

# 变截面变壁厚旋锻轴轴向强度分布研究

戴伟发, 卢曦\*

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年4月15日; 录用日期: 2025年5月8日; 发布日期: 2025年5月15日

## 摘要

以某变截面变壁厚等速万向传动中间旋锻轴为研究对象, 其在旋锻过程中由于加工硬化的作用, 毛坯经过旋锻后不同截面的加工硬化程度不同, 导致其强度也不同。为了得到旋锻后旋锻轴的轴向强度分布, 文章采用理论、仿真和试验相结合的方法, 首先根据外径和壁厚的不同将旋锻轴分为十个区域, 并根据旋锻轴各区域的变形量计算其截面等效应变, 结合材料加工硬化曲线得到各区域旋锻后的强度变化, 经过数据修正拟合得到旋锻后旋锻轴的轴向强度分布。然后通过Deform仿真分析典型区域旋锻后的等效应力及应变来验证理论求解的准确性; 最后对典型区域进行硬度测试进一步验证理论与仿真分析的合理性。硬度测试结果与理论计算很接近, 表明采用分段来计算旋锻轴轴向强度分布是可行的。

## 关键词

旋锻轴, 轴向强度分布, 变截面变壁厚

# Research on Axial Strength Distribution of Variable Cross-Section and Variable Wall Thickness Rotary Forging Shaft

Weifa Dai, Xi Lu\*

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 15<sup>th</sup>, 2025; accepted: May 8<sup>th</sup>, 2025; published: May 15<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Taking a variable cross-section, variable wall thickness, and constant velocity universally drive intermediate forging shaft as the research object; because of work hardening during the forging process, the work hardening degree of different sections of the blank after forging is different, resulting

\*通讯作者。

in different strengths. To obtain the axial strength distribution of the forged shaft after forging, a combination of theory, simulation, and experiment was used. Firstly, the forged shaft was divided into ten regions based on the different outer diameters and wall thickness. The equivalent strain of the cross-section was calculated based on the deformation of each region of the forged shaft. The strength changes of each region after forging were obtained by combining the material work hardening curve. After data correction and fitting, the axial strength distribution of the forged shaft after forging was obtained. Then, the accuracy of the theoretical solution is verified by analyzing the equivalent stress and strain of the typical area after forging through Deform simulation. Finally, hardness testing was conducted on typical areas to further validate the rationality of theoretical and simulation analysis. The hardness test results are very close to the theoretical calculations, indicating that it is feasible to use segmented methods to calculate the axial strength distribution of the rotary forging shaft.

## Keywords

Forged Shaft, Axial Strength Distribution, Variable Cross-Section and Wall Thickness

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着现代工程技术,特别是机械和交通工程的持续发展,以及轻量化和高性能需求的日益增加,汽车动力传递部件传动轴越来越多地采用旋锻工艺,旋锻工艺成形的传动轴即为旋锻轴[1]。

旋锻即旋转锻压,也叫径向锻压,常采用两个或以上的模具,在使其环绕坯料外径周围旋转的同时,也向坯料轴心施加高频率的脉冲径向力,使坯料受径向压缩而按模具型线成形和沿轴向拉伸。它是一种局部而连续、无屑而精密的金属成形加工工艺[2],并且可以根据整车轻量化需求和性能需要实现旋锻轴的变截面、变壁厚,达到轻量化的目的[3]。

国内外学者对旋锻工艺进行了大量的研究。Ghaei [4]等通过主应力法研究了含芯棒与无芯棒管坯的径向锻造。Ameli [5]等研究了常温下旋锻工艺成形零件的内外表面应力状态及残余应力的分布和下压量对模具载荷的影响规律,残余应力和模具载荷随着旋锻的下压量增大而增大。Sanjari [6]等将有限元分析和微硬度测试方法相结合,分析了轴向进给速度、轴向送给力、锻模进给角以及模具形状对旋锻成型质量的影响。Tian [7]等研究了通过旋锻工艺来生产电机转子空心轴的可行性,结合了热旋锻的模拟和实验研究,并进行了铁路电机空心轴的试制。王聚存[8]等针对薄壁细长轴内台阶孔,采用有限元与实验验证相结合的方法,研究管坯旋锻过程中毛坯外径/内径之比、模具入口角和摩擦条件对缩径过程金属流动的影响规律。李栋材[9]等提出了一种耦合旋锻成形工艺特性以及材料加工硬化特性、毛坯力学特性、毛坯旋锻前后壁厚和内外径之间关系的毛坯尺寸设计方法。李朋丽[10]等研究了毛坯在无芯棒旋锻过程中尺寸和力学特性变化时周向进给参数的匹配。张琦[11]等提出了一种利用旋锻工艺进行管材-管材、管材-棒料连接的新方法,并进行了旋锻连接过程的有限元分析和实验验证,揭示了材料流动规律及影响连接接头强度的工艺参数。龚政[12]等根据旋锻轴不同变形截面径向变形量计算的应变与硬度强度的关系拟合加工硬化曲线,然后与材料拉伸试验拟合的硬化曲线进行对比,发现两者具有相似性,在实际旋锻生产中可以通过变形量与硬度强度关系来控制旋锻加工硬化。但关于旋锻轴轴向强度分布的研究至今还未见报道。

本文研究的旋锻轴具有变截面变壁厚的特征,其经过旋锻加工后轴向方向上的应变不均匀,不同截

面的加工硬化程度也不同, 导致其强度变化也不均匀。为了得到旋锻轴旋锻后的轴向强度分布, 采用理论、仿真和试验相结合的方法, 首先利用旋锻轴加工变形量及材料加工硬化曲线, 采用分段计算的方式得到不同区域的强度变化, 并得到理论计算的旋锻轴轴向强度分布曲线, 然后通过仿真以及硬度试验来验证理论计算的准确性。本研究为工程上得到变截面变壁厚旋锻轴的轴向强度分布提供了一种新的方法。

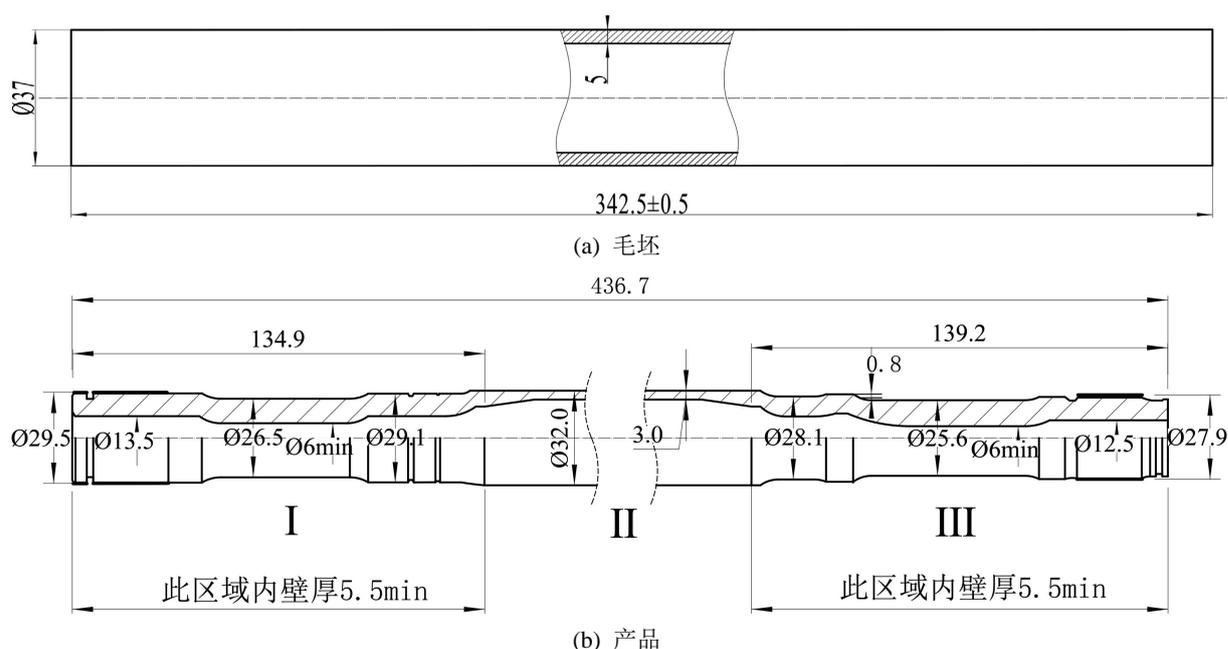
## 2. 材料与方法

本文以某变截面变壁厚空心旋锻轴为研究对象, 其旋锻工艺包括无芯棒和含芯棒旋锻。毛坯与产品尺寸如图 1 所示, 其中轴段 I 和轴段 III 由无芯棒旋锻成形, 轴段 II 由含芯棒旋锻成形。材料牌号为 25CrMo4, 其化学成分如表 1 所示。毛坯材料强度取 151 HB, 转换成强度为 507 MPa [13]。

**Table 1.** Chemical composition of 25CrMo4 (% , mass fraction)

**表 1.** 25CrMo4 化学成分(% , 质量分数)

C	Mn	Si	Cr	Mo	Cu	P	S
0.22~0.29	0.60~0.90	≤0.40	0.90~1.20	0.15~0.30	≤0.25	≤0.035	≤0.035



**Figure 1.** Dimensions of forged shaft blank (a) and product (b)

**图 1.** 旋锻轴毛坯(a)与产品(b)尺寸

本文通过分析旋锻轴旋锻硬化特性来确定旋锻轴轴向强度分布, 研究方法与步骤如下:

1) 根据旋锻轴外径和壁厚的不同将其分为十个区域, 由各区域的外径及壁厚尺寸并结合无芯棒与含芯棒的等效应变计算公式得到各部分的等效应变;

2) 根据材料拉伸试验得到 25CrMo4 材料的应力 - 应变曲线, 并拟合得到其加工硬化曲线, 结合各区域的等效应变及材料加工硬化曲线得到各部分的强度变化, 并拟合得到旋锻轴轴向强度分布;

3) 为了验证理论分析的准确性, 应用 DEFORM 仿真分析部分典型区域旋锻硬化后的强度变化, 与理论计算结果进行比较, 最后通过硬度测试旋锻轴典型区域的硬度, 并转换成强度与理论计算结果比较来进一步验证理论与仿真分析的准确性。

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 理论求解

旋锻轴具有变截面变壁厚的特征, 毛坯经过旋锻后不同截面的加工硬化程度不同, 且旋锻轴加工方式从左至右依次为无芯棒、含芯棒和无芯棒旋锻, 加工制造比较复杂, 采用仿真分析整个轴的强度变化比较困难。同时由于强度实验具有破坏性, 所以很难通过强度试验获取旋锻轴轴向强度分布。由于等外径及壁厚区域的加工硬化程度一样, 其强度也是一样的, 因此可以根据旋锻轴外径和壁厚的不同将其分为不同区域, 每个区域的强度变化可以以该区域截面的强度变化来代替。所以本文采取分段计算的方法, 不仅简化了计算, 同时也解决了旋锻轴轴向强度分布难获取的问题。

根据旋锻轴不同截面外径和壁厚的不同将其划分为十个区域, 旋锻轴区域划分如图 2 所示。

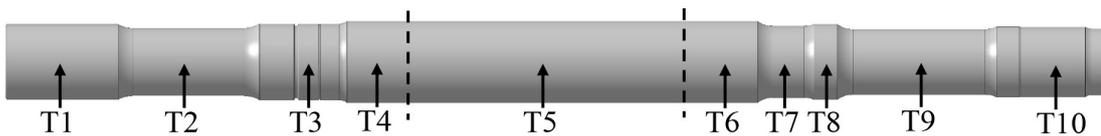


Figure 2. Division model of different regions of rotary forging shaft

图 2. 旋锻轴不同区域划分模型

不同区域的外径及壁厚尺寸如下表 2 所示。

Table 2. Outer diameter and wall thickness in different regions

表 2. 不同区域外径及壁厚

截面位置	外径尺寸/mm	壁厚/mm
T1	29.5	6.2
T2	26.5	8.3
T3	29.1	7.6
T4	32.0	4.2
T5	32.0	3
T6	32.0	4.2
T7	28.1	6.75
T8	29.6	6.2
T9	25.6	9.0
T10	27.9	7.0

从图 1 可以看出, 旋锻轴的 T4 及 T6 区域为对称区域, 处于无芯棒与含芯棒的过渡段, 且为斜面, 其外径和壁厚取斜面上最大与最小值的平均值; T9 区域的外径最小, 壁厚最大; T5 区域为含芯棒旋锻, 外径最大, 壁厚最小。

得到旋锻轴旋锻前后的外径及壁厚变化后就可以计算其等效应变, 对于无芯棒旋锻, 其等效应变可以根据式(1)来计算:

$$\varepsilon_1 = \sqrt{\frac{2}{3} \left( \left( \ln \frac{t}{t_0} \right)^2 + \left( \ln \frac{t}{t_0} + \ln \frac{r_m}{r_{m0}} \right)^2 + 1 \left( \ln \frac{r_m}{r_{m0}} \right)^2 \right)} \quad (1)$$

式中,  $t_0$  为旋锻前坯料壁厚;  $t$  为旋锻后坯料壁厚;  $r_{m0}$  为坯料初始等效半径:  $r_{m0} = r_0 - t_0/2$ ;  $r_m$  为旋锻后等效半径:  $r_m = r - t/2$ ;  $r_0$  为旋锻前坯料半径;  $r$  为旋锻后坯料半径。

对于含芯棒, 其等效应变由式(2)计算得到:

$$\varepsilon_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \left| \ln \frac{t_0}{t} \right| \quad (2)$$

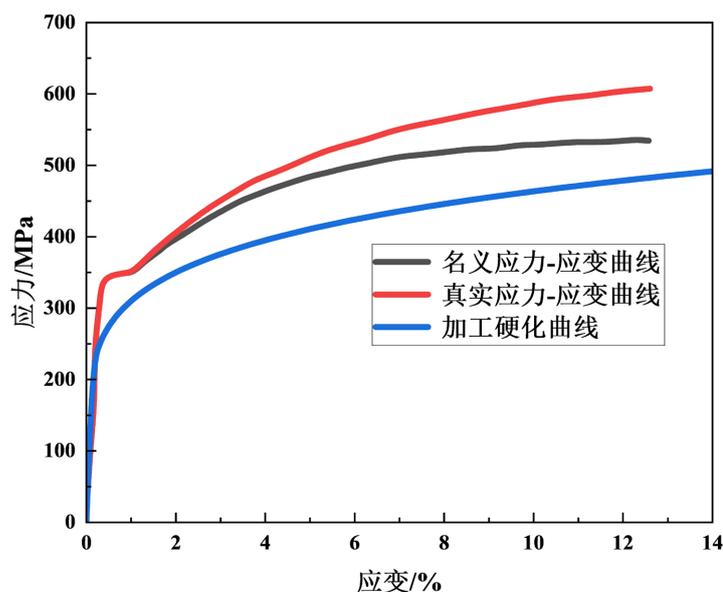
T5 区域为含芯棒旋锻, 将其旋锻前后的壁厚带入式(2)计算可得其等效应变为 0.59, 其余区域为无芯棒旋锻, 带入式(1)可得各区域的等效应变, 等效应变计算结果如表 3 所示。

**Table 3.** Equivalent strain of cross-sections in each region

**表 3.** 各区域截面的等效应变

区域截面	应变
T1	0.32
T2	0.62
T3	0.47
T4	0.20
T5	0.59
T6	0.20
T7	0.42
T8	0.32
T9	0.72
T10	0.45

材料的加工硬化曲线可以根据材料拉伸试验得到的应力 - 应变曲线拟合得到, 25CrMo4 材料的应力 - 应变曲线及拟合得到的加工硬化曲线如图 3 所示。



**Figure 3.** Stress strain and work hardening curves of 25CrMo4

**图 3.** 25CrMo4 应力 - 应变及加工硬化曲线

根据加工硬化曲线拟合得到 Hollmon 关系式为:

$$\sigma = 693(\varepsilon + \varepsilon_0)^{0.175} \quad (3)$$

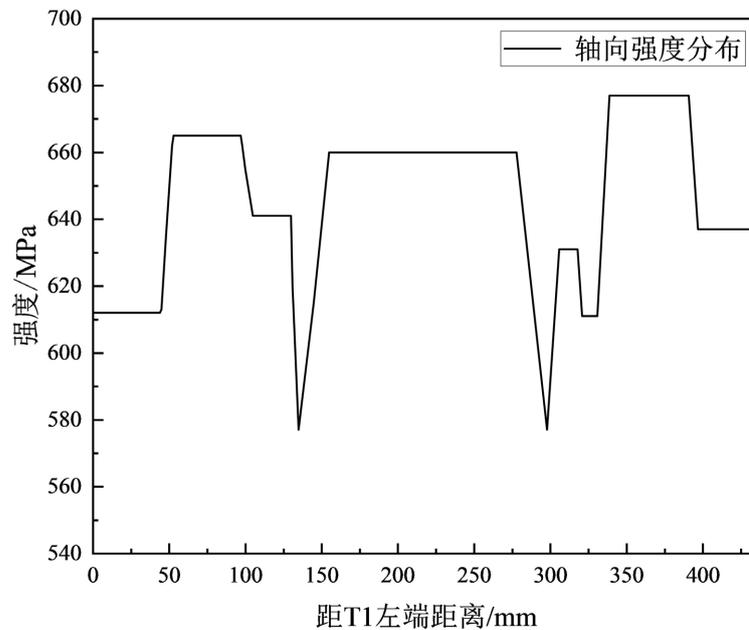
式中,  $\sigma$  为真实应力,  $\varepsilon$  为真实应变,  $\varepsilon_0$  为预应变。

将各区域得到的等效应变带入式(3), 并考虑毛坯的初始预应变, 可得各区域旋锻硬化后的强度变化, 计算结果如表 4 所示。

**Table 4.** Strength changes in various regions after rotary forging

**表 4.** 旋锻后各区域的强度变化

截面	强度/MPa
T1	612
T2	665
T3	641
T4	582
T5	660
T6	582
T7	631
T8	611
T9	677
T10	637



**Figure 4.** Axial strength distribution of rotary forging shaft

**图 4.** 旋锻轴轴向强度分布

由于旋锻轴不同截面区域连续变化, 且同一区域为等截面等壁厚的特征, 其加工硬化程度相同, 因此其轴向强度分布可近似由各截面的强度变化代替, 以 T1 区域的左端为原点, T10 区域的右端为终点,

旋锻轴的长度为横坐标, 旋锻后各区域的强度变化为纵坐标。其中同一区域的强度相同, 不同区域的强度具有连续性, 拟合得到的曲线即可近似看作旋锻轴旋锻硬化后的轴向强度分布, 变截面变壁厚旋锻轴轴向强度分布如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 旋锻轴轴向方向上的强度变化呈现不均匀性, 其中 T4 和 T6 区域的强度最低, T9 区域的强度最高, 这与旋锻轴的应变计算结果相似, 其应变更大, 加工硬化效果更显著。

### 3.2. 旋锻硬化仿真验证

为了验证理论分段计算的准确性, 运用有限元仿真软件 DEFORM 对各区域的强度变化进行仿真分析, 为了简化计算, 取 3 个典型区域进行验证, 第一个为开花键段(T10), T1 与 T10 区域都为无芯棒旋锻成形, 都要进行渐开线花键成形工艺, 且 T10 区域的外径小于 T1 区域, 其加工硬化效应更严重, 强度也更高, 后续渐开线花键成形力也更大; 第二个选择径向尺寸最小段, 即 T9 区域; 第三个选取 T5 区域, 此区域采用含芯棒旋锻成形。

首先运用 CATIA 软件建立模具以及坯料的三维模型, 导入 DEFORM-3D 软件中。无芯棒与含芯棒旋锻仿真模型如图 5 所示。

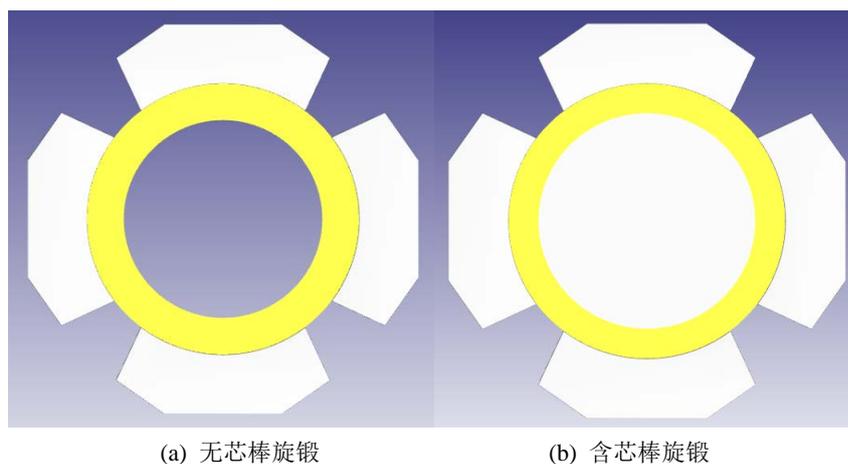


Figure 5. Rotary forging models without core rod (a) and with core rod (b)  
图 5. 无芯棒(a)与含芯棒(b)旋锻模型

从图 5 可以看出, 旋锻工艺是由四个分布在坯料四周的模具不断对坯料进行径向锻打, 同时为了保证圆度还需要进行周向锻打修圆, 含芯棒还需要坯料轴向进给[14]。含芯棒相对于无芯棒中间有芯棒支撑, 其旋锻过程中内径不变, 外径减小, 且坯料在锻打过程中会轴向流动, 而无芯棒由于没有芯棒支撑, 外径和内径在锻打过程中都会减小。

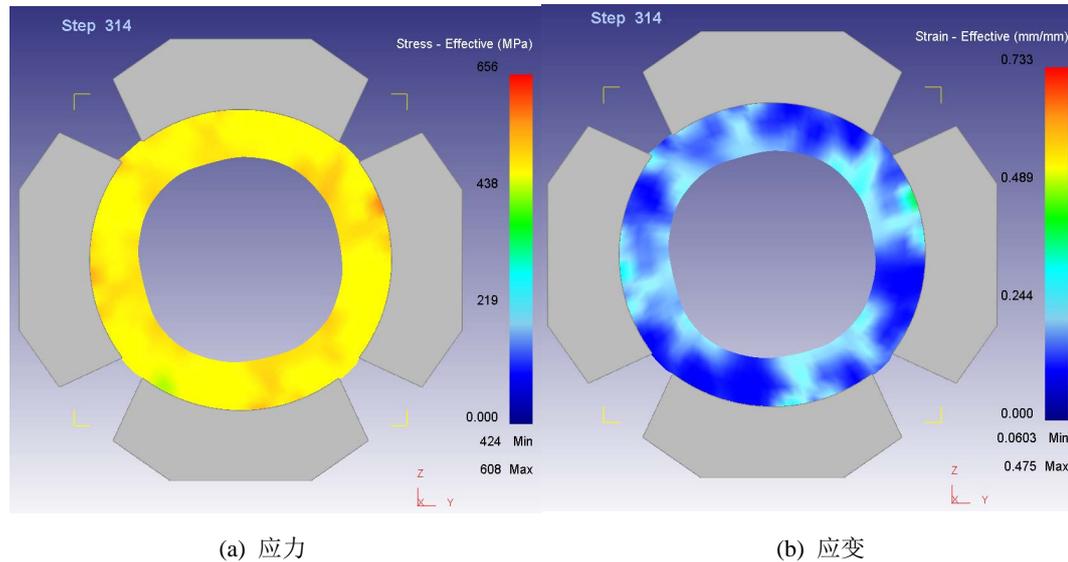
根据图 3 中 25CrMo4 材料的真实应力 - 应变曲线, 考虑旋锻的加工硬化效应, 拟合得到的材料刚塑性硬化模型如式(4)所示。

$$\sigma = 342 + 1564\varepsilon^{0.755} \quad (4)$$

将材料刚塑性模型导入 DEFORM 软件中, 设置模具与芯棒为刚体, 坯料为塑性体, 不同区域的仿真结果如下图所示。由于 T10 和 T9 区域都为无芯棒旋锻, 其为毛坯经过无芯棒旋锻过程中不同下压量的不同阶段, 由于 T9 区域的径向下压量更大, 所以该进给过程同时分析 T9 和 T10 段的应力和应变分布。

T10 区域的截面外径为 27.9 mm, 壁厚为 7 mm, 毛坯外径为 37 mm, 需要下压 4.55 mm, 同时为了保证圆度, 在每个径向进给后都需要周向进给修圆, 设置模具每径向进给 1 mm, 周向进给修圆 30 次,

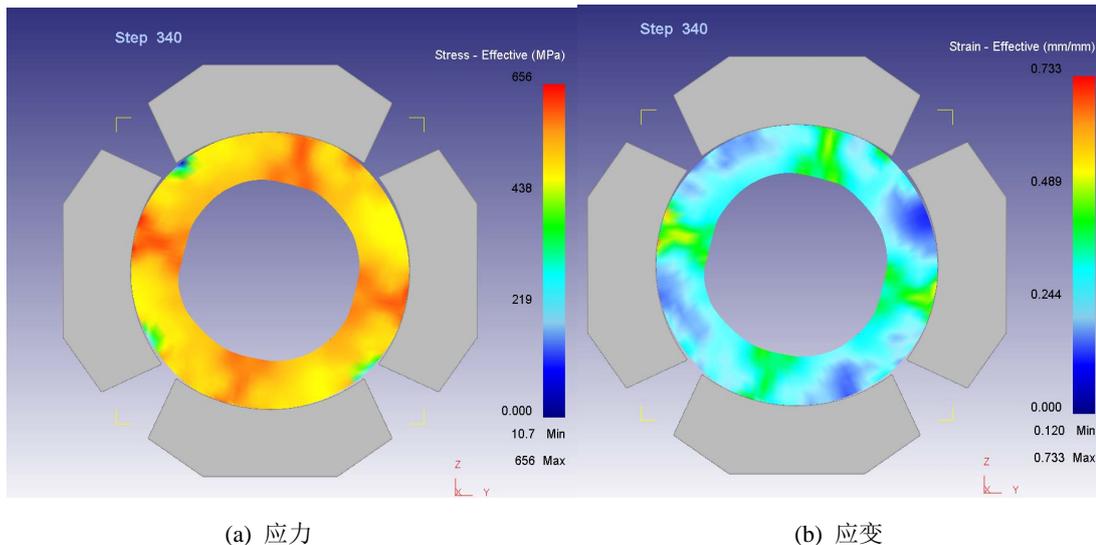
最终得到 T10 区域旋锻后的应力 - 应变分布如图 6 所示。



**Figure 6.** Distribution of stress (a) and strain (b) in T10 area after rotary forging  
**图 6.** T10 区域旋锻后的应力(a) - 应变(b)分布

从图 6 可以看出, 毛坯经过径向进给以及周向修圆后, 外圆的圆度较均匀, 但内圆的圆度质量较外圆差一些, T10 区域的最大等效应力为 608 MPa, 最大等效应变为 0.475, 其发生在四个模具与坯料接触的中心位置。仿真结果与理论计算的强度 637 MPa、等效应变 0.45 较接近, 说明理论计算结果具有一定的可信度。

T9 区域的截面外径为 25.6 mm, 需要下压 5.7 mm, 仿真得到的应力 - 应变分布如图 7 所示。

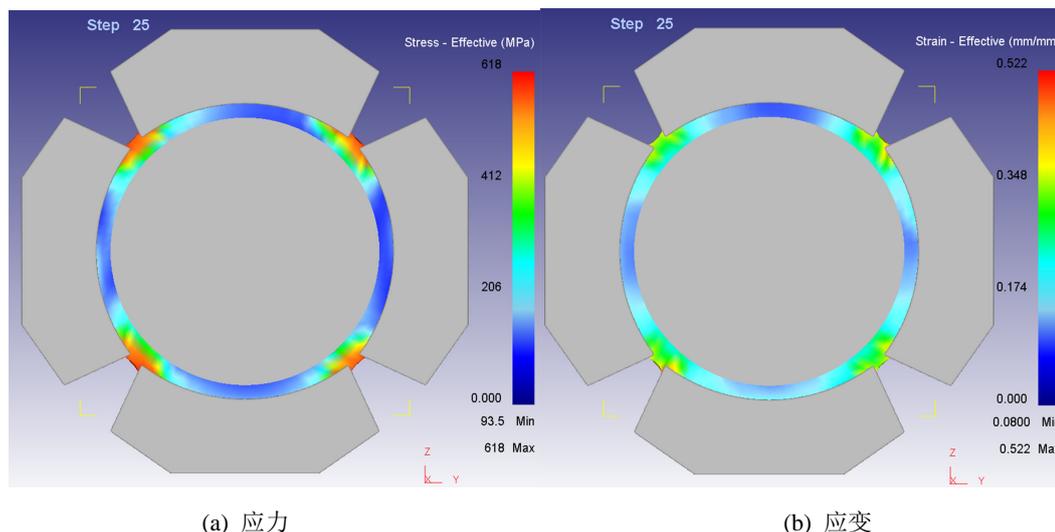


**Figure 7.** Distribution of stress (a) and strain (b) in T9 region after rotary forging  
**图 7.** T9 区域旋锻后的应力(a) - 应变(b)分布

从图 7 可以看出, 随着进给量的增加, 坯料的加工硬化程度更严重, 应变和应力也随之增加, T9 区域的最大等效应变为 0.733, 最大等效应力为 656 MPa, 其发生位置仍然在模具与坯料接触的中心区域。理论

计算的强度为 677 MPa, 等效应变为 0.72, 仿真结果与理论计算结果接近, 说明理论计算结果是可行的。

含芯棒旋锻由于有芯棒的支撑, 其内径不变, 外径减小, 由表 2 可知, 含芯棒旋锻区域其外径为 32 mm, 壁厚 3 mm, 设置旋锻下压量为 2.5 mm。由于本文只研究旋锻硬化后的应力和应变分布, 所以仿真时未考虑坯料的轴向进给, 得到 T5 区域旋锻后的应力 - 应变分布如图 8 所示。



**Figure 8.** Stress (a) and strain (b) distribution in T5 area after rotary forging hardening  
**图 8.** T5 区域旋锻硬化后的应力(a) - 应变(b)分布

由图 8 可知, 含芯棒旋锻硬化后的最大等效应力为 618 MPa, 最大等效应变为 0.522, 与理论计算的强度 660 MPa, 以及等效应变 0.59 有一定差异, 这是由于仿真时未考虑模具的周向进给修圆, 所以等效应变及等效应力会偏小, 同时含芯棒旋锻时坯料会发生轴向流动, 所以仿真结果较理论计算结果偏小。由于等效应变与硬化强度呈一定的线性关系, 应变越大其加工硬化越严重, 硬化后的强度也更大, 因此以仿真和理论计算的等效应力与等效应变的比值进一步来比较, 发现仿真结果为 1165, 理论计算结果为 1102, 其结果相差不大, 说明仿真结果具有一定的可信度。

从以上分析可得, 仿真结果与理论分段计算的结果虽然有一定差异, 但由于加工硬化现象比较复杂, 所以误差在可接受的范围内, 未来可以通过仿真分析整根轴的旋锻加工, 进而得到其旋锻加工硬化后的应力和应变分布。

### 3.3. 硬度测试



**Figure 9.** Hardness testing location of rotary forging shaft  
**图 9.** 旋锻轴硬度测试部位

为了进一步验证理论计算的准确性, 对旋锻轴经过旋锻加工后的不同区域截面进行硬度测试。实验仪器为上海理工大学电子布氏硬度计 HBE-3000A、JCD3 读数显微镜, 其中载荷要求为峰值载荷 750 N, 保荷时间 15 s。旋锻轴硬度测试部位如图 9 所示。测量结果如表 5 所示。

**Table 5.** Hardness measurement results of different cross-sections

**表 5.** 不同截面硬度测量结果

截面位置	硬度测量值/ HB						平均硬度/ HB
截面 A	188	189	191	190	188	187	189
截面 B	198	201	197	199	198	200	198
截面 C	181	179	181	180	182	178	180
截面 D	194	195	194	196	196	195	195
截面 E	150	156	153	151	151	148	151

从表 5 可以看出截面 E (坯料) 硬度测量值的平均值为 151 HB, 满足坯料要求的硬度值。在截面 B (变形量最大) 圆周位置 6 个点的硬度最大最小值相差 4 HB, 每个点硬度值与平均值绝对差值不超过 3 HB, 同样其他不同变形截面 A、C、D 硬度最大最小值相差都不超过 4 HB, 与平均硬度绝对差值都在 2 HB 左右, 这样就表明在同一截面得到了较为均匀的硬度值; 不同变形截面 A、B、C、D 测得的硬度平均值与截面 E (坯料) 的硬度平均值相比分别提高了 38、47、29、44 HB, 这表明加工硬化在不同截面程度是不一样的, 因此硬度测量值有很高的可靠性。

由表 5 可以看出由于加工硬化作用, 不同变形截面 A、B、C、D 的硬度值相比较, 坯料段的截面 E 都明显增大。其中截面 B (变形量最大) 硬度值最高, 为 198 HB, 转换成强度为 671 MPa, 与理论计算的 T9 区域的强度 677 MPa 很接近; 截面 D 硬度值次之, 为 195 HB, 转换成强度为 655 MPa, 与理论计算的 T5 区域的强度 660 MPa 近似; 截面 A 的硬度为 189 HB, 转换成强度为 635 MPa, 与理论计算的 T10 区域的强度 637 MPa 很接近。

由上面分析可得, 硬度测试结果与理论计算的结果很接近, 表明运用分段方法计算旋锻轴旋锻硬化后的轴向强度分布是可行的。

#### 4. 总结

本文研究了变截面变壁厚旋锻轴旋锻硬化后的轴向强度分布, 通过理论分段求解了不同外径和壁厚区域的截面轴向强度变化, 然后通过有限元仿真及硬度试验验证了部分区域的轴向强度变化计算的准确性, 具体结论如下:

- 1) 毛坯经过旋锻加工后其轴向方向上不同区域的外径和壁厚不同, 其加工硬化程度不同, 应变也不同, 因此其轴向强度分布也不均匀。
- 2) 无芯棒与含芯棒旋锻过渡段处斜面上的加工硬化最小, 强度也最低, 在进行后续工艺时, 该区域比较容易出现缺陷。
- 3) 仿真与硬度试验结果表明, 采用分段计算旋锻轴旋锻硬化后的轴向强度分布是可行的, 该方法为工程上通过毛坯强度来控制旋锻轴的加工硬化提供了一定的参考, 进而避免在旋锻轴制造过程中部分区域出现强度不足的现象。

#### 参考文献

- [1] 袁海兵, 杨益, 陈博文, 等. 浅谈中空轴锻件的径向锻造[J]. 锻造与冲压, 2025(1): 35-38.

- 
- [2] 周大隽. 金属体积冷成形技术与实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [3] 王建伟, 卢曦. 轿车等速万向传动中间轴的轻量化设计方法研究[J]. 上海理工大学学报, 2017, 39(2): 143-148.
- [4] Ghaei, A., Movahhedy, M.R. and Taheri, A.K. (2005) Study of the Effects of Die Geometry on Deformation in the Radial Forging Process. *Journal of Materials Processing Technology*, **170**, 156-163.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.04.100>
- [5] Ameli, A. and Movahhedy, M.R. (2006) A Parametric Study on Residual Stresses and Forging Load in Cold Radial Forging Process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **33**, 7-17.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-006-0453-2>
- [6] Sanjari, M., Saidi, P., Karimi Taheri, A. and Hossein-Zadeh, M. (2012) Determination of Strain Field and Heterogeneity in Radial Forging of Tube Using Finite Element Method and Microhardness Test. *Materials & Design*, **38**, 147-153.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.048>
- [7] Tian, T., Wu, Y., Zhan, W., Zhang, Y., Xu, H., Yang, J., et al. (2025) Lightweight Manufacturing via Rotary Swaging Process: Validation for Hollow Railway Motor Shafts. *Journal of Cleaner Production*, **495**, Article 145011.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145011>
- [8] 王聚存, 田天泰, 吴学深, 等. 空心薄壁细长轴旋转锻造过程材料流动规律研究[J]. 精密成形工程, 2021, 13(4): 102-108.
- [9] 李栋材, 卢曦, 孙子莹, 等. 某汽车旋锻轴毛坯尺寸要求研究[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(1): 72-76.
- [10] 李朋丽, 卢曦. 无芯棒旋锻周向进给参数变化匹配研究[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(5): 126-131.
- [11] 张琦, 张以升, 田天泰, 等. 旋转锻造连接工艺研究[J]. 塑性工程学报, 2024, 31(4): 274-280.
- [12] 龚政, 卢曦. 某汽车旋锻轴加工硬化特性实验研究[J]. 机械设计与制造, 2016(2): 177-180.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 33362-2016 金属材料 硬度值的换算[S]. 北京: 标准出版社, 2016.
- [14] 中国机械工程学会塑性工程学会. 锻压手册(1)——锻造(精) [M]. 第3版. 北京: 机械工业出版社, 2008.