

模具

车用扭杆端头镦粗模具结构损伤及寿命研究

吕彩琴¹, 王天骄¹, 李井吉¹, 居玉辉²

(1. 中北大学 能源动力工程学院, 山西 太原 030051; 2. 内蒙古第一机械集团有限公司, 内蒙古 包头 014000)

摘要: 车用扭杆端头镦粗时所用的模具, 会对其变形进行约束和限制, 恰当的模具设计不仅可以提高生产效率, 而且可以改善扭杆端头的结构及力学性能, 提高扭杆的使用寿命, 从而减少企业的生产成本。建立了扭杆端头及镦粗模具的有限元模型, 采用 DEFORM-3D 软件对有限元模型进行网格划分, 并仿真整个镦粗过程, 分析了不同模具结构形状和不同始锻温度下镦粗后的模具磨损、模具寿命、扭杆端头应力、扭杆端头金属材料流速及流线分布。结果表明: 始锻温度为 1250 ℃ 时, 采用合理的模具结构进行镦粗, 可以减小模具磨损、延长模具寿命, 而且成形得到的扭杆端头的综合性能较好。

关键词: 镦粗; 扭杆端头; 模具磨损; 模具寿命; 始锻温度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.10.030

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 10-0216-07

Research on structural damage and life of upsetting mold for vehicle torsion bar end

Lyu Caiqin¹, Wang Tianjiao¹, Li Jingji¹, Ju Yuhui²

(1. School of Energy and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Inner Mongolia First Machinery Group Co., Ltd., Baotou 014000, China)

Abstract: When the vehicle torsion bar end was upset, its deformation was restricted and limited by the used upsetting mold, and proper mold design can not only improve the production efficiency, but also improve the structure and mechanical properties of the torsion bar end, increase the service life of the torsion bar and reduce the production cost of enterprise. Therefore, the finite element models of the torsion bar end and the upsetting mold were established, which was meshed by software DEFORM-3D. Then, the entire upsetting process was simulated, and after upsetting under different mold structure shapes and different initial forging temperatures, the mold wear, the mold life, the stress of torsion bar end and the metal material flow rate and streamline distribution of torsion bar end were analyzed. The results show that at the initial forging temperature of 1250 ℃, the reasonable mold structure for upsetting can reduce the mold wear and prolong the mold life, and the comprehensive performance of the formed torsion bar end is better.

Key words: upsetting; torsion bar end; mold wear; mold life; initial forging temperature

对于车用扭杆端头的加工, 目前常采用“局部加热+局部镦粗”的工艺, 再经车削处理而成^[1]。在模锻过程中, 模具表面与杆料之间存在热交换、摩擦磨损、塑性变形以及挤压等一系列复杂的相互作用^[2], 扭杆端头的表面组织会与模具的表面组织产生机械牵拉^[3], 导致模具与扭杆端头均存在一定程度的磨损, 从而影响扭杆的力学性能与模具的使用寿命。模具是制造业中必不可少的工艺装备, 在生产中发挥着关键的作用, 模具的质量在很大程度上影响着加工零件的质量, 对企业的生产成

本也有重大影响, 所以, 在保障工件质量的同时, 希望模具寿命越长越好^[4]。合理的模具结构形状是改善模具磨损、提高模具使用寿命的关键因素之一^[5]。

本文以某型车用扭杆实际的结构形状对其端头镦粗模具进行结构优化设计, 选取始锻温度为 1150、1200 和 1250 ℃^[6], 研究始锻温度和模具结构对模具磨损、模具寿命、扭杆端头应力、扭杆端头金属材料流速及流线分布的影响^[7]。

1 模型建立

1.1 扭杆力学模型

扭杆材料为 45CrNiMoVA 钢^[6], 材料性能如表

收稿日期: 2021-10-26; 修订日期: 2022-01-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51275489)

作者简介: 吕彩琴 (1968-), 女, 博士, 教授

E-mail: lvcaiqin@nuc.edu.cn

1 所示。

表 1 45CrNiMoVA 钢的性能参数	
Table 1 Performance parameters of 45CrNiMoVA steel	
参数	数值
弹性模量/MPa	196
泊松比	0.3
抗拉强度/MPa	≥1470
屈服强度/MPa	≥1325

锻造过程中金属材料的流动应力数学模型采用式 (1) 表示^[5]。

$$\sigma_t = R_{eL} \left(1 + \frac{E}{R_{eL}} \varepsilon_p \right)^n \tag{1}$$

式中： σ_t 为真实应力，MPa； R_{eL} 为扭杆金属材料的屈服强度，MPa； E 为材料的弹性模量，MPa； ε_p 为材料的塑性应变； n 为应变硬化指数，取值为 0.36。

扭杆结构如图 1 所示。扭杆端头与杆身之间有一个半径为 100 mm 的弧形过渡部分，实际加工中，该部分是采用车削工艺对镦粗后的扭杆经车削而成的^[6]。

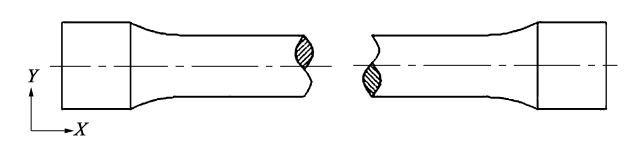


图 1 扭杆结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of torsion bar structure

1.2 镦粗过程中的磨损模型

在镦粗过程中，扭杆端头与模具产生摩擦，主要表现为塑性剪切摩擦，其数学模型如式 (2) 所示^[6]。

$$W = \int K \frac{P^a u^b}{H^c} dt \tag{2}$$

式中： W 为摩擦力做功，J； P 为模具内表面施加给扭杆表面的压强，Pa； u 为压力机锤头的进给速度，(mm · s⁻¹)； t 为时间，s； H 、 K 、 a 、 b 和 c 为实验校准系数，其中 a 、 b 通常取 1。

2 模具结构方案

2.1 模具结构

内蒙古第一机械集团有限公司目前加工中所使

用的模具结构如图 2 所示，扭杆端头与杆身之间采用阶梯过渡。现提出两种新的模具结构方案：方案 1，扭杆端头直接镦粗成形，其模具在端头与杆身之间直接采用半径为 100 mm 的弧形过渡（图 3）；方案 2，模具在端头与杆身之间采用梯形过渡（图 4），梯形尺寸近似弧形尺寸。

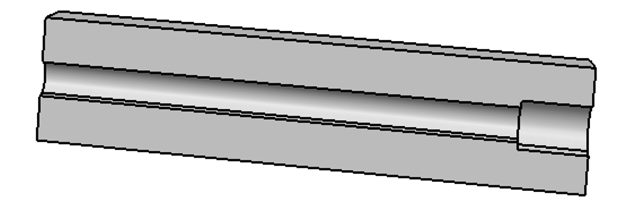


图 2 现用模具结构
Fig. 2 Current mold structure

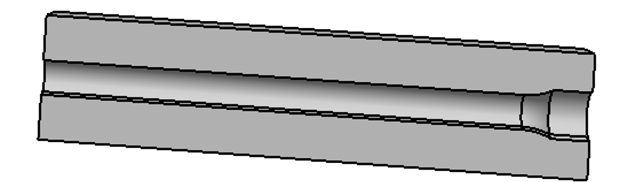


图 3 方案 1 模具结构
Fig. 3 Mold structure of scheme 1



图 4 方案 2 模具结构
Fig. 4 Mold structure of scheme 2

2.2 扭杆端头镦粗工艺有限元模型的建立

综合考虑模具的腔体体积、长度等尺寸，确定杆料长度如表 2 所示。

表 2 3 种模具结构所需杆料长度 (mm)	
Table 2 Lengths of rod material required by three mold structures (mm)	
模具结构	杆料长度
现用模具	1980
方案 1	1918
方案 2	1910

将模具、杆料以及压力机锤头分别建立有限元仿真模型，在 DEFORM-3D 环境中，给杆料赋予材料特性^[8]，模具选择 AISI-D3。杆料、模具以及压力机锤头的有限单元数量分别为 80000、50000 和

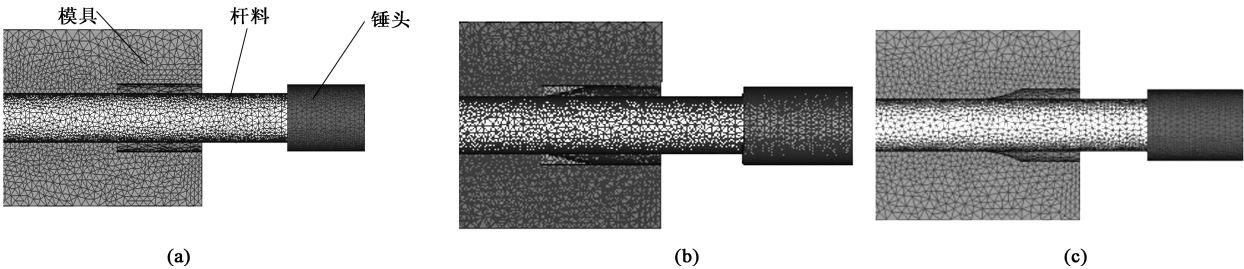


图 5 模具、杆料及压力机锤头的有限元模型
(a) 现用模具 (b) 方案 1 (c) 方案 2

Fig. 5 Finite element models of mold, rod material and press hammer
(a) Current mold (b) Scheme 1 (c) Scheme 2

30000^[9]，如图 5 所示。扭杆端头在镦粗前进行局部加热，设定其与空气、模具和压力机锤头的热量交换系数为 11^[10]，摩擦因数为 0.3。考虑到对称性，取扭杆和模具的一半进行分析研究，设定杆料以及模具中间面为对称面。

根据不同模具结构对应的杆料长度，计算各仿真模型中压力机锤头距模具的距离。为了便于观察，将工作步长设置为 0.5 mm，各模型中压力机锤头的速度、工作步长和总工作步数如表 3 所示。

表 3 仿真参数

Table 3 Simulation parameters

模具结构	压力机锤头距 模具距离/mm	压力机锤头速度/ (mm · s ⁻¹)	工作步长/ mm	总工作 步数
现用模具	105.0	1	0.5	210
方案 1	72.5	1	0.5	145
方案 2	76.5	1	0.5	153

3 仿真结果对比分析

3.1 镦粗后模具损伤分析

图 6 显示了始锻温度为 1250 ℃ 时镦粗后模具的磨损深度云图，其中箭头所指部分为模具磨损的主要区域。通过分析发现：不同始锻温度下镦粗后模具磨损的分布位置基本一致；不同模具结构方案的镦粗过程中，模具端头的内表面应力和变形较大，磨损主要发生在扭杆端头模膛内表面。主要原因为：在镦粗过程中，磨损处杆料与模具的相对位移较大。现用模具的磨损区域主要分布在距离颈部大约 16.95~93.52 mm 处，方案 1 模具的磨损区域分布在距离梯形过渡处大约 14.27~53.38 mm 处，方案 2 模具的磨损区域分布在距离弧状过渡处大约 14.18~8.38 mm 处。在杆身与扭杆端头过渡处，方案 1 轴颈处采用均匀的弧状过渡，磨损最小。

表 4 中列出了采用不同的始锻温度镦粗后模具

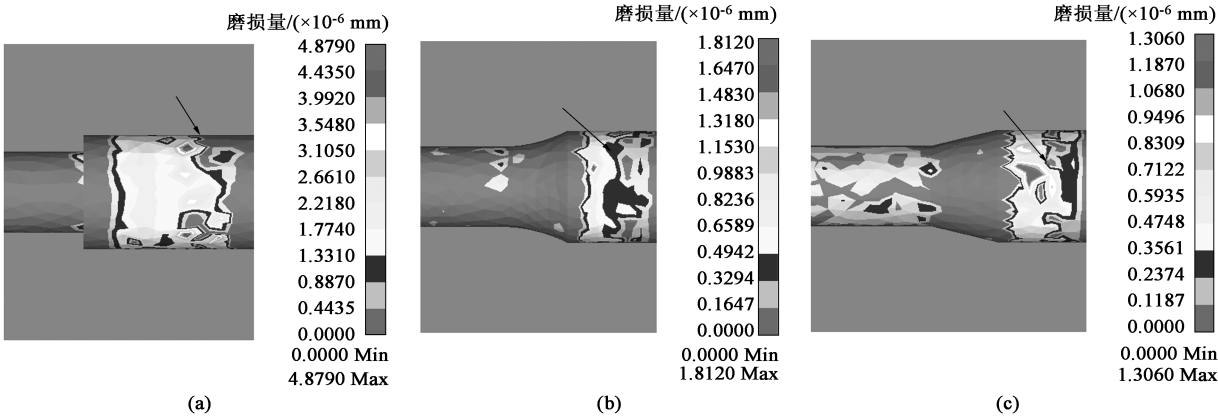


图 6 始锻温度为 1250 ℃ 时镦粗后模具磨损深度云图
(a) 现用模具 (b) 方案 1 (c) 方案 2

Fig. 6 Cloud diagram of mold wear depth after upsetting at initial forging temperature of 1250 ℃
(a) Current mold (b) Scheme 1 (c) Scheme 2

的磨损深度及磨损面积，其数据说明：随着始锻温度的升高，采用现用模具和方案 1 模具镦粗后，模具的磨损深度有增大的趋势，究其原因，随着始锻温度的升高，模具与杆料的表面材料之间的粘滞阻力增大，磨损变大；方案 2 模具镦粗后，模具的磨损深度呈减小趋势，究其原因，模具轴颈部呈梯形结构，金属的材料流动性好，充型能力好。方案 1 和方案 2 模具考虑了轴颈过渡处的金属流动情况，所以，模具的磨损面积较小 ($2.90\times 10^{-6}\text{ mm}^2$)，约为现用模具的磨损面积的 1/3。3 个方案中，方案 2 的模具的始锻温度为 1250 ℃ 时，磨损深度最小 ($1.31\times 10^{-6}\text{ mm}$)，磨损面积最小 ($2.90\times 10^{-6}\text{ mm}^2$)。

表 4 不同始锻温度镦粗后模具的磨损深度及磨损面积
Table 4 Wear depths and wear areas of mold after upsetting at different initial forging temperatures

参数	模具结构	始锻温度/℃		
		1150	1200	1250
最大磨损深度/ ($\times 10^{-6}\text{ mm}$)	现用模具	4.57	4.78	4.88
	方案 1	1.72	1.72	1.81
	方案 2	2.12	1.54	1.31
磨损面积/ ($\times 10^{-6}\text{ mm}^2$)	现用模具	8.59	8.59	8.59
	方案 1	2.90	2.90	2.90
	方案 2	2.90	2.90	2.90

3.2 模具寿命分析

假设以模具累积磨损深度达到 0.2 mm 时失效为参考值来判定模具寿命^[11]，对模具进行疲劳分析研究。图 7 展示了不同始锻温度下的模具寿命，从图 7 中可以看出：随着始锻温度的提高，现用的模具寿命有所减小，方案 2 的模具寿命有增加趋势，方案 1 的模具寿命在始锻温度为 1200 ℃ 时较好。图 7 表明，方案 1 和方案 2 的模具寿命均比现用模具

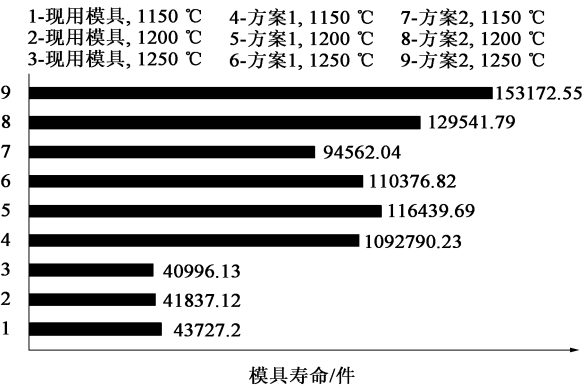


图 7 不同始锻温度下的模具寿命

Fig. 7 Mold lives at different initial forging temperatures

寿命长，几乎为现用模具寿命的 2~3 倍。说明本文所提出的模具结构可以大大提高模具使用寿命。在所有模具结构方案中，方案 2 模具在始锻温度为 1250 ℃ 时的模具使用寿命最长，可达 153172.55 件。

3.3 镦粗后扭杆端头强度应力分析

图 8 为始锻温度为 1250 ℃ 时，采用不同模具结构方案镦粗后的扭杆端头等效应力云图。采用各方案模具镦粗后，扭杆端头等效应力较高的区域均集中在端头靠近压力机锤头的区域。这是因为：扭杆端头在径向上受到模具内模膛的约束、轴向上受到

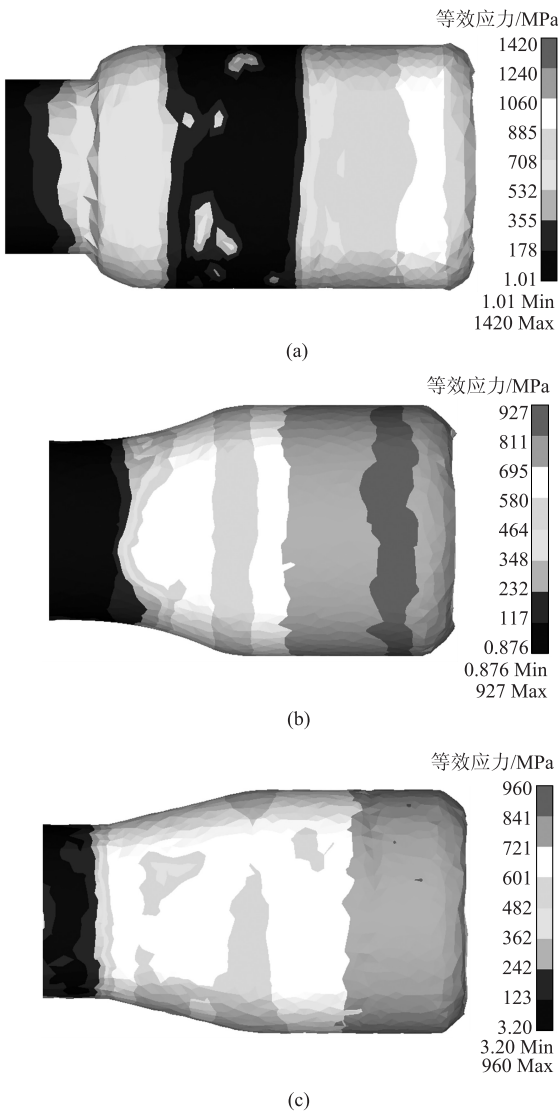


图 8 始锻温度为 1250 ℃ 时采用不同模具结构方案镦粗后扭杆端头的等效应力云图

(a) 现用模具 (b) 方案 1 (c) 方案 2

Fig. 8 Cloud diagrams of equivalent stress for torsion bar end after upsetting with different mold structure schemes at initial forging temperature of 1250 ℃

(a) Current mold (b) Scheme 1 (c) Scheme 2

压力机锤头的进给作用，使得此处金属材料吸收的能量较多，产生较大应力。

采用现用模具镦粗后，扭杆端头等效应力较高的区域距离右端面大约 52.64 mm 左右，次高应力区主要集中在轴颈过渡部分，该区域的金属材料流动阻力大，由于受到了模膛内壁在径向上和轴向上直角过渡圆台的约束，从而产生了较大的应力。扭杆端头中段的等效应力值比左右两端的等效应力值小，轴向上从扭杆端头端面至轴颈过渡处的等效应力值呈现明显的梯度分布，成形质量较差，在实际工况中使用容易产生裂纹，影响工件寿命^[12-13]。采用方案 1 模具镦粗后，扭杆端头等效应力较高区域距离右端面大约 48.69 mm；采用方案 2 模具镦粗后，扭杆端头等效应力较高区域距离右端面大约 46.41 mm。采用方案 1 和方案 2 的模具镦粗后，扭杆端头轴颈处的等效应力分布均匀过渡，不存在次高应力区。其中，采用方案 2 模具镦粗后，扭杆端头的等效应力分布最均匀。

不同始锻温度镦粗后扭杆端头的等效应力结果如表 5 所示。采用现用模具镦粗后的扭杆，始锻温度过低时，镦粗加工过程中金属材料的流动性差，变形抗力大，成形后的等效应力也较大；始锻温度过高时，金属流动性过强，杆料与模具之间的粘滞阻力过大，会造成等效应力的增大。因此，需要选择合适的始锻温度，当始锻温度为 1200 ℃ 时等效应力较小。采用方案 1 和方案 2 的模具镦粗时，随着始锻温度的升高扭杆端头的金属材料流动性好，变形抗力减小，成形后端头等效应力沿轴向的分布较为均匀，高应力区面积减小，最大等效应力值低。全部方案中，采用方案 1 的模具并且在始锻温度为 1250 ℃ 镦粗后，扭杆端头的等效应力值最低，范围为 345~927 MPa。

表 5 不同始锻温度镦粗后扭杆端头的等效应力
Table 5 Equivalent stresses of torsion bar end after upsetting at different initial forging temperatures

参数	模具结构	始锻温度/℃		
		1150	1200	1250
最大等效应力/ MPa	现用模具	1130	1030	1420
	方案 1	1240	939	927
	方案 2	1120	1120	960
等效应力主要 范围/MPa	现用模具	630~1130	572~1030	629~1420
	方案 1	412~1240	370~939	345~927
	方案 2	533~1120	533~1120	456~960

3.4 镦粗后扭杆端头金属流线及速度场

图 9 为始锻温度为 1250 ℃ 时镦粗后扭杆端头的金属流线及材料流速场分布情况。从图 9a、图 9c 和图 9e 中可看出：采用现用模具和方案 1 模具镦粗后，扭杆端头轴颈过渡处和扭杆端面处的金属向外扩散，挤压变形较大；采用方案 2 镦粗后，扭杆金属几乎在整个端头表面飞散，金属材料的充型能力较好。

对比图 9b、图 9d 和图 9f 可以发现，采用方案 1 和方案 2 的模具镦粗后，扭杆轴颈处的金属流线平滑过渡，扭杆端头的金属流线效果较好，在后续的加工中金属纤维保持得较完整，较好地保留了原有的金属流线特性和金属致密性，保障了扭杆机加工后的力学性能。方案 2 模具轴颈处的结构较简单，更易加工成形。

4 各模具结构方案参数对比

模具寿命是生产过程中影响产品成本和质量的关键因素之一。表 6 为现用模具与改进的两种方案的模具对比表。方案 1 和方案 2 的模具磨损深度和模具磨损面积远远小于现用模具，而模具寿命则远高于现用模具。方案 2 中，始锻温度为 1250 ℃ 时，模具磨损面积和模具磨损深度最小分别为 $2.90 \times 10^{-6} \text{ mm}^2$ 和 $1.31 \times 10^{-6} \text{ mm}$ ，模具寿命最长，为 153172.55 件。

5 实验验证

采用不同的模具结构方案进行镦粗实验，如图 10 所示，结果如表 7 所示（本实验对镦粗 4000 件的模具累积磨损深度进行统计）。从表 7 中可看出，模拟仿真结果与实验结果的变化趋势基本一致，说明模拟仿真结果较准确。采用方案 1 和方案 2 的模具镦粗后模具磨损深度明显小于现用模具，方案 2 的始锻温度为 1250 ℃ 时，模具磨损深度最小，从而模具寿命最长。

6 结论

（1）采用方案 1 和方案 2 的模具进行镦粗，相比现用模具，其不仅能保障扭杆端头的质量，而且能使模具磨损深度和磨损面积减小，延长模具

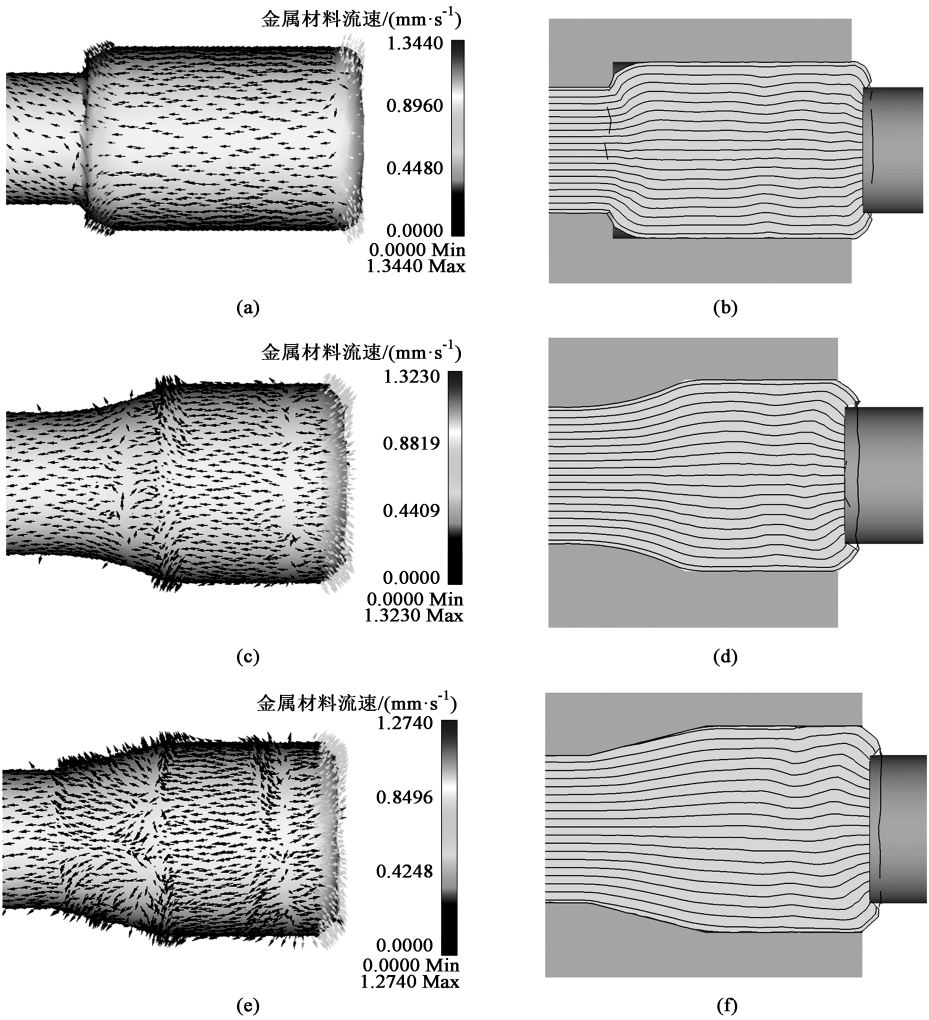


图 9 始锻温度为 1250 ℃时采用不同模具结构方案镦粗后扭杆端头的金属流线及材料流速场效果图

(a) 现用模具，金属材料流速场 (b) 现用模具，金属流线效果 (c) 方案 1，金属材料流速场
(d) 方案 1，金属流线效果 (e) 方案 2，金属材料流速场 (f) 方案 2，金属流线效果

Fig. 9 Effect diagrams of metal streamline and material flow velocity field for torsion bar end after upsetting with different mold structure schemes at initial forging temperature of 1250 ℃

(a) Current mold, flow velocity field of metal material (b) Current mold, metal streamline effect (c) Scheme 1, flow velocity field of metal material
(d) Scheme 1, metal streamline effect (e) Scheme 2, flow velocity field of metal material (f) Scheme 2, metal streamline effect

寿命。

(2) 由于方案 1 模具轴颈处采用弧形过渡，所以，镦粗后扭杆轴颈处的金属流线最平滑均匀，可以省去后续对轴颈处的车削处理，能使扭杆轴颈处的金属流线线型保持完整，使镦粗后的扭杆的力学性能更好。但是，模具轴颈处采用弧形过渡，加工模具的难度稍大，而且与采用方案 2 模具镦粗后相比，模具磨损面积几乎不变，模具磨损深度稍有增大，模具寿命较小。

(3) 采用方案 2 模具镦粗，将始锻温度设为 1250 ℃时，模具寿命表现较长，节省了生产成本，而且也可以尽可能多地保留扭杆轴颈处的金属流线的完整性，使扭杆保持较高的力学性能。

表 6 各模具结构方案的模具磨损情况对比

Table 6 Comparison of mold wear for various mold structure schemes

模具结构	始锻温度/ ℃	模具最大磨损 深度/($\times 10^{-6}$ mm)	模具磨损面积/ ($\times 10^{-6}$ mm ²)	模具寿命/ 件
现用模具	1150	4.57	8.59	43727.20
	1200	4.78	8.59	41837.12
	1250	4.88	8.59	40996.13
方案 1	1150	1.72	2.90	109279.23
	1200	1.72	2.90	116439.69
	1250	1.81	2.90	110376.82
方案 2	1150	2.12	2.90	94562.04
	1200	1.54	2.90	129541.79
	1250	1.31	2.90	153172.55



图 10 镦粗实验

Fig. 10 Upsetting experiment

表 7 镦粗实验结果

Table 7 Results of upsetting experiment

模具结构	始锻温度/℃	模具累积磨损深度/($\times 10^{-2}$ mm)
现用模具	1150	1.83
	1200	1.91
	1250	1.95
方案 1	1150	0.73
	1200	0.69
	1250	0.72
方案 2	1150	0.85
	1200	0.62
	1250	0.52

参考文献:

[1] 马娟, 解永春, 张继玲, 等. 镦粗技术在双伸缩液压缸制造中的开发应用 [J]. 机械工程师, 2013, (7): 182-184.
Ma J, Xie Y C, Zhang J L, et al. Development and application of upsetting technology in the manufacture of double telescopic hydraulic cylinders [J]. Mechanical Engineer, 2013, (7): 182-184

[2] 韩风, 胡强. 基于上模芯优化的汽车轮毂热锻模具改进 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (15): 93-95, 99.
Han F, Hu Q. Improvement of hot forging die for automobile wheel hub based on optimization of upper die core [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (15): 93-95, 99.

[3] 秦敏. 大型锻造过程接触摩擦机理及变化规律的研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2008.
Qin M. Research of Friction Mechanism and Variation Law During Forming Process of Heavy Forging [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2008.

[4] Niu Z Y, Cai Z Z, Zhu M Y. Effect of mold cavity design on the thermomechanical behavior of solidifying shell during microalloyed steel slab continuous casting [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2021, 52 (3): 1556-1573.

[5] 何志坚, 周志雄, 黄向明. 45CrNiMoVA 高速切削条件下本

构关系建模技术研究 [J]. 材料科学与工艺, 2016, 24 (4): 33-39.

He Z J, Zhou Z X, Huang X M. Study on the constitutive relation modeling technology of 45CrNiMoVA for high speed machining [J]. Materials Science and Technology, 2016, 24 (4): 33-39.

[6] 吕彩琴, 李井吉, 秦志远, 等. 车用扭杆端头镦粗工艺参数对其表面损伤的影响 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (4): 14-20.

Lyu C Q, Li J J, Qin Z Y, et al. Influence of upsetting process parameters on surface damage for torsion bar end in vehicle [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (4): 14-20.

[7] Anwar Khalil Sheikh, Muhammad Azhar Ali Khan. Mold design optimization and quality assessment of steel castings through integrated simulations and experiments [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34 (7): 2975-2983.

[8] 吴远志, 严红革, 刘先兰, 等. ZK60 镁合金高应变速率锻造成形 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38 (3): 478-483.

Wu Y Z, Yan H G, Liu X L, et al. Investigation of the high-strain-rate forging of ZK60 magnesium alloy [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38 (3): 478-483.

[9] 王磊, 杨启正, 张如华. 基于 DeForm 的板条冲压扭曲成形数值模拟 [J]. 模具工业, 2021, 47 (6): 10-15.

Wang L, Yang Q Z, Zhang R H. Numerical simulation of stamping distortion forming for strip based on DeForm [J]. Die & Mould Industry, 2021, 47 (6): 10-15.

[10] 吕彩琴, 秦志远, 杨忠林, 等. 扭力轴镦粗过程中压机速度对锻件质量的影响 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (3): 159-162, 166.

Lyu C Q, Qin Z Y, Yang Z L, et al. Effect of press speed on forging quality during torsion shaft upsetting process [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (3): 159-162, 166.

[11] 杨红超, 淳道勇, 和永岗, 等. GH4169 合金叶片挤杆工序模具磨损及寿命的数值模拟分析 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (3): 198-207.

Yang H C, Chun D Y, He Y G, et al. Numerical simulation analysis on wear and life of mold in bar extrusion process for GH4169 alloy blade [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (3): 198-207.

[12] Nabagło Tomasz, Jurkiewicz Andrzej, Kowal Janusz. Modeling verification of an advanced torsional spring for tracked vehicle suspension in 2S1 vehicle model [J]. Engineering Structures, 2021, 229: 111623.

[13] 蒋冒生, 熊员允, 张鼎新. 模具材料及使用寿命 [M]. 南昌: 江西省人民出版社, 1982.

Jiang M S, Xiong Y Y, Zhang D X. Mold Material and Service Life [M]. Nanchang: Jiangxi Provincial People's Publishing House, 1982.