

模具

基于加权分析法的车用铝合金防护罩热锻模具磨损分析

罗海英, 陈海军

(广西交通职业技术学院 汽车工程学院, 广西 南宁 530023)

摘要: 以车用铝合金防护罩为研究对象, 针对成形过程中的模具磨损问题进行了研究。首先, 基于 Archard 修正模型, 采用 Deform-3D 软件对热锻过程进行了建模仿真, 分析了凸凹模的磨损情况, 出现了凹模磨损远大于凸模磨损的现象; 其次, 以坯料温度、模具温度、凹模硬度、锻压速度以及摩擦因数为研究因素, 进行了正交试验仿真, 并以凹模的磨损深度及凹模承受的载荷为优化目标, 采用加权分析法结合极差分析法, 获得了最佳锻造工艺参数组合, 结果显示优化后的凹模的寿命提高了 50.9%; 最后, 通过生产试验对模拟结果进行了验证, 验证结果表明凹模的实际寿命与模拟结果较为接近, 有限元模拟能应用于模具寿命的研究。

关键词: 模具磨损; 模具温度; 凹模硬度; 锻压速度; 加权分析法

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.04.030

中图分类号: TG76 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 04-0212-06

Wear analysis of hot forging mold for automobile aluminum alloy protective cover based on weighted analysis method

Luo Haiying, Chen Haijun

(College of Automotive Engineering, Guangxi Institute of Transportation Vocational and Technical College, Nanning 530023, China)

Abstract: For the automobile aluminum alloy protective cover, the mold wear problem in the forming process was studied. Firstly, based on the Archard modified model, the hot forging process was modeled and simulated by software Deform-3D, the wear conditions of punch and die were analyzed, and the wear of die was much greater than that of punch. Secondly, taking billet temperature, mold temperature, die hardness, forging speed and friction factor as the research factors, the orthogonal test simulation was carried out. Furthermore, taking the wear depth of die and the load on the die as the optimization objectives, the optimal combination of forging process parameters was obtained by the weighted analysis method combining with range analysis method. The results show that the service life of the optimized die is increased by 50.9%, and the simulation results are verified by production tests, showing the actual life of the die is close to the simulation results. Thus, the finite element simulation can be applied to study the life of mold.

Key words: die wear; mold temperature; die hardness; forging speed; weighted analysis method

随着汽车向着轻量化的方向发展, 许多汽车零件的生产材料逐渐被铝合金替代, 其中, 6082 铝合金由于成形性能较好、耐高温、耐腐蚀等优点, 被广泛应用于许多车身及安全结构件中^[1-2]。热锻工艺能够改善铝合金的成形性能^[3], 成形外形较为复杂的结构件, 消除在常温下成形可能出现的开裂、起皱、回弹等缺陷^[4], 但工艺参数设计的不合理会造成模具磨损过大, 造成模具失效过快, 增加模具

成本, 同时过于频繁的修模换模, 会影响零件的生产效率, 而热锻过程中, 由于坯料与模具存在接触运动, 模具磨损是不可避免的, 因此, 对模具磨损的研究具有十分重要的意义。

目前, 科研工作者们在碳钢、合金钢热锻模具磨损方面做了大量的研究工作, 并取得了一些成果: 如韩风等^[5]通过改进热锻模具的模芯结构来降低模具磨损; 蔡力钢等^[6]对 AISI4340 合金钢热锻的模具磨损情况进行了研究, 利用有限元及正交试验法优化了模锻工艺参数; 陆元三等^[7]考虑了模具磨损累积的影响, 建立了更为准确的、关于锻造次数与模具磨损的关系曲线, 量化地预测了热锻模的寿命; 何伟等^[8]采用有限元和响应面相结合的方法, 通过

收稿日期: 2021-04-17; **修订日期:** 2021-07-19

基金项目: “广西职业教育汽车运用与维修技术专业群发展研究基地”项目支持 (桂教职成 (2018) 37 号)

作者简介: 罗海英 (1982-), 女, 学士, 讲师

E-mail: easonwang1018@sohu.com

通过热锻模拟可知,该工艺能够成形铝合金防

护罩, 成形过程中无材料折叠现象, 各部位成形饱满, 整体温度分布较为均匀, 能够获得符合要求的锻件, 经孔加工即可获得最终零件, 最终模拟件如图 3a 所示。但发现成形过程中凸模与凹模的磨损差距较大, 磨损分布分别如图 3b、图 3c 所示, 凸模最大磨损深度为 7.69×10^{-6} mm, 位于头部端面, 该

部位是成形锻件时模具与坯料的主要接触面, 符合实际情况, 而凹模最大磨损深度为 1.71×10^{-5} mm, 位于齿状部位及模底凸起位置, 磨损深度是凸模的 2.2 倍。为了减少换模次数, 达到凸凹模统一换模的目的, 采用正交试验对热锻工艺参数进行优化, 提高凹模的寿命。

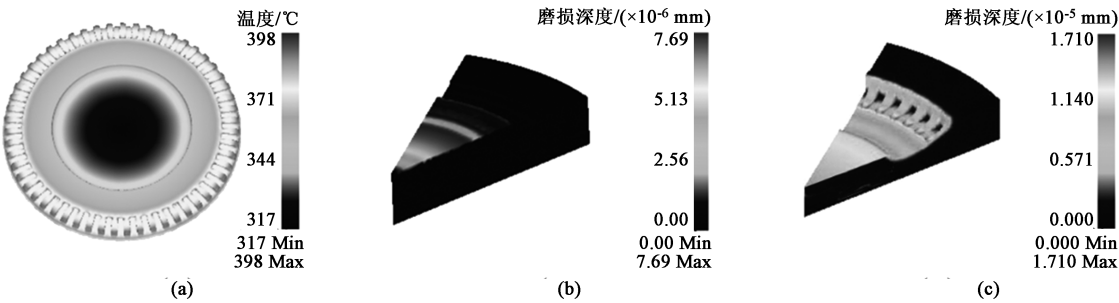


图 3 仿真结果
(a) 最终模拟件 (b) 凸模磨损分布 (c) 凹模磨损分布

Fig. 3 Simulation results

(a) Final simulation part (b) Wear distribution of punch (c) Wear distribution of die

2.2 多目标正交试验设计

当凹模受到的载荷越大时, 凹模与坯料间的挤压就越大, 理论上磨损也越大, 因此, 本文将凹模的磨损深度及凹模承受的载荷作为优化目标, 记为 W 、 Q ,

将坯料温度、模具温度、凹模硬度、锻压速度及摩擦因数作为优化因素, 记为 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 , 各取 4 个水平, 通过正交试验建立 16 组试验, 经 Deform 仿真, 各组试验凹模的最大磨损深度及最大载荷如表 1 所示。

表 1 正交试验模拟结果
Table 1 Simulation results of orthogonal experiment

试验	$x_1/^{\circ}\text{C}$	$x_2/^{\circ}\text{C}$	x_3/HRC	$x_4/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	x_5	$W/(\times10^{-6}\text{ mm})$	$Q/(\times10^5\text{ N})$	Y_{1i}	Y_{2i}	Y
1	300	200	45	50	0.15	11.23	7.75	76.70	23.21	49.96
2	300	240	50	100	0.20	15.45	7.92	33.20	13.10	23.15
3	300	280	55	150	0.25	18.67	8.03	0.00	6.55	3.28
4	300	320	60	200	0.30	17.34	8.14	13.71	0.00	6.86
5	350	200	50	150	0.30	10.93	8.11	79.79	1.79	40.79
6	350	240	45	200	0.25	11.12	7.65	77.84	29.17	53.51
7	350	280	60	50	0.20	10.18	7.29	87.53	50.60	69.07
8	350	320	55	100	0.15	10.34	6.89	85.88	74.40	80.14
9	400	200	55	200	0.20	8.97	6.83	100.00	77.98	88.99
10	400	240	60	150	0.15	9.34	6.46	96.19	100.00	98.10
11	400	280	45	100	0.30	12.14	7.71	67.32	25.60	46.46
12	400	320	50	50	0.25	11.11	7.52	77.94	36.90	57.42
13	450	200	60	100	0.25	10.35	7.03	85.77	66.07	75.92
14	450	240	55	50	0.30	14.69	7.88	41.03	15.48	28.26
15	450	280	50	200	0.15	10.33	6.79	85.98	80.36	83.17
16	450	320	45	150	0.20	11.25	6.87	76.49	75.60	76.05

2.3 加权分析法

由于处理多目标问题较为复杂, 因此, 通过加权分析法引入加权参数 Y , 将多目标问题简化为单目标问题^[11], 各组试验对应的凹模磨损及载荷对应

的加权值记为 Y_{1i} 、 Y_{2i} , 其中 i 代表第 i 组试验, 加权值以百分制为例, 即凹模磨损最小或载荷最小的试验对应的加权值为 100, 相反最大时为 0, 如表 1 中试验 3 的凹模磨损对应的加权值为 0.00, 试验 9

的凹模磨损对应的加权值为 100.00，而试验 4 的载荷对应的加权值为 0.00，试验 10 的载荷对应的加权值为 100.00，其余试验的凹模磨损深度及载荷对应的加权值计算公式如式（3）所示：

$$\begin{cases} Y_{1i} = 100(W_{\max} - W_i)/(W_{\max} - W_{\min}) \\ Y_{2i} = 100(Q_{\max} - Q_i)/(Q_{\max} - Q_{\min}) \end{cases} \quad (3)$$

式中： W_{\max} 、 W_{\min} 、 Q_{\max} 、 Q_{\min} 分别为各试验中的凹模最大磨损深度、最小磨损深度、最大载荷、最小载荷； W_i 、 Q_i 分别为第 i 组试验对应的磨损深度及载荷。

经计算，各组试验的 Y_{1i} 、 Y_{2i} 数值如表 1 所示， Y 与 Y_{1i} 、 Y_{2i} 间的计算公式如式（4）所示：

$$Y = a \cdot Y_{1i} + b \cdot Y_{2i} \quad (4)$$

式中： a 、 b 分别为加权系数， $a+b=1$ 。 a 、 b 表示凹模磨损深度及载荷对凹模寿命的重要程度，对于该试验，两目标同等重要，因此，取 a 和 b 均为 0.5。

综上，该优化问题可转化为如式（5）所示的函数问题，通过加权参数 Y 来评断凹模的寿命。

$$\begin{aligned} \max & Y(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = \\ & [W(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5), Q(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)] \end{aligned} \quad (5)$$

2.4 极差分析

正交试验中，通常采用极差分析法来鉴定目标因素对目标结果的重要性^[12-13]，极差值与重要性呈正相关关系，因此，将表 1 中计算获得的加权参数 Y 进行极差分析，极差分析结果见表 2。由极差值大小可知，目标因素的关键顺序为： $x_1 > x_5 > x_2 > x_3 > x_4$ 。由上述分析可知，加权参数 Y 越大越好，因此根据均值处理结果，取 x_1 的最优水平为 400℃，取 x_2 的最优水平为 200℃，取 x_3 的最优水平为 60 HRC，取 x_4 的最优水平为 200 mm·s⁻¹，取 x_5 的最优水平为 0.15，即为最优热锻工艺参数组合。

表 2 加权参数极差分析结果

因素	$x_1/^\circ\text{C}$	$x_2/^\circ\text{C}$	x_3/HRC	$x_4/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	x_5
均值 1	20.813	63.915	56.495	51.177	77.843
均值 2	60.877	50.755	51.133	56.418	64.315
均值 3	72.742	50.495	50.167	54.555	47.532
均值 4	65.850	55.118	62.487	58.132	60.593
极差值	51.929	13.420	12.320	6.955	47.250

3 最优热锻工艺参数验证

由表 1 可知，试验 10 的加权参数值最大，在 16 组试验中最优，而最优热锻工艺参数组合并不在 16 组试验之内，因此，将该组数据通过 Deform 再次进行建模仿真，凸、凹模磨损深度结果及凹模载荷变化曲线如图 4 所示，凹模最大磨损深度为 8.39 mm×10⁻⁶ mm，位于模底，凹模的最大载荷为 6.55×10⁵ N，将该组数据加入上述 16 组试验中重新计算加权参数 Y 值，见表 3。最优参数组合的加权值明显更大，更有利于凹模寿命的提高。与初始模拟相比，凸模磨损深度略有减小，变化不大，但凹模磨损深度降低了 50.9%。实际热锻时，凹模磨损深度达到 0.1 mm 时，防护罩就会超差将其认定为不合格产品，因此，可预测在最优参数条件下凹模的寿命为 11919 件，而实际热锻生产中，凸、凹模在完成 12434 件铝合金防护罩生产后需要进行换模，与预测结果非常接近，凹模在实际生产中的磨损情况如图 5 所示，图 5a 为生产 200 件左右后凹模的情况，磨损还不明显，图 5b 为生产 10000 件左右后的凹模情况，最大磨损深度在 80 μm 左右，磨损最大部位位于凹模模底，与模拟结果吻合，验证了模拟结果的正确性及最优参数组合的可靠性。

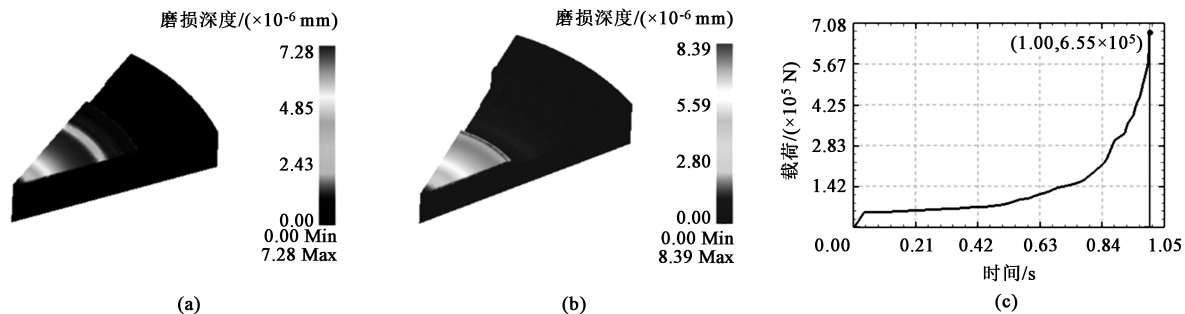


图 4 最优参数模拟结果

(a) 凸模磨损分布 (b) 凹模磨损分布 (c) 凹模载荷变化曲线

Fig. 4 Simulation results of optimal parameters

(a) Wear distribution of punch (b) Wear distribution of die (c) Change curve of die load

表 3 对比结果
Table 3 Comparison results

参数组合	$x_1/^\circ\text{C}$	$x_2/^\circ\text{C}$	x_3/HRC	$x_4/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	x_5	$W/(\times 10^{-6}\text{ mm})$	$Q/(\times 10^5\text{ N})$	Y_{1i}	Y_{2i}	Y
试验 10	400	240	60	150	0.15	9.34	6.46	90.76	100.00	95.38
最优参数组合	400	200	60	200	0.15	8.39	6.55	100.00	94.64	97.32

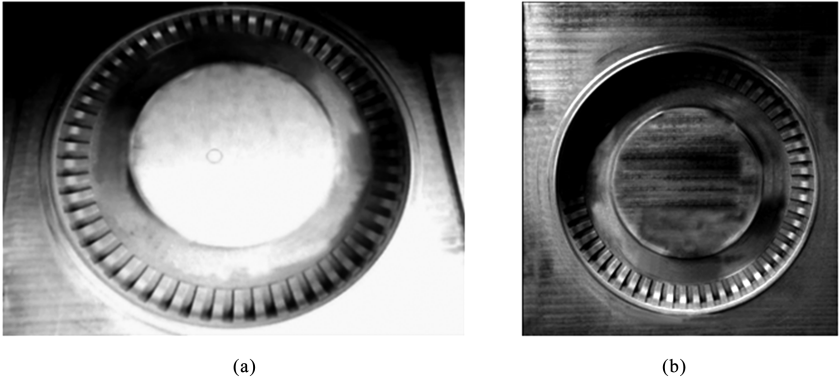


图 5 凹模实际磨损情况

(a) 生产 200 件左右后 (b) 生产 10000 件左右后

Fig. 5 Actual wear conditions of die

(a) After producing about 200 pieces (b) After producing about 10000 pieces

4 结语

基于 Archard 修正模型, 利用 Deform 软件进行了 6082 铝合金防护罩的热锻模拟, 通过正交试验并引入了加权参数 Y , 获得了各目标因素的关键程度。同时, 采用加权分析法结合极差分析法, 获得了最佳锻造工艺参数组合, 即坯料温度为 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 、模具温度为 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 、凹模硬度为 60 HRC、锻压速度为 $200\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、摩擦因数为 0.15, 与参数改进前相比, 凹模寿命提高了 50.9%。最后, 通过实际试模试验对模拟结果进行了验证, 凹模的实际寿命与模拟结果较为接近, 表明有限元模拟能应用于模具寿命的研究。

参考文献:

[1] 张劲, 蒋震, 虞大联, 等. 6082 铝合金锻造组织不均匀性及其对锻件性能的影响 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (9): 8-15.
Zhang J, Jiang Z, Yu D L, et al. Forging microstructure inhomogeneity of 6082 aluminum alloy and its effect on properties of forgings [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (9): 8-15.

[2] 张子容, 唐良喜. 工艺参数对汽车用 6082 铝合金薄板拉深性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (3): 193-195,

199.
Zhang Z R, Tang L X. Effect of process parameters on drawing properties of 6082 aluminum alloy sheet for automobile [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (3): 193-195, 199.

[3] 葛玮, 徐卫红, 邹珺. 基于 DEFORM-3D 的铝合金锻造成形过程的计算机优化研究 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (23): 128-131.
Ge W, Xu W H, Zou J. Study on computer optimization of forging forming process of aluminum alloy based on DEFORM-3D [J]. Hot Working Technology, 2014, 43 (23): 128-131.

[4] 温正略, 李卫东, 万敏, 等. 7475 铝合金板蠕变时效成形回弹研究 [J]. 塑性工程学报, 2016, 23 (3): 77-81.
Wen Z L, Li W D, Wan M, et al. Springback in creep age forming of 7475 aluminum alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2016, 23 (3): 77-81.

[5] 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.

[6] 蔡力钢, 刘海东, 程强, 等. 基于正交试验法的模锻模具磨损分析及优化 [J]. 北京工业大学学报, 2020, 46 (1): 1-9.
Cai L G, Liu H D, Cheng Q, et al. Analysis and optimization of die forging wear based on orthogonal test method [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46 (1): 1-9.

[7] 陆元三, 李颖颖, 王培安. 基于 Archard 理论对变速叉预锻凹模寿命分析 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (8): 164-169.

- Lu Y S, Li Y Y, Wang P A. Life analysis on pre-forging die for shifting fork based on Archard theory [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (8): 164-169.
- [8] 何伟, 董万鹏, 孙礼宾, 等. 基于响应面法的齿轮轴模具磨损目标参数优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (9): 166-170.
- He W, Dong W P, Sun L B, et al. Optimization on wear target parameters for gear shaft mold based on response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (9): 166-170.
- [9] 王相钧, 王大勇, 王培涛, 等. 连接杆头模锻工艺参数优化研究 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (6): 36-41.
- Wang X J, Wang D Y, Wang P T, et al. Process parameters optimization of die forging for connecting rod head [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (6): 36-41.
- [10] Lee R S, Jou J L. Application of numerical simulation for wear analysis of warm forging die [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140 (1-3): 43-48.
- [11] 王雷刚, 孙昊, 庄晓伟, 等. 爪极锻造工艺参数多目标优化 [J]. 机械设计与制造, 2017, (9): 201-203.
- Wang L G, Sun H, Zhuang X W, et al. Multi-objective optimization of claw pole forging process parameters [J]. Machinery Design & Manufacture, 2017, (9): 201-203.
- [12] 吴艳云, 张东民, 盛育东, 等. SCM435 合金钢紧固件精冲过程的数值模拟及参数优化 [J]. 中国科技论文, 2018, 13 (4): 474-477.
- Wu Y Y, Zhang D M, Sheng Y D, et al. Numerical simulation and parameter optimization of the fine blanking process of SCM435 alloy steel [J]. China Sciencepaper, 2018, 13 (4): 474-477.
- [13] 李彦奎, 吕彦明, 倪明明. 航空叶片模具设计参数对模具磨损影响分析 [J]. 材料科学与工艺, 2019, 27 (3): 79-84.
- Li Y K, Lyu Y M, Ni M M. The analysis of influence of design parameters of air blades on die wear [J]. Materials Science and Technology, 2019, 27 (3): 79-84.

关于开展第十二期“锻压企业质量工程师”培训班 (有色金属及高温合金锻造工艺与标准)的通知(第三轮)

为促进我国锻压企业实行规范化生产,提高企业生产技术水平、管理水平和市场竞争能力,满足各企业对质量管理体系和安全生产管理体系的需求,同时,提高锻压企业技术人员和质量管理人员对相关国家与行业标准的理解和使用能力,全国锻压标准化技术委员会经研究决定,自2013年起,在全国范围内开展“锻压企业质量工程师”的培训与认证工作,以及锻压标准宣贯工作。为配合此项工作,本标委会将按“模锻”、“自由锻”、“特种成形”、“冲压”等专题陆续举办相关培训班,截止目前已成功举办十一期,取得了很好的效果,得到广大锻压企业认可和支持。

第十二期“‘锻压企业质量工程师’培训班——有色金属及高温合金锻造工艺与标准”将于2022年举办。请各单位尽快报名,有关事宜通知如下:

一、报名条件

具备中专及以上学历的企业负责人、质量主管、安全卫生主管、标准化工作人员和锻压专业技术人员。

符合报名条件的上述人员,须由本人填写报名表,并经单位审核同意后方可报名。

二、培训内容

(1) 有色金属及高温合金锻造技术、工艺、装备发展现状与发展趋势

(2) 锻造车间安全生产与环境保护

(3) 有色金属及高温合金锻造模拟技术及优化设计

(4) 高温合金锻件质量控制、工艺设计与实例分析

(5) 铝合金锻件质量控制、工艺设计与实例分析

(6) 镁合金、锆合金和铜合金锻件质量控制、工艺设计与实例分析

(7) 钛合金锻件质量控制、工艺设计与实例分析

(8) 有色金属及高温合金锻件的缺陷分析与控制

(9) 企业参观与讨论

(10) 考试与测评

三、主讲教师

我国锻压领域知名专家、企业负责人、高级工程师、现场管理人员、知名院校教授等。

四、培训时间及地点

培训时间: 待定。

培训地点: 安徽省芜湖市。

五、报名方式

欲参加培训的学员,请您填好回执表(登陆网站 <http://www.fstjournal.net> 下载),通过 E-mail 发至全国锻压标准化技术委员会秘书处。

六、联络方式

全国锻压标准化技术委员会

联系人: 林玉彤、魏巍、金红

地址: 北京市海淀区学清路18号709室(100083)

电话: 010-62920652; 18811346037; 13439515704

E-mail: fst_linyutong@163.com; dyjsjournal@163.com;
duanya2005@126.com

全国锻压标准化技术委员会