

# 新能源汽车空心电机轴复合成形工艺数值模拟及优化

陈建伟<sup>1</sup>, 周志明<sup>1,2,3</sup>, 桑卓越<sup>1</sup>, 方飞松<sup>4</sup>, 罗 荣<sup>4</sup>, 王军军<sup>1</sup>, 涂 坚<sup>1</sup>, 黄 灿<sup>1</sup>

(1. 重庆理工大学 材料科学与工程学院, 重庆 400054; 2. 重庆市明理云轻量化技术研究院有限公司, 重庆 400054;  
3. 重庆合创纳米科技有限公司, 重庆 400054; 4. 重庆建设传动科技有限公司, 重庆 400054)

**摘要:** 基于 SimuFact 模拟分析软件, 对新能源汽车空心电机轴复合成形工艺的多工序进行数值模拟分析与优化。研究表明: 在热挤压成形过程中, 等效塑性应变主要集中在靠近凸模前端的位置, 材料沿轴向两端流动; 经过径向锻造后, 电机轴空心段的等效塑性应变沿直径方向先减小后增大, 台阶段的等效塑性应变沿直径方向逐渐增大。经正交实验优化后的冷径向锻造工艺参数为: 锤头相对转角为 18°、锤头下压量为 1.0 mm、锤头入模角为 22°、坯料进给量为 1.0 mm。在此基础上, 成功地研制出一种通过热挤压结合冷径向锻造复合成形的新能源汽车空心电机轴, 并分析了复合成形工艺对空心电机轴的微观组织及晶粒细化的影响。

**关键词:** 空心电机轴; 复合成形; 热挤压; 冷径向锻造; 等效塑性应变

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.04.002

**中图分类号:** TG316.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 04-0008-08

## Numerical simulation and optimization on composite forming process for hollow motor shaft of new energy vehicle

Chen Jianwei<sup>1</sup>, Zhou Zhiming<sup>1,2,3</sup>, Sang Zhuoyue<sup>1</sup>, Fang Feisong<sup>4</sup>, Luo Rong<sup>4</sup>, Wang Junjun<sup>1</sup>,  
Tu Jian<sup>1</sup>, Huang Can<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;  
2. Chongqing Mingliyun Lightweight Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400054, China;  
3. Chongqing Hechuang Nanotech Co., Ltd., Chongqing 400054, China;  
4. Chongqing Jianshe Industry Co., Ltd., Chongqing 400054, China)

**Abstract:** Based on the SimuFact simulation and analysis software, the multi-process of composite forming process for hollow motor shaft of new energy vehicles was numerically simulated and optimized. The results show that the equivalent plastic strain is mainly concentrated near the front end of punch, and the material flows along the two axial ends during the hot extrusion forming process. The equivalent plastic strain at the hollow section of motor shaft firstly decreases and then increases along the diameter direction after radial forging, and the equivalent plastic strain at the step section increases gradually along the diameter direction. The cold radial forging process parameters optimized by orthogonal experiment are the relative rotation angle of hammer head of 18°, the hammer head depression amount of 1.0 mm, the hammer head die entry angle of 22°, and the billet feeding amount of 1.0 mm. On this basis, a kind of hollow motor shaft for new energy vehicles formed by the composite forming of hot extrusion and cold radial forging was successfully developed, and the influences of the composite forming process on the microstructure and grain refinement of hollow motor shaft were analyzed.

**Key words:** hollow motor shaft; composite forming; hot extrusion; cold radial forging; equivalent plastic strain

电机轴是电机的核心零件, 用于安装电机转子和传递扭矩, 是将电能转换为动能的重要零件<sup>[1]</sup>。在保

证电机轴的结构强度和抗疲劳性能的前提下, 采用空心结构的电机轴具有重量轻、传动效率高等优点, 在新能源汽车领域具有很好的应用前景。径向锻造是一种精密成形技术, 通过围绕在坯料圆周方向上的多个锤头沿直径方向对旋转的坯料进行高频锻打, 加工出具有不同内外轮廓的棒材或管材, 径向锻造加工过程的自动化程度高、生产效率高、产品的尺寸精度高、抗扭抗疲劳性能优异<sup>[2-6]</sup>。然而, 空心电机轴具有较大的尺寸和较多的台阶段结构, 并且各段之间的直径变

收稿日期: 2022-08-19; 修订日期: 2022-11-29

基金项目: 重庆市人才计划项目 (2020RC22); 重庆市巴南区科技计划项目 (2021TJZ013)

作者简介: 陈建伟 (1999-), 男, 硕士研究生

E-mail: 846298093@qq.com

通信作者: 周志明 (1976-), 男, 博士, 教授

E-mail: zhouzhiming@cqut.edu.cn

化较大,采用单一的径向锻造工艺难以将管材加工为空心电机轴。挤压成形工艺广泛地应用于生产尺寸公差小、表面质量高、力学性能好的几何复杂部件<sup>[7]</sup>。采用一种热挤压结合冷径向锻造的复合成形工艺制造空心电机轴,该复合成形工艺结合了以上两种工艺各自的优点:高温下的热挤压能够改善原始坯料的组织、消除气孔等;室温下的径向锻造,其最终产品的尺寸精度高、力学性能和抗疲劳性能优异,在满足轻量化的同时可提高材料利用率。

在热挤压和冷径向锻造成形过程中,材料的流动以及等效塑性应变的分布对产品宏观的力学性能、抗疲劳性能以及微观组织、晶粒尺寸等具有重要影响<sup>[8]</sup>。尽管复合成形过程中材料的流动以及等效塑性应变的分布非常复杂,但是,基于有限元方法对成形过程进行数值模拟分析,能够准确地预测材料的流动方向和速度以及等效塑性应变分布等信息<sup>[9-14]</sup>。许多学者已经在相关领域开展了大量的研究,例如:Zou J等<sup>[15]</sup>利用模拟分析软件对ZK60镁合金棒材的径向锻造过程进行模拟分析,系统性地研究了不同变形程度下镁合金棒材的应变和温度分布,以及棒材的塑性变形行为和微观组织演变;Cao X Q等<sup>[16]</sup>通过热压缩实验得到了34CrNiMo6合金钢的流变应力曲线,并建立了统一的本构模型,结合SimuFact模拟分析软件,研究了滚轧过程中合金钢空心管材的应力应变、再结晶体积分数、位错密度和晶粒尺寸分布,最后,通过滚轧实验验证了模拟结果的准确性;Yang Y等<sup>[17]</sup>通过冷径向锻造加工30SiMn2MoVA高强度钢,研究不同下压量对材料微观组织和组织演变的影响,并通过有限元方法模拟分析了径向锻造过程中应变的分布;曹菡等<sup>[18]</sup>采用有限元方法研究一体成形纵筋板的轧制工艺,分析了轧制工艺参数、孔型参数等各种因素对筋高的影响规律,并开展了小规格纵筋板轧制实验,所得结果与有限元仿真结果吻合较好,为加筋塔筒的应用提供了理论依据;Yong L等<sup>[19]</sup>提出了一种薄壁铜管径向锻造工艺的有限元分析方法,研究了锤头数量对薄壁铜管成形特性的影响,结果表明,在相同条件下随着锤头数量的增加,薄壁铜管的应变分布更加均匀;Pachla W等<sup>[20]</sup>使用挤压与径向锻造复合成形工艺加工钛合金棒材,研究塑性变形对钛合金的力学性能、表面质量、晶粒细化的影响;Wu Y J等<sup>[21]</sup>利用轴对称UBM模型分析径向锻造过程中材料的中性面位置和流动方向,并对比有限元模拟分析结果,验证了轴对称UBM模型的可靠性,进一步地探究了各工艺参

数对径向锻造效率的影响。

然而,目前关于复合成形工艺(热挤压和冷径向锻造)的数值模拟分析,以及复合成形工艺对空心电机轴显微组织影响等方面的研究还较少,并且以往的研究仅对单个径向锻造工序进行模拟分析,忽略了材料加工历史对等效塑性应变分布的影响。本文对空心电机轴热挤压和冷径向锻造的整个成形过程进行数值模拟分析,系统性地研究了材料在成形过程中的流动方向和等效塑性应变分布,以及复合成形工艺对空心电机轴的微观组织、晶粒细化的影响,以为空心电机轴的生产提供指导意义。

## 1 研究对象及实验方法

空心电机轴的材料为45钢。图1a为空心电机轴的复合成形工序示意图,共分为4个工序。工序1:选用长度为160 mm、直径为 $\Phi 60$  mm的圆柱形实心坯料,通过感应加热将坯料加热至980℃后进行热挤压加工,一次性加工出传动段与空心段,挤压成形后传动段外径 $d_1 = \Phi 30$  mm,空心段外径 $d_2 = \Phi 60$  mm、内径 $d_3 = \Phi 30$  mm,挤压比 $\lambda = 4$ 。工序2:热挤压成形后的坯料空冷至室温,再对空心段进行冷径向锻造加工,空心段的径向锻造共有3个工步,每个工步的锤头下压量为1.0 mm、锻造比 $\lambda = 1.05$ ,经过3个工步的径向锻造后空心段的外径由 $d_2 = \Phi 60$  mm减小至 $d_4 = \Phi 54$  mm,由于空心段的径向锻造设置有芯棒,所以空心段的内径不变。工序3:台阶段的径向锻造共有10个工步,每个工步的锤头下压量为1.0 mm、锻造比 $\lambda = 1.05$ ,经过10个工步的径向锻造后,台阶段的外径减小至 $d_5 = \Phi 34$  mm、内径减小至 $d_6 = \Phi 18$  mm。工序4:冷径向锻造后,对空心电机轴进行退火热处理以消除残余应力,最后,通过车削加工出空心电机各段之间的台阶面。

为了预测整个成形过程中材料的应变分布情况和流动方向等信息,对以上成形工序,基于锻造模拟分析软件SimuFact进行多工序的数值模拟分析。图1b为热挤压成形过程的模拟模型,凸模与凹模的初始温度设置为200℃,坯料的初始温度设置为980℃,凸模以 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度压入凹模。将热挤压成形模拟结果导入SimuFact的径向锻造模块,图1c为冷径向锻造过程的模拟模型,模具与坯料的初始温度设置为25℃,锤头沿图1c所示直径方向以每分钟1200锤的频率锻打坯料,锤头每锻打一次坯料前进2 mm,锤头相对转角设置为18°,坯

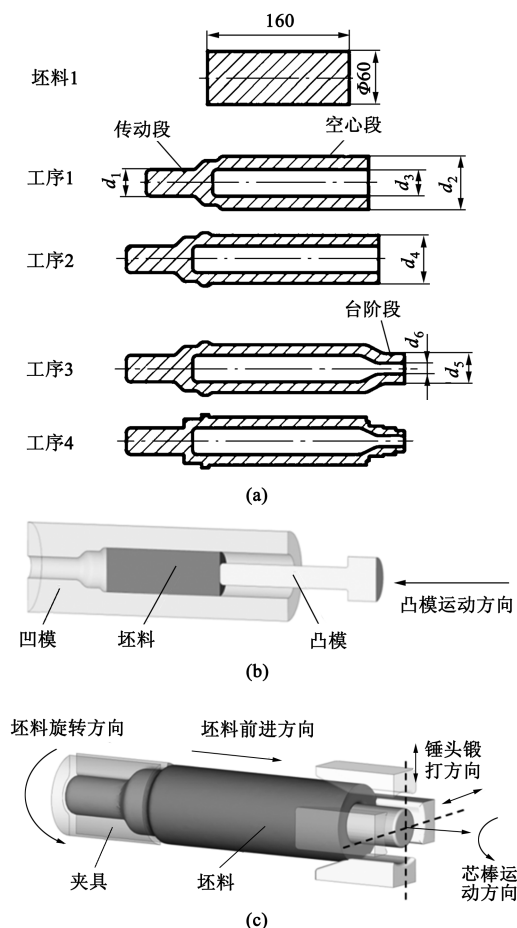


图 1 复合成形工艺原理图

(a) 成形工序 (b) 热挤压工艺 (c) 冷径向锻造工艺

Fig. 1 Principle diagrams of composite forming process

(a) Forming processes (b) Hot extrusion process

(c) Cold radial forging process

料内部的芯棒运动方式与坯料一致。在热挤压与径向锻造过程中，坯料与模具采用混合摩擦模型，摩擦

因数设置为 0.08、界面摩擦因数设置为 0.12；坯料与模具的传热系数设置为  $1500 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ ，与环境的传热系数设置为  $50 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 。

为了提高空心电机轴的成形质量，在试制样件之前通过正交实验优化径向锻造的工艺参数，设置了锤头相对转角  $A$ 、锤头下压量  $B$ 、锤头入模角  $C$ 、坯料进给量  $D$  的 4 因素 3 水平正交实验。基于正交实验得出的最优工艺参数，按照复合成形工艺试制空心电机轴样件，采用 YRK-3500BS 型挤压机对圆柱形坯料进行热挤压加工，挤压成形的坯料空冷至室温后再采用 GFM SKK-10 型精锻机进行冷径向锻造加工，最后通过车削加工出空心电机轴各段之间的台阶面。使用线切割机对空心电机轴样件的空心段和台阶段两个部位切割取样；样品打磨至 4000# 后机械抛光，使用腐蚀溶液（无水乙醇与硝酸体积比 9:1）腐蚀样品表面 4 s，酒精冲洗吹干后，采用 Axio-vert200MAT 光学显微镜观察样品不同位置的显微组织，并采用 VEGA3 GM 电子显微镜观察样品的高倍显微组织。

## 2 复合成形工艺模拟分析

### 2.1 热挤压成形模拟结果与分析

凸模压入凹模的过程中，坯料发生了大量的塑性变形，如图 2a 所示，当凸模下压 60 mm 时，等效塑性应变呈不均匀分布，此时的最大等效塑性应变集中在靠近凸模前端的位置，最大等效塑性应变为 2.05，并沿直径方向向外逐渐减小。为了进一步分析热挤压成形过程中材料的流动机制，由图 2b 可见，在凸模压入凹模过程中，凸模前端的材料向下流动，凸模圆周

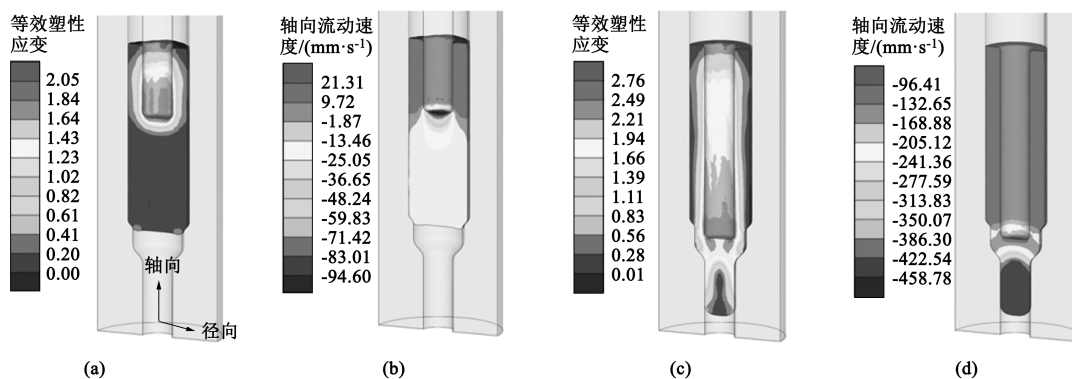


图 2 热挤压成形过程中的等效塑性应变和材料在轴向方向上的流动速度分布

(a) 凸模下压 60 mm，等效塑性应变 (b) 凸模下压 60 mm，轴向流动速度 (c) 凸模下压 180 mm，等效塑性应变 (d) 凸模下压 180 mm，轴向流动速度

Fig. 2 Distributions of equivalent plastic strain and flow velocity in axial direction of material during hot extrusion process

(a) Punch down 60 mm, equivalent plastic strain (b) Punch down 60 mm, flow velocity in axial direction

(c) Punch down 180 mm, equivalent plastic strain (d) Punch down 180 mm, flow velocity in axial direction



方向上的材料向上流动, 材料上下轴向流动速度约为  $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。如图 2c 所示, 凸模下压 180 mm 时热挤压工序结束, 此时的最大等效塑性应变为 2.76, 在坯料空心段内部具有较大的等效塑性应变, 并沿直径方向向外逐渐减小, 同时, 由于热挤压成形过程在  $980^\circ\text{C}$  下进行, 高温下变形材料发生动态再结晶, 难以积累大量的等效塑性应变。如图 2d 所示, 凸模下压 180 mm 时材料整体向下流动, 坯料空心段的材料轴向流动速度约为  $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 与凸模下压的移动速度接近。由于凹模下端直径逐渐减小, 靠近凸模前端的材料轴向流动速度达到  $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。通过对材料的轴向流动速度分析可知, 热挤压成形过程中, 圆柱形坯料在凸模与凹模的共同作用下正挤压出传动段, 同时反挤压出空心段。

## 2.2 冷径向锻造模拟结果与分析

在空心电机轴的冷径向锻造工序中, 主要包括空心段的径向锻造和台阶段的径向锻造, 这两处位置径向锻造的主要区别为: 前者设置了芯棒, 而后者未设置芯棒, 在完成空心段的径向锻造后取出芯棒, 再进行台阶段的径向锻造。空心段径向锻造后的等效塑性应变分布如图 3a 所示, 经过 3 个工步的径向锻造, 空心段的外径减小至  $\Phi 54 \text{ mm}$ , 并沿轴向拔长, 由于空心段的径向锻造设置有芯棒, 因此空心段的内径未减小。空心段原本塑性变形量较小的外表面, 在经过锤头的高频锻打之后, 产生了大量的塑性变形。图 3c 为图 3a 中位置 a 截面处的等效塑性应变沿直径方向的变化曲线, 在空心段外表面的等效塑性应变较大, 随着距坯料外表面距离的增加, 等效塑性应变呈现先减小后增大的趋势。图 3c 中, w、z 和 n 分别表示在位置 a 截面上选取的外部、中部、内部的 3 个区域。径向锻造过程中, 剧烈的等效塑性应变积累与材料的变形密切相关<sup>[22]</sup>, 而材料的变形对最终产品的微观形貌以及性能有着重要影响, 相对与热挤压成形, 冷径向锻造过程中材料流动的机制较为复杂。如图 3b 所示, 在锤头的高频锻打与芯棒的共同作用下, 材料沿轴向两端流动, 并且材料向右端的流动速度明显大于材料向左端的流动速度。

如图 4a 所示, 由于台阶段的径向锻造工序未设置芯棒, 台阶段经过锤头的高频锻打后内径与外径均减小, 最大等效塑性应变由 3.22 增加至 5.49, 并主要集中于台阶段外表面。图 4c 为图 4a 中位置 b 截面处的等效塑性应变沿直径方向的变化曲线, 随着距外表面距离的增加, 等效塑性应变逐渐减小。如图 4b 所示, 由于台阶段的径向锻造未设置芯棒,

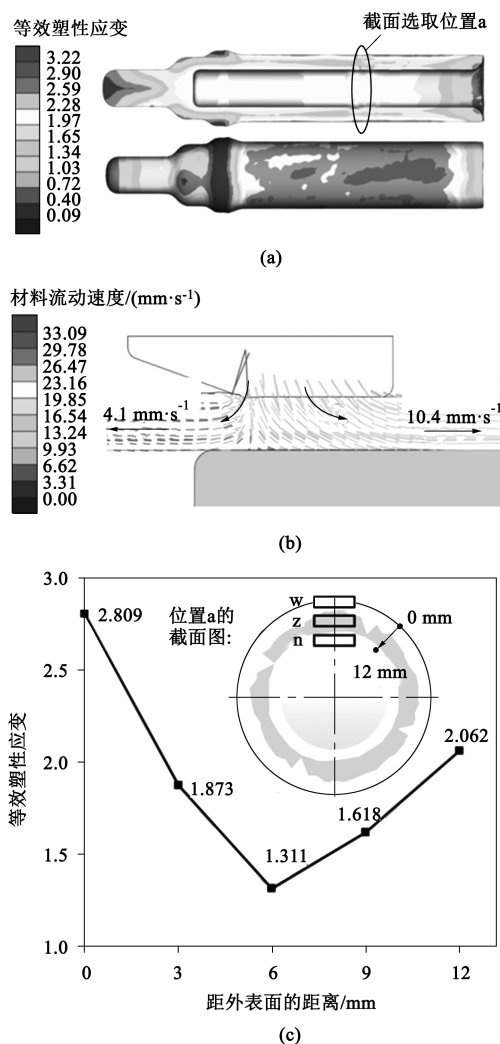


图3 空心段径向锻造过程模拟结果分布

(a) 等效塑性应变分布 (b) 材料流动速度分布  
(c) 位置 a 截面处的等效塑性应变沿直径方向的变化曲线

Fig. 3 Simulation results of radial forging process for hollow section  
(a) Distribution of equivalent plastic strain (b) Distribution of material flow velocity (c) Equivalent plastic strain change curve of section in position a along diameter direction

因此, 在锤头的高频锻打下材料主要沿左端流动。

## 3 正交实验

### 3.1 正交实验设计

相较于热挤压成形工序, 在冷径向锻造过程中的工艺参数对产品最终的性能有着更大的影响, 因此, 本文仅对冷径向锻造过程中的关键成形部位设置正交实验来优化工艺参数。在以往的研究中, 通过正交实验研究不同的锤头相对转角、锤头下压量、坯料进给量对空心轴类零件的最大等效应力  $\sigma$  和材料折叠数  $N$  的影响, 并通过极值法分析得出锤头相对转角和锤头下压量为主要的影响因素, 但是未探

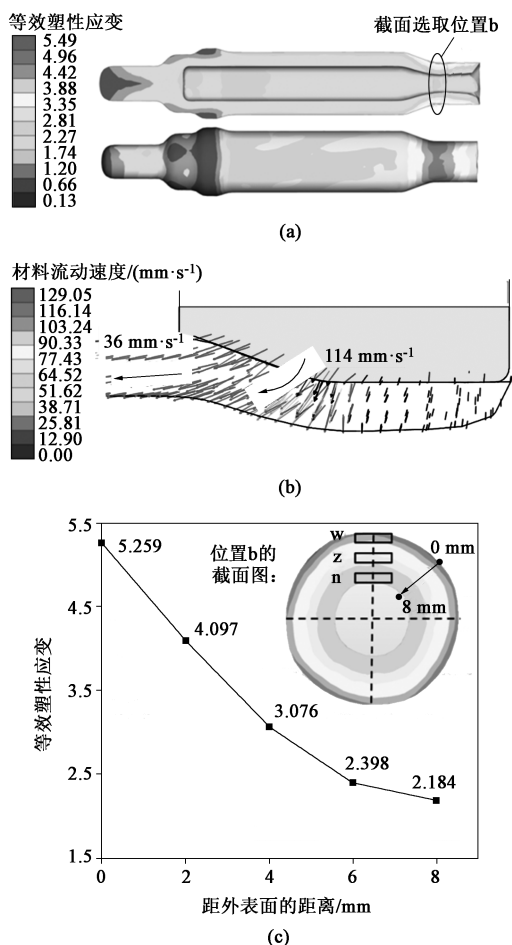


图 4 台阶段径向锻造过程模拟结果

(a) 等效塑性应变分布 (b) 材料流动速度分布

(c) 位置 b 截面处的等效塑性应变沿直径方向的变化曲线

Fig. 4 Simulation results of radial forging process for step section

(a) Distribution of equivalent plastic strain (b) Distribution of material flow velocity (c) Equivalent plastic strain change curve of section in position b along diameter direction

讨锤头入模角对坯料的影响。因此,本文在设置以上主要影响因素的基础上,将锤头入模角的影响也考虑进来,结合实际生产经验设置了 4 因素 3 水平正交实验,研究不同的锤头相对转角  $A$ 、锤头下压

量  $B$ 、锤头入模角  $C$ 、坯料进给量  $D$  对产品的最大等效应力  $\sigma$  和材料折叠数  $N$  的影响,并以此优选出最佳的工艺参数。表 1 为设计的正交实验因素水平表。

表 1 正交实验因素水平表

Table 1 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素			
	$A/(^{\circ})$	$B/\text{mm}$	$C/(^{\circ})$	$D/\text{mm}$
1	12	0.5	18	1.0
2	18	1.0	20	1.5
3	24	1.5	22	2.0

### 3.2 正交实验结果分析

正交实验的结果如表 2 所示,表 3 为正交实验结果分析。其中,  $K$  值为不同水平和因素下的最大等效应力之和或材料折叠数之和,下角标  $X1$  代表水平为 1 时的不同因素  $X$  ( $X=A, B, C, D$ ),  $X2$  和  $X3$  同理,  $R$  为极差值。在同一因素的 3 个水平中优选出  $K$  值最小的水平量,从而可以确定在同一因素下的最优工艺参数。某个因素的极差值  $R$  越大,代表该因素对结果的影响越大,因此,可以根据各因素的  $R$  值确定因素对结果影响的主次顺序。在影响最大等效应力  $\sigma$  的各因素中,坯料进给量  $D$  的影响最大,锤头入模角  $C$  也有较大的影响,根据  $K$  值最小原则,优选出工艺方案  $A_2B_2C_3D_1$ 。在影响材料折叠数  $N$  的各因素中,锤头下压量  $B$  的影响是最大的,根据  $K$  值最小原则,优选出工艺方案  $A_2B_2C_3D_2$ 。以上正交实验结果与以往的空心轴类零件正交实验中的结果基本一致,同时,锤头入模角  $C$  对最大等效应力  $\sigma$  的影响也不可忽视。由于坯料进给量  $D$  对最大等效应力  $\sigma$  的影响最大,对材料折叠数  $N$  的影响较小,因此,综合考虑优选出最优工艺方案  $A_2B_2C_3D_1$ ,即锤头相对转角为  $18^{\circ}$ 、锤头下压量为 1.0 mm、锤头入模角为  $22^{\circ}$ 、坯料进给量为 1.0 mm。

表 2 正交实验结果

Table 2 Orthogonal experimental results

方案	$A_1B_1C_1D_1$	$A_1B_2C_2D_2$	$A_1B_3C_3D_3$	$A_2B_1C_2D_3$	$A_2B_2C_3D_1$	$A_2B_3C_1D_2$	$A_3B_1C_3D_2$	$A_3B_2C_1D_3$	$A_3B_3C_2D_1$
$\sigma/\text{MPa}$	1000.65	967.39	1014.71	993.92	938.67	1005.15	990.64	1026.52	997.04
$N$	5	0	3	2	2	2	2	1	7

## 4 微观组织分析

空心电机轴样件及切面如图 5 所示,其外表面

及空心段内部均无明显的缺陷。为了进一步探究复合成形工艺对材料微观组织的影响,选取图 3c 与图 4c 中位置 a 和位置 b 处的区域 w、z 和 n 来观察微观形貌。图 6 为空心电机轴不同位置的显微形貌。

表 3 正交实验结果分析

Table 3 Analysis of orthogonal experimental results					
指标	因素	A	B	C	D
$\sigma$ / MPa	$K_{X1}$	2982.75	2985.21	3032.32	2936.36
	$K_{X2}$	2937.74	2932.58	2958.35	2963.18
	$K_{X3}$	3014.20	3016.90	2944.02	3035.15
	极差 R	76.46	84.32	88.30	98.79
	主次顺序	$D>C>B>A$			
N	$K_{X1}$	8	9	8	14
	$K_{X2}$	6	3	9	4
	$K_{X3}$	10	12	7	6
	极差 R	4	9	2	8
	主次顺序	$B>D>A>C$			

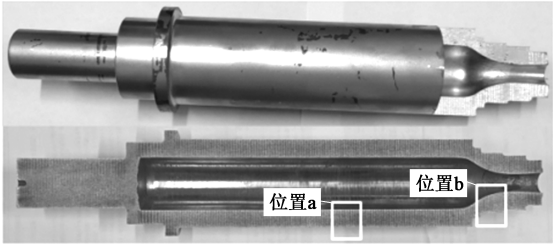


图 5 空心电机轴  
Fig. 5 Hollow motor shaft

比较图 6a 和图 6b 可以看到，空心段中部的晶粒粗大，而空心段内部的晶粒明显小于中部的大尺寸晶粒。由于空心段外部的等效塑性应变较大，如图 6c 所示，晶粒已经不能清晰分辨而形成纤维组织。在图 6a~图 6c 中，晶粒尺寸的变化呈现出先增大后减小的趋势，形成了中部晶粒粗大、内外部晶粒细小的双向梯度组织，这与图 3c 中等效塑性应变的变化趋势相同。在图 6d 中可以观察到沿材料变形方向拉长的粗大晶粒，图 6d~图 6f 的晶粒逐渐减小，直至晶粒不能清晰分辨而形成如图 6f 所示的纤维组织，形成了外部晶粒细小、内部晶粒粗大的单向梯度组织，其晶粒尺寸变化的趋势与图 4c 中的等效塑性应变的变化趋势相同。以上结果说明了空心电机轴晶粒的细化与塑性变形有关，并且随着变形量的增加，晶粒尺寸逐渐减小并沿变形方向拉长，最终在电机轴塑性变形量最大的外表面形成了一层具有特殊取向的纤维组织。选取图 6f 中的任意位置，在扫描电子显微镜下观察材料的微观形貌，如图 7 所示，可以明显地观察到球状和针状的珠光体组织，并且针状的珠光体组织沿着材料的变形方向择优取向。这些不均匀组织会对电机轴的使用性能造成不利影响，可以通过后续的热处理进一步消除空心电机轴的不均匀组织。

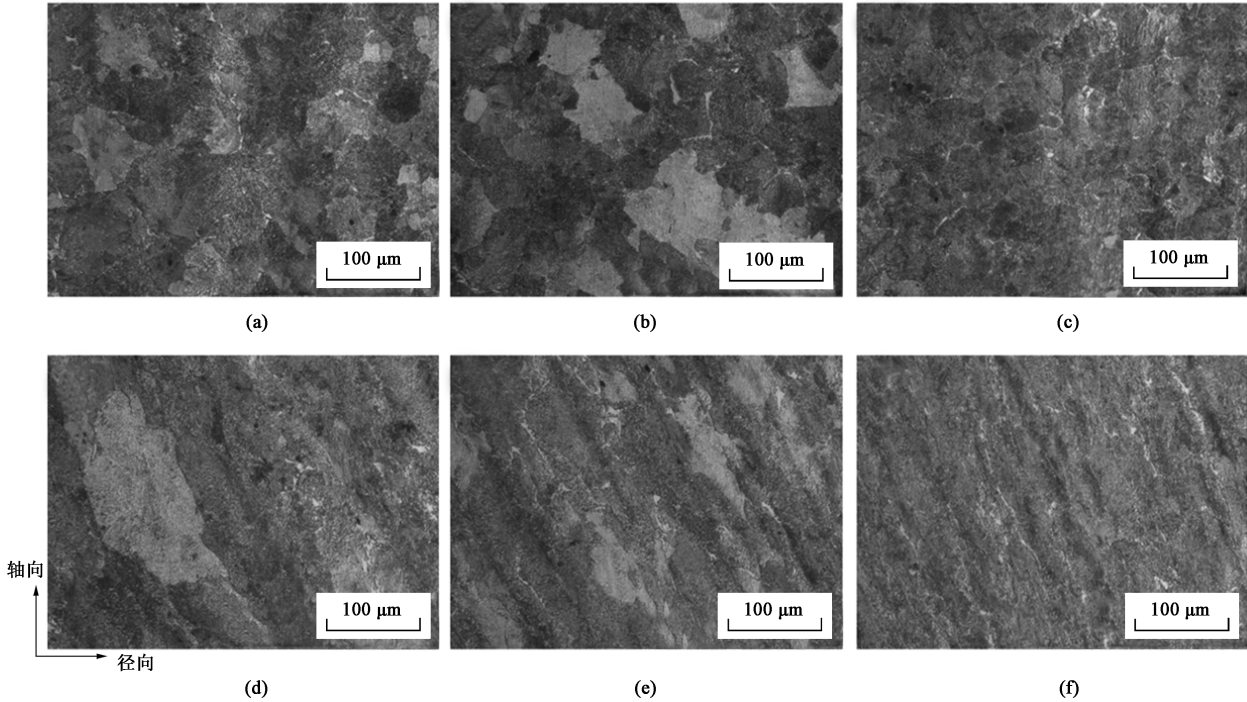


图 6 空心电机轴不同位置的显微形貌  
(a) 位置 a，区域 n (b) 位置 a，区域 z (c) 位置 a，区域 w (d) 位置 b，区域 n (e) 位置 b，区域 z (f) 位置 b，区域 w  
Fig. 6 Micromorphologies in different positions of hollow motor shaft  
(a) Position a，area n (b) Position a，area z (c) Position a，area w (d) Position b，area n (e) Position b，area z (f) Position b，area w



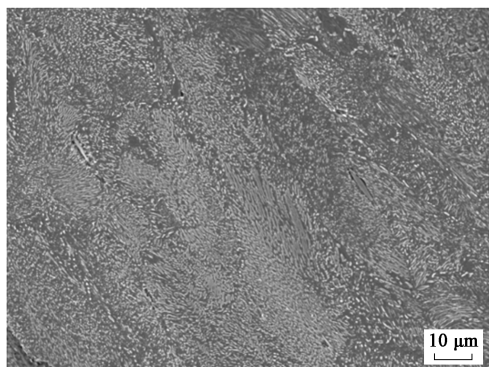


图 7 空心电机轴的显微形貌

Fig. 7 Micromorphology of hollow motor shaft

## 5 结论

(1) 在热挤压成形过程中, 空心电机轴最大等效塑性应变集中靠近凸模前端的部位, 并沿空心电机轴直径方向向外逐渐减小, 热挤压过程中靠近凸模前端的材料向下流动, 凸模圆周方向上的材料向上流动。

(2) 在空心段的径向锻造过程中, 材料沿轴向两端流动, 等效塑性应变随着距坯料外表面距离的增加呈现出先减小后增大的趋势; 在台阶段的径向锻造过程中, 材料沿左端流动, 随着距外表面距离的增加, 等效塑性应变逐渐减小。

(3) 通过正交实验优选出冷径向锻造工序的最优工艺方案为  $A_2B_2C_3D_1$ , 即锤头相对转角为  $18^\circ$ 、锤头下压量为  $1.0\text{ mm}$ 、锤头入模角为  $22^\circ$ 、坯料进给量为  $1.0\text{ mm}$ 。

(4) 经过热挤压和冷径向锻造工序后, 在空心段形成了中部晶粒粗大、内外部晶粒细小的双向梯度组织, 在台阶段形成了外部晶粒细小、内部晶粒粗大的单向梯度组织; 经过锤头的高频锻打, 最终在电机轴塑性变形量最大的外表面形成了一层具有特殊取向的纤维组织。

### 参考文献:

[1] 马世博, 孙立科, 张双杰, 等. 多台阶电机轴敦挤复合成形工艺 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (7): 29-35.  
Ma S B, Sun L K, Zhang S J, et al. Multi step motor shaft extrusion composite forming process [J]. Journal of Plastic Engineering, 2021, 28 (7): 29-35.

[2] Huang J, Slater C D, Mandral A, et al. A dynamic model for simulation of hot radial forging process [J]. Procedia Engineering, 2017, 207: 478-483.

[3] 周志明, 陈波, 黄伟九, 等. 精密旋锻技术的研究进展 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (19): 5-8.  
Zhou Z M, Chen B, Huang W J, et al. Research progress of precision rotary forging technology [J]. Hot Working Technology, 2017, 46 (19): 5-8.

[4] 杨华, 高俊峰, 何琪功, 等. 径向锻造机的几种典型主机结构分析 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (6): 17-32.  
Yang H, Gao J F, He Q G, et al. Analysis on several typical main engine structures of radial forging machine [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (6): 17-32.

[5] Afrasiab H, Hamzekolaei M G, Hassani A. New insight into the radial forging process by an asymptotic-based axisymmetric analysis [J]. Applied Mathematical Modelling, 2022, 102: 811-827.

[6] 徐宝池, 石必坤, 樊黎霞, 等. 冷径向锻造身管壁厚方向变形不均匀性研究 [J]. 兵工学报, 2020, 41 (1): 14-20.  
Xu B C, Shi B K, Fan L X, et al. Study on deformation inhomogeneity of cold radial forging barrel in wall thickness direction [J]. Journal of Ordnance Industry, 2020, 41 (1): 14-20.

[7] Lu X, Zhou Y F, Xing X L, et al. Failure analysis of hot extrusion die based on dimensional metrology, micro-characterization and numerical simulation-A case study of Ti alloy parts [J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 73: 113-128.

[8] Zou J, Ma L, Zhu Y, et al. Deformation mechanism of ZK60 magnesium bars during radial forging: Mathematical modeling and experimental investigation [J]. Materials Characterization, 2021, 179: 111321.

[9] 王敬丰, 彭星, 王奎, 等. 超大规格宽幅薄壁中空镁合金型材挤压成形的数值模拟及实验研究 [J]. 中国有色金属学报, 2020, 30 (12): 2810-2819.  
Wang J F, Peng X, Wang K, et al. Numerical simulation and experimental study on extrusion forming of large size, wide width and thin wall hollow magnesium alloy profiles [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30 (12): 2810-2819.

[10] 王晓溪, 张翔, 张磊, 等. 工业纯铝等通道球形转角挤压数值模拟与实验研究 [J]. 中国有色金属学报, 2019, 29 (7): 1361-1365.  
Wang X X, Zhang X, Zhang L, et al. Numerical simulation and experimental study on equal channel spherical angular extrusion of industrial pure aluminum [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29 (7): 1361-1365.

[11] 石磊, 文九巴, 姚怀, 等. 钛合金弯管动态流量控制法挤压成形的模拟与实验研究 [J]. 中国有色金属学报, 2019, 29 (2): 381-385.  
Shi L, Wen J B, Yao H, et al. Simulation and experimental study on extrusion forming of titanium alloy elbow by dynamic flow control method [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29 (2): 381-385.

[12] 张雪, 樊黎霞, 张鹤词. 身管膛精密径向锻造的锻透性分析 [J]. 兵工学报, 2019, 40 (3): 474-479.  
Zhang X, Fan L X, Zhang H C. Analysis of forging penetration of precision radial forging of pipe bore [J]. Journal of Ordnance Industry, 2019, 40 (3): 474-479.

- [13] 刘金明, 刘兵, 杨晨, 等. 精锻身管弹腔内壁成形圈纹缺陷机理研究 [J]. 兵工学报, 2020, 41 (3): 452-459.  
Liu J M, Liu B, Yang C, et al. Study on the forming mechanism of ring defects on the inner wall of precision forged barrel [J]. Journal of Ordnance Industry, 2020, 41 (3): 452-459.
- [14] 徐笑, 樊黎霞, 王亚平, 等. 身管精锻过程跨尺度多晶体塑性有限元模拟与织构预测 [J]. 兵工学报, 2016, 37 (7): 1181-1186.  
Xu X, Fan L X, Wang Y P, et al. Cross scale polycrystalline plastic finite element simulation and texture prediction of barrel precision forging process [J]. Journal of Ordnance Industry, 2016, 37 (7): 1181-1186.
- [15] Zou J, Ma L, Jia W, et al. Microstructural and mechanical response of ZK60 magnesium alloy subjected to radial forging [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 83: 228-238.
- [16] Cao X Q, Wang B Y, Zhou J, et al. Application of unified constitutive model of 34CrNiMo6 alloy steel and microstructure simulation for flexible skew rolling hollow shafts [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 76: 598-610.
- [17] Yang Y, Fan L, Xu C. The microstructure, texture evolution and plasticity anisotropy of 30SiMn2MoVA high strength alloy steel tube processed by cold radial forging [J]. Materials Characterization, 2020, 169 (235): 110641.
- [18] 曹茜, 鲁仰辉, 李高盛. 风电塔筒用纵筋板轧制的有限元模拟与实验 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (9): 164-167.  
Cao H, Lu Y H, Li G S. Finite element simulation and experiment on rolling of longitudinal rib plate in wind power tower [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (9): 164-167.
- [19] Yong L, Huang J, Huang G, et al. Comparison of radial forging between the two- and three-split dies of a thin-walled copper tube during tube sinking [J]. Materials & Design, 2014, 56: 822-832.
- [20] Pachla W, Kulczyk M, Przybysz S, et al. Effect of severe plastic deformation realized by hydrostatic extrusion and rotary swaging on the properties of CP Ti grade 2 [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 221: 255-268.
- [21] Wu Y J, Dong X H, Yu Q. An upper bound solution of axial metal flow in cold radial forging process of rods [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2014, 85: 120-129.
- [22] 林鹏程, 庞玉华, 孙琦, 等. 45 钢块体超细晶棒材 3D-SPD 轧制法 [J]. 金属学报, 2021, 57 (5): 606-612.  
Lin P C, Pang Y H, Sun Q, et al. 3D-SPD rolling method of 45 steel block ultrafine grained bar [J]. Acta Metallica Sinica, 2021, 57 (5): 606-612.

## “第十八届全国塑性工程学术年会暨第十届全球华人塑性技术研讨会”征文通知

“第十八届全国塑性工程学术年会暨第十届全球华人塑性技术研讨会”(以下简称“年会”)将于2023年10月20-22日在武汉市举行,年会主题为“提高自主创新能力 扎实推进产业基础再造工程”。本届年会将邀请国内外高等院校、科研院所和知名企业的资深专家做主旨报告,同时还安排分组学术交流。

热忱欢迎海内外广大同仁踊跃投稿、积极参会。

### 一、组织单位

指导单位:中国机械工程学会、中国机械科学研究总院集团有限公司

主办单位:中国机械工程学会塑性工程分会

承办单位(排名不分先后):中国机械总院集团北京机电研究所有限公司、武汉理工大学、华中科技大学、太原理工大学、山东大学、精密成形国家工程研究中心

协办单位(排名不分先后):征集中

支持媒体:《塑性工程学报》、《锻压技术》杂志

### 二、征文范围

- |            |             |             |                 |
|------------|-------------|-------------|-----------------|
| ●金属塑性成形理论  | ●塑性成形技术与装备  | ●模具设计与制造技术  | ●材料与成形性能        |
| ●工业加热技术及设备 | ●锻后热处理技术及设备 | ●摩擦与润滑      | ●测试技术与装备        |
| ●增材制造      | ●智能制造       | ●计算机模拟及仿真应用 | ●其他与塑性工程相关或交叉领域 |

### 三、论文提交时间及方式

网上投稿截止时间:2023年6月1日;投稿网址: <https://conference.cstp-cmes.org.cn/?siteid=10241>

### 四、塑性工程分会秘书处联系方式

地址:北京市海淀区学清路18号711房间 邮编:100083 电话:010-62920654, 82415084

E-mail: [duanya@cmes.org](mailto:duanya@cmes.org)

联系人:秦思晓(15201461873), 周林(13811919643), 金红(13911560582)

中国机械工程学会塑性工程分会