

## 基于 Deform-3D 的风机主轴空心轴预制坯成形优化

赵顺治, 景财年, 林 涛, 刘 磊, 张志浩

(山东建筑大学 材料科学与工程学院, 山东 济南 250101)

**摘要:** 基于有限元分析软件 Deform-3D 建立了 42CrMo4 钢风机主轴 1:10 等比例缩小的热力耦合三维有限元模型。为了对风机主轴空心轴预制坯进行成形优化, 设计了一套专用于风机主轴空心轴预制坯锻造的新型模具。在 Deform-3D 中将常规风机主轴坯料模锻成形过程与采用新型模具的风机主轴空心轴预制坯成形过程进行等条件对比研究, 分别从法兰端成形效果、轴身下料量以及等效应变、金属流动速度场、主轴所需成形力等的变化规律方面进行参数对比研究, 验证了采用新型模具成形风机主轴空心轴预制坯的可行性, 为优化风机主轴空心轴的实际生产流程提供了一定的参考。

**关键词:** 风机主轴空心轴; 模锻成形; 预测坯; 42CrMo4 钢; 模具

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.06.006

**中图分类号:** TG316      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 06-0047-08

## Forming optimization on hollow shaft preform of wind turbine spindle based on Deform-3D

Zhao Shunzhi, Jing Cainian, Lin Tao, Liu Lei, Zhang Zhihao

(School of Materials Science and Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

**Abstract:** Based on finite element analysis software Deform-3D, a three-dimensional thermal-mechanical coupling finite element model of 42CrMo4 steel wind turbine spindle with equal scale reduction of 1:10 was established, and a set of new mold for hollow shaft preform forging of wind turbine spindle was designed in order to optimize the forming of hollow shaft preform for wind turbine spindle. Then, in Deform-3D, the conventional forging process of wind turbine spindle blank was compared with the forming process of hollow shaft preform for wind turbine spindle using the new mold under the same conditions, and the parameters were compared and studied from the aspects of flange end forming effect, cutting amount of shaft body and changing laws of equivalent strain, metal flow velocity field, forming force required by spindle etc., and the feasibility of using the new mold to form hollow shaft preform for wind turbine spindle was verified, which provided a certain reference for optimizing the actual production process of hollow shaft for wind turbine spindle.

**Key words:** hollow shaft of wind turbine spindle; die forging; preform; 42CrMo4 steel; die

风电机组内部转子配套的风机主轴单轴质量高达数十吨, 极大地增加了风电机组转子的启动载荷<sup>[1]</sup>。为充分体现清洁能源优势, 进一步推进风电机组轻量化进程, 国内外多家企业机构研发人员相继进入风机主轴空心轴的研发序列, 图 1 为某风机主轴空心轴的实物图。廉荣光等<sup>[2]</sup>提出了一种大 MW 级风电主轴的空心近成形的锻造方法; 陈文全等<sup>[3]</sup>提出了一种防止空心锻造主轴内孔变形的方

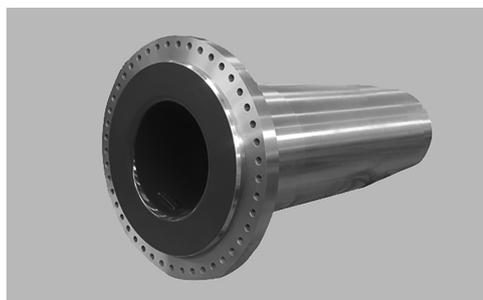


图 1 某风机主轴空心轴的实物图

Fig. 1 Physical diagram of hollow shaft for a wind turbine spindle

**收稿日期:** 2021-04-12; **修订日期:** 2021-07-13

**基金项目:** 济南市“高校 20 条”资助项目 (2018GXRC025)

**作者简介:** 赵顺治 (1997-), 男, 硕士研究生

**E-mail:** 1753783278@qq.com

**通信作者:** 景财年 (1973-), 男, 博士, 教授

**E-mail:** jcn@sdjzu.edu.cn

法。风机主轴是实现机械能转变为电能的核心传动部件, 在风电机组中发挥着至关重要的作用。目前, 市场上 90% 以上的风机主轴采用实心结构, 虽然这种常规设计的制造工艺相对简单, 但增加了风电机组

组自重和制造成本。因此, 风机主轴空心结构设计成为重要突破点, 图 2 为某风机主轴空心轴的外形尺寸图。国内企业生产空心轴主要采用两种方案: (1) 在风机主轴铸锭基础上冲孔拔长; (2) 先生产实心风机主轴预制坯, 而后采用深孔钻床进行钻孔。这两种方案虽可行, 但生产周期长、操作难度系数大。为此, 本文创新设计成形方案, 设计了一种新型坯料结构, 首先在法兰端坯料中预留预制孔, 然后中期采用新型模具进行模锻从而实现法兰端充分成形, 最后采用深孔钻床在剩余轴身部位钻孔, 该工艺流程如图 3 所示。本文采用 Deform-3D<sup>[4]</sup> 对成形过程进行有限元分析, 以探究方案的可行性。

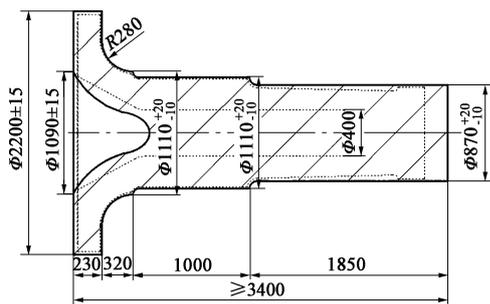


图 2 风机主轴空心轴外形尺寸图

Fig. 2 Outline dimension diagram of hollow shaft for wind turbine spindle

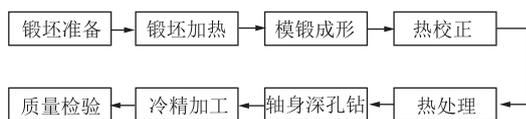


图 3 生产工艺流程图

Fig. 3 Flow chart of production process

## 1 风机主轴空心轴预制坯模拟研究

在 Deform-3D 中采用刚塑性有限元法预先仿真模拟, 验证并优化方案, 可以避免常规试错法带来的时间、材料和人力浪费, 进而提高生产效率。

### 1.1 材料参数

42CrMo4 钢<sup>[5]</sup>为欧洲牌号, 与我国 GB/T 5216—2014<sup>[6]</sup>标准中的 42CrMoH 钢牌号近似, 具有高强度和韧性, 淬透性也较好, 无明显的回火脆性, 调质处理后有较高的疲劳极限和抗多次冲击能力, 低温冲击韧性良好, 被广泛应用于大型轴类锻件中, 其化学成分如表 1 所示。

图 4 为通过 JMatpro 模拟得到的 42CrMo4 钢的热物理性能参数<sup>[7]</sup>, 得出 42CrMo4 钢大型轴类锻件

表 1 42CrMo4 钢化学成分 (% , 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of 42CrMo4 steel (% , mass fraction)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe
0.38	0.17	0.60	≤	≤	0.3	1.0	0.2	≤	余量
~	~	~	0.012	0.008	~	~	~	0.2	
0.43	0.30	0.80			0.5	1.2	0.3		

的始锻温度为 1350 ~ 1400 °C, 终锻温度为 700 ~ 800 °C, 将 JMatpro 所得参数导入 Deform-3D 中自定义材料参数。

### 1.2 新工装结构设计

该工装的主要创新点在于: 设计了新型的圆凸上模; 采用曲面式漏盘; 设计了新型坯料结构。为体现新型圆凸上模及新型坯料结构在风机主轴法兰端<sup>[8]</sup>成形方面的优越性, 在研究过程中设计了一组简化后的轴类锻粗对比模拟试验 a 和 b, 如图 5 所示, 结果如图 6 和图 7 所示。

在对比模拟试验中, 模具、坯料材质完全相同, 不同的是: 试验 a 中上模 A 采用平面设计, 试验 b 中上模 B 在其底面上增设一个锥体凸起; 试验 a 中坯料 A' 为普通圆柱形设计, 试验 b 中坯料 B' 在其顶部增设一个倒锥体预制孔。

试验结果表明: 采用上模 B 及坯料 B' 的形状设计进行模锻时, 最终得到的锻件的径向尺寸更大, 轴向尺寸更小, 成形效果更加理想。其原因在于: 当模具接触坯料的一瞬间, 在力的作用下金属会沿着锥体外表面法线或近法线方向流动。对于普通平面模具而言, 金属流动方向与上模运动方向相同, 而对于有锥体凸起的模具, 金属流动方向会与模具运动方向呈一锐角, 因此, 金属会更加快速均匀地向外周流动。风机主轴作为一种大型轴类异形锻件<sup>[9]</sup>, 其成形难点在于: 法兰端难以充分成形, 锻造过程中轴身金属流下量不易控制。基于前文所述思路及风机主轴空心轴中心孔径应小于等于轴身直径尺寸 1/3 的生产实际要求, 设计新型圆凸上模、新型坯料及配套工装<sup>[10]</sup>, 如图 8 所示。该套工装可根据主轴锻造要求应用于多种型号锻压设备, 如 31.5 MN、50.0 MN 锻造油压机等。

### 1.3 建模过程

利用 UG 软件建立常规风机主轴成形装备模型 (图 9) 与新型风机主轴空心轴预制坯成形装配模型<sup>[10]</sup> (图 10), 将各部件生成的 STL 文件导入 Deform-3D 中。坯料在进行锻挤工序时, 会根

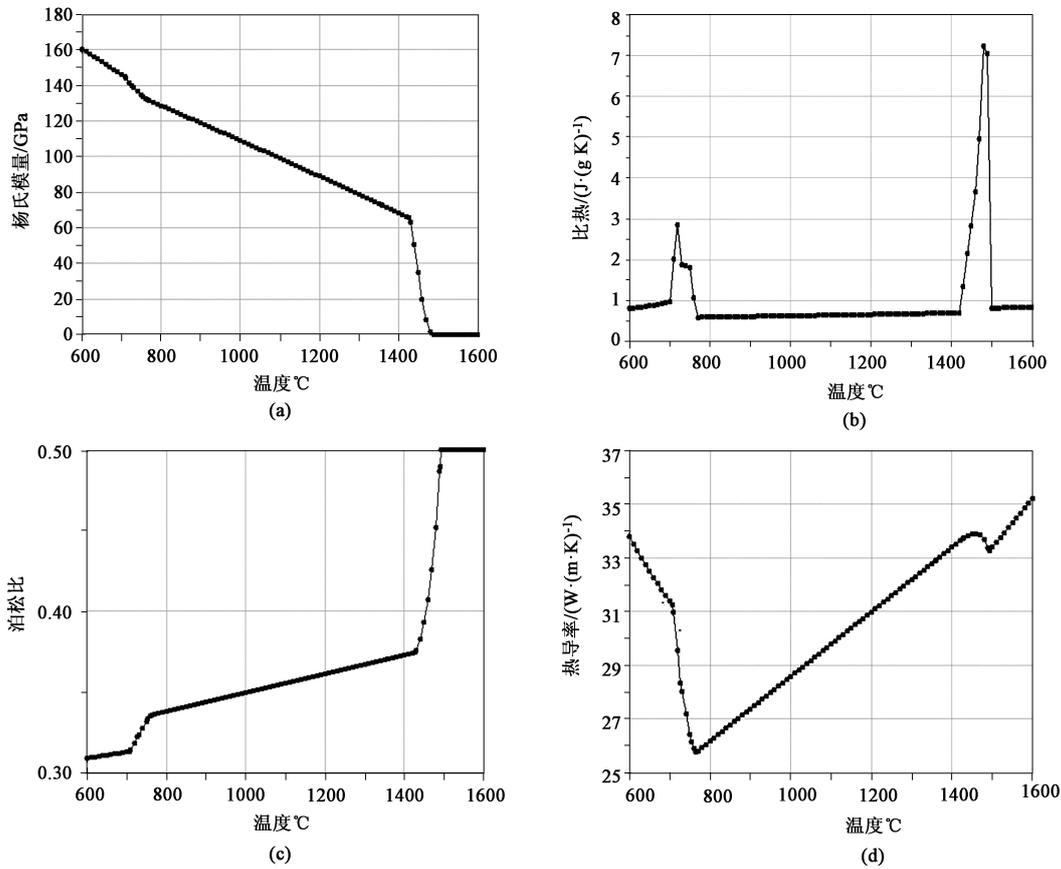


图 4 42CrMo4 钢热物理性能参数

(a) 杨氏模量 (b) 比热 (c) 泊松比 (d) 热导率

Fig. 4 Thermophysical property parameters of 42CrMo4 steel

(a) Young's modulus (b) Specific heat (c) Poisson's ratio (d) Thermal conductivity

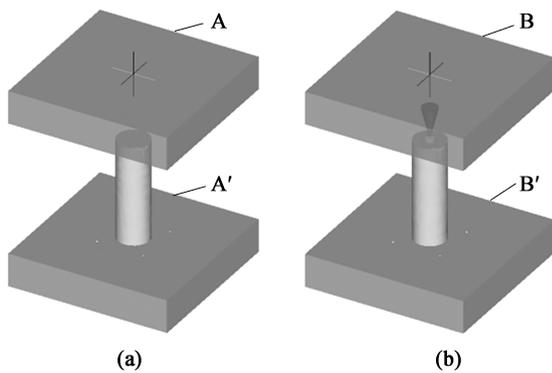


图 5 对比模拟试验示意图

(a) 对比试验 a (b) 对比试验 b

Fig. 5 Schematic diagram of comparative simulation tests

(a) Comparative test a (b) Comparative test b

据阻力最小定律<sup>[11]</sup>分别向径向漏盘和轴向轴身流动，而由于法兰端的直径远大于其轴身直径，成形难度系数大，常常会面临缺料导致的成形不充分现象<sup>[10]</sup>。为此结合前述对比试验，对模具及坯料进行创新，新型装配模型与常规装配模型

的最大区别在于新模型的上模底部设计了流线型圆凸，漏盘内表面设计为曲面<sup>[12]</sup>，坯料法兰端设有预制孔。

在 Deform-3D 中使用自适应网格重划分技术<sup>[6]</sup>对坯料进行较高密度的网格划分，可避免变形过程中的网格畸变，提高计算精度。坯料截面图与网格划分如图 11 所示。

## 2 对比模拟试验结果

### 2.1 主轴成形过程分析

为充分表征坯料从成形初始至成形完毕的形状尺寸差异化过程，调用 Deform-3D 的 Post 模块中成形过程的第 1 步、第 180 步和第 260 步的风机主轴坯料与等比例缩小 10 倍后的毛坯图进行参照对比，如图 12 所示。结果显示，最终坯料尺寸与缩小后的毛坯图基本重合，综合验证了新型模具在成形上的可行性。

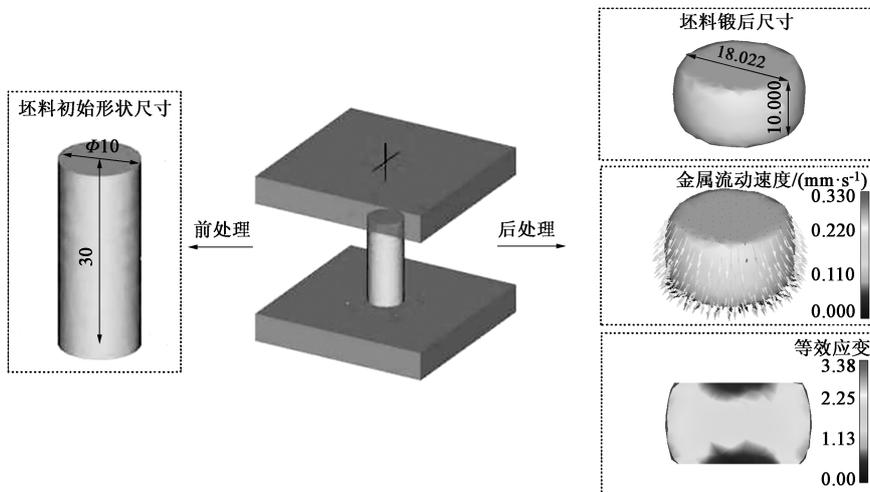


图 6 对比试验 a 模拟结果

Fig. 6 Simulation results of comparative test a

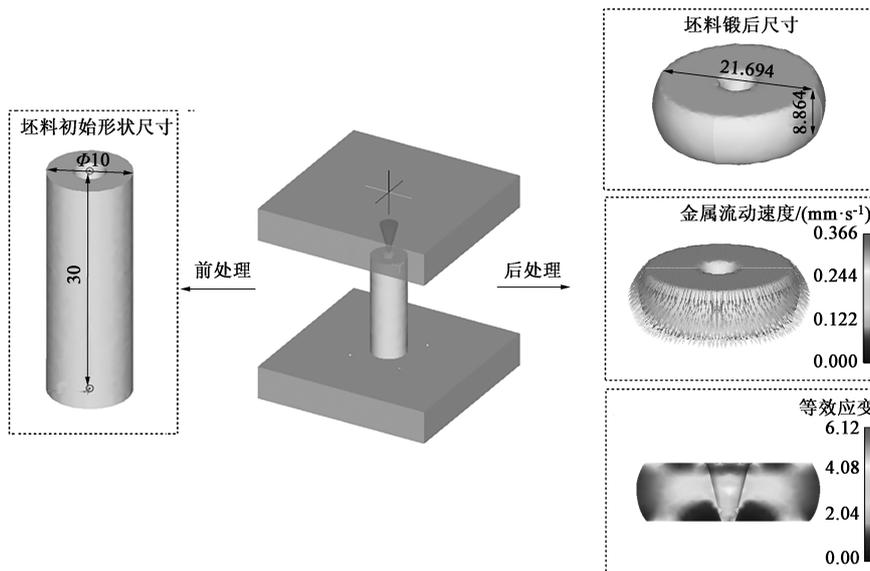


图 7 对比试验 b 模拟结果

Fig. 7 Simulation results of comparative test b

## 2.2 法兰端成形效果分析

### 2.2.1 常规镦粗变形表征

圆盘形平面上模与实心坯料发生面接触,受最小阻力影响,金属分别向径向和轴向流动<sup>[13]</sup>。由图 13a 可以看出:法兰端坯料并未充满漏盘,充盈率约为 70%,成形不充分。在实际生产中,诸多企业为解决这一困境常采用增大法兰端坯料体积<sup>[10]</sup>的方法,该方法的弊端在于增大了后期精机加工的工作量和下料量。由图 14a 金属流动速度场可以发现,镦粗过程中大量金属均沿轴向向下流动导致法兰端缺料,其原因为常规圆盘形平面上模在整个成形过程中均会对轴身施加向下的力,金属在上模的镦挤

作用下发生自然流动行为。企业内为降低轴身金属流动带来的法兰端缺料难题,常采用降低轴身温度的方法,但是该方法容易导致轴身温度不均,增大轴颈处缺陷率,即产生刚性滑动撕裂效应(Rigid Slide Tearing Effect, RST 效应)<sup>[14]</sup>,而且常规镦粗方法无法从本质上解决减少风机主轴空心轴下料量的问题。

### 2.2.2 新模具镦粗变形表征

上模圆凸部位与坯料上预制孔内表面初始接触时,首先发生线接触,随位移增大逐渐转变为面接触。金属沿圆凸外表面的法线或近法线方向流动,因此,法兰端早于轴身更快进入径向成形状态,随

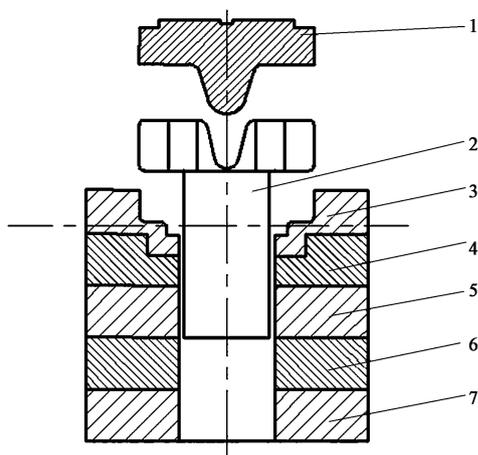


图 8 新工装结构示意图

1. 圆凸上模 2. 主轴坯料 3. 漏盘 4、5、6、7. 漏盘组合件

Fig. 8 Schematic diagram of new equipment structure

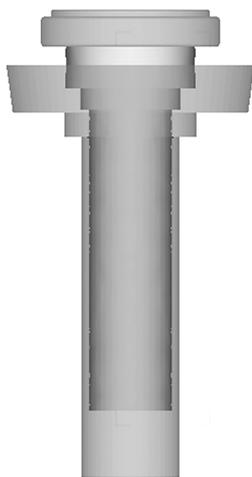


图 9 常规风机主轴成形装配模型

Fig. 9 Forming assembly model of conventional wind turbine spindle

着进给量增大法兰端逐步充满模腔，最终充盈率约为 100%。由于轴身部分晚于法兰端进入成形阶段，所以避免了大量金属向下流动引发的缺料问题。由图 14b 的轴身金属流动速度场可以发现，其轴身金属流动速度远低于图 14a 显示的常规镦粗方法，而且法兰端的金属流动速度远高于图 14a 显示的常规镦粗方法。采用新型模具的镦粗过程不仅改善了常规镦粗整体同步成形存在的问题，减小了下料量、节约了资源<sup>[15]</sup>，而且为风机主轴空心轴后期的深孔钻过程节约了一定的工作量。

### 2.3 等效应力场分析

变形均匀性是衡量锻件质量的重要标准之一<sup>[16-18]</sup>。风机主轴对自身均匀性要求极高，在运转过程中会受到弯曲载荷、扭转载荷、拉压载荷等复

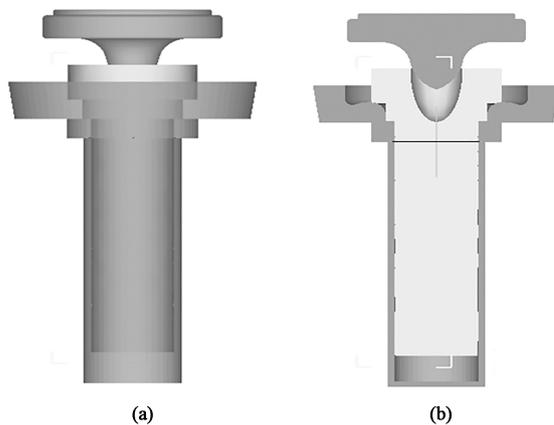


图 10 风机主轴空心轴预制坯成形装配模型

(a) 装配主视图 (b) 装配剖面图

Fig. 10 Forming assembly model of hollow shaft preform for wind turbine spindle

(a) Assembly front view (b) Assembly section view

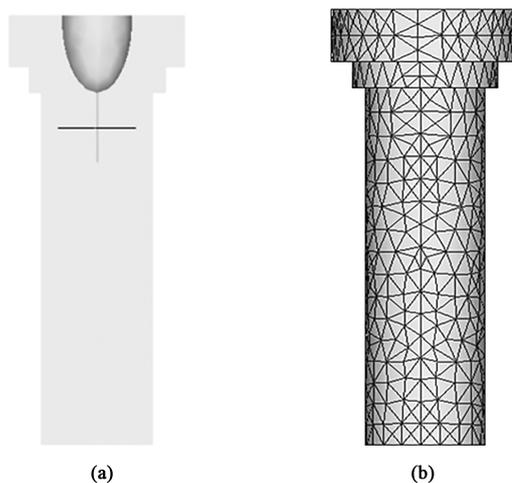


图 11 坯料截面图 (a) 与网格划分 (b)

Fig. 11 Blank section view (a) and mesh generation (b)

杂交变载荷的影响。观察图 15 a 可以发现：A"点处的等效应力有明显的跨越区，而图 15b 中 B"点处由过渡区组成。风机主轴轴颈 (A"和 B"处) 是成形均匀性要求最高的区域之一，过渡区的表征可在一定程度上保证轴颈处的成形均匀性<sup>[19]</sup>。此外，图 15b 所示的等效应力值大于图 15a 所示的等效应力值，而且在法兰端呈现均匀的红色，这表明：采用新型模具镦粗的风机主轴法兰端变形更加充分且均匀，由此得出图 15b 所示新型模具的成形效果优于常规模具<sup>[20-21]</sup>。

### 2.4 主轴所需成形力情况分析

通过以上分析，得出采用创新设计后的模具在成形效果上优于常规模具，为充分验证其正确性及有效性，需要综合主轴所需成形力情况来加以验证。图

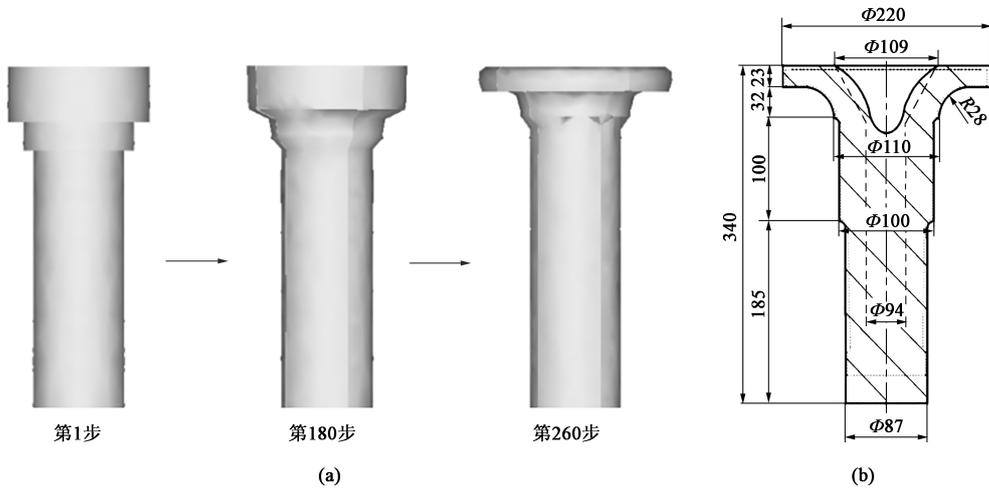


图 12 坯料变形过程图 (a) 和等比例缩小 10 倍的毛坯尺寸图 (b)

Fig. 12 Deformation process diagram of billet (a) and blank size diagram after equal scale reduction of 10 times (b)

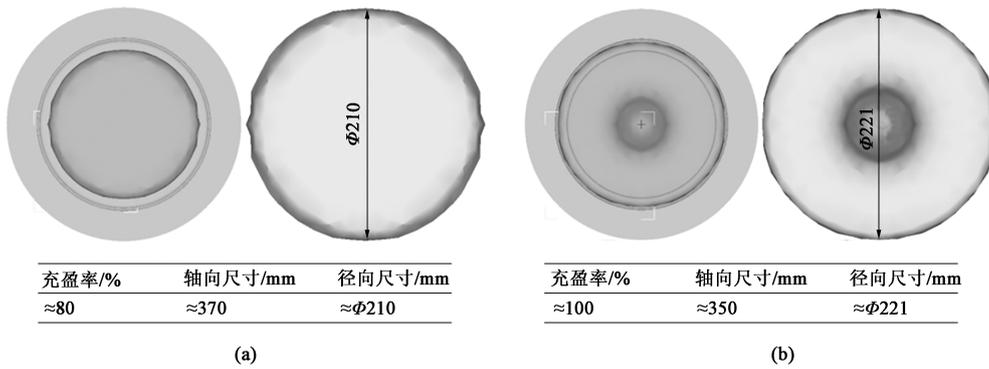


图 13 法兰端成形效果

(a) 常规模具镦粗 (b) 新型模具镦粗

Fig. 13 Forming effect of flange end

(a) Upsetting with conventional die (b) Upsetting with new die

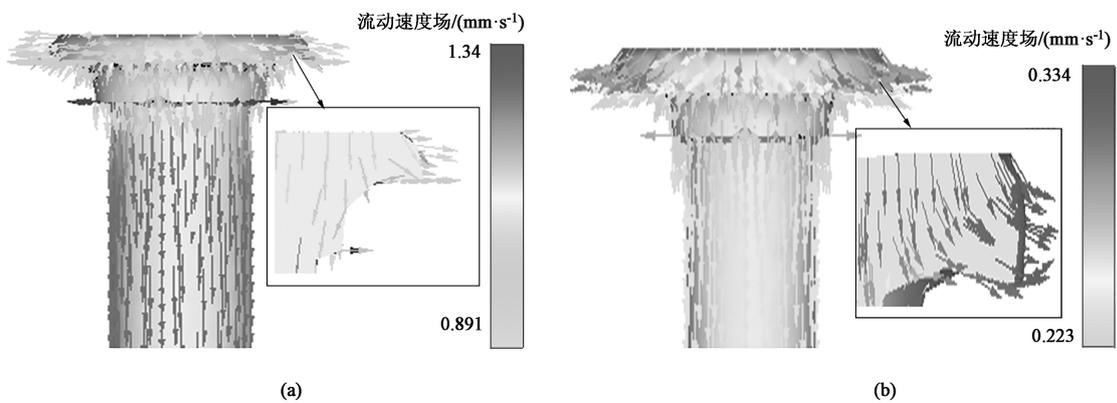


图 14 风机主轴成形过程金属流动速度场

(a) 常规模具镦粗 (b) 新型模具镦粗

Fig. 14 Velocity fields of metal flow in forming process for wind turbine spindle

(a) Upsetting with conventional die (b) Upsetting with new die

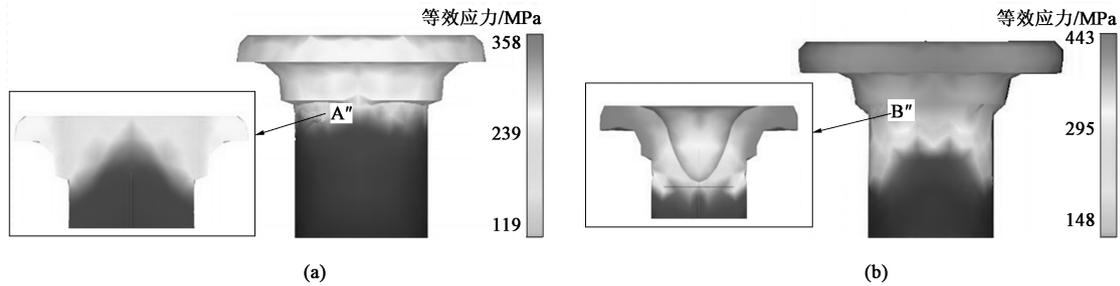


图15 风机主轴成形过程等效应力场

(a) 常规模具镦粗 (b) 新型模具镦粗

Fig. 15 Equivalent stress fields in forming process of wind turbine spindle

(a) Upsetting with conventional die (b) Upsetting with new die

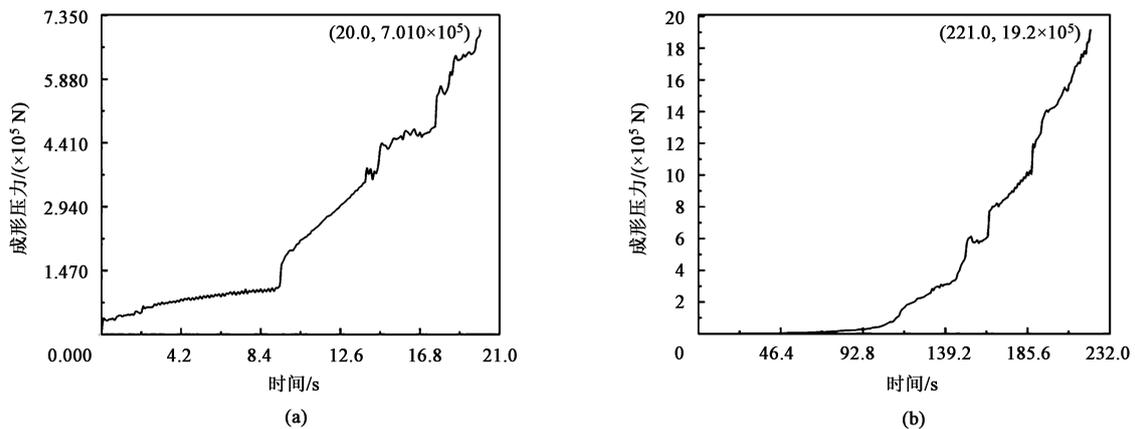


图16 主轴所需成形力

(a) 常规模具镦粗 (b) 新型模具镦粗

Fig. 16 Forming forces required by spindle

(a) Upsetting with conventional die (b) Upsetting with new die

16表明, 常规模具上模所受的最大载荷为  $7.01 \times 10^5$  N, 新型模具上模所受的最大载荷为  $1.92 \times 10^6$  N. 新模具载荷较大的原因为坯料在成形过程中应变较大<sup>[22-23]</sup>, 成形更加均匀. 虽然该方案对压力机的要求增大, 使得能耗增大, 但是, 综合所得锻件的各方面性能<sup>[24-25]</sup>来看, 该方案可行性较高.

### 3 结论

(1) 采用新型模具锻造新型坯料可高效率地实现风机主轴空心轴预制坯的锻造, 优化后的坯料结构不仅节省了原材料而且配合新型模具工装节省了后续深孔钻床的机加工量.

(2) 优化设计的风机主轴空心轴成形方案可以得到锻造均匀、综合性能均优的预制坯.

(3) 本文研究内容可为风机主轴空心轴的实际

生产工艺优化提供一定的参考.

#### 参考文献:

- [1] 白儒, 徐蕊璇, 李钢强, 等. 兆瓦级风力发电机组主轴优化设计 [J]. 现代制造工程, 2020, (3): 136-141.  
Bai R, Xu B X, Li G Q, et al. Research about structure optimization on main shaft of MW wind turbine [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020, (3): 136-141.
- [2] 陈文全, 时乐智, 廉荣光, 等. 法兰轴的自由锻造工艺 [J]. 大型铸锻件, 2019, (5): 17-19.  
Chen W Q, Shi L Z, Lian R G, et al. Free forging process of flange shaft [J]. Heavy Casting and Forging, 2019, (5): 17-19.
- [3] 陈文全, 毕京华, 王素娟, 等. 大型风电主轴空心锻造内孔变形问题解决方案 [J]. 大型铸锻件, 2019, (3): 11-12.  
Chen W Q, Bi J H, Wang S J, et al. Solution for inner hole deformation issue of heavy wind power main shaft in hollow forging [J]. Heavy Casting and Forging, 2019, (3): 11-12.

- [4] 阮树荣, 吴永强, 王开坤. 方锭改锻圆锭过程中心开裂的数值模拟分析 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (11): 104-108.  
Ruan S R, Wu Y Q, Wang K K. Numerical simulation analysis on cracking of center in process of cuboid ingot forging into round ingot [J]. Hot Working Technology, 2021, 50 (11): 104-108.
- [5] 鲁玉梅, 王凯军, 梁晓婕, 等. 42CrMo4 风机主轴调质工艺优化 [J]. 热处理技术与装备, 2020, 41 (5): 29-32.  
Lu Y M, Wang K J, Liang X J, et al. Optimization of quenching and tempering process for 42CrMo4 fan spindle [J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2020, 41 (5): 29-32.
- [6] GB/T 5216—2014, 保证淬透性结构钢 [S].  
GB/T 5216—2014, Structural steels subject to end-quench hardenability requirements [S].
- [7] 高士友, 张永忠, 石力开, 等. 激光快速成型 TC4 钛合金的力学性能 [J]. 稀有金属, 2004, 28 (1): 29-33.  
Gao S Y, Zhang Y Z, Shi L K, et al. Mechanical properties of TC4 alloy fabricated by laser direct deposition [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2004, 28 (1): 29-33.
- [8] Jonkman J. New modularization framework for the FAST wind turbine CAE tool; Preprint [A]. 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting [C]. US: AIAA, 2013.
- [9] Damiani R R, Song H, Robertson A N, et al. Assessing the Importance of nonlinearities in the development of a substructure model for the wind turbine CAE tool FAST [A]. ASME International Conference on Ocean [C]. Nantex, 2013.
- [10] 张彦娟. 风机主轴旋转锻造工艺及参数研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011.  
Zhang Y J. Study on Main Shaft Rotation Forging Process and Its Process Parameters [D]. Qianhuangdao: Yanshan University, 2011.
- [11] 杨萍. 风力发电机主轴锻件的化学成份设计及热处理工艺研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2008.  
Yang P. Design Chemical Composition and Study on Heat Treatment Method of the Main Shaft of Wind Power Generator [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [12] 江燮鑫. 风机主轴毛坯组合锻造法 [J]. 新技术新工艺, 2010, (2): 87-88.  
Jiang X X. Combination forging method for the fan spindle blank [J]. New Technology & New Process, 2010, (2): 87-88.
- [13] Mosavi A. CAE automatic multi-objective optimization based design: Application to wind turbine nacelle design [A]. ANSYS Conference and 27th CADFEM User's Meeting [C]. Leipzig, 2009.
- [14] 史可庆, 蔺立元, 赵刚, 等. 42CrMo4 钢锭锻粗裂纹的原因分析 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (3): 154-156.  
Shi K Q, Lin L Y, Zhao G, et al. Cause analysis of crack in 42CrMo4 steel ingot during upsetting [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (3): 154-156.
- [15] Kim Y H, Park H G, Kim D H, et al. Structural and vibration analyses of 3MW class wind-turbine blade using CAE technique [J]. The KSFM Journal of Fluid Machinery, 2008, 11 (4): 22-31.
- [16] Zhang Z, Yin Z, Han T, et al. Fracture analysis of wind turbine main shaft [J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 34 (6): 129-139.
- [17] 单陇红, 王凌浩, 刘顺彭, 等. 42CrMo4 钢高温拉伸断裂准则与机理的研究 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (4): 59-62, 67.  
Shan L H, Wang L H, Liu S P, et al. Study on tensile fracture criterion and mechanism of 42CrMo4 steel at high temperature [J]. Hot Working Technology, 2021, 50 (4): 59-62, 67.
- [18] Sonne M R, Thorborg J, Hattel J H. Modelling the effect of coating on the stresses and microstructure evolution in chill casting of wind turbine main shafts [J]. Wind Energy, 2017, 20 (9): 1635-1643.
- [19] 商雪坤, 肖会芳, 王西涛. 化学机械合金化方法制备 Cu-Nb 系氧化物强化合金 [J]. 稀有金属, 2020, 44 (2): 122-126.  
Shang X K, Xiao H F, Wang X T. Mechanochemical synthesis of oxide dispersion-strengthened Cu-Nb alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44 (2): 122-126.
- [20] Rebsdorf A V. Wind turbine and a shaft for a wind turbine [P]. US: 13164926, 2011-12-22.
- [21] 许礼刚, 关景文, 徐美娟. 基于鲁棒优化理论的离子型稀土逆向物流网络模型构建 [J]. 稀有金属, 2020, 44 (6): 647-657.  
Xu L G, Guan J W, Xu M J. Ionic rare earth reverse logistics network model based on robust optimization theory [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44 (6): 647-657.
- [22] 严伟鑫. 风电传动链非扭矩载荷技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.  
Yan W X. Research on the Technology of Non-torque Loading System for Wind Turbine Drivetrain [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [23] 曾纯亮. 风电机组主轴系统结构分析建模研究及其应用 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011.  
Zeng C L. Structural Modeling Analysis and Applications on Wind Turbine Main Shaft [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [24] 陈德平, 许健, 杨刚, 等. 不同浇注方式下铸造风机主轴的热裂模拟及工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2011, 40 (7): 54-56, 62.  
Chen D P, Xu J, Yang G, et al. Simulation of hot tearing of fan main shaft casting under different pouring methods and its process optimization [J]. Hot Working Technology, 2011, 40 (7): 54-56, 62.
- [25] Chen J, Jie C, Gong C. On optimizing the aerodynamic load acting on the turbine shaft of PMSG-based direct-drive wind energy conversion system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61 (8): 4022-4031.