[15]</sup>,挤压速度增大,材料的流动应力增大,挤压力增大。

在变形过程中,金属的大部分变形能将转化为变形热,致使被挤毛坯产生温度升高;由于变形体内部存在变形不均匀性,且钛合金的导热性能较差,使得变形体内部的温度分布也不均匀。为了研究挤压参数对变形体内温度场的影响,在图 5 所示的位置沿变形体轴向连续选取了 8 个温度考察点。通过对考察点的分析,获得了挤压速度  $V$  对变形体内温度场分布的影响规律,如图 6 所示。

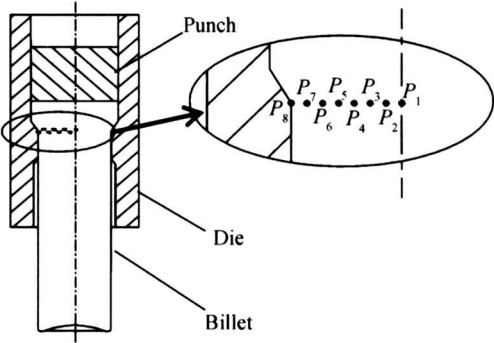


图 5 变形体内温度考察点的位置分布

Fig. 5 The distribution of the deformable body temperature investigation points

从图 6 可以看出,变形体外层( $P_6, P_7, P_8$ )的温度较高,且变化的梯度较大,而变形体内部( $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$ )的温度则较低,分布比较均匀。挤压速度为 50mm/s 时,变形体外层的局部最大温升可以达到 300℃ 以上,这与实际过程比较吻合,在生产中需要注意。从图 6 还看到,随着挤压速度的增大,曲线越加陡峭,高温区(变形体外侧)温度增大明显,而低温区(变形体内部)温度变化很小,说明挤压速度越大,变形体内温度场分布的不均匀性越大。这主要是由于本实验挤压比很小,挤压过程中只有变形体外部参与变形,而内部仅作刚性平移所导致的。

在研究挤压参数对变形体温升的影响方面,引入了平均温升的概念,即挤压终了(即凸模下压 30mm)时变形体的平均温度减去挤压开始前的温度(即室温),平均温升反映了在挤压结束时整个变形体的温升情况,对实际生产更具指导意义。图 7 为变形体平均温升随挤压速度的变化曲线,可以看出,平均温升由挤压速度为 10mm/s 的 147℃ 骤增到 200mm/s 时的 408℃,增幅达 177.6%,可见挤压速度对温升的影响非常显著。这是由两方面原因造成的:一方面,挤压速

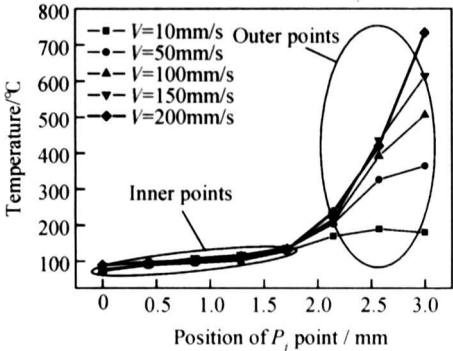


图 6 不同挤压速度下变形体内考察点  $P_i$  和温度的关系曲线

Fig. 6 The temperature with position of investigation point  $P_i$  under different extrusion speeds

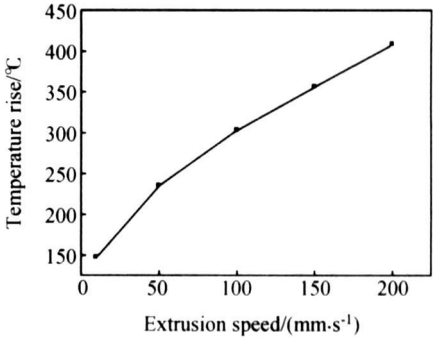


图 7 变形体平均温升和挤压速度的关系曲线

Fig. 7 The average temperature rise with extrusion speed

度增大,使材料的流动速度增大,变形体内的应力-应变状态不均匀性增大,变形热效应增加;另一方面,由于挤压速度增大,热传导需要的时间减少,导致大量变形热来不及扩散,挤压件温升增大。

图 8 为前端内缩量随挤压速度的变化曲线。由图 8 可知,挤压速度由 10mm/s 增加到 200mm/s 时,内缩量由 0.379mm 减少到 0.188mm,减少了 50.4%,可见挤压速度对内缩量的影响是比较明显的。这因为挤压速度增加,凹模对外层金属流动的阻力增大,致使内外层金属流速差减小,内缩量减小。

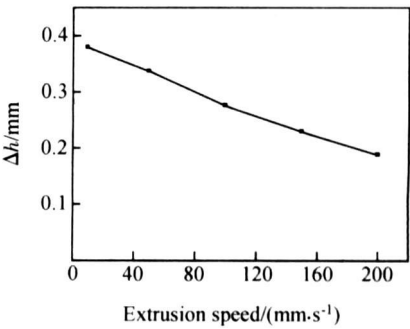


图 8 前端内缩量和挤压速度的关系曲线

Fig. 8 The value of axial concavity with extrusion speed

综上所述可知, 挤压速度对温升影响最为显著, 因此挤压速度应尽可能小, 但过小又会引起内缩量的增大, 且降低了生产效率, 所以综合上述原因, 本工作认为紧固件挤压生产中, 挤压速度应该选在 50 ~ 100mm/s 范围内较为合适, 此范围落在经验选取范围之内<sup>[14]</sup>。

2.2 凹模半锥角对冷挤压成型的影响

在摩擦系数  $\mu=0.05$ , 挤压速度  $V=50\text{mm/s}$  条件下, 设定凹模半锥角分别为 15, 30, 45, 60, 75° 时, 对冷挤压过程进行模拟, 得到图 9~13 的结果。

图 9 为挤压力随凹模半锥角的变化曲线。可以看出, 凹模半锥角增大, 挤压力增大, 但当凹模半锥角大于 45° 时, 半锥角增大, 挤压力增大幅度明显减缓。说明凹模半锥角对挤压力的影响呈现阶段性。原因是, 凹模半锥角较小时, 即尚未形成死区前, 半锥角增大, 被挤毛坯在锥面处不易流动, 形成了较大的流动阻力, 导致挤压力增大。而当半锥角较大时, 紧贴凹模的金属材料粘着于凹模而不会移动, 形成死区, 如图 10 所示区域速度接近于零, 由于材料总是沿最易的途径流动, 因此死区的存在使得在半锥角处产生了一个剪切面, 就像凹模那样作为材料的流动通道边缘, 这样就形成了一个死区半锥角  $\gamma/2$  (见图 10), 这与传统挤压理论相吻合<sup>[16]</sup>, 凹模半锥角增大, 死区半锥角逐渐趋于稳定, 故当凹模半锥角继续增大, 挤压力增大的幅度明显减缓, 最终将趋于恒定值。

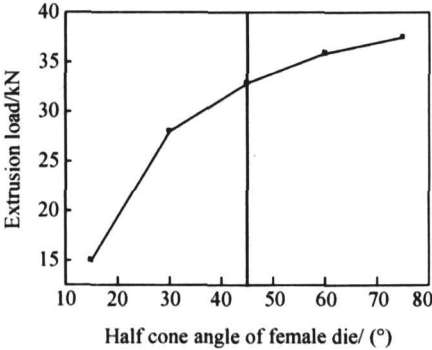


图 9 挤压力和凹模半锥角的关系曲线

Fig. 9 The extrusion load with half cone angle of female die

图 11 为不同凹模半锥角下变形体内温度考察点和温度的关系曲线。可以看出, 凹模半锥角对变形体温度场分布的影响和挤压速度对变形体温度场分布的影响类似。凹模半锥角增大, 曲线越加陡峭, 说明凹模半锥角增大, 变形体内温度场分布的不均匀性增强。凹模半锥角对高温区温度场的影响很大, 而对低温区温度场几乎没有影响。这是由于挤压比小造成的。

图 12 为变形体平均温升随凹模半锥角的变化曲

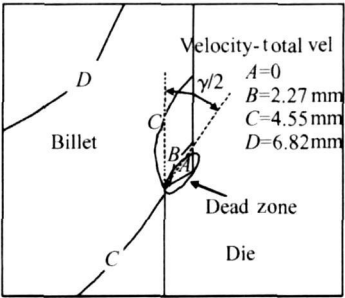


图 10  $\alpha/2=60^\circ, V=50\text{mm/s}$  时凹模锥角处速度场等值线图

Fig. 10 The contour distributions of velocity field at the cone angle of female die when  $\alpha/2$  is  $60^\circ$  and  $V$  is  $50\text{mm/s}$

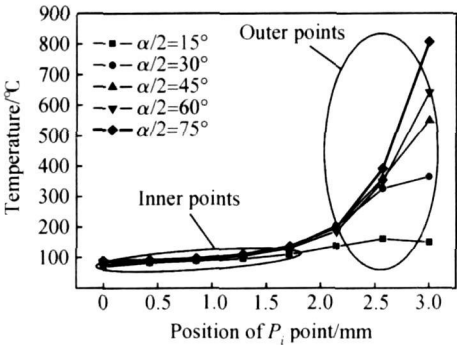


图 11 不同凹模半锥角下变形体内考察点  $P_i$  和温度的关系曲线  
Fig. 11 The temperature with position of investigation point under different half cone angles of female die

线。可以看出, 凹模半锥角增大, 平均温升呈阶段性增大。凹模半锥角小于 45° 时, 半锥角增大, 温升增大显著; 但当半锥角继续增大, 温升增大幅度有所减缓。这是因为凹模半锥角对温升的影响同样要考虑两方面原因: 一方面, 凹模半锥角增大, 毛坯在模壁型腔处的变形越加激烈, 使得温升增大; 另一方面, 凹模半锥角继续增大, 死区形成, 继而存在一个死区半锥角, 它的存在减缓了毛坯变形激烈的程度。

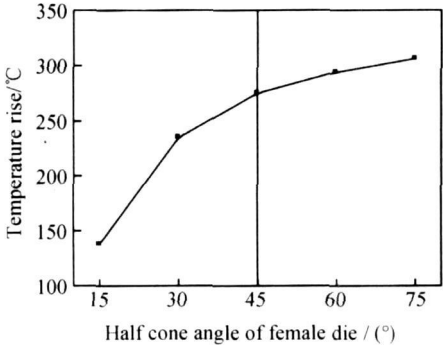


图 12 变形体平均温升和凹模半锥角的关系曲线  
Fig. 12 The average temperature rise with half cone angle of female die

图 13 为前端内缩量随凹模半锥角的变化曲线。可以看出,凹模半锥角为  $15^\circ$  时,前端内缩量为  $0.416\text{mm}$ ;当半锥角增大到  $75^\circ$  时,前端内缩量减少到  $0.007\text{mm}$ ,减幅达  $98.3\%$ ,显然凹模半锥角对前端内缩量的影响非常显著。原因主要是由于凹模半锥角增大,外层金属流动阻力增大,缩小了内外层金属流速差,最终导致内缩量减少。

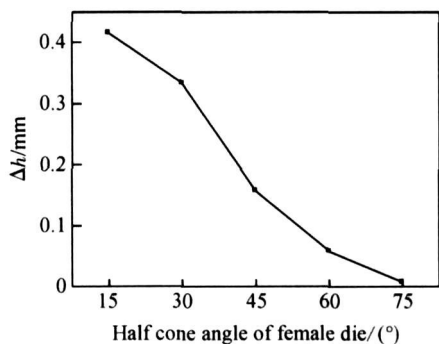


图 13 前端内缩量和凹模半锥角的关系曲线

Fig. 13 The value of axial concavity with half cone angle of female die

纵观以上结果,凹模半锥角对前端内缩量的影响非常大,所以如果仅从减小内缩量来看,凹模半锥角越大越好。但凹模半锥角增大,挤压件温度场分布不均匀性增大,挤压力和平均温升也均增大,同时考虑到,凹模半锥角过小,挤压余料增加,将会增加后续加工工序的工时及加大材料消耗,所以综合多方面因素,本工作认为紧固件挤压生产中,凹模半锥角应该取  $45^\circ$  附近为宜,此值与经验公式所得的最佳值非常接近<sup>[16]</sup>。

### 3 结论

(1) 前端内缩量是反映塑性变形时变形体内外层金属流动不均衡性指标,对于保证挤压件良好的质量和性能具有重要意义。

(2) 挤压速度增大,挤压力增大,挤压件温度场分布越加不均匀性,平均温升增大非常显著,因此挤压速度应尽量小,但考虑到挤压速度过小又会引起内缩量的增大,且降低生产效率。本工作认为合理的挤压速度应该选在  $50 \sim 100\text{mm/s}$  范围内。

(3) 凹模半锥角增大,挤压件温度场分布不均匀性增大,挤压力和平均温升也均增大,但增加幅度随着半锥角增大呈减缓趋势,而前端内缩量随凹模半锥角增大却显著减小。本工作认为合理的凹模半锥角应该选

在  $45^\circ$  附近。

### 参考文献

- [1] 吴崇周,李兴无. TC16 钛合金室温变形特性研究[J]. 钛工业进展, 2006, 23(6): 17- 19.
- [2] KUZMAN KARL. Problems of accuracy control in cold forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 113: 10 - 15.
- [3] 何晓辉. 矩形花键冷挤压工艺研究及组合凹模的优化设计[D]. 南京: 东南大学, 2003.
- [4] 彭魏,赵玉民,杨金娥. 花键管冷挤压成形挤压力的影响因素分析[J]. 机械制造, 2006, 44(504): 35- 36.
- [5] 徐虹,贾树盛,白凤梅. 基于数值模拟的渐开线花键件冷挤压工艺参数优化[J]. 塑性工程学报, 2005, 12(6): 7- 10.
- [6] GOUVEIA B P P A, RODRIGUES J M C, BAY N, et al. Finite element modeling of cold forward extrusion [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 94: 85- 93.
- [7] DUAN X J, VELAY X, SHEPPARD T. Application of finite element method in the hot extrusion of aluminum alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2004, A369: 66- 75.
- [8] ONUH S O, EKOJA M, ADEYEMI M B. Effects of die geometry and extrusion speed on the cold extrusion of aluminium and lead alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 132: 274- 285.
- [9] YANG D Y, PARK K, KANG Y S. Integrated finite element simulation for the hot extrusion of complicated Al alloy profiles [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 111: 25 - 30.
- [10] 闫洪,夏巨谔,李志刚. 工艺参数对型材挤压变形规律的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(6): 1154- 1161.
- [11] 洪慎章. 冷挤压实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [12] 俞汉清,陈金德. 金属塑性成形原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [13] VERSTEEG H. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method [M]. New York: Longman Scientific & Technical, 1995.
- [14] 谢建新,刘静安. 金属挤压理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- [15] 舒滢,曾卫东,周军. BT 20 合金高温变形行为的研究[J]. 材料科学与工艺, 2005, 13(1): 66- 69.
- [16] 吴诗惇. 挤压理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2007CB613807); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目(NCET-07-0696)

收稿日期: 2007-12-20; 修订日期: 2008-01-23

作者简介: 张驰(1982—), 男, 硕士, 研究方向为塑性加工过程数值模拟, 联系地址: 西北工业大学材料学院(710072)。E-mail: zengwd@nwpu.edu.cn