

汽车变速器轴轻量化设计与旋转锻造仿真

张 琦, 田天泰, 张 毓, 韩 宾

(西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 汽车零部件的轻量化设计与制造是助力整车轻量化、实现绿色制造和降低汽车碳排放的重要途径。以汽车变速器轴为对象, 对其轻量化设计与高效精密制造进行了研究, 基于 Abaqus 静力分析研究了相同静扭载荷下变速器轴不同空心轻量化设计时的应力分布, 基于 FORGE 探究了变速器轴旋转锻造缩径过程的变形特征, 实现了对设计管料的旋锻工艺验证。结果表明: 空心设计能够很好地实现变速器轴的轻量化, 结合变壁厚设计能够改善应力分布、提升轻量化水平至 50% 左右; 使用旋转锻造工艺能够实现变速器轴的缩径和壁厚增厚, 保证良好的精度, 同时将成形损伤累积和成形力控制在较低水平。

关键词: 空心设计; 轻量化; 汽车变速器轴; 旋转锻造; 缩径; 变壁厚

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.05.035

中图分类号: U466; TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 05-0266-09

Lightweight design and rotary swaging simulation for automobile transmission shaft

Zhang Qi, Tian Tiantai, Zhang Yu, Han Bin

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The lightweight design and manufacturing of automobile parts is an important way to help vehicle lightweight, realize green manufacturing and reduce carbon emissions. Therefore, for the automobile transmission shaft, its lightweight design and efficient precision manufacturing were studied, and based on Abaqus static analysis, the stress distribution of transmission shaft with different hollow lightweight designs under the same static torsional load was studied. Furthermore, based on FORGE, the deformation characteristics of transmission shaft during the rotary swaging diameter reduction process were explored, and the rotary swaging process verification on the designed tube material was realized. The results show that the hollow design can well realize the lightweight of transmission shaft, and combined with the variable wall thickness design can improve the stress distribution and increase the lightweight level to about 50%. The use of rotary swaging process can reduce the diameter and thicken the wall thickness of transmission shaft, ensuring good accuracy while keeping forming damage accumulation and forming forces controlled at a low level.

Key words: hollow design; lightweight; automobile transmission shaft; rotary swaging; diameter reduction; variable wall thickness

能源与资源的高效利用已成为世界范围内的一大趋势, “双碳”目标的提出正在有力地推动我国制造业向更轻便、更快速、更精密的方向发展。汽车行业在能源消耗、温室气体与污染物排放方面仍然占据着重要的比例^[1], 研究表明, 车辆轻量化是降低能耗的最有效措施之一, 汽车每减少 100 kg 重量, 百公里可节省 0.3~0.5 L 的燃油, 亦即百公里减少 8~11 g 的 CO₂ 排放^[2]。轻量化设计和制造有助于降低整车的重量和碳排放, 而汽车零部件的轻

量化设计和高效近净制造对整车轻量化至关重要。

轴类零件是汽车传动系统中的关键零部件, 包括汽车转向轴、齿轮箱中的驱动轴、车辆动力传动系统中的半轴和电机轴等^[3]。这一类零件需要传递力矩, 持续承受载荷, 在服役过程中要求他们具有一定的刚度、抗疲劳性能和吸能功能^[4]。装备制造业水平的不断发展, 对轴类零件的设计制造提出了更多的要求, 要求实现汽车传动系统用轴类零件轻量化和性能的良好融合, 因此, 汽车轴类零件的轻量化设计制造技术尤为重要。

在汽车轴类零件的轻量化设计方面, 常艳昌等^[5]针对商用车前轴, 基于有限元分析, 通过优化尺寸设计, 实现了 11 kg 的减重; 汪朝晖等^[6-7]基于遗传算法实现了汽车驱动轴的多目标轻量化优化设

收稿日期: 2023-02-16; 修订日期: 2023-05-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52275375); 陕西省重点研发计划 (2021GXLH-Z-037)

作者简介: 张 琦 (1978-), 男, 博士, 教授

E-mail: henryzhang@mail.xjtu.edu.cn

计且满足了强度设计要求,并提出采用冷精锻和花键轴向冷挤压技术试制变径全空心半轴,以提高产品金属流线的连续性与一致性,增加使用寿命;承姿辛等^[8]基于支持向量机回归代理模型实现了空心半轴的优化设计,在进一步降低重量的同时实现了可靠度的提升;公彦军等^[9]分析了搅拌摩擦焊和闭式模锻两种工艺下重卡传动花键轴的中空轻量化,采用闭式模锻工艺实现了中空化减重 1.46 kg,并满足了扭转载荷的设计要求。

旋转锻造技术是一种可用于轴管类零件加工的局部连续、无屑的精密渐进成形工艺。在旋转锻造过程中,一般有 4 个锻模均匀排布在坯料的外围圆周方向,沿径向向高频率短行程冲击,同时围绕坯料旋转,坯料发生局部均匀缩径^[10]。旋转锻造可以缩减轴管类零件的直径、调节空心轴壁厚而不影响纤维流动,从而保证零件力学性能的稳定^[11]。旋转锻

造工艺的成形效率高、表面成形质量好且具有残余压应力、易形成变截面变厚度的结构,可使材料利用率提高^[12],在航空航天和汽车船舶领域被广泛应用,用于加工实心台阶轴、锥形轴、空心轴等零件。对汽车变速器轴采用空心轻量化设计,再利用旋转锻造技术进行局部成形,能够很好地实现汽车传动轴类零件的短流程制造和绿色制造。

1 研究对象

1.1 零件与材料

本文以某型号汽车变速器轴为研究对象,其结构如图 1 所示,原零件设计为实心轴,总长度超过 800 mm,两端为外花键,除外花键以外的中间主体部分设计有小台阶,但外径仅在 $\Phi 1.5$ mm 以内变化。变速器轴在服役过程中主要承受扭矩以实现传动。

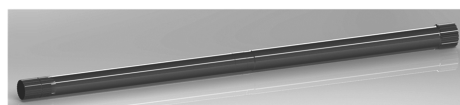
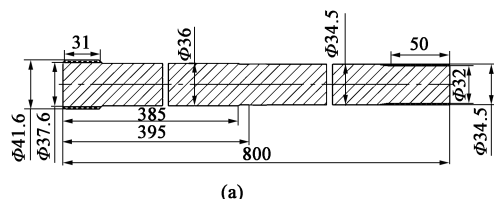


图 1 某汽车变速器轴尺寸图 (a) 和实物图 (b)

Fig. 1 Size drawing (a) and physical drawing (b) of an automobile transmission shaft

图 2 为轻量化设计与加工流程,对变速器轴采取空心轻量化设计后,以最大外径为基础设计初始管坯,从管坯一端采用旋转锻造进行缩径,在减小外径的同时强化材料,最后对外圆进行加工。

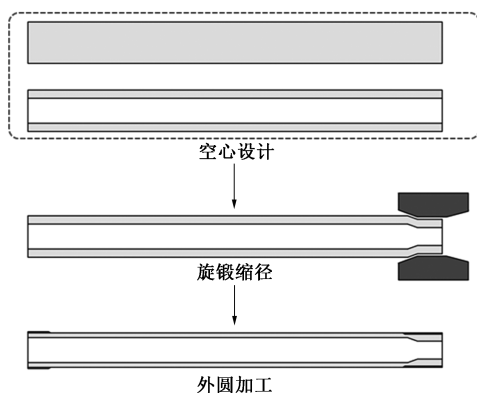


图 2 变速器轴的轻量化设计与加工流程

Fig. 2 Lightweight design and processing flow of transmission shaft

变速器轴的材料采用 42CrMoH 合金结构钢,其塑性硬化规律由 Hansel-Spittel 本构模型确定,如式 (1) 所示。旋转锻造变形一般视为冷变形过程,图 3 为 42CrMoH 合金结构钢在 25 °C 条件下不同应变速

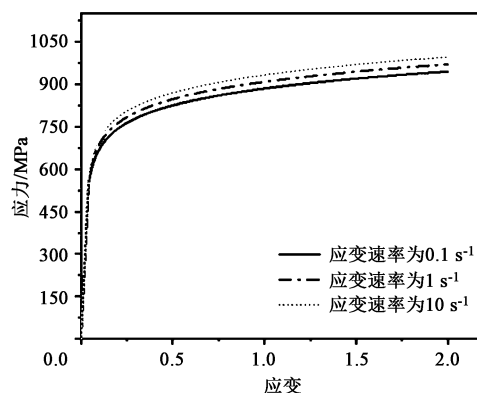


图 3 不同应变速率下的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves under different strain rates

率的应力-应变曲线。此外,材料的弹性模量为 206 GPa,泊松比为 0.3。

$$\sigma = 989.82 \times e^{-0.00064T} \times \varepsilon^{0.8896} \times \dot{\varepsilon}^{0.0114} \times e^{\frac{-0.008}{\dot{\varepsilon}}} \quad (1)$$

式中: σ 为流动应力; T 为温度; ε 为应变; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率。

1.2 中间主体部分强度理论计算

变速器轴零件结构的细节较复杂,因此,忽略掉零件上细小的特征,将中间主体部分视为外径为

$\Phi 36$ mm 的均匀管料进行强度理论计算以指导形成空心设计。零件工况为承受 $1500 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的静扭转力矩, 按式 (2)~式 (5) 计算最大切应力与扭转角度。

$$W_p = \frac{\pi D^3}{16} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] \quad (2)$$

$$I_p = \frac{\pi}{32} (D^4 - d^4) \quad (3)$$

$$\tau_{\max} = \frac{|M|}{W_p} \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{|M| l}{GI_p} \quad (5)$$

式中: W_p 为抗扭截面模量, m^4 ; I_p 为极惯性矩, m^4 ; τ_{\max} 为最大切应力, Pa; φ 为扭转角度, rad; D 为空心管外径, m; d 为空心管内径, m; M 为所受扭矩, ($\text{N} \cdot \text{m}$); l 为空心管长度, m; G 为切变模量, Pa。

图 4 为设计不同内孔直径来实现轻量化时的最大切应力与扭转角度的变化曲线, 两者的变化趋势一致, 均在内孔直径大于 $\Phi 10$ mm 之后出现比较明显的上升, 考虑工程实际应用一般取安全系数接近 2, 即轴扭转屈服强度为其最大切应力的 2 倍, 因此, 最大切应力仍在可接受范围以内, 参考理论计算可以将内孔直径限制在 $\Phi 25$ mm 以下。

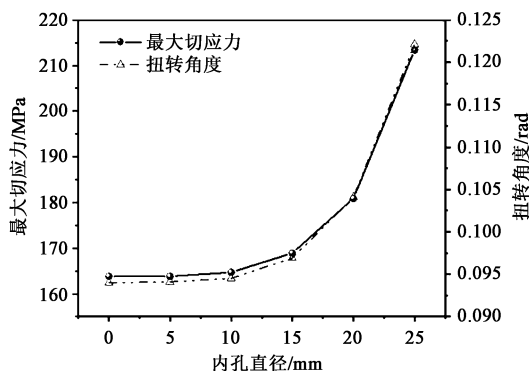


图 4 简化模型理论计算结果

Fig. 4 Theoretical calculation results of simplified model

2 空心设计有限元分析

2.1 通孔空心设计分析

基于 ABAQUS 进行了静扭转仿真。变速器轴两端花键部分结构的细节较多而中间主体部分结构规则, 因此, 花键部分采用四面体网格, 中间主体部分采用六面体网格, 网格类型分别为 C3D8R 与 C3D10。固定一端的花键表面, 在另一端花键表面

上施加集中扭矩 $1500 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

在相同的扭矩作用下, 不同内孔直径时变速器轴的等效应力如图 5 所示, 为便于比较, 将应力范围设置在 $100 \sim 400 \text{ MPa}$ 。从仿真结果可知: 在扭矩作用的所有情况下, 应力均在横截面沿径向呈现层状分布, 且以外表面阶梯为界呈现明显的两段式结构; 随着内孔直径扩大至 $\Phi 25$ mm, 表层应力大幅上升, 超过 400 MPa , 同时由于内孔的扩大, 导致内外应力梯度降低, 从而呈现整体较高的应力状态。与简化为均匀管料的强度理论计算结果相比, 有限元计算的中间主体部分的等效应力明显更高, 这说明变速器轴外表面的小台阶结构和两端不对称的花键结构对变速器轴中间主体部分的应力分布有较大的影响。

变速器轴表面相同位置沿轴向的等效应力分布如图 6a 所示, 应力以外表面台阶处为界, 呈现明显的两段均匀分布, 同时在台阶处形成了局部应力集中。轻量化设计内孔并未对应力的整体分布产生明显影响, 当开孔直径达到 $\Phi 20$ mm 后, 整体平均应力开始快速上升而不再呈近似线性增长。中间主体部分的最大等效应力分布如图 6b 所示, 上升趋势与图 4 中理论计算的最大切应力、扭转角度相近, 这说明尽管变速器轴的结构增大了应力, 但仍可用于预测中间主体部分的应力趋势。

变速器轴两端的花键部分也需要重点考量, 但花键处齿形复杂、有多种槽形结构, 划分的网格很难得到精准的计算结果, 因此, 以原始实心轴为基准, 考量相对应应力大小以反映空心轻量化设计对变速器轴静扭承载能力的影响。图 7 为两端花键处的综合最大应力分布, 宏观上各轻量化设计的外圆结构保持一致, 但微结构、网格划分等因素造成的应力集中使得每种情况下的最大应力均偏大。可以发现, 只有当内孔直径达到 $\Phi 25$ mm 时, 最大应力显著上升, 接近 2000 MPa , 其他设计下最大应力均在 $1600 \sim 1800 \text{ MPa}$ 之间, 这说明当内孔直径大于 $\Phi 20$ mm 时, 会显著提高两端花键部分的应力集中效应, 对花键寿命、变速器轴整体承载能力造成不利影响。

将应力范围设置为 $620 \sim 1600 \text{ MPa}$, 图 8 为不同空心设计下变速器轴一端花键处的应力分布演变情况, 可以发现仅有当内孔直径达到 $\Phi 25$ mm 时, 花键处的高应力区域面积占比大幅增长, 沿轴向在花键齿根扩展直至花键末端。因此, 相比于采用 $\Phi 20$ mm 的内孔设计时中间主体部分应力已经显著增长的情况, 需要更大的内孔 ($\Phi 25$ mm) 才会显

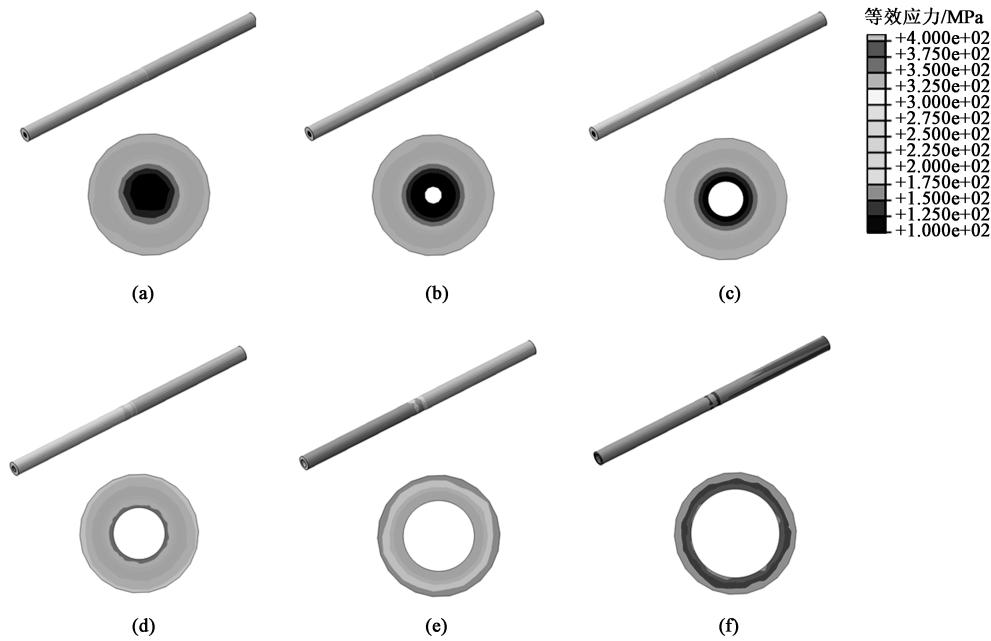


图 5 相同扭矩作用下不同内孔直径时变速器轴的等效应力云图

(a) $\Phi 0$ mm (b) $\Phi 5$ mm (c) $\Phi 10$ mm (d) $\Phi 15$ mm (e) $\Phi 20$ mm (f) $\Phi 25$ mm

Fig. 5 Equivalent stress nephograms of transmission shaft with different diameters of inner hole under same torque

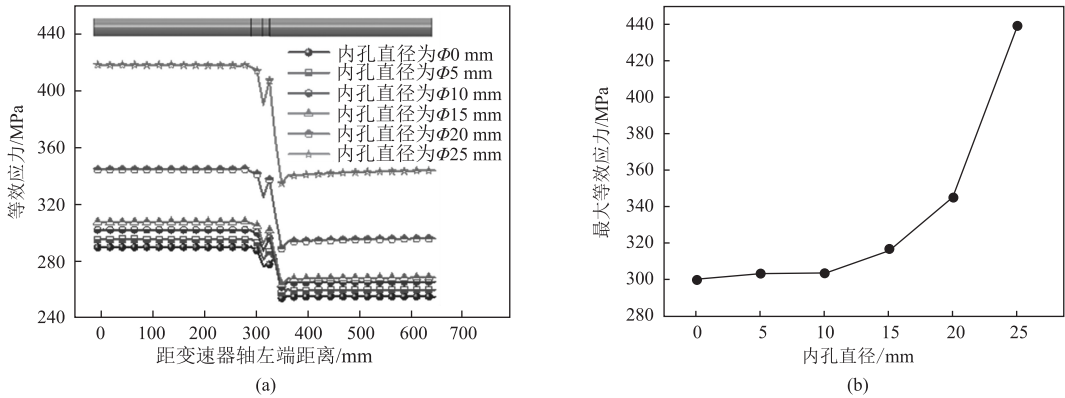


图 6 等效应力分布情况

(a) 表面沿轴向应力分布 (b) 中间主体部分最大等效应力分布

Fig. 6 Equivalent stress distributions

(a) Axial stress distributions on surface (b) Maximum equivalent stress distribution of intermediate main part

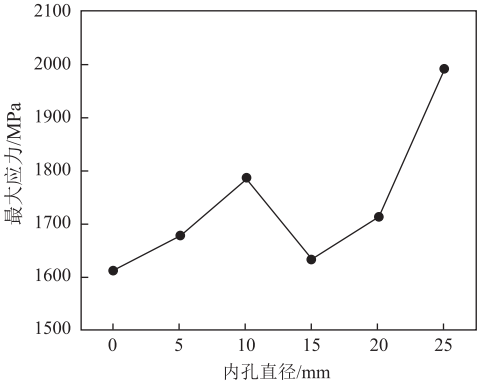


图 7 两端花键处的最大应力分布

Fig. 7 Maximum stress distributions at splines of both ends

著提升花键处的应力集中程度。

图 9 为不同内孔直径设计下的减重率，与应力上升趋势相比，减重率上升较为平缓，当内孔直径达到 $\Phi 10$ mm 以上时能够显著提升变速器轴的轻量化水平，结合应力水平来看，当空心内孔直径维持在 $\Phi 10$ mm 以下时，基本可以认为对中间主体部分应力无影响。

为使设计与分析结果能为其他结构与尺寸的轴类零件设计提供参考，采用内外径比来分析轻量化设计效果，即：当内外径比达到 0.28 以上时，能够显著提升变速器轴的轻量化水平至 10% 以上；当内

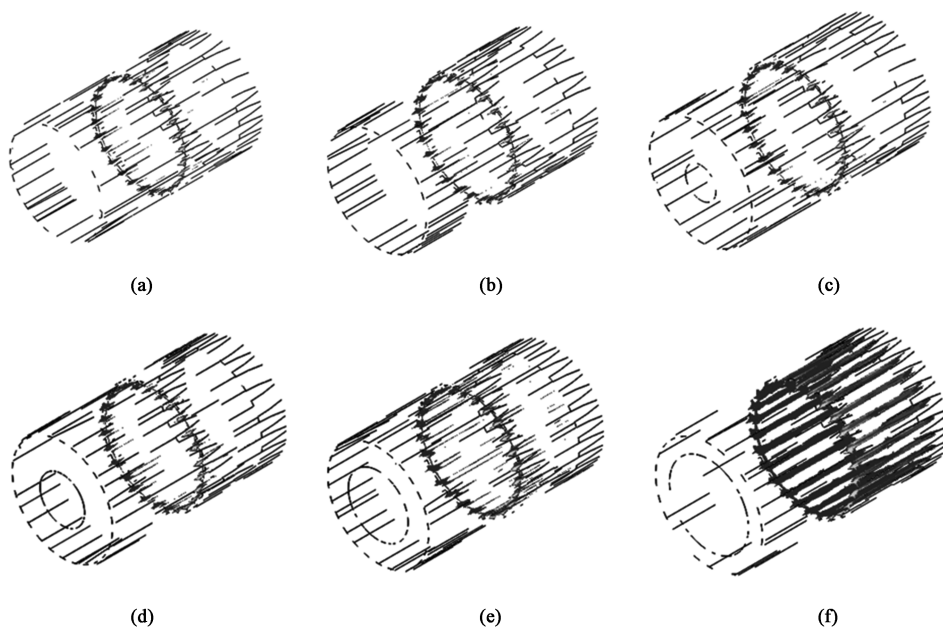


图 8 不同内孔直径设计下花键处的高应力区域

(a) $\Phi 0$ mm (b) $\Phi 5$ mm (c) $\Phi 10$ mm (d) $\Phi 15$ mm (e) $\Phi 20$ mm (f) $\Phi 25$ mm

Fig. 8 High stress areas at spline under different diameters of inner hole design

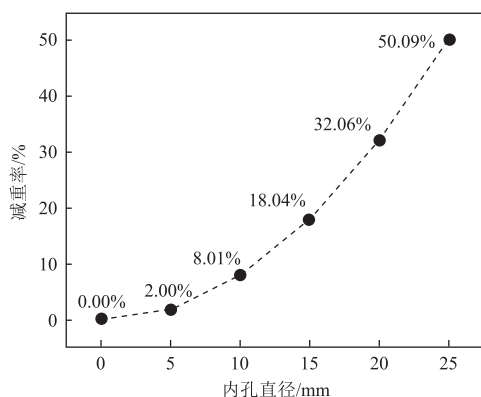


图 9 不同内孔直径设计下的减重率

Fig. 9 Weight reduction under different diameters of inner hole design

外径比达到 0.70 以上时, 将大幅提升变速器轴中间主体部分的应力且加剧两端花键处的应力集中。

2.2 变壁厚空心设计分析

由上文可知, 当空心内孔直径达到 $\Phi 25$ mm 时, 变速器轴的承载能力与安全性将大幅降低, 针对这一问题, 可以采用变壁厚空心设计进行花键处的局部增强, 以实现变速器轴中间主体部分最大程度的轻量化。基于此, 将变速器轴一端的花键处壁厚增厚 2.5 mm 后同样施加 $1500 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的扭矩, 结果如图 10 所示。中间主体部分的应力分布变化很小, 可认为花键局部变壁厚不影响其应力分布 (图 10a 和图 10d); 采用变壁厚设计后, 键槽内应力 $> 620 \text{ MPa}$ 的区域减少, 沿管壁径向的应力分布更加均匀 (图

10b 和图 10e); 设置应力范围为 $620 \sim 1600 \text{ MPa}$, 可观察到高应力区域面积大幅减少, 原本在花键齿根处沿轴向大范围分布的高应力得到显著降低, 达到图 8 中采用 $\Phi 20$ mm 通孔空心设计时的水平 (图 10c 和图 10f)。以上结果表明, 变壁厚设计能够大幅改善花键局部的应力分布, 减少高应力和危险区域, 提高变速器轴整体的安全系数。2.5 mm 变壁厚设计下的减重率为 48.65%, 与 $\Phi 25$ mm 通孔空心设计相比, 下降很少, 因此, 采用变壁厚设计能够显著提升轻量化水平。

3 旋转锻造有限元分析

基于 Transvalor FORGE 进行了旋转锻造工艺仿真。为缩短计算时间, 将旋转锻造模具视为刚体。整体采用四节点四边形网格划分, 同时对变形部分的网格设置随动细化区域以保证模拟精度, 网格大小为未变形区域的 $1/3$, 共产生约 21500 个元素和 5200 个节点。由于旋转锻造过程中的变形较大, 需要自适应重新网格化以保持网格质量。工件的网格根据模具接触处的曲率进行细化。摩擦模型选用 Coulomb-Tresca 模型^[13], 摩擦因数 μ 和摩擦剪切系数 m 分别设置为 0.05 和 0.10。模具温度和环境温度保持在 25°C 。模具运动速度设置为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。模型的热条件为: 热导率为 $173 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$, 比

到, 内孔转折处同样具有较高的应力, 达到了 330 MPa 以上。管料前端已整形区域和后端未进模区域的应力保持在 55 MPa 以下的低应力水平, 整体上旋转锻造缩径过程造成的应力并不高。选取图 12 中 3 个横截面来观察截面的应力分布, 可以发现: 管料前端已整形段 (截面 1) 的应力沿径向呈现双峰形态, 内外表面应力高于管壁中间区域; 管料缩径段 (截面 2) 与模具接触的区域应力呈现局部高值, 达到 480 MPa 以上, 与之相应的为内表面应力在合模间隙处也呈现高值, 达到 370 MPa 左

右;管料进模处(截面3)的应力水平相对较低,仅有内表面因缩径段的变形产生局部高于 220 MPa 的应力,沿径向至外表面管壁的整体应力较均匀。

图 13 为旋转锻造管材的等效应变分布情况,整体应变分布相似,应变均在 0.30 以下且沿径向呈现层状分布。近端面区域沿径向全壁厚应变在 0.18 以上。其他变形部分近内表面处应变在 0.20 左右,沿径向向外表面降低直至低于 0.10。截取不同部位的横截面观察应变分布:在接近管料端面的内表面区域,应变可超过 0.28,整体应变较大;中间变形区域呈现显著的应变分层现象,内表面应变最大,各应变层厚度相对均匀;在接近管料过渡区域的横截面上,应变也呈现分层现象,但平均应变更低,且在最外表面处存在明显的低应变区域。

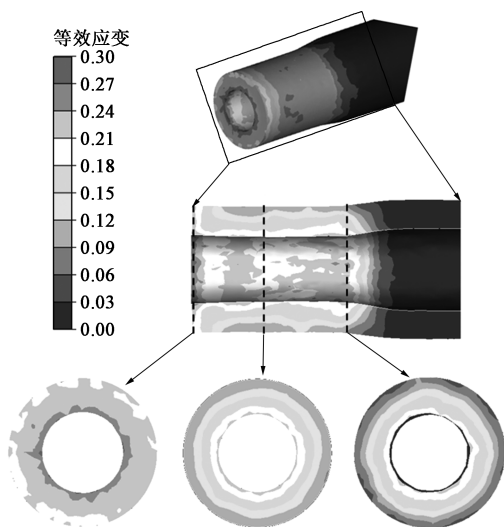


图 13 旋转锻造管材等效应变分布

Fig. 13 Equivalent strain distributions of rotary swaged tube

管材旋转锻造部分的外径由于旋转锻造模具整形区的约束尺寸相对稳定,因此,近端面相对偏大的应变会对内孔尺寸的均匀性产生影响。图 14 为对仿真结果中近端面(外内孔)、中部区域(中内孔)、近进料区域(里内孔)的内孔直径的拟合。中内孔和里内孔的内径基本保持一致,拟合半径分别为 9.844 和 9.874 mm,而外内孔的半径明显发生了扩大,达到了 10.417 mm。若以中内孔为标准参考,在旋转锻造成形过程完成后,外内孔直径将发生 5.82% 的扩大。这种扩大与摩擦条件存在一定的关系,减小管料外表面与模具间的摩擦,将有助于外表面材料轴向流动,促进管壁应变沿径向的均匀性。

在端面从外表面沿径向取 3 个跟踪点(图 15a)

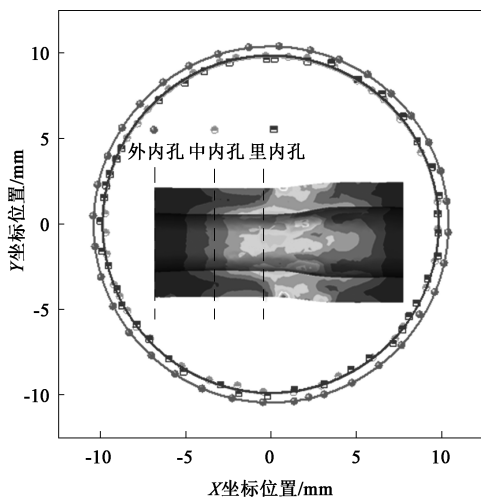


图 14 旋转锻造后不同位置的内孔直径

Fig. 14 Diameters of inner hole at different positions after rotary swaging

来观察旋转锻造全过程的轴向速度演化,如图 15 所示。在旋转锻造部分开始发生明显缩径时,由于外部旋转锻造模具表面摩擦力的带动,使得速度分布由外至内依次降低;当旋转锻造部分进入模具整形区时,管料变形进入稳定阶段,内表面由于不受模具约束,速度并未下降,始终维持在 $60 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,内表面总轴向位移略高于外表面与中部区域,这与内表面的等效应变结果相吻合。

旋转锻造冷变形过程中,需要特别关注内壁是否因径缩过程产生微裂纹等缺陷,因此,有必要对零件的损伤积累进行研究^[14]。图 16 为采用 Normalized Latham Cockcroft (N-LC) 准则的损伤结果,观察到损伤主要集中于成形主体部分,近端面和近进料处分布较少。损伤呈现显著的分层特征,由外表面向内表面递增,但总体上均处于较低水平,不足以对 42CrMo 钢材料为基础的零件性能产生实质性影响^[15]。因此,在仿真设计的工艺量下,能够保证旋转锻造成形的变速器轴不发生过量损伤积累,另一方面,因为外表面几乎无损伤,而变速器轴承受的扭矩在外表面最大,因此,截面损伤分布与扭矩分布的趋势相同,能够进一步发挥变速器轴的潜在性能。

图 17 为管料旋转锻造缩径过程中模具的成形力。4.1 s 以前管料前端尚未进入模具整形区,成形力随着进料深度近似呈线性快速上升达到约 126 kN; 4.1 s 以后已有管料进入模具整形区,模具成形力出现拐点,转为缓慢上升。全过程中模具成形力均保持在 160 kN 以下,普通的旋转锻造机即可实现加工。

综上所述,通过有限元仿真可以发现:空心轴

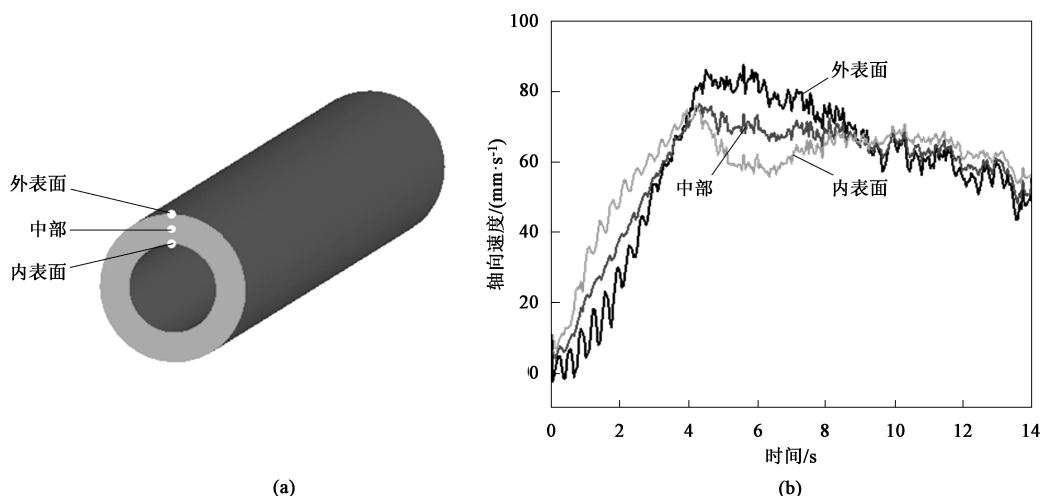


图15 旋转锻造全过程端面不同位置的最大速度

(a) 跟踪点位置 (b) 轴向最大速度

Fig. 15 Maximum velocities at different positions of end face in whole process of rotary swaging

(a) Tracking point positions (b) Axial maximum velocity

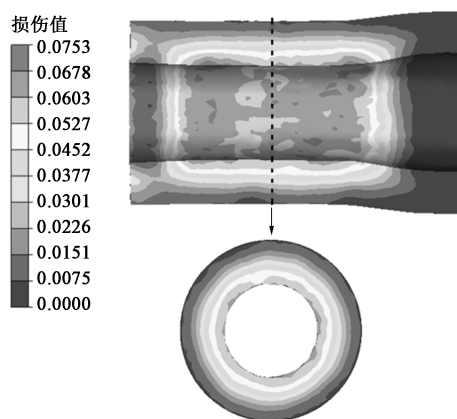


图16 旋转锻造后的损伤分布

Fig. 16 Damage distributions after rotary swaging

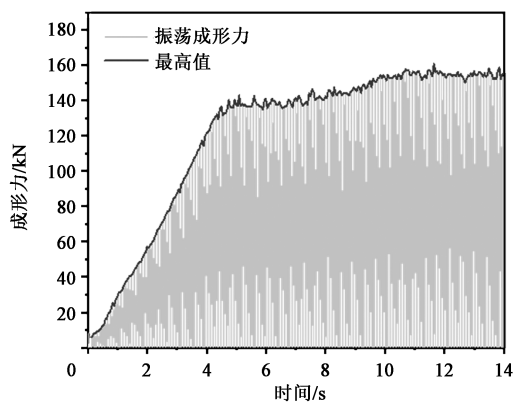


图17 旋转锻造过程的成形力分布

Fig. 17 Forming force distributions of rotary swaging process

类零件采用无芯轴旋转锻造的过程中,应变由内壁向外表面减小;空心轴旋转锻造缩径过程的各项参数

主要受管料位置与加工状态的影响,当管料开始进入模具整形区以后,成形力和流动速度趋于稳定,成形损伤控制在低水平;摩擦条件造成的内、外表面的流动速度差使得变速器轴端部在整形区内逐渐发生扩大,以管料直径为参考,扩大范围在6%以下。

4 结论

(1) 空心设计能够很好地实现变速器轴的轻量化,当内外径比达到0.28以上时,能够显著提升变速器轴的轻量化水平至10%以上;当内外径比达到0.70以上时,将大幅提升变速器轴中间主体部分的应力且加剧两端花键处的应力集中现象。

(2) 变壁厚设计能够大幅改善花键局部的应力分布,减少高应力和危险区域,提高变速器轴整体的安全系数,进一步提升轻量化水平至50%左右。

(3) 旋转锻造工艺能够很好地实现花键处的缩径增厚,整体成形应力较低且损伤积累较小,端部内孔直径有一定程度扩大,但成形段其他区域的内孔尺寸均匀,成形精度较高,且全过程成形力在160 kN以下。

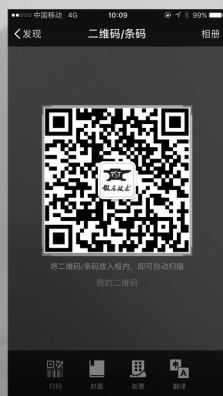
参考文献:

- [1] Giuseppe I. Manufacturing strategies for efficiency in energy and resources use: The role of metal shaping processes [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142 (4): 2872-2886.
- [2] 范子杰, 桂良进, 苏瑞意. 汽车轻量化技术的研究与进展 [J]. 汽车安全与节能学报, 2014, 5 (1): 1-16.
Fan Z J, Gui L J, Su R Y. Research and development of automotive lightweight technology [J]. Journal of Automotive Safety and

- Energy, 2014, 5 (1): 1-16.
- [3] Gronostajski Z, Pater Z, Madej L, et al. Recent development trends in metal forming [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2019, 19 (3): 898-941.
- [4] 陈建国, 袁海兵. 汽车转向轴扭转疲劳试验台开发 [J]. 机电工程技术, 2013, 42 (12): 1-3.
Chen J G, Yuan H B. Development of test stand for torsional fatigue test of vehicle steering shaft [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2013, 42 (12): 1-3.
- [5] 常艳昌, 彭浩, 张晓虎. 商用车 5T 前轴结构轻量化设计方法 [J]. 汽车实用技术, 2022, 47 (10): 38-43.
Chang Y C, Peng H, Zhang X H. Commercial vehicle 5T front axle structure lightweight design method [J]. Automobile Applied Technology, 2022, 47 (10): 38-43.
- [6] 朱发渊, 汪朝晖, 吕密. 基于遗传算法的汽车驱动轴多目标轻量化优化设计 [J]. 机械设计与制造, 2015, (3): 87-90.
Zhu F Y, Wang Z H, Lyu M. Multiple objective lightweight optimization design of vehicle drive shaft based on genetic algorithm [J]. Machinery Design & Manufacture, 2015, (3): 87-90.
- [7] 汪朝晖, 朱发渊, 吕密, 等. 转向驱动桥变径全空心半轴的设计及力学特性 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43 (2): 40-44.
Wang Z H, Zhu F Y, Lyu M, et al. Design of steering drive axles variable diameter hollow half shaft and its mechanical characteristics [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2015, 43 (2): 40-44.
- [8] 承姿辛, 刘玉敏, 邱光琦. 基于可靠性优化的空心半轴轻量化设计 [J]. 机械设计, 2023, 40 (1): 34-39.
Cheng Z X, Liu Y M, Qiu G Q. Lightweight design of hollow half shaft based on reliability optimization [J]. Journal of Machine Design, 2023, 40 (1): 34-39.
- [9] 公彦军, 李萌芳, 高蕊. 重型商用车传动轴花键轴轻量化研究 [J]. 重型汽车, 2021, (6): 11-12.
- Gong Y J, Li M F, Gao R. Research on lightweight of spline drive shaft spline of heavy commercial vehicles [J]. Heavy Truck, 2021, (6): 11-12.
- [10] 邵清安, 李治华, 孙立群, 等. 航空发动机塑性成形技术的应用与展望 [J]. 航空制造技术, 2014, 451 (7): 34-39.
Tai Q A, Li Z H, Sun L Q, et al. Application and prospect of aeroengine plastic forming technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 451 (7): 34-39.
- [11] 魏科, 马庆, 徐勇, 等. 大型/复杂模锻件省力成形工艺研究进展 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (5): 166-168.
Wei K, Ma Q, Xu Y, et al. Research progress of less-loading forming technology for large-sized/complex die forgings [J]. Journal of Plasticity Engineering. 2021, 28 (5): 166-168.
- [12] 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.
Li D C, Lu X, Sun Z Y, et al. Investigation on workblank size requirements of rotary-swaging shafts of an automobile [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (1): 72-76.
- [13] Zhang D W, Xu F F, Yu Z C, et al. Coulomb, Tresca and Coulomb-Tresca friction models used in analytical analysis for rolling process of external spline [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 292: 117059.
- [14] Yang Y Z, Fan L X, Xu C. Formation criterion of fissure defects in the inner wall of the radial forged steel tube [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 123: 3647-3655.
- [15] 单隼红, 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.
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.

欢迎关注“锻压技术杂志”微信公众号

@杂志动态 @行业信息 @企业宣传



• 锻造 • 冲压 • 钣金 • 模具 • 加热 • 标准化 •