

模具

热锻模具结构参数与模具应力关系的数值模拟

廖海龙¹, 夏玉峰¹, 孙朝远^{1,2}, 刘 洋², 蒋先宏¹, 陈 磊¹, 滕海灏¹

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院 先进模具智能制造重庆市重点实验室, 重庆 400044;

2. 中国第二重型机械集团德阳万航模锻有限责任公司, 四川 德阳 618000)

摘要: 为降低深型槽锻模型槽底部过渡圆角处的开裂风险, 为锻模结构设计提供指导, 通过所设计的模具探究了结构参数(型槽底部过渡圆角半径 R 、毛边槽桥部单边高度 h 、入口圆角半径 r 以及拔模斜度 α) 对模具应力(模具的最大主应力)的影响。采用单因素变量法, 设计了4组模拟实验, 共计24次有限元模拟, 并通过对比成形载荷的模拟结果和已有研究预测结果来验证模拟的正确性。模拟结果表明: σ_{\max} (模具应力最大值) 随着 R 的增大而减小, 且二者呈现出较好的线性关系, 即 R 增大1 mm, σ_{\max} 下降约40 MPa; 模具整体应力水平随着 h 的增大而迅速减小, 但减小程度逐渐降低; r 在1~7 mm变化时对模具应力的影响较小; α 对模具应力的影响机理较为复杂, 但总体而言, 增大 α 会导致模具应力轻微上升。

关键词: 深型槽锻模; 结构参数; 拔模斜度; 模具应力; 成形载荷

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.04.028

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 04-0210-08

Numerical simulation of relationship between structural parameters and mold stress for hot forging mold

Liao Hailong¹, Xia Yufeng¹, Sun Chaoyuan^{1,2}, Liu Yang², Jiang Xianhong¹, Chen Lei¹, Teng Haihao¹

(1. Chongqing Key Laboratory of Advanced Mold Intelligent Manufacturing, College of Materials Science and Engineering,

Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. China National Erzhong Group Deyang Wanhong Die Forging Co., Ltd., Deyang 618000, China)

Abstract: In order to reduce the cracking risk of transition fillet of the groove bottom of deep groove forging mold, and provide guidance for the structural design of forging mold, a mold was designed to study the influences of structural parameters (transition fillet radius of groove bottom R , single side height of bridge for flash groove h , inlet fillet radius r , draft angle α) on mold stress (maximum principal stress of mold). Then, four sets of simulation experiments were designed by using the single factor variable method, and a total of twenty-four finite element simulation experiments were carried out. Furthermore, the simulation correctness was verified by comparing the simulation results of forming load with the prediction results of existing studies. The simulation results indicate that σ_{\max} (maximum mold stress value) decreases with the increasing of R , and the two show a good linear relationship, that is, R increases by 1 mm, and σ_{\max} decreases by about 40 MPa. The overall stress level of mold decreases rapidly with the increasing of h , but the degree of reduction decreases gradually. r has little effect on the mold stress when r changes from 1 mm to 7 mm, and the influence mechanism of α on the mold stress is more complicated. In general, increasing α induces a slight increase in the mold stress.

Key words: deep groove forging mold; structural parameters; draft angle; mold stress; forming load

航空航天制造业的发展是国家工业水平提高的

重要体现, 在提高经济效益、发展高技术产业方面具有重要作用, 因此是我国的战略性支柱产业。而结构件是航空航天器中重要的承载部件, 其性能对航空航天器性能起着决定性影响^[1], 如何获得性能优异的结构件对发展先进航空航天制造业至关重要。

在众多的生产工艺中, 锻造工艺因具备材料利用率高、产品力学性能好、可细化晶粒和焊合孔洞等优势^[2-4] 往往被用于结构件生产, 以满足结构件

收稿日期: 2022-07-20; 修订日期: 2022-10-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51775068); 中央高校基本科研 (2022CDJXY-010)

作者简介: 廖海龙 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: lhl1243118402@163.com

通信作者: 夏玉峰 (1972-), 男, 博士, 教授

E-mail: yufengxia@cqu.edu.cn

的性能要求。但是,当结构件形状较为复杂且材料变形抗力大时,锻模在服役时承受的载荷较大,容易失效,这导致结构件的一致性下降、生产成本上升。因此,降低模具的失效风险对稳定生产意义重大。锻模主要失效形式有磨损、塑性变形、氧化、开裂等^[2],而开裂是其中最为严重的失效形式,不仅会影响零件生产,甚至可能对人身安全造成损害,故需要着重考虑。锻模中的裂纹种类不一,萌生位置和原因也有所不同,但在众多裂纹中,型槽底部过渡圆角处的裂纹(图1)因频频出现而引起工程师注意,如何减少这类裂纹萌生对提高锻模寿命、增强零件一致性有重要意义。

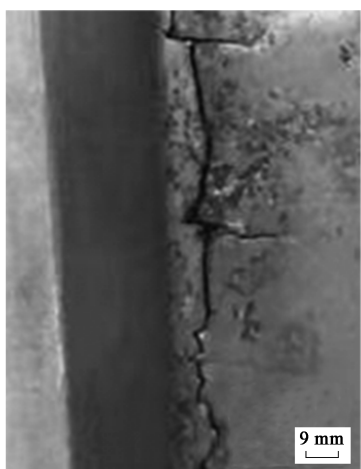


图1 型槽底部过渡圆角处开裂而失效的锻模

Fig. 1 Failed forging mold due to cracking at transition fillet of groove bottom

国内外对于模具开裂的研究成果丰富,在裂纹萌生机理方面,一般认为热疲劳裂纹是由模具表面冷热交替引起的热应力循环导致的^[2];而机械疲劳裂纹是由于外部循环载荷导致材料临界应变不断积累而产生的^[2]。模具底角裂纹是一类典型的机械疲劳裂纹,其产生与应力水平密切相关^[5],现有研究表明:最大主应力超过材料屈服强度会导致裂纹萌生^[6-8],因此,减小最大主应力可以有效降低开裂风险。Dalbosco M 等^[9]、Abishkenov M 等^[10]、Tzou G Y 等^[11]和 Chang K H 等^[6]通过模具外壁施加过盈配合的方式来预设压应力,以降低型槽应力水平,并考虑了不同预紧方式^[9]、模芯外形^[11]、模芯和模套的过盈配合尺寸^[6,10-11]等因素对模具应力的影响,借助有限元模拟验证了预设压应力的可行性。

然而,通过预设压应力来降低模具应力的办法并不适用于大型锻模,且在非回转体锻件中鲜有应用,因此,对于大型航空类锻模而言,从模具结

构出发进行优化更加实用。沈力^[12]调整了汽轮机叶片锻模型槽底部过渡圆角半径,发现增大圆角半径可以降低应力集中,降低模具应力水平。张月婷^[13]通过调整模具型槽底部过渡圆角半径和拔模斜度的方式来获得合理的模具结构参数。熊逸博^[14]通过增大凸模根部圆角半径,成功地消除了根部的高应力区。李向阳^[15]通过改变模具环形凸台的直径、高度和斜度,大幅度降低模具应力。

尽管学者已经提出了通过优化模具结构的方式来降低模具应力,但相关研究存在结构参数取值范围偏小、数值模拟结果规律性不强、结构参数种类少以及缺乏机理性解释等不足。考虑到未来结构件形状将趋于复杂,合理的模具结构设计将愈发重要,因此,本文通过特别设计的型槽结构并结合有限元软件 Deform 来较为完整地研究型槽底部过渡圆角半径 R 、毛边槽桥部单边高度 h 、入口圆角半径 r 以及拔模斜度 α 对模具应力水平的影响,为实际生产中模具结构参数的选择提供有价值的参考。

1 模具设计

为避免因金属填充不满而影响模具应力,所设计的型槽结构应尽可能简单,同时又能够较好地代表型槽较深的锻模所受的应力,因此,设计了如图2所示的模具(上模和下模完全相同),外形为回转体,型槽具有较大的深度。该模具结构简单,型槽中的主要尺寸包括型槽底部半径、型槽深度、拔模斜度、底部过渡圆角半径,毛边槽主要尺寸包括桥部宽度、桥部高度和入口圆角半径,各参数相互独立,互不影响,有利于运用单因素变量法研究结构参数的变化对模具应力的影响,此外,模具外壁与底部应当与型槽有较大距离,以免模具速度边界处的应力影响型槽应力。需要注意的是,由于拔模斜度的增大会导致锻件体积明显增大,故棒料体积也应当随之改变,以避免模具应力受其他因素的影响。故取棒料体积为锻件体积的1.15倍,同时将棒料高度与直径之比固定为2.25,由此可以通过锻件体积获得棒料尺寸。

2 有限元模型

2.1 模型建立

为减少计算时间,简化了图2中的模具三维模型,建立了如图3a所示的模具、棒料的二维模型用于 Deform 2D 模拟,棒料模型的边缘已倒角,倒角半径为10 mm。上模的相关尺寸已在图3b中标出,

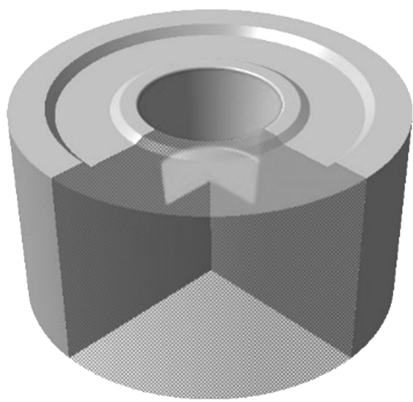


图 2 模具三维模型
Fig. 2 3D model of mold

其中, R 为型槽底部过渡圆角半径, h 为毛边槽桥部单边高度, r 为入口圆角半径, α 为拔模斜度, R_1 为模具半径, 下模结构与上模完全相同。模拟主要参数设置: 棒料温度为 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 模具温度为 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 棒料与空气对流换热系数为 $0.02\text{ N}\cdot(\text{mm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$, 棒料与模具之间界面换热系数为 $2\text{ N}\cdot(\text{mm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$, 环境温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 上模下压速度为 $10\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 摩擦类型选用剪切摩擦, 摩擦因数为 0.3 , 停止条件为上模与下模距离达到 1 mm 。

模拟分为两步: 第 1 步, 将模具视为刚性体, 将棒料视为塑性体, 上模以恒定速度下压, 模拟锻件成形情况; 第 2 步, 成形结束后, 选取成形模拟的最后

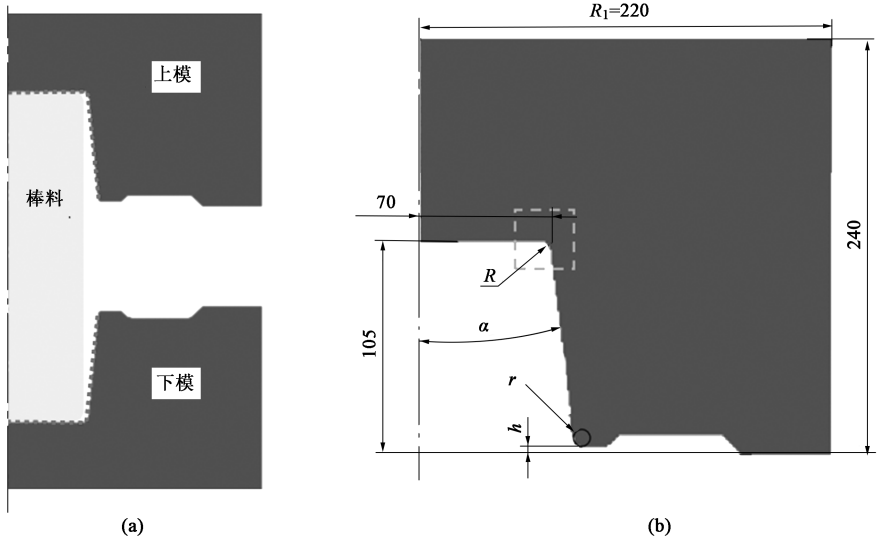


图 3 用于模拟的模具与棒料模型 (a) 与上模主要尺寸 (b)
Fig. 3 Mold and bar material model (a) and main dimensions of upper mold (b) for simulation

一个分析步, 将模具改为弹性体并把模具受力映射至模具上, 设置速度边界条件, 分析模具应力。

2.2 模拟方案

本文采用单因素变量法探究型槽底部过渡圆角半径 R 、毛边槽桥部单边高度 h 、入口圆角半径 r 以及拔模斜度 α 这 4 个参数对模具应力的影响, 因此共设计了 4 组模拟实验, 共计 24 次模拟。模拟时采用的结构参数见表 1, 其中 Δ 为取值间隔。

表 1 结构参数取值
Table 1 Values of structural parameters

组号	R/mm	h/mm	r/mm	$\alpha/(^{\circ})$
1	5~12 ($\Delta=1$)	4	3	5
2	12	3~8 ($\Delta=1$)	3	5
3	6	4	1~7 ($\Delta=2$)	5
4	6	4	3	5~15 ($\Delta=2$)

2.3 材料性能参数

棒料材料选用超高强钢 300M, 本构方程及性能参数查询文献^[16-17]可得, 其本构方程为:

$$\dot{\epsilon} = 1.2091 \times 10^{15} [\sinh(0.007\sigma)]^{5.7903} \times \exp\left(\frac{-391510}{R_g T}\right) \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 为应变速率; σ 为应力; R_g 为气体常数; T 为温度。

300M 钢材料密度为 $7.85\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 泊松比为 0.3 , 辐射率为 0.6 , 其他性能参数如图 4 所示。模具材料选用常见的热作模具钢 5CrNiMo, 性能参数查询文献^[18]可得, 材料密度为 $7.804\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 辐射率为 0.7 , 其他性能参数如图 5 所示。

2.4 模拟验证

模拟的准确性直接关系到结论的正确性, 因此,

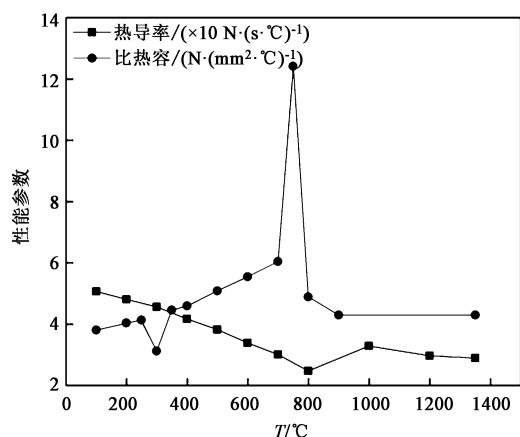


图4 300M 钢性能参数

Fig. 4 Property parameters of 300M steel

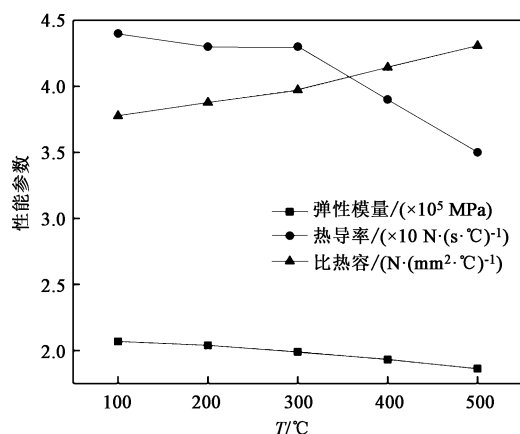


图5 5CrNiMo 钢性能参数

Fig. 5 Property parameters of 5CrNiMo steel

需要对模拟结果进行验证。然而, 据了解目前尚无成功测量模具应力的案例, 因此, 无法直接评估模拟准确性。在塑性成形领域中, 有学者通过比较模拟结果和实验结果的成形载荷来间接验证有限元模拟的正确性^[19-21], 此外, 有学者通过对比模拟成形载荷与实际成形载荷来反推摩擦因数^[22]。有鉴于此, 本文通过引入现有研究中锻件成形载荷计算公式得出锻件所需成形载荷预测值, 并与有限元模拟结果对比, 以确保模拟结果的可靠性。

对于轴对称且其中心线与上模运动轨迹平行的锻件, 成形载荷预测值 p 的计算公式为^[23]:

$$p = \pi Y \left[b(b + D) \left(1.5 + \frac{b}{2h'} \right) + \frac{D^2}{4} \left(1.5 + \frac{b}{h'} + \frac{1}{12} \times \frac{D}{h'} \right) \right] \quad (2)$$

式中: Y 为流变应力, 本文取 75 MPa; b 为毛边槽桥部单边宽度, 本文取 20 mm; D 为锻件直径, 与结构

参数取值有关, 本文中 $D = \Phi 2 \times (70 + 105 \tan \alpha)$ mm; h' 为毛边槽桥部高度, 其大小为上模、下模的毛边槽桥部单边高度 h 以及上模与下模间隔距离之和, 本文中上模与下模完全一致, 因此 $h' = 2h + 1$ 。

3 结果与分析

根据设计的模拟方案进行数值模拟, 获得了每组参数对应的模具应力场, 由于本文着重于如何减少模具型槽底部裂纹萌生, 同时模拟结果表明上模与下模应力水平分布情况接近, 且上模应力水平略高于下模, 因此, 本文的模具应力分析主要是对上模最大主应力的分析。此外, 为了完整展示本文工作, 在模具应力分析前首先进行锻件成形分析。

3.1 锻件成形分析

图6为第1组方案中, 当 $R = 5$ mm 时, 锻件成形结束时的应力云图, 从图6中可看出, 锻件上不同应力区的分界线光滑, 高应力区与低应力区有良好过渡, 没有应力突变。从云图中应力分布来看, 分模面附近的应力明显大于其他区域, 这是因为在成形终了时, 锻件变形仅限于分模面附近^[23]。此外, 通过观察接触区域(模具与锻件接触)可以发现, 锻件完全接触型槽, 成形良好, 避免了因局部未填充而影响模具应力。

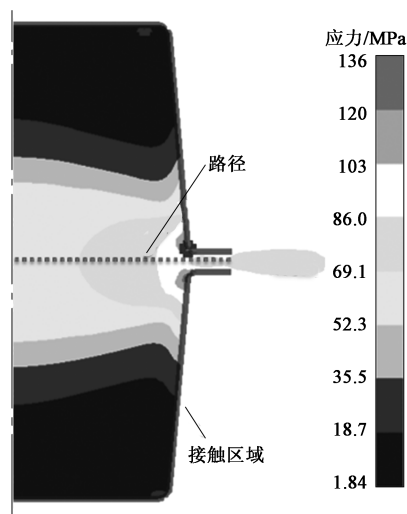
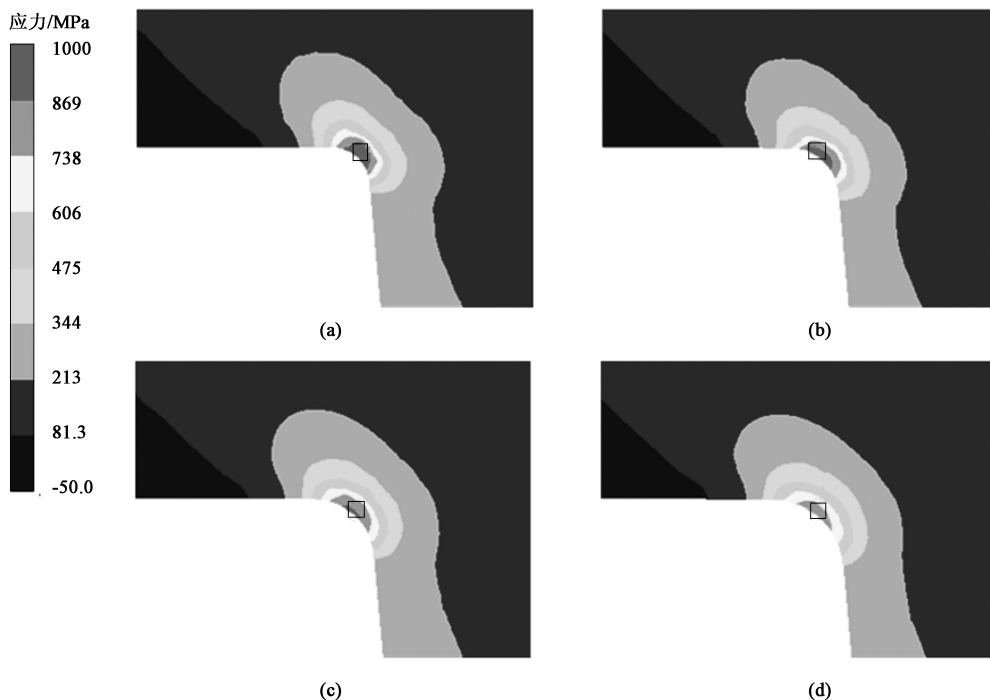


图6 锻件成形结束时的应力云图

Fig. 6 Stress cloud map of forgings at end of forming

3.2 R 对模具型槽应力的影响

图7为不同 R 时型槽底部过渡圆角区域(图3b中虚线框所示)的应力云图, 整体而言, 模具应力分布情况大致相同, 较大的应力主要集中在过渡圆角区域, 模具大部分区域的应力水平较低, 这是因为表面力只在物体表面附近产生显著应力^[24]。另外, 从云图变化趋势可以看出, 随着 R 的不断增

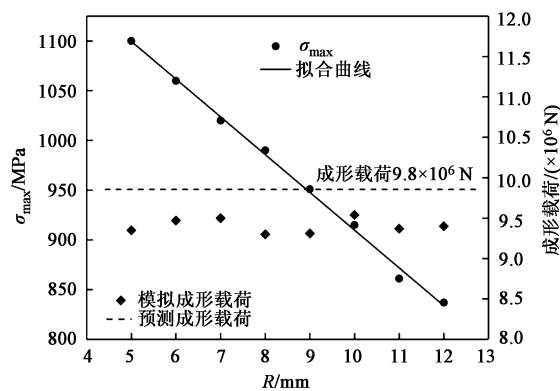
图 7 不同 R 时上模部分区域的应力云图(a) $R=6\text{ mm}$ (b) $R=8\text{ mm}$ (c) $R=10\text{ mm}$ (d) $R=12\text{ mm}$ Fig. 7 Sectional stress cloud maps of upper mold under different R

大, 云图中框选区域深色部分不断减小且最后消失, 而模具内部其他应力水平未明显变化, 这表明增大 R 可以降低应力集中程度, 进而降低最大应力 σ_{\max} 。

进一步地, 通过图 8 所示的 σ_{\max} 与 R 的关系可以看出, σ_{\max} 随着 R 的增大而降低, 二者近似于线性关系 (图 8 中拟合曲线), 即 R 增大 1 mm, σ_{\max} 下降约 40 MPa。可以猜测: 随着 R 的进一步增大, σ_{\max} 将进一步减小, 并且二者可能在一个更大的范围内保持线性关系。另外, 值得注意的是, σ_{\max} 的值和变化趋势与云图中应力水平以及应力水平的变化趋势一致 (图 7), 即用 σ_{\max} 的变化趋势代表模具应力的变化趋势是合理的, 可以在一定程度上说明本文给出的定量关系具有一定的可靠性, 这对于实际生产中圆角半径的取值具有较大意义。从图 8 中成形载荷与 R 的关系曲线可以看到, 不同 R 时锻件成形载荷的预测值约为 $9.8 \times 10^6\text{ N}$, 而模拟值在 $9.5 \times 10^6\text{ N}$ 附近波动, 尽管成形载荷的预测值大于模拟值, 但二者差距较小, 这在一定程度上证明了模拟结果可靠。

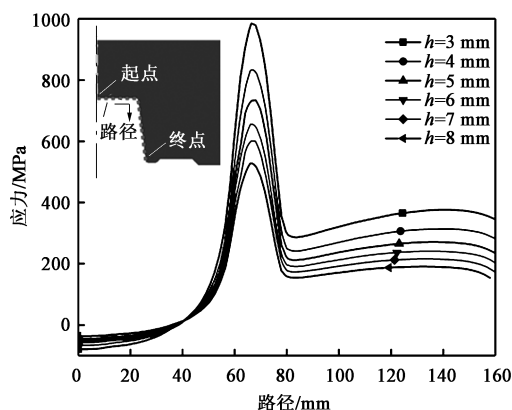
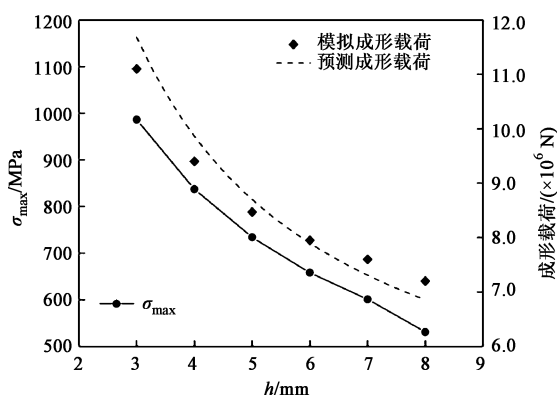
3.3 h 对模具型槽应力的影响

图 9 为不同 h 下应力沿着图 9 中所示路径的变化曲线, 从图 9 中可以看出, 应力从中心线开始为压应力, 随着距离的增加, 应力不断减小至零, 然后压应力转变为拉应力, 拉应力快速上涨, 在距离

图 8 σ_{\max} 和成形载荷随 R 的变化关系Fig. 8 Variation relationships between σ_{\max} and forming load with R

为 70 mm 时达到最大值, 接着迅速下降, 最后趋于稳定。需要注意的是, 型槽侧壁的应力水平明显高于型槽底部, 因此, 侧壁开裂的可能性高于底部; 此外还可以看到, 随着 h 的越大, 型槽表面整体应力水平逐渐降低, 这可以解释为 h 增大, 金属更易从型槽中流出^[25], 使模具承受载荷下降, 进而降低模具整体应力水平。

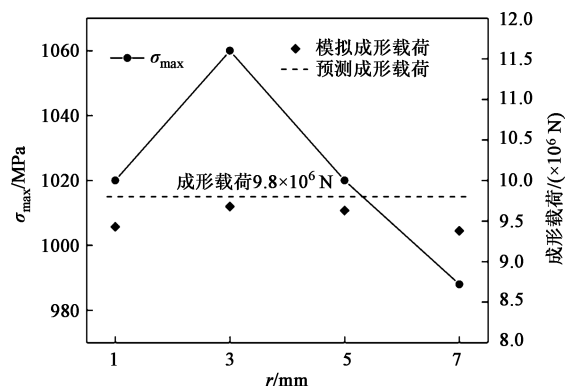
从图 10 中可以看出, 模具 σ_{\max} 随着 h 的增大迅速减小, 但减小程度趋于缓和, h 从 3 mm 增加至 4 mm 时, σ_{\max} 下降近 150 MPa, 而 h 从 7 mm 增加至 8 mm 时, σ_{\max} 仅下降了 70 MPa, 因此, 适当增

图9 不同 h 下沿路径的应力分布情况Fig. 9 Stress distribution conditions along path under different h 图10 σ_{\max} 和成形载荷随 h 的变化关系Fig. 10 Variation relationships between σ_{\max} and forming load with h

加 h 可以有效地降低模具应力。从图 10 中成形载荷与 h 关系曲线中还可以看出, 无论是模拟结果还是预测结果, 成形载荷均随着 h 的增大而减小, 但减小程度越来越小, 这与 σ_{\max} 变化趋势一致。此外, 成形载荷的有限元模拟值和预测值接近, 表明模拟结果是可靠的。

3.4 r 对模具型槽应力的影响

图 11 为 σ_{\max} 和成形载荷随 r 的变化关系图, 由图 11 可知, σ_{\max} 随着 r 的增大先增大, 在 $r=3$ mm 时达到峰值, 然后开始下降, 下降速度和上升速度大致相等。需要注意的是, σ_{\max} 的最大值与最小值仅相差约 70 MPa, 变化较小, 这表明 r 在 1~7 mm 之间变化时模具应力所受到的影响较小。分析图 11 中成形载荷与 r 之间的关系曲线可以得到, 成形载荷受 r 的影响较小, 但仍然呈现出先增大后减小的趋势。可以推测的是: r 继续增大, 模具应力和成形载荷将继续减小, 这是因为: 增大 r 在某种程度上相当于减小毛边槽桥部投影面积, 同时增大

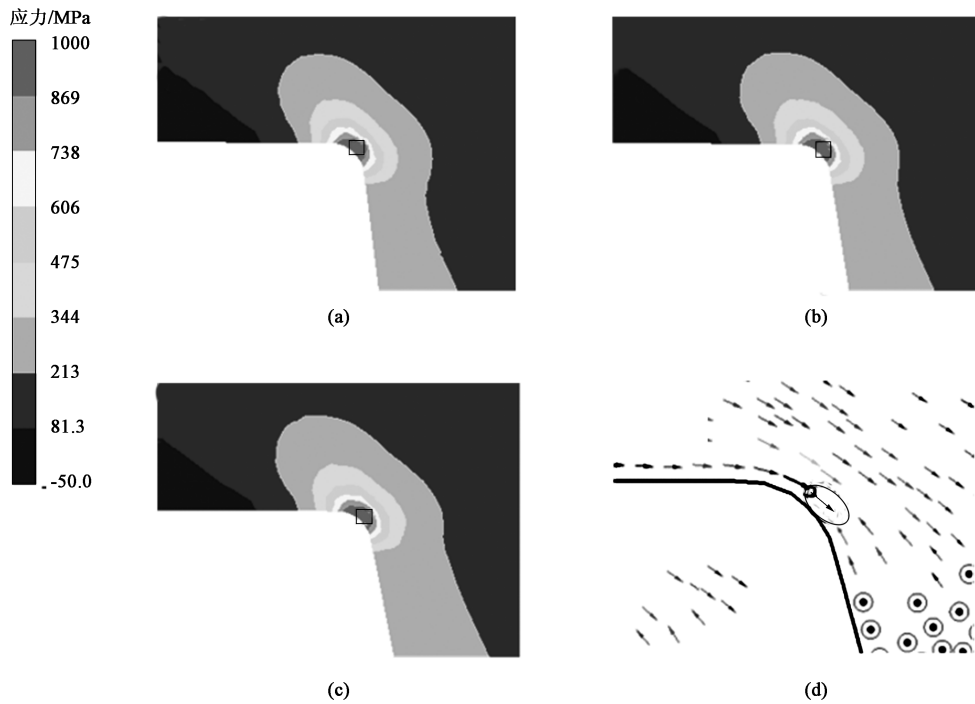
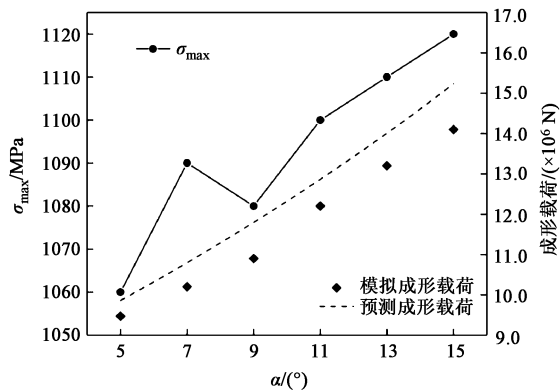
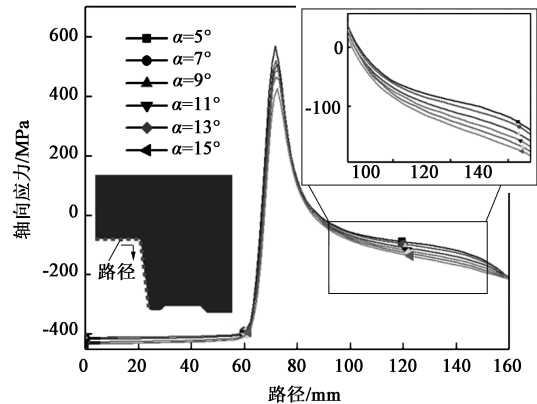
图11 σ_{\max} 和成形载荷随 r 的变化关系Fig. 11 Variation relationships of σ_{\max} and forming load with r

锻件投影面积, 尽管锻件与毛边槽桥部的总投影面积不变, 但根据式 (2) 可以计算出在这种情况下, 成形载荷呈下降趋势, 同时随着毛边槽桥部单边宽度的减少, 型槽内部金属排出所受的阻力将减小, 模具应力也相应减小。此外, 成形载荷的预测值与有限元模拟值较为接近, 这表明模拟结果具有一定的可靠性。

3.5 α 对模具型槽应力的影响

图 12 为不同 α 下的模具应力云图, 由图 12a~图 12c 可知, 模具整体应力随着 α 的增大而增大, 但整体而言变化较小, 圆角区域大小也没有明显变化, 这表明 α 对模具应力的影响较小。由图 12d 可以看出, σ_{\max} 方向 (图 12d 中箭头所示) 大致为过渡圆弧的切线方向。

图 13 为 σ_{\max} 和成形载荷随 α 的变化关系图, 总体而言, σ_{\max} 随着 α 的增加而增加, 但增加幅度较小且局部出现反常, 当 α 从 5° 增加至 15° 时, σ_{\max} 从 1060 MPa 增加到 1120 MPa, 涨幅仅有 5%, 而 α 从 7° 增加至 9° 时, σ_{\max} 不升反降。这种应力先减小后增大的情况在文献 [13] 中有相同描述, 这表明 α 对模具应力的作用机理较为复杂, 因此, 猜测 α 对模具应力的可能影响机理为以下 3 方面: (1) α 增大导致锻件在分模面上的投影面积增大, 成形载荷增大进而导致模具承受的载荷上升; (2) α 增大导致过渡圆弧长度减小, 即过渡区域减小, 因此, 导致型槽底角的应力上升; (3) α 增大使型槽侧壁承受更多的、方向朝上的压应力, 因而降低了过渡圆角处的拉应力。此外, 从图 13 中还可以看出, 成形载荷的预测值和模拟值随着 α 的增加而增加, 这是因为: 锻件成形载荷主要与锻件投影面积、毛边槽桥部单边高度以及材料性能有关, 且图 12 中的型槽侧壁的应力水平随着 α 的增加而增加也与成形载荷的变化情况相吻合, 由

图 12 不同 α 下上模部分区域应力云图(a) $\alpha=7^\circ$ (b) $\alpha=9^\circ$ (c) $\alpha=11^\circ$ (d) $\alpha=15^\circ$ Fig. 12 Sectional stress cloud maps of upper mold under different α 图 13 σ_{\max} 和成形载荷随 α 的变化关系Fig. 13 Variation relationships between σ_{\max} and forming load with α 图 14 不同 α 下轴向应力沿路径的分布Fig. 14 Axial stress distribution along path under different α

此可以进一步证明模拟结果的合理性。

为验证猜想 (3) 的合理性, 按图 14 所示的路径从左至右提取轴向应力, 得到了图 14 中不同 α 下轴向应力随路径的变化关系, 由图 14 可知, 型槽表面轴向应力主要为压应力, 仅在过渡圆角及附近处为拉应力, 通过方框中的放大图可以清楚看到, α 越大, 侧壁的压应力也越大, 这与猜想 (3) 中的结论一致, 因此, 在一定程度上印证了该猜想。

4 结语

本文应用单因素变量法较为完整地研究了 R 、 h 、

r 和 α 对模具应力的影响, 通过比较成形载荷的模拟结果和公式预测结果来核验模拟的准确性, 并结合已有研究进行分析, 现得出结论: σ_{\max} 随着 R 的增大而减小, 且二者呈现出较好的线性关系, 即 R 增大 1 mm, σ_{\max} 减小约 40 MPa, 这种定量分析结果对 R 取值具有重要参考意义; 模具整体应力随着 h 的增大而迅速减小, 但 h 越大, 增大 h 带来的应力减小程度越小; r 增大, σ_{\max} 整体呈下降趋势, 但部分数据点呈上升趋势, 不过 r 在 1~7 mm 之间取值时, σ_{\max} 变化较小; α 增大, σ_{\max} 整体上呈上升趋势, 但部分数据点出现反常, 且增加幅度较小, 这可能与 α 增大带

来锻件投影面积增加、过渡圆弧长度减小以及模具侧壁承受压应力增加等因素有关。尽管作用机理复杂,但总体而言,拔模斜度对模具应力影响有限。

参考文献:

- [1] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造 [J]. 中国激光, 2020, 47 (5): 32-55.
Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47 (5): 32-55.
- [2] Emamverdian A A, Sun Y, Cao C, et al. Current failure mechanisms and treatment methods of hot forging tools (dies) -A review [J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 129: 105678.
- [3] 纪小虎, 李萍, 时迎宾, 等. TA15 钛合金等温多向锻造晶粒细化机理与力学性能 [J]. 中国有色金属学报, 2019, 29 (11): 2515-2523.
Ji X H, Li P, Shi Y B, et al. Grain refinement mechanism and mechanical properties of TA15 alloy during multi-directional isothermal forging [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29 (11): 2515-2523.
- [4] Hibbe P, Wolfgarten M, Hirt G. Investigation of void closure in open-die forging considering changing load directions [J]. Prod. Eng.-Res. Dev., 2019, 13 (6): 703-711.
- [5] Wang Z P, Wang J P, Huang C W, et al. Cracking failure analysis of steel piston forging die [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 138: 106291.
- [6] Chang K H, Shih C W, Tzou G Y. Defect improvement of extrusion dies using combination of fem stress analysis with the taguchi method [J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2015, 39 (3): 729-738.
- [7] Dehghani K, Jafari A. Finite element stress analysis of forging dies to improve their fatigue life [J]. Materials Science-Poland, 2010, 28 (1): 139-152.
- [8] Vazquez V, Hannan D, Altan T. Tool life in cold forging-An example of design improvement to increase service life [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 98 (1): 90-96.
- [9] Dalbosco M, da Silva Lopes G, Schmitt P D, et al. Improving fatigue life of cold forging dies by finite element analysis: A case study [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64: 349-355.
- [10] Abishkenov M, Ashkeyev Z, Mashekov S, et al. Investigation of the stress-strain state of balls under deformation in a closed die [J]. Metalurgija, 2020, 59 (4): 559-562.
- [11] Tzou G Y, Lin S H, Chen D C, et al. Die stress analysis and improvement of the welding valve fastener in multi-stage forging [J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2019, 44 (2): 263-271.
- [12] 沈力. 基于损伤力学的锤锻模疲劳断裂分析及再制造工艺研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
Shen L. Analysis of Hammer Forging Die Fatigue Fracture and Research of the Remanufacturing Process Based on Damage Mechanics [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [13] 张月婷. 某耳轴锤上模锻模具断裂及裂纹扩展研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
Zhang Y T. A Trunnion of Hammer Forging on Fracture and Crack Propagation Research [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [14] 熊逸博. 航空发动机机匣锻造工艺优化及模具梯度堆焊再制造研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
Xiong Y B. Research on Optimization of Forging Process for Aero-Engine Casing and Die Remanufacturing by Gradient Surfacing Welding [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [15] 李向阳. 游艇转向臂锻造工艺优化及模具寿命提升 [D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
Li X Y. Optimization of Forging Process for Steering Arm of Yacht and Improvement for the Die Life [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.
- [16] 代伟, 易幼平, 李蓬川, 等. 300M 超高强钢起落架外筒模锻件锤锻工艺 [J]. 宇航材料工艺, 2012, 42 (6): 100-104.
Dai W, Yi Y P, Li P C, et al. Hammer forging process for 300M ultra high strength steel die forging of landing gear cylinder [J]. Aerospace Materials & Technology, 2012, 42 (6): 100-104.
- [17] 黄顺喆, 厉勇, 王春旭, 等. 300M 钢的热变形行为研究 [J]. 热加工工艺, 2010, 39 (20): 25-28.
Huang S Z, Li Y, Wang C X, et al. Investigation on hot deformation behavior of 300M steel [J]. Hot Working Technology, 2010, 39 (20): 25-28.
- [18] 朱宗元. 我国热作模具钢性能数据集 (续 I) [J]. 机械工程材料, 2001, 25 (2): 40-42.
Zhu Z Y. Property data collection of common hot working die steels used in China (Continued I) [J]. Materials For Mechanical Engineering, 2001, 25 (2): 40-42.
- [19] Liu Z, Li L, Yi J, et al. Influence of extrusion speed on the seam weld quality in the porthole die extrusion of AZ31 magnesium alloy tube [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92 (1): 1039-1052.
- [20] Li D, Jing Z, Yao M, et al. Simulation research on effect of extrusion parameters on welding pressure during porthole extrusion process of AZ91 pipe through angle welding chamber die [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50 (8): 2752-2759.
- [21] Abd El Aal M I. 3D FEM simulations and experimental validation of plastic deformation of pure aluminum deformed by ECAP and combination of ECAP and direct extrusion [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27 (6): 1338-1352.
- [22] 赵乙丞, 朱广伟, 齐鹏, 等. 基于圆环压缩和挤压-模拟法的 Zr-4 合金塑性成形摩擦因子测定 [J]. 工程科学学报, 2020, 42 (2): 209-215.
Zhao Y C, Zhu G Y, Qi P, et al. Measurement of friction factor in plastic forming of Zr-4 alloy based on ring compression and extrusion-simulation [J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42 (2): 209-215.
- [23] 俞汉清, 陈金德. 金属塑性成形原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
Yu H Q, Chen J D. Principle of Metal Plastic Forming [M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [24] 徐芝纶. 弹性力学 (上册) [M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
Xu Z L. Elastic Mechanics: Volume I [M]. 4nd Edition. Beijing: Higher Education Press, 2016.
- [25] 姚泽坤. 锻造工艺学与模具设计 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.
Yao Z K. Forging Technology and Die Design [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University Press, 2007.