

材料与成形性能

基于多工序旋压的内外齿形件力学性能研究

袁云鹏, 夏琴香, 肖刚锋, 赵 杰

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641)

摘要: 通过单向拉伸试验和硬度试验, 探究了 SPHC 热轧钢板的各向异性, 获得了 SPHC 热轧钢板的相关力学性能, 量化了各工序件的力学性能参数, 并对 SPHC 热轧钢板材料进行了应变硬化函数拟合。结果表明: SPHC 热轧钢板材料的各向异性不明显, 其屈服强度为 251 MPa、抗拉强度为 371 MPa、屈强比为 0.68、伸长率为 44% 以及硬化指数为 0.190。从原始坯料到内外齿形件, 旋压工艺使材料的抗拉强度由 371 MPa 增加至 485.5 MPa, 上升了 31%; 屈服强度由 251 MPa 增加至 475 MPa, 上升了 89%; 屈强比由 0.68 增加至 0.95; 硬度由 136 HV 增加至 188~216 HV; 硬化指数由 0.190 降至 0.028。最终通过 Swift、Voce 及 Swift+Voce 的应变硬化函数拟合对比, 获得了 SPHC 热轧钢板材料的应变硬化函数。

关键词: SPHC 热轧钢板; 内外齿形件; 旋压工艺; 力学参数; 应变硬化函数

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.10.036

中图分类号: TG142.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 10-0257-08

Research on mechanical properties for internal and external toothed parts based on multi-process spinning

Yuan Yunpeng, Xia Qinxang, Xiao Gangfeng, Zhao Jie

(School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The anisotropy of SPHC hot rolled steel plate was investigated by unidirectional tensile test and hardness test, and the related mechanical properties of SPHC hot rolled steel plate were obtained. Then, the mechanical property parameters of each process part were quantified, and the strain hardening function of SPHC material was fitted. The results show that the anisotropy of SPHC material is not obvious, the yield strength is 251 MPa, the tensile strength is 371 MPa, the yield strength ratio is 0.68, the elongation is 44%, and the hardening index is 0.19. From the original blank to the internal and external toothed parts, the spinning process increases the tensile strength of the material from 371 MPa to 485.5 MPa, an increase of 31%, and the yield strength is increased by 89% from 251 MPa to 475 MPa, the yield strength ratio is increased from 0.68 to 0.95, the Vickers hardness is increased from 136 HV to 188–216 HV, and the hardening index is decreased from 0.19 to 0.028. Finally, through the fitting and comparison of the strain hardening functions of Swift, Voce and Swift+Voce, the strain hardening function of SPHC material is obtained.

Key words: SPHC hot-rolled steel plate; internal and external toothed parts; spinning process; mechanical parameters; strain hardening function

SPHC 酸洗热轧钢板是一种低碳低硅钢, 由于其具有良好的塑性, 现已被广泛应用于汽车制造、家用电器以及建筑等行业^[1-2]。例如在汽车工业中, 利用旋压工艺对 SPHC 材料进行塑性成形, 可以高效制备侧壁带内外齿形的离合器毂件^[3]。由于钢板经过热轧, 在成形筒形件时可能会产生凸耳现象^[4], 需增加切边工艺, 影响了坯料尺寸的制定,

因此需要探究板材的各向异性。研究旋压成形前后的 SPHC 材料的力学性能对离合器毂件具有重要的理论意义。

目前, 针对 SPHC 材料力学性能的研究主要集中在塑性成形前残留元素及温度对其力学性能的影响上。其中, 田亚强等^[5]研究了微量残留元素对 SPHC 钢组织性能的影响, 研究表明, 随着 Cr、Ni 和 Cu 等微量残留元素当量的增加, SPHC 材料的硬度呈现先增加后减小的趋势, 屈强比呈现逐渐降低的趋势; 刘立辉等^[6]和陈燕等^[7]的研究表明, 不同的终轧温度和卷取温度对 SPHC 材料的力学性能会产生不同程度的影响。而目前关于旋压塑性变形对 SPHC 材料力学性能的影响的相关研究较少。本文

收稿日期: 2021-10-12; 修订日期: 2022-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52175316)

作者简介: 袁云鹏 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: 18839773905@163.com

通信作者: 夏琴香 (1964-), 女, 博士, 教授

E-mail: meqxxia@scut.edu.cn

采用单向拉伸试验和硬度试验，针对 SPHC 材料及旋压成形内外齿形件的各工序件的力学性能进行测定，探究 SPHC 材料的各向异性，量化旋压工艺对其力学性能的影响；并对 SPHC 材料的应变硬化函数进行拟合，以便后续开展 SPHC 材料塑性成形的精确数值仿真模拟。

1 力学性能测试

1.1 坯料及各工序件试样设计及制备

原始坯料为宝山钢铁股份有限公司企业标准 Q/BQB 302—2018^[8]、牌号为 SPHC、厚度为 2.4 mm 的酸洗热轧钢板。该材料为碳素结构钢，其主要化学成分含量如表 1 所示。

表 1 SPHC 热轧钢板的化学成分（%，质量分数）
Table 1 Chemical components of SPHC hot-rolled steel plate（%，mass fraction）

C	Si	Mn	P	S
0.02~0.08	≤0.05	≤0.40	≤0.03	≤0.03

酸洗热轧钢板在出厂时标注轧制方向，并制备圆形坯料，圆形坯料经拉深、整形、流动和制齿旋压成形为内外齿形件^[9-10]，如图 1 所示，各工序件的筒壁边缘未出现凸耳现象。由于内外齿形件侧壁是承受工作载荷的主要部位，因此，重点关注各工序件侧壁的力学性能。其中整形工序件是对圆角的旋压变形，对侧壁的力学性能的影响较小，故不考虑整形工序件侧壁的力学性能。

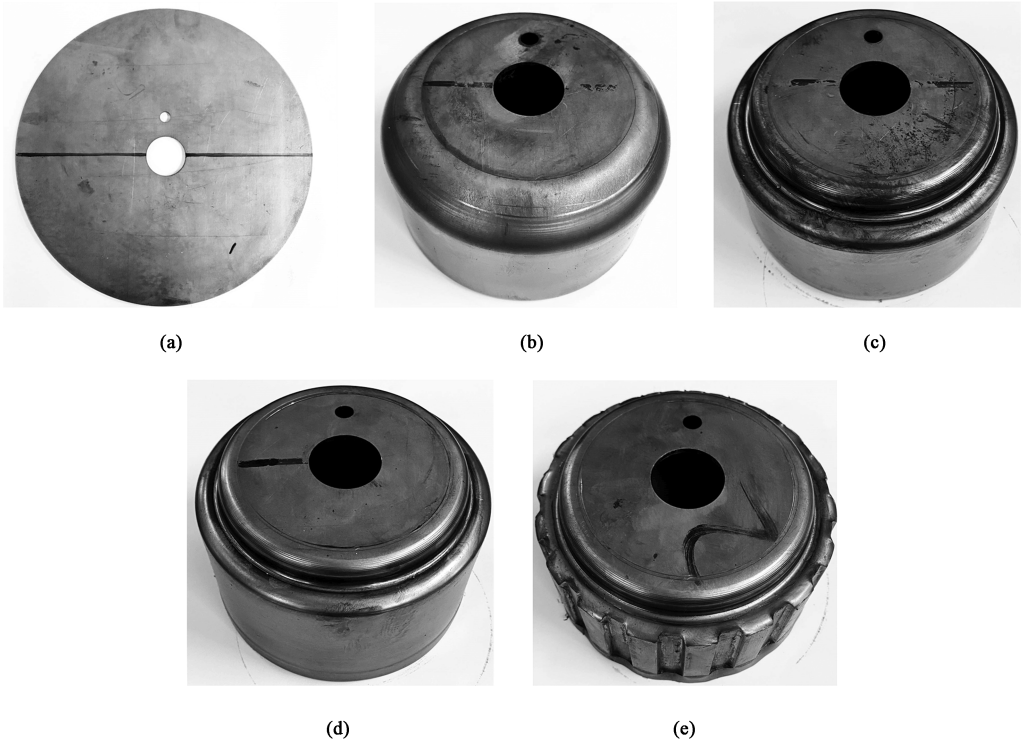


图 1 坯料及各工序件
(a) 坯料 (b) 拉深工序件 (c) 整形工序件 (d) 流动工序件 (e) 内外齿工序件
Fig. 1 Blank and each process part
(a) Blank (b) Process part of drawing (c) Process part of shaping (d) Process part of flow
(e) Process part of internal and external teeth

根据 GB/T 228.1—2021^[11] 中圆管纵向弧形试样设计标准，并考虑到不同工序件的尺寸限制，原始坯料、拉深工序件和流动工序件的单向拉伸试样的尺寸设计如图 2a 所示，内外齿工序件的单向拉伸试样的尺寸设计如图 2b 所示。从宏观上研究 SPHC 热轧钢板的各向异性，通常是沿钢板的不同方向切

取单向拉伸试样进行试验。根据图 2a 和图 2b 所示试样尺寸参数，采用中走丝线切割方法分别制备与轧制方向成 0°、45°和 90°的 3 个方向的各工序件的单向拉伸试样。
试样的预处理分为打磨和喷涂。为使带材处于理想状态^[12]，打磨采用 320 目和 1000 目砂纸去除

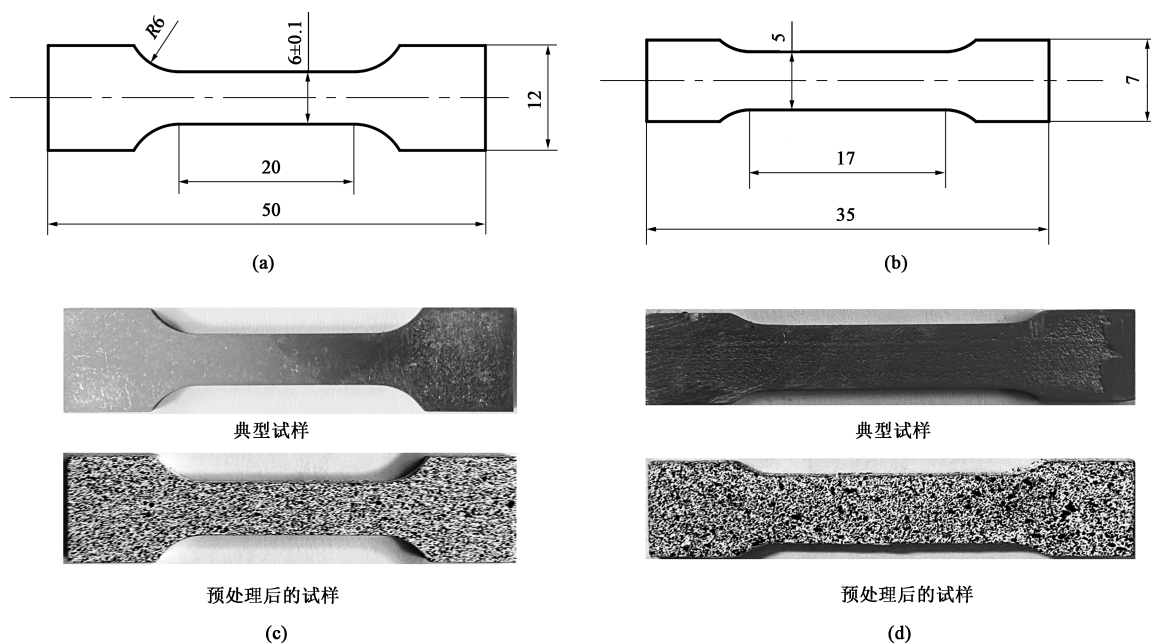


图 2 单向拉伸试样的尺寸设计和制备

(a) 坯料、拉深工序件和流动工序件的尺寸设计 (b) 内外齿工序件的尺寸设计 (c) 坯料、拉深工序件和流动工序件试样
(d) 内外齿工序件试样

Fig. 2 Dimensional design and preparation of unidirectional tensile samples

(a) Dimensional design on blank and process parts of drawing and flow (b) Dimensional design on process parts of internal and external teeth
(c) Samples for blank and process parts of drawing and flow (d) Samples for process parts of internal and external teeth

线切割在试样厚度方向上残留的氧化痕迹以及试样表面的微小划痕。而打磨导致试样的横截面积减少,需要对打磨后的试样尺寸进行测定。试样的理想状态通常用表面粗糙度来表征,试验采用 SURFTEST SJ-210 粗糙度测量仪对坯料和各工序件试样的表面粗糙度进行了测量,结果表明,经打磨后的试样的表面粗糙度值均小于规定值 $Ra3.2 \mu\text{m}$ 。试验采用 DIC (Digital Image Correlation) 图像技术获取单向拉伸力学数据^[13],这是一种光学测量材料力学应变的方法。采用白色底漆和黑色面漆对试样进行喷涂处理,使试样表面覆盖均匀散斑。坯料、拉深工序件和流动工序件的典型试样及预处理后的试样如图 2c 所示,内外齿工序件的典型试样及预处理后的试样如图 2d 所示。

1.2 坯料及各工序件试样的单向拉伸试验

单向拉伸试验平台搭建如图 3 所示,试验采用岛津 AG-100 kN 拉伸机,对坯料的 9 个试样以及拉深、流动和内外齿工序件的 18 个试样进行单向拉伸试验,其中拉深工序件对应试样 1~试样 6,流动工序件对应试样 7~试样 12,内齿工序件对应试样 13~试样 15,外齿工序件对应试样 16~试样 18。为保证试样在拉伸过程中处于准静态状态,设置拉伸速度为 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,使用工业相机采集相应的

图像数据。为消除试验数据的偶然误差,坯料及各工序件试样均进行重复试验:坯料试样中,对 0° 、 45° 和 90° 方向各重复试验 3 次;拉深工序件和流动工序件试样中,对 0° 、 45° 和 90° 方向各重复试验 2 次。采用 HVS-1000Z (显微维氏硬度仪),对 SPHC 原始坯料及各工序件试样进行硬度测定。为减小硬度测量误差,取试样 3 个不同位置点的硬度平均值^[14]。

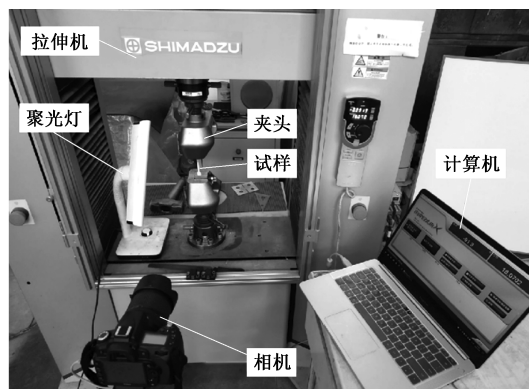


图 3 单向拉伸试验平台

Fig. 3 Unidirectional tensile test platform

1.3 坯料及各工序件的力学性能分析

通过 MATLAB 子程序 NCORR 和 DAMAGE 处理试样拉伸图像,获得试样的工程应变;根据拉伸机

应力数据，获得试样的工程应力。通过工程应力-工程应变曲线，求取 SPHC 材料的屈服强度和抗拉强度；通过（断后标距-原始标距）/原始标距×100%，获得材料的断后伸长率。将工程应力-工程应变转化为真实应力-真实应变，再通过 Hollomon 公式拟合得到应变硬化指数 n [15]。厚向异性系数 r 是坯料试样单向拉伸试验中宽度方向真实塑性应变 ε_b 与厚度方向真实塑性应变 ε_t 的比值，即 $r=\varepsilon_b/\varepsilon_t$ 。

绘制 SPHC 酸洗热轧钢板坯料不同方向的各试样的工程应力-工程应变曲线，如图 4 所示。其中试样 3 和试样 8 的工程应力-工程应变曲线与其他试样相差过大，需剔除。得到 SPHC 各方向的力学参数如表 2 所示，由表 2 可得 3 个方向上的屈服强度、抗拉强度以及厚向异性系数无明显差异，所以，SPHC 热轧钢板的各向异性程度较小，可以视为各向同性材料处理。

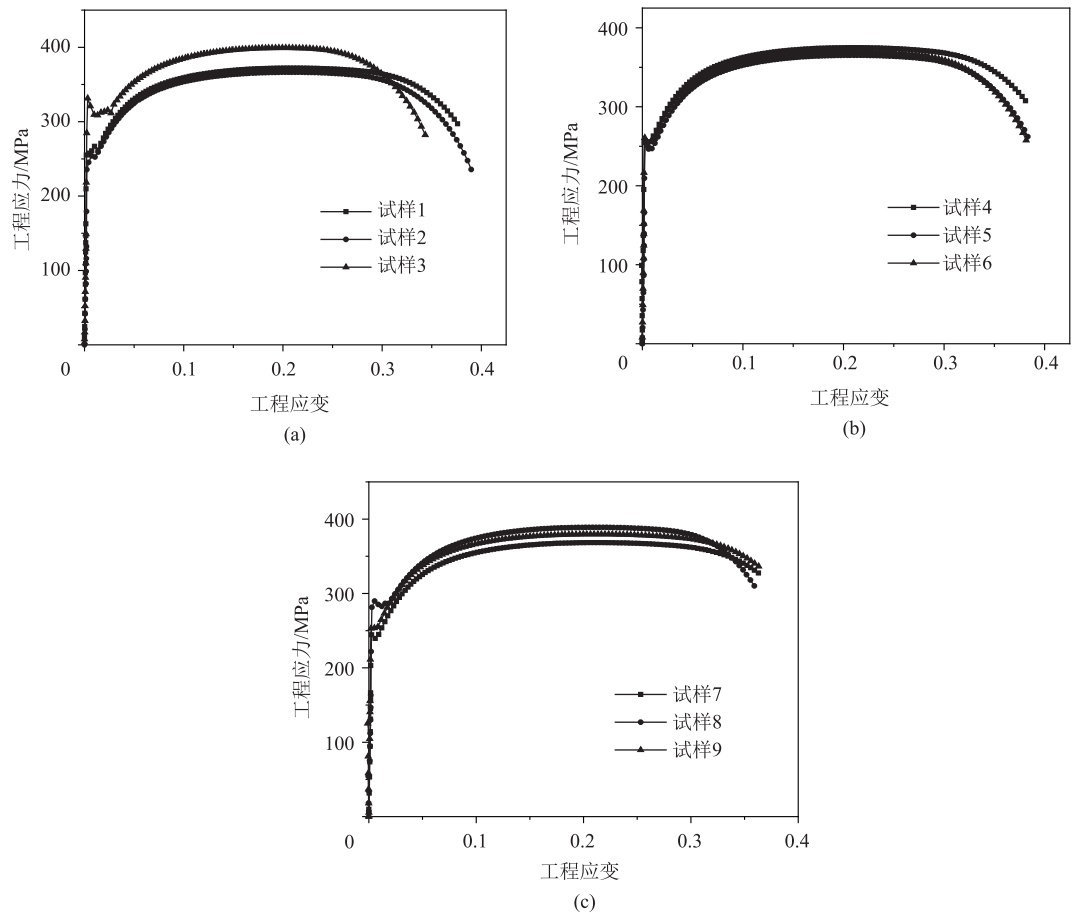


图 4 坯料试样各方向的工程应力-工程应变曲线
(a) 0° (b) 45° (c) 90°

Fig. 4 Engineering stress-engineering strain curves in various directions for blank samples

表 2 原始坯料的力学性能参数

Table 2 Mechanical property parameters of original blank						
试样 方向	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	r 值	伸长率/ %	屈强比	硬化指数 n
0°	254.5	369.5	1.00	43.75	0.688	0.19
45°	250.3	370.0	1.04	44.00	0.676	0.19
90°	248.5	374.0	1.06	43.25	0.664	0.19
均值	251.0	371.0	1.03	44.00	0.680	0.19

通过 DIC 图像处理 [16] 获得相应工序件的试样数据，采用 Origin 软件绘制拉深、流动和内外齿工序

件试样的工程应力-工程应变曲线。同一工序不同方向下试样的工程应力-工程应变曲线如图 5 所示，不同工序件同一方向的试样的工程应力-工程应变曲线如图 6 所示，各方向的重复试验中只给出了其中一个试样的工程应力-工程应变曲线。

图 5 表明，各工序件不同方向下的工程应力-工程应变曲线无明显差别，旋压工艺对 SPHC 材料各向异性的影响较小，可以忽略。图 6 表明：同一方向下，流动工序件的屈服强度和抗拉强度较拉深工序件显著增大、伸长率显著降低；内外齿工序件相较

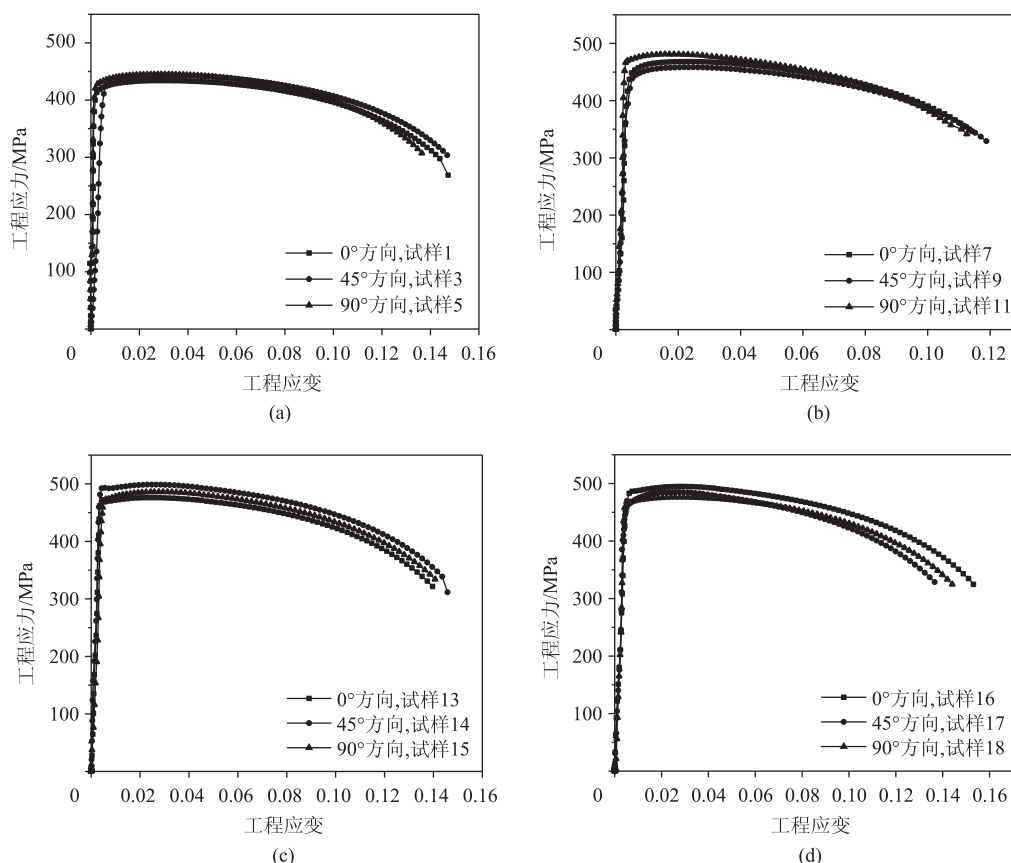


图 5 同一工序不同方向下试样的工程应力-工程应变曲线

(a) 拉深工序件 (b) 流动工序件 (c) 内齿工序件 (d) 外齿工序件

Fig. 5 Engineering stress-engineering strain curves for samples under different directions in the same process

(a) Process part of drawing (b) Process part of flow (c) Process part of internal tooth (d) Process part of external tooth

流动工序件的屈服强度和抗拉强度增幅较小。各工序件的力学性能参数如表 3 所示, 根据表 3 绘制不同工序件的力学性能变化曲线, 如图 7 和图 8 所示。

由图 7 可得, 从原始坯料到内外齿工序件, 材料的屈服强度和抗拉强度变化呈上升趋势。其中, 抗拉强度由 371 MPa 增加至 485.5 MPa, 上升了 31%; 屈服强度由 251 MPa 增加至 475 MPa, 上升了 89%; 试样的屈强比由 0.68 增加至 0.98。图 7 表明, 旋压工艺导致材料产生了不同程度的加工硬化, 且屈强比的增加表明各工序件的可成形性逐步降低。

图 8 表明, 从原始坯料到内外齿工序件, 伸长率和硬化指数呈下降的趋势, 而硬度逐步增加。其中, 硬化指数从 0.190 降至 0.028; 硬度由 136 HV 增加至 188 ~ 216 HV, 内齿硬度比外齿硬度大 28 HV 左右, 这是由于内外齿旋压成形原理导致内齿的变形量大于外齿^[3]; 伸长率从 44% 降至 12%, 由于拉深和流动旋压工艺使材料产生一定程度的硬

化, 而加工硬化会导致裂纹加速扩展^[17], 从而导致试样的伸长率显著下降。由于试样的尺寸效应, 内外齿工序件试样的伸长率出现增大现象, 但试样尺寸对硬化指数、屈服强度和抗拉强度无明显影响, 对伸长率有影响^[18-19], 故不影响上述相关力学性能分析。

2 应变硬化函数拟合

材料的应变硬化曲线是表征其塑性变形行为的重要途径之一。由 1.3 小节可得 SPHC 材料的各向异性程度较小, 目前常用的各向同性材料硬化模型有 Swift 硬化模型、Voce 硬化模型等^[20], 其中 Swift 是非饱和型硬化模型, 而 Voce 是饱和型硬化模型。为了获得较高的拟合自由度, 以贴合实测数据, 也可采用 Swift+Voce 混合硬化模型来描述 SPHC 材料在塑性变形过程中的硬化行为。采用上述 3 种硬化模型对应力、应变强化阶段进行数据拟合, 如图 9 所示。Swift 硬化模型、Voce 硬化模型、Swift+Voce 混

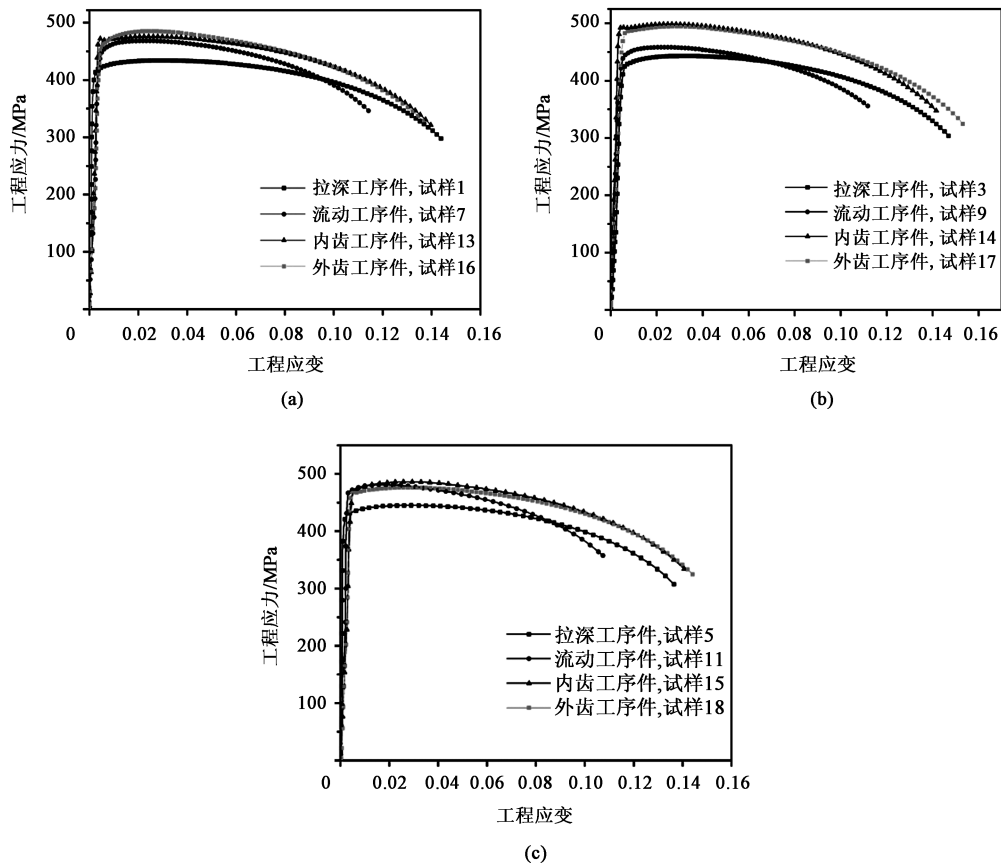


图 6 同一方向下不同工序件试样的工程应力-工程应变曲线

(a) 0° (b) 45° (c) 90°

Fig. 6 Engineering stress-engineering strain curves for different process part samples under the same direction

表 3 原始坯料和各工序件的力学性能参数

Table 3 Mechanical property parameters of original blank and various process parts

试样	屈服强度/ MPa	屈服强度变化 百分比/%	抗拉强度/ MPa	抗拉强度变化 百分比/%	硬度/HV	伸长率/%	屈强比	硬化指数 n
原始坯料	251.00	—	371.00	—	135.98	44	0.68	0.190
拉深工序件	420.67	68	444.33	20	154.09	14	0.95	0.034
流动工序件	451.17	80	468.50	26	167.90	12	0.96	0.029
内齿工序件	476.33	90	487.00	31	187.94	14	0.98	0.027
外齿工序件	475.00	89	485.50	31	215.76	14	0.98	0.028

合硬化模型的表达式如式 (1) ~ 式 (3) 所示。通过 MATLAB 拟合, Swift 硬化模型、Voce 硬化模型和 Swift+Voce 混合硬化模型的拟合精度 R 分别为 0.9993、0.9946 和 0.9998, 最终选择 Swift+Voce 硬化模型拟合 SPHC 材料的硬化模型, 拟合结果如式 (4) 所示。

$$\sigma = K \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_{\text{sat}} \cdot [1 - \exp(-n_0 \cdot \varepsilon_p)] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma &= (1 - \alpha) \cdot K \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n + \\ &\alpha \cdot \{ \sigma_0 + \sigma_{\text{sat}} \cdot [1 - \exp(-n_0 \cdot \varepsilon_p)] \} \quad (3) \\ \sigma &= 0.7404 \times 632.2 \times (0.08614 + \varepsilon_p)^{0.4534} + \\ &0.2596 \times [296.8 + 445.1 \times \exp(-28.43 \cdot \varepsilon_p)] \quad (4) \end{aligned}$$

式中: σ 为真实应力; ε_p 为真实塑性应变; $\exp(x) = e^x$; α 为两种硬化模型的权重系数; K 、 n 及 ε_0 分别为 Swift 硬化模型的硬化系数、硬化指数及预应变;

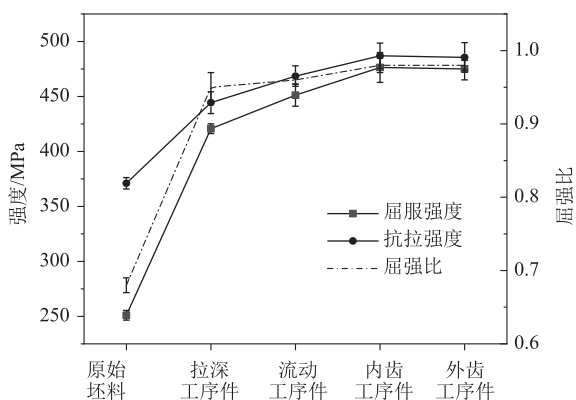


图 7 屈服强度、抗拉强度及屈强比变化曲线

Fig. 7 Change curves of yield strength, tensile strength and yield ratio

σ_0 、 σ_{sat} 及 n_0 为 Voce 硬化模型的拟合系数。

3 结论

(1) 通过对 SPHC 酸洗热轧钢板的单向拉伸试验，探究了材料的各向异性，获取了 SPHC 材料的相关力学性能参数，其中屈服强度为 251 MPa、抗

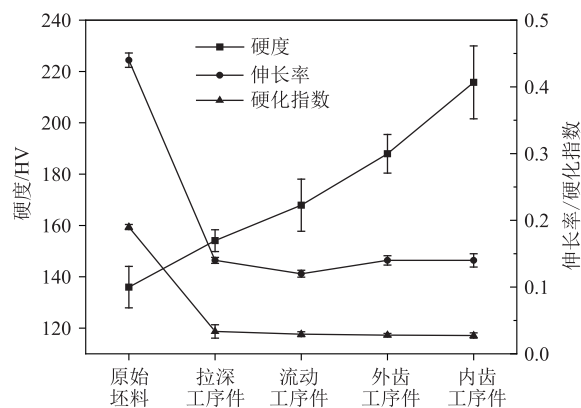


图 8 硬度、伸长率和硬化指数变化曲线

Fig. 8 Change curves of hardness, elongation and hardening index

拉强度为 371 MPa、屈强比为 0.68、断后伸长率为 44%、硬化指数 n 为 0.190。

(2) 通过拉深、流动和内外齿工序件的单向拉伸试验及硬度试验，获得了各工序件的力学性能参数。试验数据表明：从原始坯料到内外齿工序件，屈服强度、抗拉强度和屈强比变化呈上升趋势，其中抗拉强度由 371 MPa 增加至 485.5 MPa，上升了 31%；

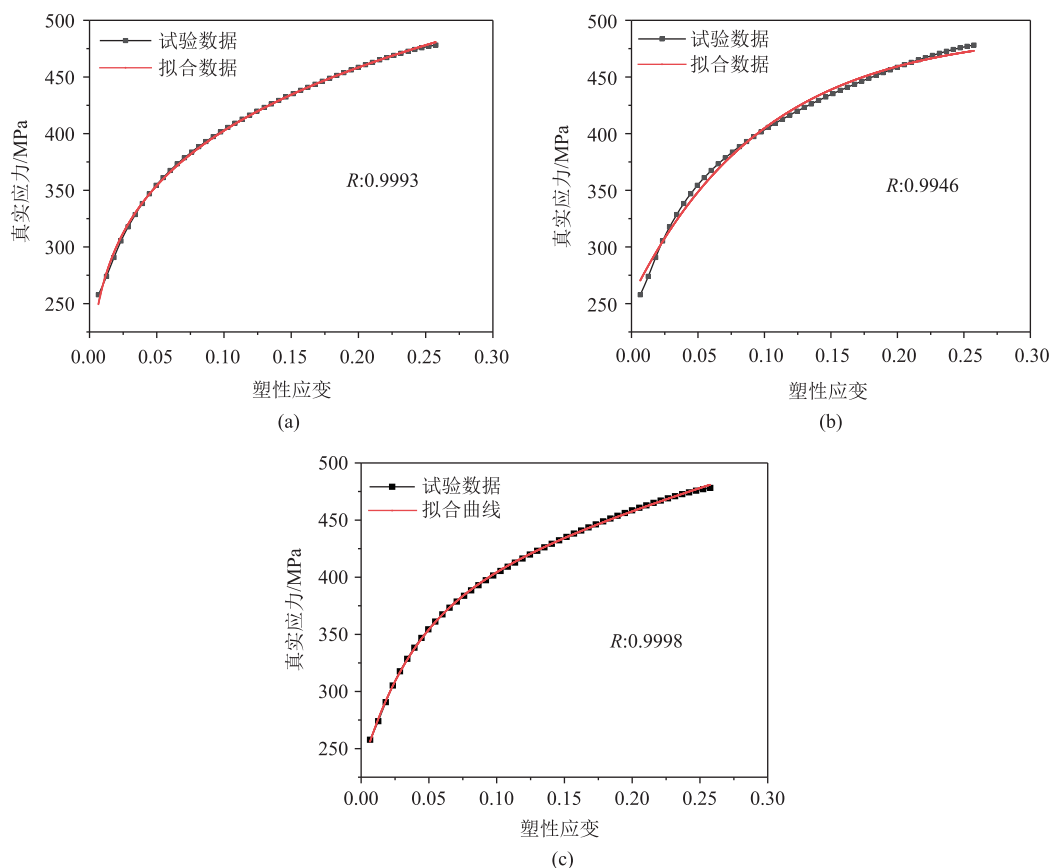


图 9 不同硬化模型的拟合曲线

(a) Swift (b) Voce (c) Swift+Voce

Fig. 9 Fitting curves by different hardening models

屈服强度由 251 MPa 增加至 475 MPa, 上升了 89%; 试样的屈强比由 0.68 增加到 0.98; 硬化指数显著下降, 由 0.190 降到 0.028; 硬度则呈上升趋势, 硬度由 136 HV 增加至 188~216 HV, 其中内齿比外齿硬度大 28 HV 左右。

(3) 通过 Swift+Voce、Swift、Voce 硬化模型的拟合精度对比, 选择 Swift+Voce 混合硬化模型作为 SPHC 材料的应变硬化函数模型, 并拟合得到硬化模型函数。

参考文献:

- [1] 伍来智. 低碳结构钢热塑性成形过程的组织细化研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
Wu L Z. Research on Microstructure Refinement for Hot Forming Process of Low Carbon Structural Steel [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [2] 李振兴. 低碳低硅钢连铸过程的非金属夹杂物研究 [J]. 南方金属, 2002, (2): 14-17.
Li Z X. A study of the nonmetal inclusions in continuous cast low-carbon, low-silicon steel [J]. Southern Metals, 2002, (2): 14-17.
- [3] 余林峰, 徐晓, 夏琴香, 等. 薄壁内外齿形件旋压成形机理 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (5): 86-93.
Yu L F, Xu X, Xia Q X, et al. Spinning mechanism of thin-walled internal and external toothed parts [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 86-93.
- [4] 夏琴香. 特种旋压成形技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
Xia Q X. Special Spinning Technology [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [5] 田亚强, 田飞, 宋进英, 等. 微量残留元素 Cr、Ni、Cu 对 SPHC 热轧带钢组织性能影响 [J]. 钢铁钒钛, 2014, 35 (6): 102-107.
Tian Y Q, Tian F, Song J Y, et al. Influences of residual elements Cr, Ni and Cu on microstructure and properties of SPHC strip [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2014, 35 (6): 102-107.
- [6] 刘立辉, 李磊, 魏峥. 热轧温度对 SPHC 钢热轧卷板力学性能的影响 [J]. 河北冶金, 2015, (8): 33-35.
Liu L H, Li L, Wei Z. Influence of hot rolling temperature on mechanical properties of hot rolling coil sheet of SPHC steel [J]. Hebei Metallurgy, 2015, (8): 33-35.
- [7] 陈燕, 王德厚, 李庆. 优化 SPHC 钢种冷轧基板力学性能的生产实践 [J]. 山东冶金, 2016, 38 (5): 3-4.
Chen Y, Wang D H, Li Q. Production practice of optimizing the mechanical properties of SPHC sheet steel for cold rolling [J]. Shangdong Metallurgy, 2016, 38 (5): 3-4.
- [8] Q/BQB 302—2018, 冷成型用热连轧钢板及钢带 [S].
Q/BQB 302—2018, Continuously hot-rolled steel sheet and strip for cold forming [S].
- [9] 余林峰. 基于响应面的内外齿形件旋压成形参数敏感性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
Yu L F. Research on Sensitivity of Spinning Forming Parameters of Internal and External Toothed Parts Based on Response Surface [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [10] 杨前超. 侧壁带内外齿形离合器零件旋压成形工艺研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
Yang Q C. A Research on Spinning Process for the Side Wall with Inner and Outer Toothed Clutch Hub [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [11] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].
GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [12] Marciniak Z, Duncan J L. The Mechanics of Sheet Metal Forming [M]. Sevenoaks, Kent: Edward Arnold, 1992.
- [13] 白晓虹. 数字图像相关 (DIC) 测量方法在材料变形研究中的应用 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
Bai X H. Application of Digital Image Correlation Method in Study of Material Deformation [D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.
- [14] 王帅, 薛河, 杨富强, 等. 利用硬度试验获取冷加工后 316L 不锈钢力学性能 [J]. 西安科技大学学报, 2021, 41 (2): 340-347.
Wang S, Xue H, Yang F Q, et al. Determination of the mechanical parameters of 316L austenitic stainless steel after cold working by using hardness test [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021, 41 (2): 340-347.
- [15] 苏洪英, 吕丹, 李阳, 等. 应变硬化指数 (n 值) 公式的探讨 [J]. 理化检验: 物理分册, 2006, (12): 621-623, 620.
Su H Y, Lyu D, Li Y, et al. The discussion on the formula of strain hardening exponent (n values) [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2006, (12): 621-623, 620.
- [16] Blaber J A, Adair B, Antoniou A, et al. Ncorr: Open-source 2D digital image correlation Matlab software [J]. Experimental Mechanics, 2015, 55 (6): 1106.
- [17] 杨宏亮. 加工硬化对 316L 不锈钢环境致裂扩展驱动力影响的研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
Yang H L. Effect of Work Hardening on Driving Force of Environmentally Assisted Cracking of 316L SS [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [18] 邱晓刚, 张晓华, 唐静, 等. 影响冷轧薄板力学性能测试结果的试验研究 [J]. 理化检验: 物理分册, 2003, (7): 333-337.
Qiu X G, Zhang X H, Tang J, et al. Study on the tests which affect results of mechanical property of cold rolled sheet [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2003, (7): 333-337.
- [19] 韩淑敏, 刘刚, 白常厚. 管材试样的长短对延伸率的影响 [J]. 有色金属加工, 2008, 37 (2): 36-38.
Han S M, Liu G, Bai C H. Relationship between length of tube specimen and tested elongation [J]. Nonferrous Metals Processing, 2008, 37 (2): 36-38.
- [20] 李宏焯, 庄新村, 赵震. 材料常用流动应力模型研究 [J]. 模具技术, 2009, (5): 1-4, 48.
Li H Y, Zhuang X C, Zhao Z. Research on material flow stress models in common use [J]. Die and Mould Technology, 2009, (5): 1-4, 48.