

基于 Deform-3D 的齿轮坯精锻工艺分析与试验验证

陈保山¹, 逯云杰²

(1. 濮阳职业技术学院 机电与汽车工程学院, 河南 濮阳 457000; 2. 河南大学 濮阳工学院, 河南 濮阳 457000)

摘要: 针对齿轮坯铸造生产质量差、精度低, 而机加工生产材料利用率低、效率低的问题, 采用锻造工艺进行取代。设计了齿轮坯的两种锻造成形工艺, 分别为开式模锻和闭式模锻, 并采用刚塑性有限元法对两种工艺进行了模拟分析。结果表明: 采用开式模锻, 当坯料高径比为 0.23~0.53 时, 可获得成形完整、无缺陷的齿轮坯, 且当高径比为 0.53 时成形力更小; 采用闭式模锻, 当坯料高径比为 0.17~0.49 时, 可获得成形完整、无缺陷的齿轮坯, 且当高径比为 0.49 时成形力更小。经对比, 开式模锻的成形力更小, 锻模寿命更长, 而闭式模锻的材料利用率更高, 锻件出现开裂的风险更低, 锻件质量更好。最后, 通过工艺试验获得了质量良好的齿轮坯锻件, 验证了模拟结果的准确性。

关键词: 齿轮坯; 开式模锻; 闭式模锻; 坯料高径比; 成形力

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.12.003

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 12-0018-07

Analysis and experimental verification of gear billet precision forging process based on Deform-3D

Chen Baoshan¹, Lu Yunjie²

(1. School of Mechatronics and Automotive Engineering, Puyang Vocational and Technical College, Puyang 457000, China;

2. Puyang Institute of Technology, Henan University, Puyang 457000, China)

Abstract: For the problems of poor quality and low precision of gear billet casting production and low material utilization rate and low efficiency of machining production, the forging process was proposed to replace them. Then, two forging processes for gear billet were designed, namely open die forging and closed die forging, and they were simulated by rigid plastic finite element method, respectively. The results show that for open die forging, when the height-to-diameter ratio of billet is between 0.23 and 0.53, a complete and defect-free gear billet can be obtained, and when the height-to-diameter ratio is 0.53, the forming force is smaller. For closed die forging, when the height-to-diameter ratio of the billet is between 0.17 and 0.49, a complete and defect-free gear billet can be obtained, and when the height-to-diameter ratio is 0.49, the forming force is smaller. By comparison, the open die forging has lower forming force and longer life of forging die, while the closed die forging has higher material utilization rate, lower risk of cracking for forgings, and better quality of forgings. Finally, the good-quality gear billet forgings are obtained by process experiments, which verifies the accuracy of the simulation results.

Key words: gear billet; open die forging; closed die forging; height-to-diameter ratio of billet; forming force

齿轮是用于传递动力的一类机械元件, 齿轮传动具有寿命长、可靠性强、效率高、适用场合广等优点^[1-3], 在机械结构中应用最广。而齿轮的工作环境较为苛刻, 受载大, 同时伴有振动、摩擦、冲击、高温等影响, 因此对齿轮的质量要求极高。目前, 齿轮加工方式主要为模锻制坯配合机加工齿形^[4-5], 实现了速度与精度的有效结合, 因此, 除去机加工水平的影响后, 齿轮的质量主要取决于齿轮锻坯的质量。本文根据塑性成形原理, 对齿轮坯

的两种模锻成形工艺进行了深入研究, 以锻坯质量为前提来确定更合适的工艺, 并采用有限元分析软件 Deform-3D 作为研究工具^[6-9], 更加直观地了解锻坯的成形过程、是否有缺陷产生、锻模载荷是否过大等信息, 与传统的经验法和类比法相比, 指导性、目的性更强, 不仅加快了研究效率, 反复试验造成的成本浪费也得到大幅缩减, 还能对锻模的寿命进行一定程度的预测^[10]。

1 齿轮坯锻造工艺分析

某规格齿轮坯的锻件图如图 1 所示, 材料为

收稿日期: 2022-10-10; 修订日期: 2023-01-25

作者简介: 陈保山 (1983-), 男, 硕士, 讲师

E-mail: baoshan198302@163.com

20CrMnMo 合金钢，属盘状零件，上下两端的中部各有一个带锥度的环形凸台，但高度不同，同时环形凸台与外圈之间设置有 5 条加强筋，结构复杂。如果采用机加工方式成形，精度较好，但材料利用率不超过 49%，成本高，加工效率慢，零件性能一般。如果采用铸造加工，比较经济，适合复杂零件的成形，但铸件内部易产生孔洞、组织疏松不连续、

夹杂异物等缺陷，零件性能差。而通过锻造加工，制件晶粒可以得到细化，能够保证组织的连续性，零件性能好，精度高，加工效率高，同时材料利用率高，可达到近净成形^[11-13]，完美地填补了上述缺陷。本文根据塑性成形原理，设计了图 2 所示的两种成形工艺，即开式模锻（图 2a）和闭式模锻（图 2b），并分别通过 Deform-3D 软件进行模拟研究。

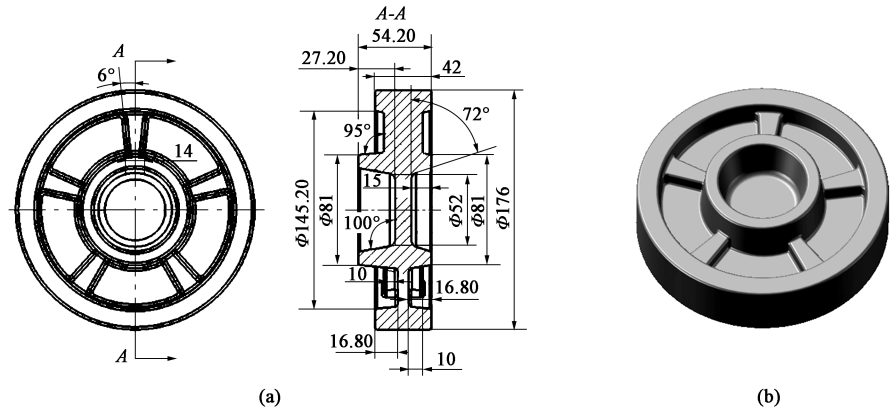


图 1 齿轮坯锻件图
(a) 二维图 (b) 三维图
Fig. 1 Drawings of gear billet forgings
(a) Two-dimensional drawing (b) Three-dimensional drawing

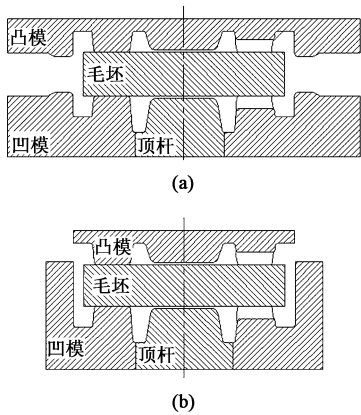


图 2 两种模锻成形工艺
(a) 开式模锻 (b) 闭式模锻
Fig. 2 Two kinds of die forging processes
(a) Open die forging (b) Closed die forging

2 有限元建模及结果分析

2.1 有限元模型建立

由上述齿轮坯的结构特征可知，零件关于 5 条加强筋对称，因此，可取 1/10 模型进行模拟，以节约运算时间。其次，模拟过程无需进行脱模，因此，将锻模结构简化为上模、毛坯、下模 3 个零件，将模型导入 Deform-3D 软件后，毛坯定义为塑性体，材

料采用 20CrMnMo 合金钢，不同温度下的应力-应变曲线如图 3 所示，模拟温度为 1100 ℃，模具定义为刚体，材料选择 H13 钢，模拟温度为 320 ℃。划分网格后，定义毛坯与模具之间为剪切接触摩擦，摩擦因数取为 0.3^[14]，传热系数为 11 N · (s · mm · ℃)⁻¹。锻造设备采用 Screw Press（螺旋压力机），锻造能量设置为 36 kJ，锻造效率为 0.6，飞轮惯性矩为 1.356×10⁵ kg · mm · s²，滑块速度为 50 mm · s⁻¹。以开式模锻作为示例，建立的有限元模型如图 4 所示。

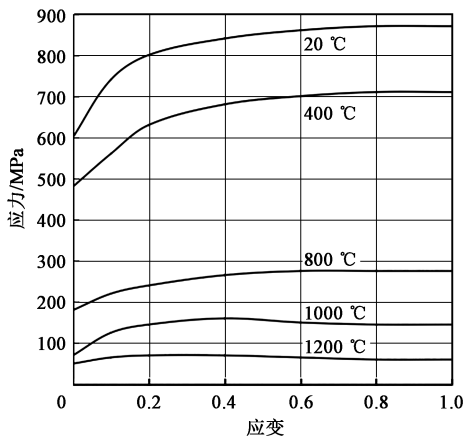


图 3 不同温度下的应力-应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curves under different temperatures

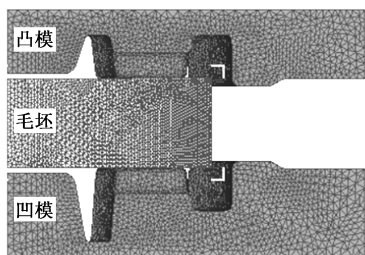


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

2.2 高温损伤模型建立

通过建立高温损伤模型,可根据模拟结果预测成形锻件是否存在断裂趋势。Normalized Cockcroft & Latham 模型的常规公式如式 (1) 所示^[15],该模型认为当损伤值 $C >$ 临界损伤值 $C_{\text{临界}}$ 时,材料发生断裂。在 Deform-3D 软件系统中设定断裂单元为 4,即模拟计算中相连的 4 个网格单元出现断裂时,系统即认为此处出现了断裂,自动删除该处网格以显示断裂缺口。在常温条件下, $C_{\text{临界}}$ 为常量,而在高温条件下, $C_{\text{临界}}$ 是随温度变化的,为准确预测缺陷成形过程,对式 (1) 进行修正后,高温损伤模型如式 (2) 所示。

$$C = \int \max(0, \frac{\sigma_1}{\sigma_e}) d\bar{\epsilon} \quad (1)$$

$$\begin{cases} C = \int \max(0, \frac{\sigma_1}{\sigma_e}) d\bar{\epsilon} \\ C_{\text{临界}} = y(T) \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_1 为最大主应力; σ_e 为等效应力; $\bar{\epsilon}$ 为等效应变; T 为温度; $y(T)$ 为临界损伤值与温度 T 之间的函数。

20CrMnMo 合金钢各温度下的临界损伤值可利用高温拉伸试验获得,分别将试样加热至指定温度,利用热模拟试验机以 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速率拉伸至断裂,随后根据设备采集的实验数据以及式 (3) 即可计算获得各温度下的临界损伤值,如表 1 所示,经 Matlab 拟合获得的函数关系式为 $y(T) = 3.95563 \times 10^{-6} T^2 - 0.00654 T + 4.356$ 。通过子程序 USRUPD 将高温损伤模型植入到 Deform-3D 中。

$$C_{\text{临界}} = \sigma_{\text{limit}} / R_m \times \epsilon_{\text{limit}} \quad (3)$$

式中: σ_{limit} 为极限应力; R_m 为抗拉强度; ϵ_{limit} 为极限应变。

表 1 不同温度下的临界损伤值

Table 1 Critical damage values under different temperatures

温度/℃	650	750	850	950	1050	1150	1200
$C_{\text{临界}}$	1.771	1.672	1.653	1.718	1.845	1.966	2.004

2.3 开式模锻模拟结果

2.3.1 成形过程分析

齿轮坯开式模锻的具体成形过程如图 5 所示。成形开始,上模下压使得毛坯受力变形,同时受到下模的限制,材料主要向右下方流动(图 5a);上模继续下压,材料逐渐向上下两端流动,填充环形凸台和外圈,同时由于毛坯与上、下模的接触面积不断增大,产生的阻力致使材料流动受到限制,部分材料开始流向阻力更小的飞边槽部位(图 5b);随着飞边槽阻力的增大,材料被很好地限制在模腔内,克服上、下模的摩擦阻力继续向两端填充凸台和外圈(图 5c);填充结束后,过剩的材料流入飞边槽(图 5d)。

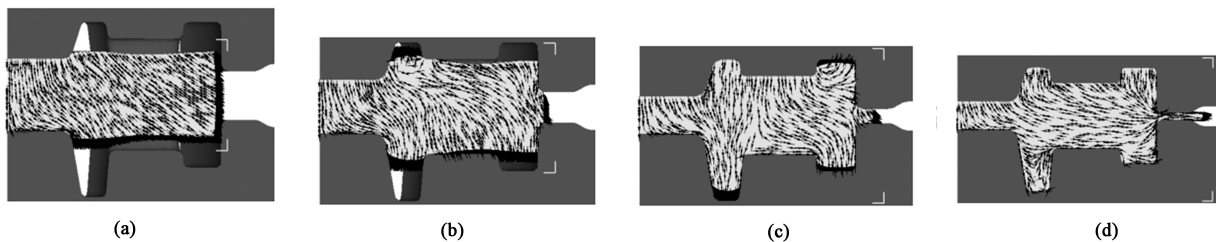


图 5 开式模锻成形过程

(a) 第 31 步 (b) 第 57 步 (c) 第 80 步 (d) 第 98 步

Fig. 5 Open die forging process

(a) Step 31 (b) Step 57 (c) Step 80 (d) Step 98

2.3.2 不同高径比对齿轮坯成形的影响

不同坯料高径比对材料流动和成形力具有极大的影响。表 2 为根据等体积原理获得的 5 种不同的坯料高径比。图 6a 为坯料高径比为 0.92 时齿轮坯

某瞬间的成形状态,从圈出部位可明显看出材料存在折叠趋势,这是因为高径比较大时,成形初期毛坯与模具的接触面积较小,阻力小,使得环形凸台和加强筋先完成成形,而后在成形齿轮坯外圈时,

由于材料的流速、流向不一致而出现折叠现象。图 6b 为坯料高径比为 0.19 时齿轮坯的最终成形情况，齿轮坯外圈上下两端内侧存在充不足缺陷，产生的原因是材料过早过多地流入飞边槽。而高径比为 0.23、0.34 和 0.53 时，齿轮坯成形过程与图 5 保持一致，最终成形效果见图 6c，齿轮坯未出现材料折叠和充不足缺陷，成形完整，轮廓清晰，通过机加工切除飞边后即可获得所需零件。从表 2 中各坯料高径比下对应的成形力可知，高径比越大，需要的最大成形力就越小，成形力小表明锻造过程中受到的抗力越小，模具承受的载荷越小，模具寿命越

长。因此，在确保齿轮坯成形后，优先选取载荷较小的方案，若采用开式模锻，选择坯料高径比为 0.53 更好，最大成形力为 1538 kN。

表 2 开式模锻中不同高径比时齿轮坯成形模拟结果
Table 2 Simulation results of gear billet forming in open die forging with different ratios of height to diameter

高径比	0.92	0.53	0.34	0.23	0.19
毛坯高度/mm	92	64	47	36	32
毛坯直径/mm	Φ100	Φ120	Φ140	Φ160	Φ170
最大成形力/kN	1410	1538	1726	1980	2360

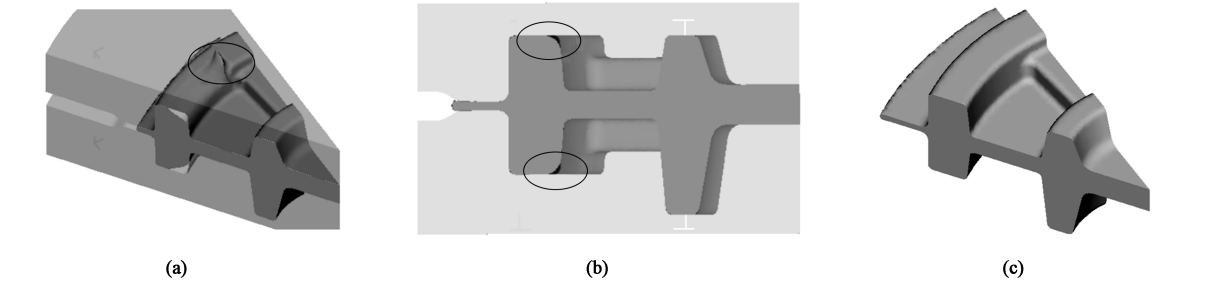


图 6 不同高径比下的齿轮坯成形效果（开式模锻）
(a) 0.92 (b) 0.19 (c) 0.23, 0.34, 0.53

Fig. 6 Forming effect of gear billet under different ratios of height to diameter (Open die forging)

2.4 闭式模锻模拟结果

2.4.1 成形过程分析

齿轮坯闭式模锻的具体成形过程见图 7。成形初始，与开式模锻情况相似，毛坯在上模下压作用下材料主要向右下方流动（图 7a）；随着锻造继续，被镦粗的毛坯由于受到下模内壁的束缚，迫使材料往上下两端填充环形凸台和外圈（图 7b）；

待毛坯与上模完全接触后，由于上模与下模之间的间隙较小，不易流出，因此，材料主要向未充满的下模腔流动（图 7c）；到成形末期，在封闭式模腔的束缚下，材料流向最难到达的角隙部位，最后在较大的成形力作用下，迫使过剩的材料从狭小的上、下模间隙中排出，形成少量毛刺（图 7d）。

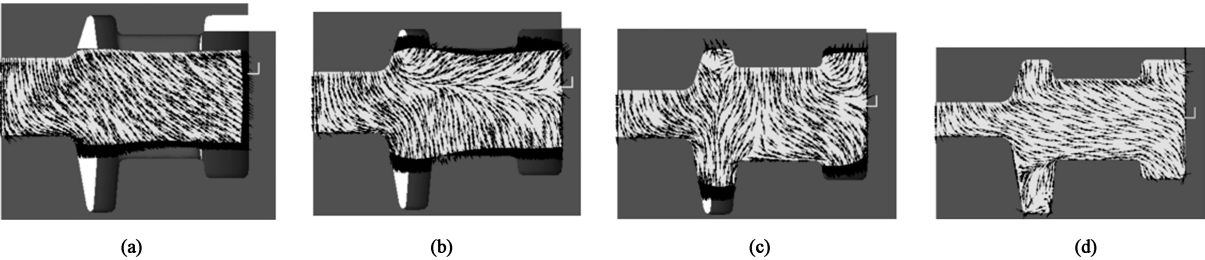


图 7 闭式模锻成形过程
(a) 第 30 步 (b) 第 50 步 (c) 第 71 步 (d) 第 86 步

Fig. 7 Closed die forging process

(a) Step 30 (b) Step 50 (c) Step 71 (d) Step 86

2.4.2 不同高径比对齿轮坯成形的影响

表 3 为闭式模锻方案下，根据等体积原理获得的 5 种不同的坯料高径比，由于开式模锻需要增加飞边体积，因此在同等直径下，闭式模锻的毛坯高度要更

小。图 8a 为坯料高径比为 0.84 时齿轮坯在某瞬间的成形状态，同开式模锻一样，在相同位置出现材料折叠趋势，成形机理类似。但是，在毛坯直径为 Φ170 mm 时，与开式模锻不同，毛坯处于封闭式模

腔中, 因此, 不会出现齿轮坯外圈充不足的缺陷。最终经模拟可知, 高径比为 0.17、0.21、0.31 和 0.49 时, 齿轮坯的成形过程与图 7 类似, 最终成形效果见图 8b, 成形完整, 外观良好, 仅有少量毛刺, 可后续去除, 无折叠、充不足缺陷, 与开式模锻相比, 能节约大量的材料。同样从表 3 中分析可知, 若采用闭式模锻, 选择坯料高径比为 0.49 更好, 最大成形力为 1823 kN, 与开式模锻相比, 增长了 18.5%。

表 3 闭式模锻中不同高径比时齿轮坯成形模拟结果

Table 3 Simulation results of gear billet forming in closed die forging with different ratios of height to diameter

高径比	0.84	0.49	0.31	0.21	0.17
毛坯高度/mm	84	59	43	33	29
毛坯直径/mm	Φ100	Φ120	Φ140	Φ160	Φ170
最大成形力/kN	1601	1823	2144	2780	3590

2.5 锻件温度分析

图 9a 为坯料高径比为 0.53 时, 开式模锻下齿轮坯锻造后的温度分布图。由于两端受到上、下模的束缚, 毛坯心部的变形最为剧烈, 心部不与外界接触, 热量不易排出, 因此, 环形凸台心部和外圈心部的温度最高, 大概在 1100 °C 左右, 环形凸台上、下端面等最先与模具接触的部位因热传导作用而

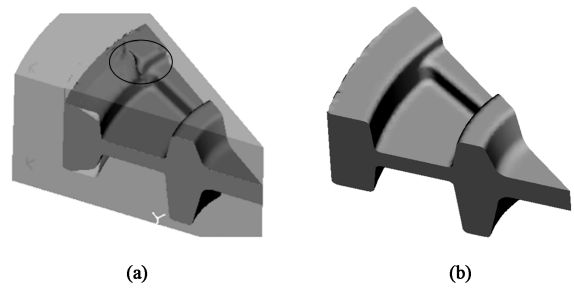


图 8 不同高径比下的齿轮坯成形效果 (闭式模锻)

(a) 0.84 (b) 0.17, 0.21, 0.31, 0.49

Fig. 8 Forming effect of gear billet under different ratios of height to diameter (Closed die forging)

温度最低, 为 695 °C 左右。此外, 成形最后多余材料流入飞边槽, 入口处金属变形剧烈, 因此, 飞边根部温度较高。图 9b 为坯料高径比为 0.49 时, 闭式模锻下齿轮坯锻造后的温度分布图, 其中环形凸台心部、外圈心部的温度最高, 环形凸台上、下端面等部位温度最低的原因与开式模锻一致, 而齿轮坯外圈内侧圆角处的温度较高是因为该处最后成形, 金属变形剧烈, 同时与模具接触最晚, 不存在热传导。两种方案的锻件温度分布差别不大, 冷却后产生的应力相差不大, 同时环形凸台上、下端面和加强筋等部位因热传导而引起温度骤降是导致后期成形力迅速增长的主要原因。

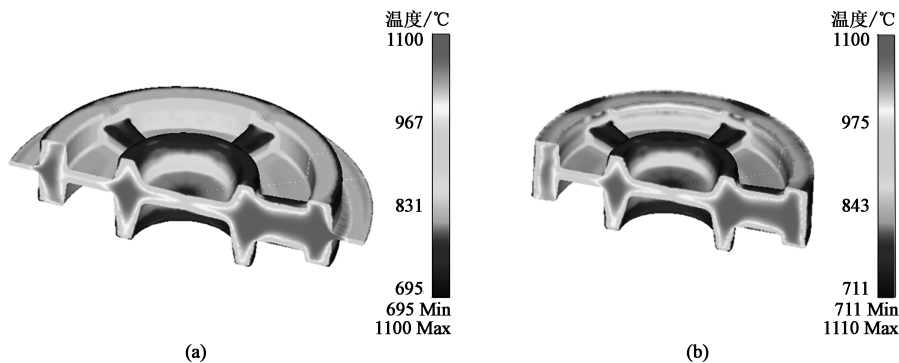


图 9 两种方案下齿轮坯温度分布

(a) 开式模锻 (b) 闭式模锻

Fig. 9 Temperature distributions of gear billet under two schemes

(a) Open die forging (b) Closed die forging

2.6 锻件损值分析

图 10 为两种方案下的齿轮坯损伤值分布图, 其中开式模锻的最大损伤值为 1.018, 位于加强筋前端, 表明在成形该部位时材料流动较困难, 损伤程度较大。闭式模锻的整体损伤值分布与开式模锻大体相似, 且最大损伤部位位于同一位置, 但损伤值较小, 仅为 0.689, 因此采用闭式模锻, 齿轮坯出

现裂纹的风险更低, 质量更优, 并且闭式模锻不需要切除大量飞边, 更能保证材料组织的连续性。基于上述建立的材料的高温损伤模型, 如果齿轮坯锻件某部位的损伤值超过临界损伤值时, 系统会删除该部位的网格, 形成缺陷, 以表示该部位存在材料断裂趋势, 而图 10 中两种锻造方式下, 齿坯均成形完整, 因此, 两种方案下均不存在断裂问题。

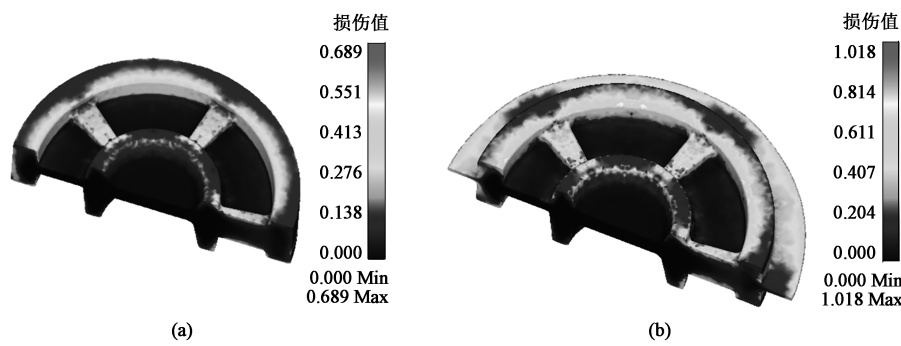


图 10 两种方案下齿轮坯损伤值分布
(a) 闭式模锻 (b) 开式模锻
Fig. 10 Damage value distributions of gear billet under two schemes
(a) Closed die forging (b) Open die forging

3 工艺试验

为了验证数值分析结果的准确性，对两种方案分别展开成形试验。坯料材料为 20CrMnMo 合金钢，开式锻造坯料尺寸为 $\Phi 120\text{ mm}\times 64\text{ mm}$ ，闭式锻造坯料尺寸为 $\Phi 120\text{ mm}\times 59\text{ mm}$ ，加热至 $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并保温，模具预热至 $320\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为降低摩擦，模锻前在毛坯表面及模具模腔内壁刷石墨乳进行润滑，通过

JC67-500 t 螺旋压力机进行锻造，开式模锻结果见图 11a，齿轮坯各部位充填完整，无不良缺陷，飞边均匀，成形良好，试验中最大载荷为 1670 kN。闭式模锻试验现场及模具如图 11b 所示，试验结果见图 11c，齿轮坯同样充填完整，无缺陷，仅在上端有少量毛刺，材料利用率明显高于开式模锻，试验中最大载荷为 1960 kN，高于开式模锻。两方案的载荷大小与数值分析结果极为接近。虽然两种方案后续均需要经过机加工，但闭式模锻是在边缘，

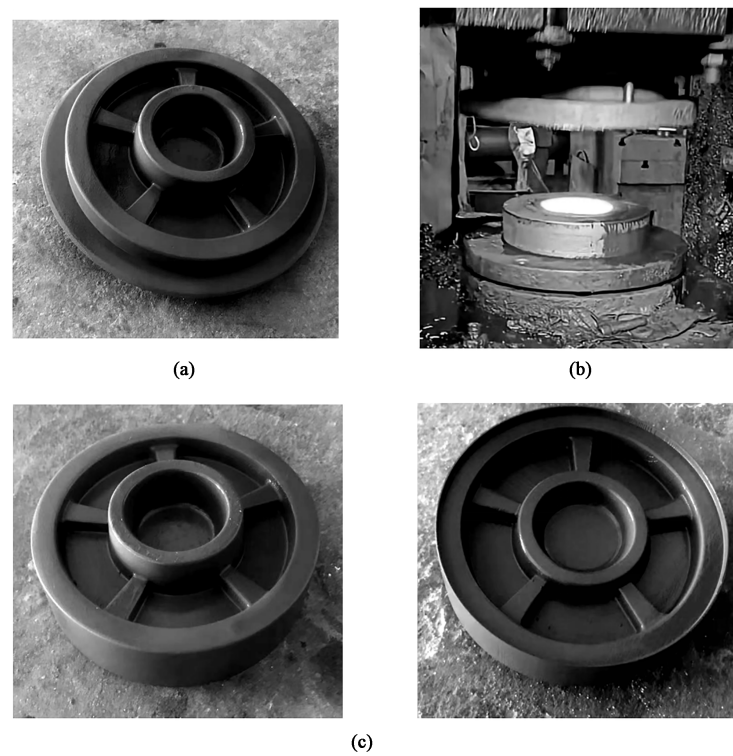


图 11 齿轮坯试制结果
(a) 开式模锻结果 (b) 闭式锻造试验现场及模具 (c) 闭式模锻结果
Fig. 11 Trial production results of gear billet
(a) Open die forging result (b) Closed forging test site and die (c) Closed die forging result

而开式模锻在齿轮坯主体中间,会影响组织的连续性,后续使用中更易出现裂纹失效,尽管开式模锻的锻模寿命更长,但是综合分析,采用闭式模锻工艺更好。其次,该闭式模锻工艺也能进一步进行优化,如在模具上设置分流降压腔,用于降低模锻力,同时也能储存多余材料,从而改善纵向毛刺情况,不需要严格控制坯料的尺寸^[16]。

4 结论

(1) 根据齿轮坯的结构,根据塑性成形原理,设计了开式模锻和闭式模锻两种成形工艺,并建立了刚塑性有限元模型和高温损伤模型,分别进行了数值分析,为实际模锻提高了理论指导,数值分析可靠性较高,与模锻试验结果的吻合度较高。

(2) 对两种方案的不同坯料高径比进行了研究,结果发现,采用开式模锻时,当坯料高径比为 0.23~0.53 时,可获得成形完整、无缺陷的齿轮坯,且当高径比为 0.53 时,成形力更小。采用闭式模锻时,当坯料高径比为 0.17~0.49 时,可获得成形完整、无缺陷的齿轮坯,且当高径比为 0.49 时,成形力更小,并展开模锻试验进行了验证。

(3) 采用开式模锻,成形力更小,锻模寿命更长,而闭式模锻的材料利用率更高,锻件出现开裂的风险更低,同时组织连续性更好,锻件质量更佳。

参考文献:

- [1] 于惠力,冯新敏. 齿轮传动装置设计与实例 [M]. 北京:机械工业出版社,2015.
Yu H L, Feng X M. Design and Example of Gear Transmission Device [M]. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [2] 毛天雨,余泳,刘怀举,等. 飞行汽车齿轮传动系统动态可靠性分析 [J]. 机械传动, 2021, 45 (6): 96-103, 176.
Mao T Y, Yu Y, Liu H J, et al. Dynamic reliability analysis of flying car gear transmission system [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2021, 45 (6): 96-103, 176.
- [3] 赵自强,殷学宾,王文中. 分流型内平动齿轮传动效率的理论与试验研究 [J]. 机械传动, 2018, 42 (6): 7-11.
Zhao Z Q, Yin X B, Wang W Z. Theory and experiment research of transmission efficiency of split-power internal parallel moving gear transmission [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2018, 42 (6): 7-11.
- [4] 张辉,潘爱琼,张莉. 某齿轮坯精锻模具的优化与数值模拟分析 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (19): 188-191.
Zhang H, Pan A Q, Zhang L. Optimization and numerical simulation analysis of precision forging die for a gear billet [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (19): 188-191.
- [5] 徐君燕,卜建荣,朱楠. 带肋板齿轮坯闭式热精锻成形工艺的数值模拟改进 [J]. 机械工程材料, 2017, 41 (3): 103-106.
Xu J Y, Bu J R, Zhu N. Numerical simulation of closed hot precision forging process improvement for gear blank with ribbed plate [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41 (3): 103-106.
- [6] Zhuang W H, Han X H, Hua L. Differences between traditional cold forging and cold orbital forging of a spur bevel gear [J]. Procedia Engineering, 2017, 207: 442-447.
- [7] 王瑶,查光成,谢斌,等. 螺旋伞齿轮近净成形试验研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (4): 33-40.
Wang Y, Zha G C, Xie B, et al. Experimental research on near net shape forming of spiral bevel gear [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (4): 33-40.
- [8] Feng W, Jia X Y, Liu B, et al. Material flow characteristics and deformation law during dual directional hot forging of the steel-aluminium spur gear [J]. Procedia Manufacturing, 2020, 50 (4): 425-428.
- [9] Zhuang W H, Han X H, Hua L, et al. FE prediction method for tooth variation in hot forging of spur bevel gears [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 38: 244-255.
- [10] 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.
- [11] 李月樵,朱建胜,李凝,等. 铝合金轮毂近净成形技术工艺研究进展 [J]. 铸造技术, 2020, 41 (11): 1095-1098.
Li Y Q, Zhu J S, Li N, et al. Research progress on near net-shape forming technology for aluminum alloy wheel hub [J]. Foundry Technology, 2020, 41 (11): 1095-1098.
- [12] 孙建辉,谢瑞,薛克敏,等. 带轴齿轮坯闭式精锻成形数值模拟与实验研究 [J]. 精密成形工程, 2016, 8 (5): 137-141.
Sun J H, Xie R, Xue K M, et al. Numerical simulation and experimental study on closed precision-forging for shaft gear billet [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8 (5): 137-141.
- [13] Moody L C, Powell I J, Lewis D O, et al. Cross-sectional area measurement by optical and electrical resistance methods for sub-scale mechanical testing of near-net-shape titanium components [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2020, 92: 105265.
- [14] Yin J, Hu R F. Closed-die forging process of copper alloy valve body: Finite element simulation and experiments [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 10 (1): 1339-1347.
- [15] 杜科学,陈学文,刘佳琪,等. X12 合金钢高温 Normalized Cockcroft & Latham 损伤模型及参数反求分析方法 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (4): 174-180.
Du K X, Chen X W, Liu J Q, et al. High temperature Normalized Cockcroft & Latham damage model and inverse analysis method of parameter for X12 alloy steel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (4): 174-180.
- [16] 王以华. 锻模设计技术及实例 [M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
Wang Y H. Forging Die Design Technology and Examples [M]. Beijing: China Machine Press, 2009.