

超高强度钢大型深盲孔锻件拔长工艺仿真

宁 静¹, 杨 鹏², 洪 松³, 林 晨⁴, 苏 杰¹, 孟凡星³

(1. 钢铁研究总院有限公司 特殊钢研究所, 北京 100081; 2. 大冶特殊钢有限公司 特冶产品研究所, 湖北 黄石 435001;
3. 中国兵器工业集团航空弹药研究院有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150030; 4. 武汉重工铸锻有限责任公司 技术中心, 湖北 武汉 430084)

摘要: 超高强度钢大型深盲孔锻件在芯轴拔长过程中采用单一压下率和连续 45° 翻转工艺, 锻件头部的实心锻透性及整体均匀性较差。通过 DEFORM-3D 有限元模拟和分析, 确定了头、尾部变形角与压下率的关系, 制定了压下率为 8%、10% 和 45°、60° 新翻转工艺的不同组合的对比实验。结果表明: 深盲孔锻件头部采用 10% 压下率与 60° 翻转的组合工艺, 可改善锻件头部的锻透性及变形均匀性; 尾部采用 8% 压下率与 45° 翻转的组合工艺, 能够有效地控制尾部内孔畸变率并保证变形均匀性。在此基础上, 合理设计头部锥度, 可使头部变形量达到与尾部相当的水平, 进一步提升头部的锻透性, 完成近终成形。研究结果在工业化试制中得到了应用和验证, 采用新工艺成形的大型深盲孔锻件的头尾性能均匀性明显改善。

关键词: 深盲孔锻件; 芯轴拔长; 锻透性; 变形均匀性; 压下率; 连续 45° 翻转

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.07.008

中图分类号: TG316.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 07-0050-08

Simulation on drawing process of large deep blind hole forgings for ultra-high strength steel

Ning Jing¹, Yang Peng², Hong Song³, Lin Chen⁴, Su Jie¹, Meng Fanxing³

(1. Institute for Special Steels, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China;
2. Special Metallurgical Products Research Institute, Daye Special Steel Co., Ltd., Huangshi 435001, China;
3. NORINCO Group Air Ammunition Research Institute Co., Ltd., Harbin 150030, China;
4. Technology Center, Wuhan Heavy Industry Casting & Forging Co., Ltd., Wuhan 430084, China)

Abstract: For the large deep blind hole forgings of ultra-high strength steel, a single reduction rate and continuous 45° turning process is adopted in the mandrel drawing process, and the solid forging penetration and overall uniformity of the forgings head are poor. Therefore, the relationship between the deformation angle of head and tail and the reduction rate was determined by DEFORM-3D finite element simulation and analysis, and the comparative experiments of different combinations for the reduction rate (8%, 10%) and the new turning process (45°, 60°) were formulated. Results show that the combination process of the reduction rate of 10% and the turning process of 60° improves the forging penetration efficiency and the deformation uniformity of the forgings head, while the combination process of the reduction rate of 8% and the turning process of 45° effectively controls the distortion rate of inner hole in the tail and ensures the uniformity of deformation. Based on this, the rational design of head taper makes the deformation amount of head reach the same level as that of tail, further improves the forging penetration efficiency of head and completes the near-end-forming. Thus, the research results are applied and verified in the industrial trial production, and the performance uniformity of head and tail for the large deep blind hole forgings formed by the new process is significantly improved.

Key words: deep blind hole forgings; mandrel drawing; forging penetration efficiency; deformation uniformity; reduction rate; continuous 45° turning

对于大型深盲孔部件成形工艺, 若直接机加工成形会造成材料利用率低, 且切断工件的金属流线,

降低整体性能, 其中超高强度钢对切削模具损耗非常大^[1]; 而一步挤压成形对设备挤压力要求极高, 易损坏设备, 降低其使用寿命。因此, 本研究提出热挤压与芯轴拔长组合工艺来生产大型深盲孔锻件, 将圆柱坯料热挤压出深盲孔后, 锻件穿芯棒经多次滚方及多道次拔长, 再进行平整及滚圆工序至近成品尺寸, 后期少量机加工至成品部件, 如图 1 所示。采用本工艺可提高工件的锻造比及力学性能,

收稿日期: 2022-09-14; 修订日期: 2022-12-20

作者简介: 宁 静 (1988-), 女, 硕士, 高级工程师

E-mail: ningjing@necast.com

通信简介: 苏 杰 (1965-), 男, 博士, 正高级工程师

E-mail: sujie@necast.com

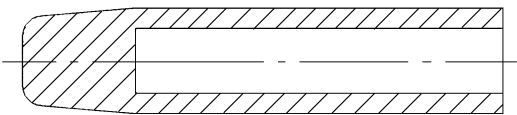


图 1 超高强度钢大型深盲孔部件示意图
Fig. 1 Schematic diagram of large deep blind hole component for ultra-high strength steel

同时降低生产成本、设备损耗及缩短机加工周期。但工艺上也存在诸多难题，如挤压时存在“闷车”，芯轴拔长时操作难度大、锻件头尾变形程度差异大，头部实心锻透性不佳，周向变形不均匀，孔底折叠，芯棒“退芯”等。

针对大型深盲孔锻件芯轴拔长工艺的制定，工厂一般依靠经验指导加工，锻件成品质量的稳定性无法得到保证。目前，关于超大规格实心棒、空心筒形件及厚管壁件的成形效果的研究已有报道，诸多学者对此已开展相关研究，孙志仁等^[2]建立了 40Mn 钢动态再结晶模型，并对大型轴类锻件锻造工艺进行了模拟预测，获得了变形工艺和晶粒尺寸的关系。王连东等^[3]通过数值模拟研究 $\Phi 1365$ mm 阶梯轴拔长工艺，确定翻转角度与压下量的匹配关系，提高工件的锻透性及控制轴线偏移问题。潘品李等^[4]研究核电主管道用实心钢锭在拔长过程中锻件周向变形不均匀问题，提出了“三压法”翻转工艺，有效地改善了锻件周向的变形均匀性。刘敏等^[5]通过有限元数值模拟及理论推导，研究 20Mn5 超大型空心钢锭芯轴拔长过程中的变形均匀性及压实效果，设计不同的 V 型砧及工艺优化来改善锻件变形均匀性及压实效果。田晨晟^[6]采用有限元数值模拟结合缩比实验的方法，对深盲孔、半盲孔件的锻造关键工艺参数、缺陷控制等进行了系统研究，验证了成形工艺选择的合理性。

而超高强度钢大型深盲孔锻件的芯轴拔长过程更加复杂，其实际难度更大，关于改善深盲孔锻件芯轴拔长成形效果的研究鲜有报道。本文针对超高强度钢大型深盲孔锻件在拔长过程中，头尾部组织性能分布严重不均匀等实际问题，采用理论分析和数值模拟相结合的研究方式，对锻件的变形特征进行分析，给出不同部位拔长时压下率与新翻转工艺的最佳匹配，设计锻件头部锥度，以达到改善锻件头部锻透性、锻件周向均匀性的目的，为国产大型深盲孔锻件锻造工艺的制定提供理论指导。

1 有限元模型建立

DEFORM-3D 有限元模拟可实现全工步的锻造过程模拟，已成为大型锻件成形工艺的有效研究手段，同时，能够为热加工工艺制定、成形缺陷预测等问题提供理论基础^[7-9]。本研究依据某锻造厂现场条件，确定模拟工艺参数及边界条件，如表 1 所示，各模型尺寸按实际尺寸 1 : 1 比例建模。原始坯料尺寸为 $\Phi 1120$ mm/ $\Phi 1160$ mm $\times 1700$ mm 的实心圆柱，经 45 MN 模锻压机挤压出内孔尺寸为 $\Phi 432$ mm $\times 1400$ mm 的深盲孔后，送进 1250 ℃ 加热炉保温 6 h，为拔长工艺做准备。芯轴拔长模具采用上平砧、下 V 型砧（砧宽均为 600 mm，V 角的角度为 112°）及芯棒（直径为 $\Phi 412$ mm），其三维模型如图 2 所示。采用 DEFORM-3D 模拟深盲孔件芯轴拔长工艺，为实现芯棒随动，迭代器采用 Sparse 矩阵求解器。上、下砧及芯棒材料选取为 H-13 钢，工件材料为高强韧超高强度钢 G31^[10]，其化学成分如表 2 所示，材料的热变形方程由 Gleeble-3800 热力学模拟实验机测定并计算得到。

表 1 仿真模型中的工艺参数及边界条件

Table 1 Process parameters and boundary conditions in simulation model

参数	数值
工件初始温度/℃	1250
环境温度/℃	20
模具温度/℃	20
上砧压下速度/(mm·s ⁻¹)	60
工件工装时间/s	300
工件与空气换热系数/(N·(s·mm·℃) ⁻¹)	0.2
工件与模具换热系数/(N·(s·mm·℃) ⁻¹)	5.0
工件与模具剪切摩擦因数	0.3
工件热辐射系数	0.7

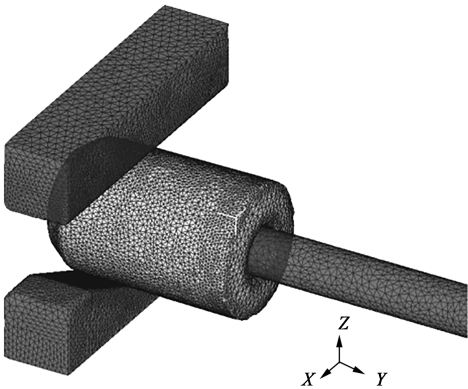


图 2 深盲孔件芯轴拔长工艺有限元模型
Fig. 2 Finite element model of mandrel drawing process for deep blind hole part

表 2 超高强度钢 G31 的化学成分 (%, 质量分数)

Table 2 Chemical compositions of ultra-high strength steel G31 (%, mass fraction)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	W	Fe
0.28	1.4	0.7	3.5	1.1	0.5	0.03	0.7	余量

2 深盲孔锻件芯轴拔长新翻转工艺

2.1 现有工艺存在的不足

某锻造厂在深盲孔锻件芯轴拔长过程中, 采用 3800 t 水压机, 单步压下率 η 在 8%~10% 之间, 采用连续 45° 翻转工艺, 单周拔长后锻件头尾的等效应变分布如图 3a 和图 3b 所示, 经 3 道次拔长后深

盲孔锻件子午面的等效应变分布如图 3c 所示。可知锻件周向的等效应变呈不均匀分布, 且头尾拔长后应变大小差异也较大, 经多道次拔长后不均匀性叠加, 由于锻透性不足, 头部出现近似锥形的低应变区。

图 4 为某锻造厂成品锻件头部的心部、 $R/2$ (R 为锻件头部的半径) 处、边部、尾部环 $t/2$ (t 为尾部环的壁厚) 处的锻态显微组织及部分尾部环的微观组织。头部的心部在拔长过程中无法有效锻透, 且处于高温状态, 晶粒呈粗大的等轴晶 (图 4a); 头部 $R/2$ 处呈等轴晶, 晶粒尺寸细化明显 (图 4b); 工件边部的金属由于温降快且处于砧下难变形区, 晶粒形貌为粗大的扁平的变形晶 (图 4c)。与头部 $R/2$ 处组织对比, 大变形的尾部环 $t/2$ 处的晶粒为

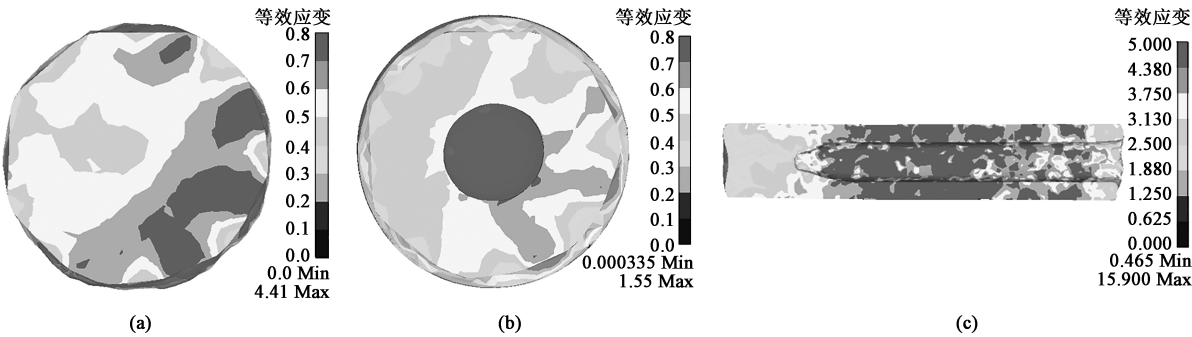


图 3 芯轴拔长工艺等效应变分布

(a) 头部横截面 ($\eta=10\%$) (b) 尾部横截面 ($\eta=8\%$) (c) 锻件子午面

Fig. 3 Equivalent strain distributions of mandrel drawing process

(a) Cross section of head ($\eta=10\%$) (b) Cross section of tail ($\eta=8\%$) (c) Meridian plane of forgings

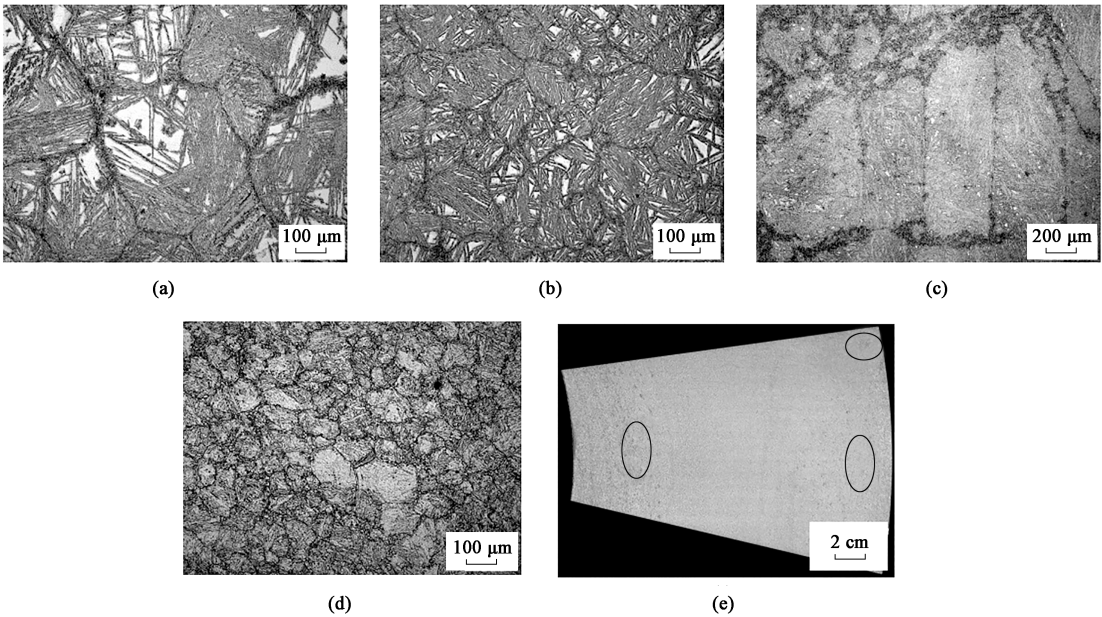


图 4 G31 钢大型深盲孔锻件锻态显微组织

(a) 头部的心部 (b) 头部 $R/2$ 处 (c) 头部边部 (d) 尾部环 $t/2$ 处 (e) 尾部环部分

Fig. 4 Forged state microstructures of large deep blind hole forgings for G31 steel

(a) Center of head (b) $R/2$ position of head (c) Edge of head (d) $t/2$ position of tail ring (e) Ring part of tail

更加细小的等轴晶(图4d),但在尾部环的组织中出现局部粗晶问题(图4e)。因此,在芯轴拔长过程中改善深盲孔锻件的头部锻透性及整体件的周向变形均匀性是保证锻件获得细小均匀的晶粒组织的关键。

挤压后深盲孔件存在头部实心圆和尾部空心环的非等截面特征,根据潘品李等^[4]和刘敏等^[5]的研究,上平下V型砧拔长时,实心圆的大变形区集中在平砧下方,空心环的大变形区集中在平砧与芯棒之间且靠近芯棒侧,两者的大变形区不同,若对深盲孔件选择同一压下量和连续45°翻转的拔长工艺,显然不合理。

2.2 新翻转工艺制定

在芯轴拔长时下V型砧侧金属变形较小,上平砧侧大变形区呈“V”字状,如图5所示。董节功等^[11]提出当等效应变达到0.2时锻件被锻透,故定义本材料大变形“V”区变形角 α 以等效应变达到0.2为边界,如图5所示,通过数值模拟给出不同压下率 η 与头、尾部变形角 α 的变化关系,如图6所示。将数据拟合,变形角 α 随压下率 η 的增加呈线性增大。考虑工厂单步压下率在8%~10%之间,头、尾部的变形角的范围分别为56.6°~64.1°、57.7°~65.6°。

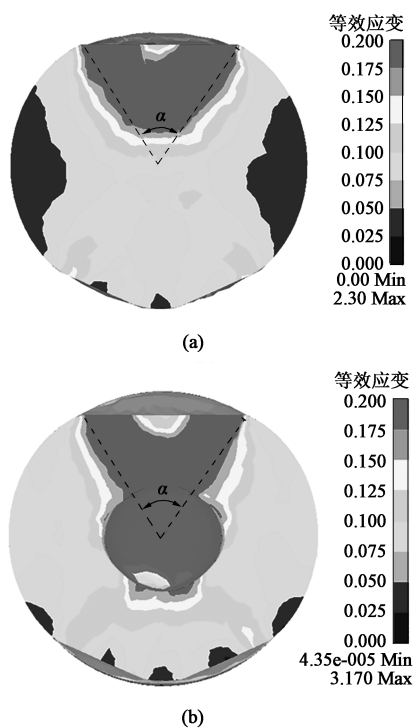


图5 单砧压下时大变形区变形角示意图

(a) 头部 (b) 尾部

Fig. 5 Schematic diagrams of deformation angle in large deformation area under single anvil pressing

(a) Head (b) Tail

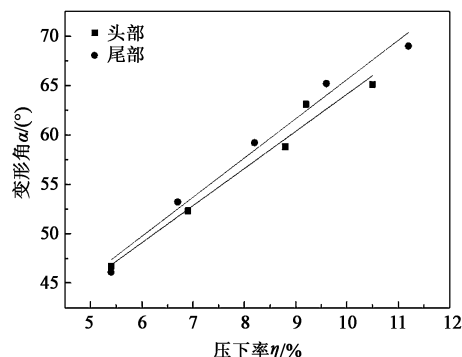


图6 压下率与变形角的关系曲线

Fig. 6 Relationship curves between reduction rate and deformation angle

如2.1节所述,某锻造厂拔长时,基于经验和操作方便的原则,锻件的均匀性较差。王连东等^[3]在锻造阶梯轴的操作原则中提出,为抵消变形区分布轴线偏移问题,坯料拔长一周的翻转次数 n 应为偶数次,理论翻转角度公式为:

$$\theta = 360^\circ/n \quad (1)$$

式中: θ 为理论翻转角度。

n 一般取6、8、10、12和18,即 θ 为60°、45°、36°、30°和20°。合理的翻转角度应充分发挥大变形“V”区特征,两砧之间的接砧角为5°~10°^[12],使相邻砧压下后大变形区相互配合,得到的锻件的周向应变分布达到最均匀的状态。

考虑大型深盲孔锻件芯轴拔长时压下步数多、操作难度大、热锻耗时长、温降大等实际问题,若翻转角过小,压下次数倍数增加,极大地延长了热锻时间。综上考虑,推荐理论翻转角度为45°或60°,具体翻转工艺为:(1)45°翻转工艺,0°→90°→90°→90°→45°→90°→90°→90°,翻转8次,相邻压下砧次夹角为45°;(2)60°翻转工艺,0°→120°→120°→60°→120°→120°,翻转6次,相邻压下砧次夹角为60°。

2.3 深盲孔锻件头尾部数值模拟分析

深盲孔锻件不仅需改善周向变形均匀性的问题,不同部位亟需解决的问题不同,如头部主要需要提高实心锻透性以降低径向应变差异,尾部需控制内孔畸变,以降低“喇叭口”的影响。因此,需依据不同标准判定工艺优化程度。对深盲孔锻件头、尾单周次拔下进行研究,压下率 η 取为8%、10%,新翻转工艺为45°翻转、60°翻转,即头、尾部分别设置4组进行对比实验。

图7为压下率为8%、10%时经两种翻转工艺后锻件头部的等效应变分布,可知60°翻转时等效应

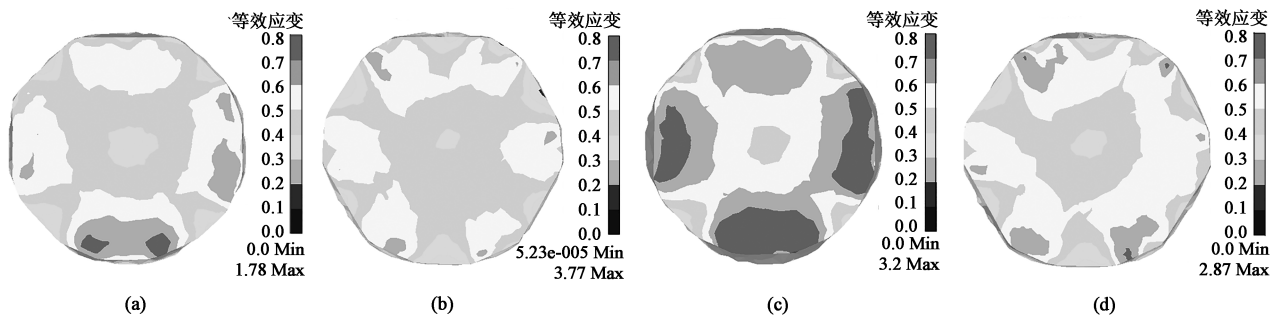


图 7 头部单周次拔长等效应变分布

(a) $\eta=8\%$, 45° 翻转 (b) $\eta=8\%$, 60° 翻转 (c) $\eta=10\%$, 45° 翻转 (d) $\eta=10\%$, 60° 翻转

Fig. 7 Equivalent strain distributions of head after single cycle drawing

(a) $\eta=8\%$, 45° turing (b) $\eta=8\%$, 60° turing (c) $\eta=10\%$, 45° turing (d) $\eta=10\%$, 60° turing

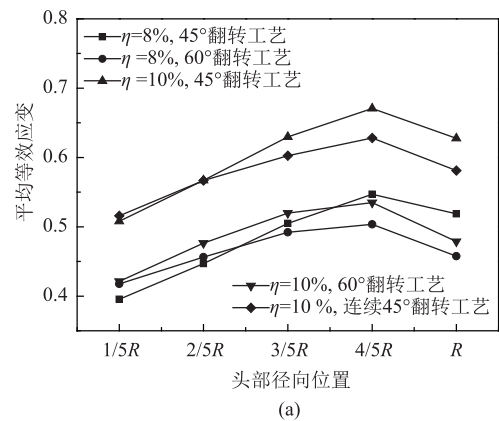
变的周向均匀性明显优于 45° 翻转, 这是因为 60° 翻转时相邻压下大变形区的配合更理想, 其接砧角更接近合理接砧角 $5^\circ \sim 10^\circ$ 。压下率增加, 当 $\eta=10\%$ 时, 大等效应变区域的面积明显优于 $\eta=8\%$ 的情况, 心部的应变提高, 可改善其锻透性。

为准确对比不同工艺组合之间的差异, 对头部由心部至边部的周向等效应变分布特征数据化表征如图 8 所示。由头部径向应变分析可知, 60° 翻转时平均等效应变的最大与最小值之差明显小于 45° 翻转, 且随着压下率的增加, 两者差值增大, 表明 60° 翻转工艺可降低工件头部的径向变形差异。由头部周向应变分析可知, 60° 翻转时的平均等效应变小于 45° 翻转工艺, 这是因为 45° 翻转工艺的接砧角较大, 大变形区相互重叠而导致的。从周向等效应变值的离散程度分析可知, $3/5R$ 向内区域, 新翻转工艺的标准差均较小, 且远低于连续 45° 翻转工艺, 表明近心部位置在新翻转工艺拔长后可有效提高心部的周向变形均匀性; $3/5R$ 向外区域, 标准差明显增大, 这是由于此位置处于大变形叠加区和难变形区的混合区域, 不同组合工艺的影响存在较大差异, 发现当 10% 压下率与 60° 翻转工艺组合时, 等效应变增加且周向均匀性 (标准差) 仍处于相对最佳状态。综上可知, 头部拔长时采用压下率为 10% 及 60° 翻转工艺既提高了心部锻透性, 也保证了变形均匀性。

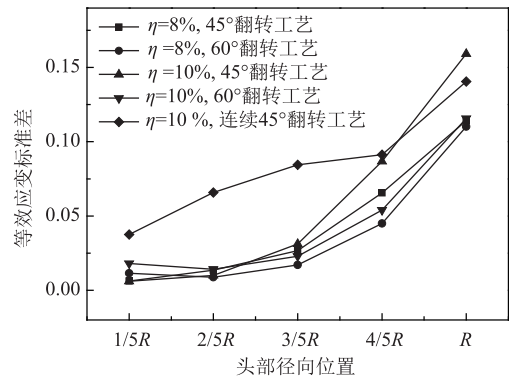
同头部, 尾部在不同拔长工艺下的等效应变如图 9 所示, 可以看出 60° 翻转后尾部的周向等效应变更加均匀, 但内孔畸变较为严重; 45° 翻转能有效控制内孔畸变, 但 45° 翻转时随压下率的增加, 周向等效应变分布的不均匀性增加。

陈英等^[13]定义的内孔畸变率 ω 的表达式为:

$$\omega = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_0} \times \frac{t_0 - t}{t_0} \times 100\% \quad (2)$$



(a)



(b)

图 8 头部不同位置周向平均等效应变 (a) 及标准差曲线 (b)

Fig. 8 Mean equivalent strain (a) and standard deviation curves (b) in circumferential direction at different positions of head

式中: d_{\max} 为变形后内孔最大直径, mm; d_{\min} 为芯棒直径, mm; d_0 为内孔原始直径, mm; t_0 为原始壁厚, mm。

由式 (2) 计算出尾部环内孔畸变率, 如表 3 所示, 当压下率为 8% 时, 相对于 60° 翻转时的 34.2% 内孔畸变率, 45° 翻转时的内孔畸变率大幅降低, 为 19.7% 。图 10 为尾部经不同拔长工艺后 $t/2$ 壁厚处周向等效应变分布, 从图 10 可知, 新翻转工

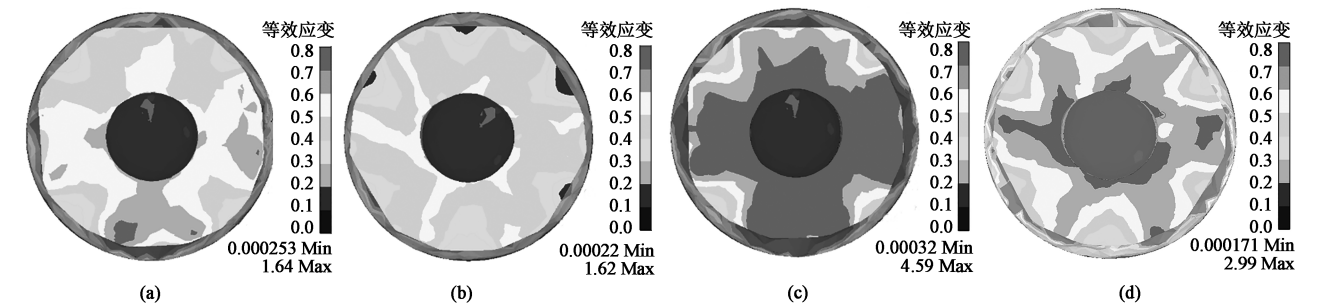


图 9 尾部单周次拔长等效应变分布

(a) $\eta=8\%$, 45° 翻转 (b) $\eta=8\%$, 60° 翻转 (c) $\eta=10\%$, 45° 翻转 (d) $\eta=10\%$, 60° 翻转

Fig. 9 Equivalent strain distributions of tail after single cycle drawing

(a) $\eta=8\%$, 45° turning (b) $\eta=8\%$, 60° turning (c) $\eta=10\%$, 45° turning (d) $\eta=10\%$, 60° turning

艺周向等效应变曲线的稳定性均优于连续 45° 翻转工艺, 用标准差大小判定数据离散性, 如表 3 所示, 压下率为 8% 及 45° 翻转的组合工艺得到的周向等效应变值的标准差最小, 即周向均匀性最佳。综上可知, 尾部拔长时, 采取压下率为 8% 及 45° 翻转工艺的组合工艺有利于控制内孔的畸变程度和提高变形均匀性。

表 3 深盲孔锻件尾部单周次不同拔长工艺后的数据分析结果

Table 3 Data analysis results for tail of deep blind hole forgings after different drawing processes for single cycle				
压下率/%	翻转工艺	内孔畸变率/%	t/2 处等效应变	
			平均值	标准差
8	45°连续翻转	22.4	0.449	0.095
	45° 翻转	19.7	0.536	0.060
	60° 翻转	34.2	0.442	0.042
10	45° 翻转	19.1	0.739	0.072
	60° 翻转	37.1	0.603	0.054

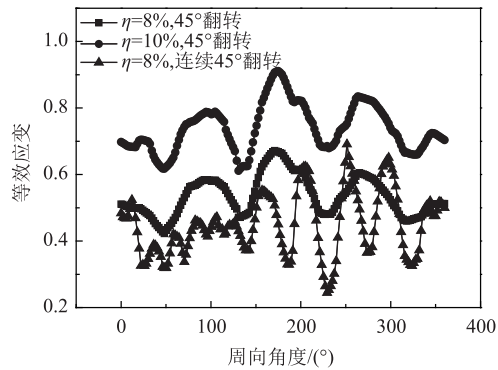


图 10 尾部单周次拔长 t/2 处周向等效应变

Fig. 10 Circumferential equivalent strains at t/2 position of tail after single cycle drawing

综上分析, 深盲孔锻件头部采用 10% 压下率和 60° 翻转的组合工艺, 可在提高头部锻透性的同时, 保证周向均匀性; 尾部采用 8% 压下率和 45° 翻转的组合工艺, 可有效控制内孔畸变率且保证了周向均匀

性。对比头、尾部在新组合工艺拔长后的等效应变分布, 如图 7d 和图 9a 所示, 可知两者的应变值均以 0.4~0.6 为主, 表明在提高头、尾部周向变形均匀性的基础上, 提高头部压下率可改善头部的锻透性。

基于上述翻转工艺和压下率, 进一步锻造头部锥度, 以提升锻透性, 完成近终成形。盲孔锻件水平拔长后尾部总压下率为 42%, 头部总压下率为 27%, 由于变形量差异造成的组织不均难以避免; 因此, 设计 5° 锥度完成头肩部过渡, 将头部最前端的总压下率提升至 42%, 拔长后深盲孔锻件子午面的等效应变分布如图 11 所示。对比图 3 可知, 头部的低应变区明显改善。

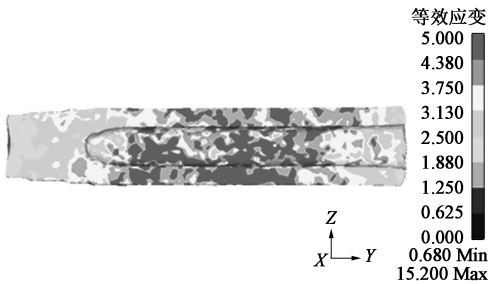


图 11 采用新工艺参数拔长时深盲孔锻件等效应变分布

Fig. 11 Equivalent strain distribution for deep blind hole forgings in drawing using modified process parameters

3 新工艺工业试制验证

基于本文有限元仿真优化的盲孔拔长工艺开展工业化试制, 生产的盲孔锻件如图 12 所示。在锻件头尾不同位置切取试样并进行淬火+回火热处理, 力学性能如表 4 所示。锻件头部表层的冷却条件良好, 且设计锥度后其与尾部变形量接近, 最终强度、冲击功均与尾部接近; 头部向内强度略高、韧性偏低, 但总体看来, 锻件各部位的均匀性良好。



图 12 工业化试制深盲孔锻件

Fig. 12 Deep blind hole forgings of industrial trial production

表 4 盲孔锻件不同位置力学性能

Table 4 Mechanical properties at different positions of blind hole forgings

位置		抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 R_{eL} /MPa	伸长率 A /%	断面收缩率 Z /%	冲击功 A_{kv} /J
头部	R	1721	1421	12	55	79
	$3R/4$	1774	1438	12	54	64
	$R/2$	1782	1426	12	54	65
	$R/4$	1785	1439	12	54	65
	0	1787	1437	12	53	64
尾部	t	1717	1364	12	57	80
	$t/2$	1724	1373	13	55	72
	0	1728	1385	13	57	73

取头部 1/2 半径处与尾部 1/2 壁厚处试样的性能作为基准，与原工艺盲孔锻件进行比较，如图 13 所示。无论工艺如何，头部强度均略高于尾部约 50 MPa。而采用原工艺时，头部冲击功仅为 54 J、尾部冲击功可达 125 J，差异达到 130%；采用新工艺后，头部冲击功提升，头尾差异仅为 10.8%。这一结果表明，盲孔拔长工艺优化后，锻件的变形均匀性获得明显提升。

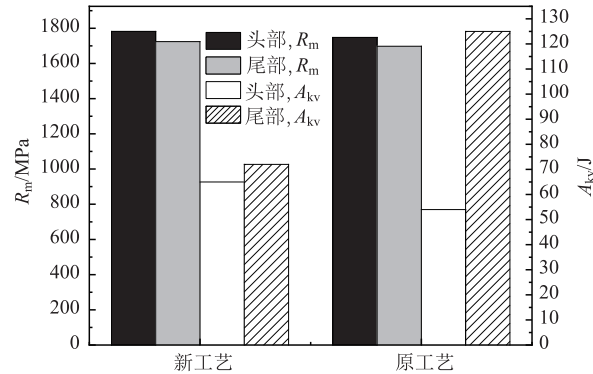


图 13 新工艺与原工艺头、尾部性能差异对比

Fig. 13 Comparison of performance difference between new process and original process at head and tail parts

4 结论

(1) 深盲孔锻件拔长时，基于头尾部大变形区分布规律的差异，定量给出了头、尾的变形角与压下率的关系，为翻转工艺制定提供了理论基础。综合考虑，提出了两种新翻转工艺，45°翻转工艺和60°翻转工艺，相对于连续45°翻转工艺，新工艺可显著提高工件的周向变形均匀性。

(2) 针对原工艺锻件的头尾组织及性能分布不均匀问题，通过制定不同压下率和新翻转工艺的对比研究，发现头部采用10%压下率与60°翻转的组合工艺，可改善头部的锻透性和周向均匀性；尾部采用8%压下率与45°翻转的组合工艺，可降低内孔的畸变程度且保证了变形均匀性。此外，合理设计头部锥度可将头端部的变形量提升至与尾部接近的水平。

(3) 新工艺在工业化试制中得到了应用和验证，盲孔锻件头尾性能的均匀性获得了明显提升。

参考文献：

[1] 伍太宾. 超高强度钢薄壁深盲孔弹体的精密成形技术 [J]. 兵工学报, 2005, 26 (4): 515-518.
Wu T B. Precision forming technique of ultra-high-strength steel shell body with thin wall and deep blind hole [J]. Acta Armamentarii, 2005, 26 (4): 515-518.

[2] 孙志仁, 孔德磊, 雷丽萍. 大型轴类锻件典型锻造工艺微观组织模拟 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (6): 33-40.
Sun Z R, Kong D L, Lei L P. Microstructure simulation of typical forging process of large shaft forgings [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (6): 33-40.

[3] 王连东, 梁晨, 王金宝, 等. 上平下 V 形砧锻造阶梯轴关键技术的研究 [J]. 中国机械工程, 2010, 21 (23): 104-108.
Wang L D, Liang C, Wang J B, et al. Research on key technologies for forging stepping shaft between upper flat and lower V shaped anvil [J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21 (23): 104-108.

[4] 潘品李, 钟约先, 马庆贤, 等. 核电主管道锻件锻造成形均匀性模拟研究 [J]. 机械工程学报, 2013, 49 (10): 97-102.
Pan P L, Zhong Y X, Ma Q X, et al. Simulation on forming uniformity of nuclear main pipe forging [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49 (10): 97-102.

[5] 刘敏, 马庆贤, 刘功梅. 超大锻件空心钢锭翻转变形均匀性和压实效果研究 [J]. 机械工程学报, 2016, 52 (8): 96-102.
Liu M, Ma Q X, Liu G M. Research on rotatory deformation uniformity and compaction effect of super-heavy hollow steel Ingot [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52 (8): 96-102.