激光复合织构焊管轧辊模具成形有限元模拟与试验研究

符永宏，周颖鸿，符昊，潘彩云，胡光耀

（江苏大学 机械工程学院，江苏 镇江 212013）

摘 要：目的 提高焊管成形质量，为激光复合织构轧辊模具产业化提供试验依据。**方法** 通过数值模拟方法模拟焊管轧辊成形过程，获得不同摩擦系数组合下板料成形应力应变和径向厚度数据，并获得最优模具表面织构方案，为轧辊模具表面织构处理提供依据。依据数值模拟结果，运用激光表面织构技术对辊子模具表面进行复合织构加工处理，开展激光复合织构模具和未织构模具成形对比，并对成形件进行残余应力、应变、边缘减薄率等检测分析。**结果** 数值模拟结果表明，下辊边缘区域应为减摩区，上辊边缘区域应为增摩区；应对下辊边缘区域进行激光微织构减摩，上辊边缘区域进行激光毛化增摩。成形试验结果表明，试验结果与数值模拟结果基本一致；与未织构模具相比，激光复合织构焊管轧辊模具优化了成形件的应力应变分布，降低了板厚边缘减薄率（5.06%），提高了成形件的均匀性（3.9%），成形件边缘区域形成了残余压应力。**结论** 激光复合织构焊管轧辊模具相比未织构模具，可显著改善成形件的边缘稳定度和成形质量。

关键词：轧辊；数值模拟；激光复合织构；应力；应变；减薄率

中图分类号：TH117 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2018)08-0121-08

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.08.018

Finite Element Simulation and Experiment on the Forming of Laser Composite Textured Roll

FU Yong-hong, ZHOU Ying-hong, FU Hao, PAN Cai-yun, HU Guang-yao

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the roll forming quality in order to provide test basis for the industrialization of laser composite textured roll. The roll forming process was simulated by the numerical simulation method to obtain the forming stress-strain and radial thickness of sheet at different friction coefficient combinations and the optimum mold surface texture to provide basis for treatment of roll texture. According to the results of numerical simulation, laser surface texturing was adopted to treat the roller surface, the forming contrast experiment was carried out for laser texturing mold and non-laser texturing mold and the residual stress, strain and edge thinning rate of the forming part were detected and analyzed. From the results of numerical simulation, the edge area of lower roll should be anti-friction area and the edge area of upper roll should be friction-added area. Laser microtexture anti-friction was conducted to the lower roll edge area and laser texturing friction addition was carried

收稿日期：2018-02-15；**修订日期：**2018-06-21

Received：2018-02-15；**Revised：**2018-06-21

基金项目：国家自然科学基金项目（51175233）；江苏省工业支撑项目（BE2014115）；江苏省重点研发计划（BE2016144）

Fund：Supported by the National Natural Science Foundation of China (51175233), Industrial Support Project of Jiangsu Province (BE2014115), Key Research and Development Programs of Jiangsu Province (BE2016144)

作者简介：符永宏（1965—），男，博士，教授，主要从事摩擦润滑理论及激光应用技术研究。

Biography：FU Yong-hong(1965—), Male, Ph.D., Professor, Research focus: friction lubrication theory and laser application technology.

out to the upper roll edge area. Through the results of forming test, the test results were basically consistent with the numerical simulation results. Compared to the non-textured mould, the laser surface texturing roll mould could optimize the distribution of molding stress and strain, reduce the thinning rate of the plate thickness by 5.06% and improve the uniformity of the forming part improved by 3.9%. Therefore, the edge area of the forming part was accumulated with residual stress and strain. Compared with the non-textured mould, the laser composite textured roll can obviously improve the edge stability and forming quality of the forming part.

KEY WORDS: roll; numerical simulation; laser texturing; stress; strain; thinning ratio

随着航空航天、汽车、建筑、家电等行业的快速发展，焊管的需求量不断增加，焊管行业竞争也日趋激烈[1-2]。焊管轧辊成形属于三维弹塑性大变形，板料经过各个道次，经历大变形、有限应变弯曲成目标产品。辊弯成形时，板料边缘区域不仅纵向受到反复的拉伸和压缩变形，横向也逐渐弯曲，受力分析复杂。对于轧辊模具设计，目前缺少公认的设计准则，工业实践上主要通过经验设计优化模具，此方法需要大量的试验和时间，难以适应市场变化。目前通过有限元方法设计轧辊模具，可直观探究辊弯变形规律并改善成形工艺，受到行业内工程技术人员的普遍重视。

小野田义富等[3]通过刚塑性有限元方法分析了辊弯特性，并依据模拟结果优化工艺，提高了板料成形的均匀度。德国 data M 公司对冷弯成形开展模拟研究，并对冷弯成形设计软件 COPRA 进行开发，新增有限元仿真模块。李大永、肖良红等[4-5]利用有限元分析法对 U 型钢辊弯曲成形过程进行有限元仿真，研究发现辊子间距越大、板厚越小，板料边缘纵向应变越小，成形件易失稳。胡盛德等[6]利用有限元分析方法，模拟 HFW 焊管成形时预成形段板料的应变分布和变形状态，研究表明预成形阶段，发生大塑性变形的区域为板料边缘区域。张楠等[7]通过有限元分析方法，模拟了进给量对轧辊残余应力应变的影响，结果显示进给量越小，残余应力越小，有利于板料后续加工。通过对辊弯成形的有限元模拟研究，取得两点重要共识：一是板料的应力应变和板厚分布是评价板料成形质量的重要指标；二是塑性成形过程中，当工艺参数确定时，成形件的应力应变和厚度分布主要受辊子与板料接触界面的摩擦力决定，即成形工艺确定时，辊子表面摩擦特性是影响成形件质量的关键要素。同时工程实践应用也表明，辊子表面粗糙度过大将导致成形困难，造成工件表面划伤；辊子表面粗糙度过低，即光轧辊，工件易与模具发生粘着或打滑。其实在理论上，要求模具辊子与板料接触界面应该存在不同摩擦特性分布，只是目前的机加工方法难以实现。

通过表面微织构技术，可显著改善摩擦副表面的摩擦性能，改善成形性能[8]。本课题组长期专注于激光微织构技术的应用研究，并在发动机[9]、机械密封、轴承[10]等行业，成功得到初步工程应用。相关试验研究表明，将激光毛化技术应用于模具，可增加摩擦副表面的摩擦系数，提高板料的延展率，提高成形极限，改善成形件的成形质量[11-14]。本课题组提出的模具表面激光复合织构新技术，即在模具表面不同关键敏感区域，利用激光微加工技术，设置不同的表面增摩减摩微织构，以优化模具表面摩擦特性分布，从而实现模具表面主动设计制造的目的。试验结果表明，应用激光复合织构技术可减小筒形件最大减薄率，改善弯管件起皱现象，提高成形件的成形质量[15-16]，但有关激光复合织构轧辊模具的试验研究尚未见报道。

本文主要针对激光复合织构技术对焊管轧辊模具进行应用研究，首先通过数值模拟方法，寻找辊子模具表面不同区域摩擦系数组合对焊管成形性能的影响规律，从而确定辊子表面增摩、减摩区域。据此，对轧辊模具表面进行激光复合织构加工处理，并系统开展激光复合织构轧辊模具和未织构模具的性能对比试验，以期为激光复合织构技术在焊管成形行业的大规模工程应用提供支撑。

1 轧辊成形数值模拟

1.1 有限元建模

轧辊成形过程是板料的连续塑性变形过程，为简化求解过程，节约计算时间，选取轧辊前四道次进行分析。由于轧辊辊子和成形件的对称性特点，仿真时取模型的一半进行计算。将轧辊模具设置为刚性体，板料设置为弹塑性体，将板料的网格单元设置为 8 节点连续壳体单元（SC8R），仿真装配模型如图 1 所示。板料的基本物理参数如表 1 所示。

表 1 试验材料的基本物理参数

Tab.1 Basic physical parameters of test material

Material	Density/(kg·m^{-3})	Modulus of elasticity/GPa	Tensile strength/MPa	Poisson ratio
Q235 steel	7.8×10^{3}	200~210	375~460	0.25~0.33

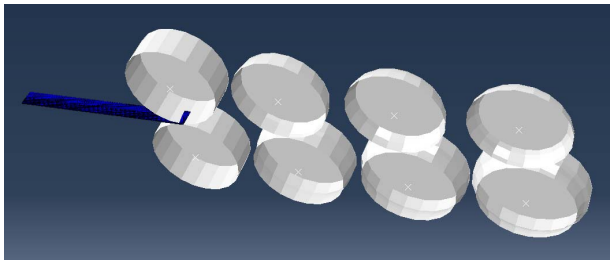


图 1　轧辊仿真装配模型
Fig.1 Assembly model of simulated roll

1.2　模拟方案

焊管成形时，板料边缘区域为主要变形区域，辊子边缘区域为塑性成形摩擦特性敏感区，中心区域为非敏感区。将辊子划分为边缘区域和中心区域，本文重点研究辊子边缘区域摩擦特性对焊管成形性能的影响。

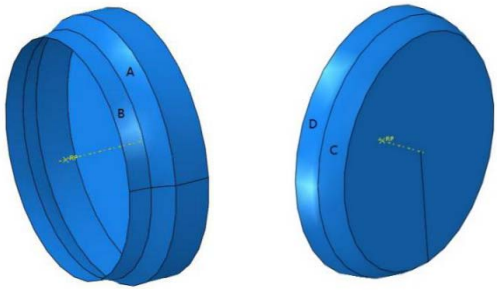
设定板料以 600 mm/s 的速度恒定向前做主动运动，辊子在摩擦力的作用下做随动运动，约束辊子位移。选取第四道次辊子作为具体研究对象。将辊子表面划分为四个区域：下辊边缘区域 A 和中心区域 B，上辊边缘区域 C 和中心区域 D，如图 2 所示。设定区域 A、B、C、D 的摩擦系数分别为 f_a、f_b、f_c、f_d，控制辊子中心区域的摩擦系数不变，改变上辊边缘区域和下辊边缘区域的摩擦系数。设置三种方案：方案 1，对下辊边缘区域进行减摩处理，对上辊边缘区域做增摩处理；方案 2，对下辊边缘区域进行增摩处理，对上辊边缘区域做减摩处理；方案 3，将辊子表面摩擦系数设置为同一数值，即不改变辊子边缘摩擦特性分布。摩擦系数方案如表 2 所示。其中，未织构接触界面摩擦系数设置为 0.26，微凹坑具有减摩效果[8]，减摩区域摩擦系数设置为 0.02。摩擦磨损试验表明，激光毛化后，接触界面的摩擦系数为未织构试样的 1.5~2.25 倍[17]，且激光毛化织构后，接触界面实际接触面积比名义接触面积小，设定增摩区域摩擦系数为 0.5。成形件检测路径与第四道次辊子中心线重合，图 3a 为路径示意图，图 3b 为应变检测示意图。具体应变检测定义为：

$$\varepsilon_n = \frac{l_n - L_n}{L_n} \tag{1}$$

式中：ε_n 为路径方向点 S_n 处的应变；L_n 为成形前点 S_n 处相邻两条标记线的径向距离；l_n 为成形后点 S_n 处相邻两条网格线的纵向距离。

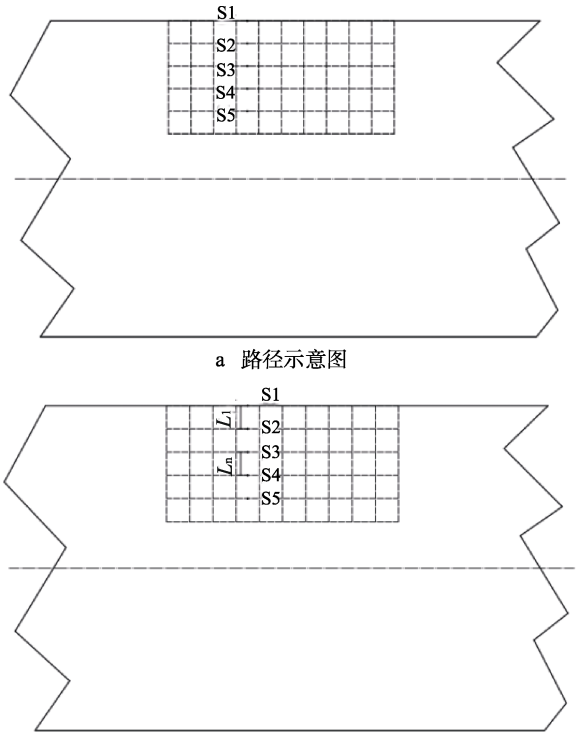
表 2　摩擦系数方案
Tab.2 Friction coefficient scheme

Programme	f_a	f_b	f_c	f_d
1	0.02	0.26	0.5	0.26
2	0.5	0.26	0.02	0.26
3	0.26	0.26	0.26	0.26



a 下辊区域　　b 上辊区域

图 2　轧辊辊子表面分区图
Fig.2 Roller surface partition:
a) lower roller area, b) upper roller area



a 路径示意图

b 应变检测示意图

图 3　数值模拟成形检测示意图
Fig.3 Schematic diagram of numerical simulation forming test: a) path diagram, b) distribution diagram of test point of residual stress

2　数值模拟结果与分析

2.1　应力应变分析

工程应用表明，焊管轧辊成形失效部位主要为板料边缘区域。为提高成形件质量，应优化成形件边缘区域的应力分布状态，降低板料边缘区域的最大应力。图 4 为不同方案沿同一路径的有效应力分布图，可以看出，3 种方案中，板料的边缘区域应力均为最大，且应力均成逐渐减小的趋势。其中边缘应力分布从大到小为：方案 2>方案 3>方案 1，方案 1 的应力分布状态最优。

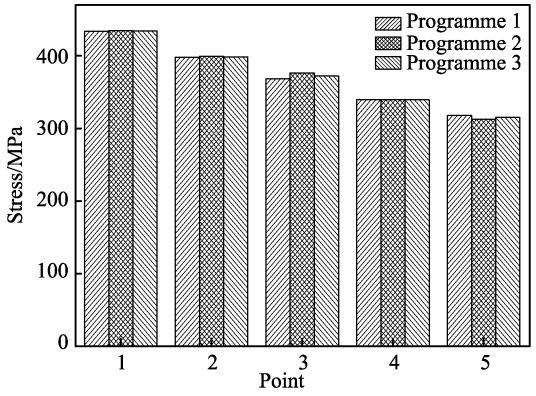


图 4　沿径向数值模拟的应力分布
Fig.4 Stress distribution of FE

图 5 为不同方案沿同一路径的等效塑性应变分布图。从图 5 可以看出，不同方案下应变变化趋势基本一致，均从边缘区域向中心区域逐渐减小。其中，方案 2，即下辊增摩、上辊减摩组，靠近板料边缘区域和接近板料中心区域的应变均最大，这表明相比其他两种方案，焊管轧辊成形过程中，材料流动最剧烈，板料边缘区域材料减薄最严重。方案 1，即下辊减摩、上辊增摩组，板料边缘区域的应变最小，材料流动最小。从图 4 和图 5 可以看出，方案 1 相比其他两种方案，即下辊减摩、上辊增摩组相比下辊增摩、上辊减摩组和普通试验组，应力应变分布最优，为优化方案。

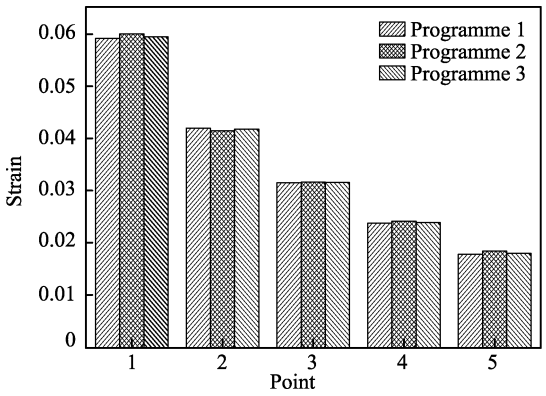


图 5　沿径向数值模拟的应变分布
Fig.5 Strain distribution of FE

2.2　径向厚度分析

板料板厚沿路径方向的变化规律如图 6 所示，曲线变化趋势基本一致，边缘区域厚度减小，靠近中心区域的板厚略有增加。数值模拟结果表明，方案 1 板料边缘的板厚减薄率为 0.156%，方案 2 板料边缘的板厚减薄率为 0.168%，方案 3 板料边缘的板厚减薄率为 0.161%。边缘板厚减薄率结果表明，方案 1 的板厚分布最均匀，即成形性能最好。

从图 4—6 中可以看出，方案 1 可提高焊管成形质量，降低板料边缘出现鼓包的概率，增强成形件边缘的稳定性，应降低板料边缘区域的减薄率，提高板厚均匀性。

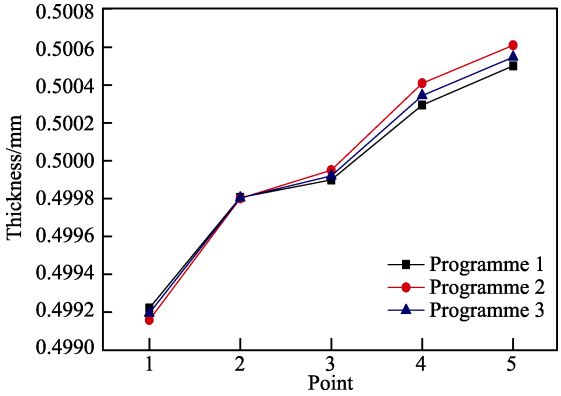


图 6　沿径向数值模拟的厚度分布
Fig.6 Thickness distribution of FE

3　轧辊试验

3.1　激光复合织构辊子

本文选取 VZH-25 高频直缝精密焊管机组（立式料笼）前四道次进行试验，试验材料选取 Q235 钢，宽 70 mm，厚 0.5 mm，基本物理参数见表 1。根据模拟结果指导试验，将第四道次辊子的下辊边缘区域划分为减摩区域，上辊边缘区域划分为增摩区域。对第四道次辊子下辊边缘区域进行激光微织构处理，上辊边缘区域进行激光毛化处理，另一侧不进行激光表面织构处理，开展成形对比试验，对比激光复合造型模具和未织构模具对轧辊的影响。

采用 YAG 固体激光器，对下辊边缘区域进行激光微织构处理，微凹腔直径为 120 μm，深度为 13 μm，面积占有率为 3%，微凹腔形貌如图 7 所示。采用光纤激光器对上辊边缘进行毛化处理，激光毛化点直径为 200 μm，凸起高度为 7.5 μm，面积占有率为 10%，毛化形貌如图 8 所示，激光复合织构后的轧辊辊子如图 9 所示。

3.2　检测方案

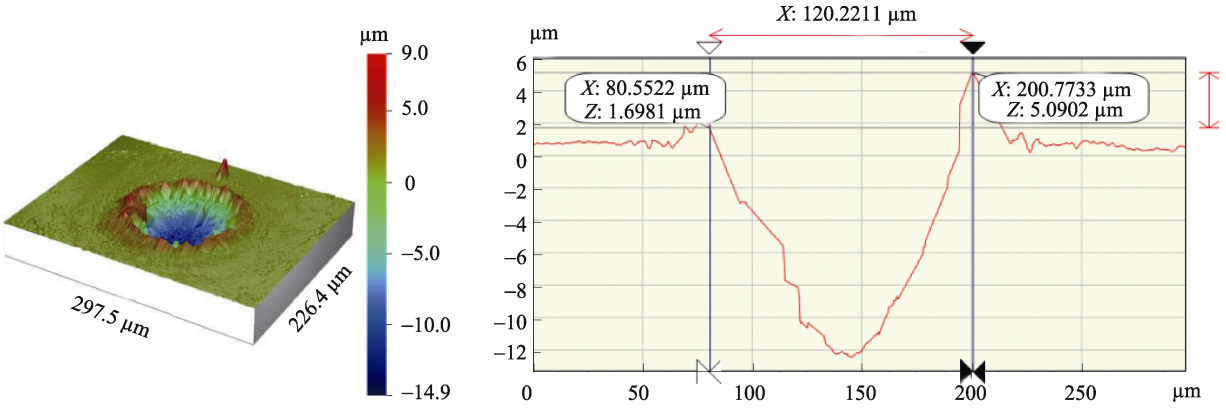
3.2.1　应变检测

在带钢两侧预先画出标记线，图 10 为应变检测示意图。各路径点位置处分别测量 3 次，最后取其平均值，具体应变定义如下：

$$\varepsilon_i=\frac{l_i-L_i}{L_i} \tag{2}$$

$$\varepsilon_i'=\frac{l_i'-L_i'}{L_i'} \tag{3}$$

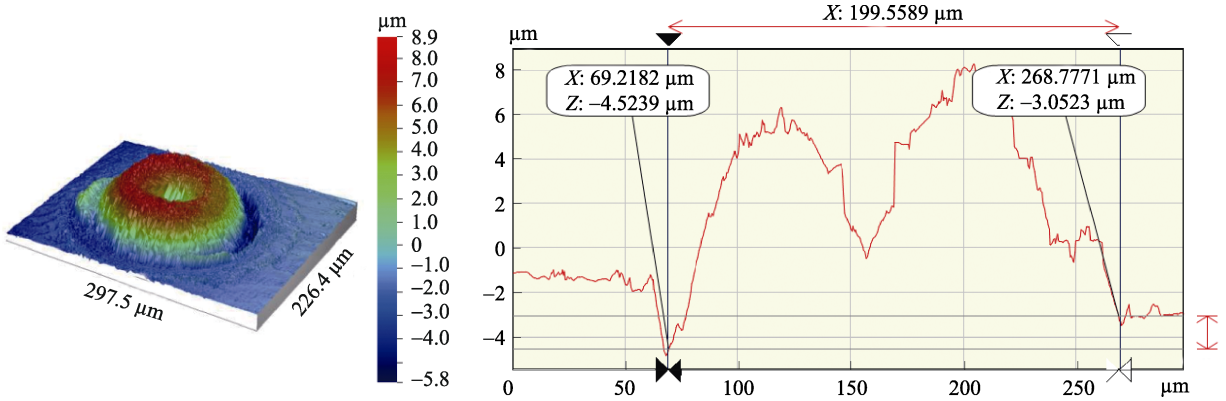
式中：ε_i 为织构侧路径方向点 S_i 处的应变；L_i 为成形前点 S_i 处相邻两条标记线的径向距离；l_i 为成形后点 S_i 处相邻两条网格线的纵向距离；ε_i' 为非织构侧路径方向点 S_i' 处的应变；L_i' 为非织构侧成形前点 S_i' 处相邻两条标记线的径向距离；l_i' 为非织构侧成形后点 S_i' 处相邻两条网格线的纵向距离。



a 三维图　　b 二维图

图 7　微织构形貌图

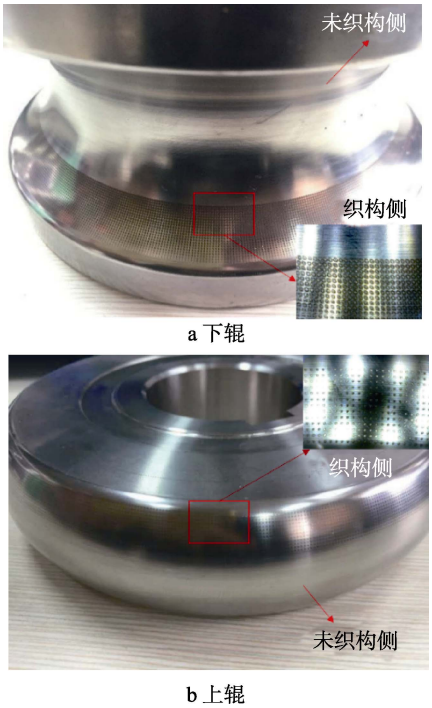
Fig.7 Micro texture morphologies: a) 3-dimensional graphical, b)2-dimensional graphical



a 三维图　　b 二维图

图 8　毛化形貌图

Fig.8 Micro ridge morphologies: a) 3-dimensional graphical, b)2-dimensional graphical



a 下辊

b 上辊

图 9　轧辊辊子

Fig.9 Roller: a) upper roller, b)lower roller

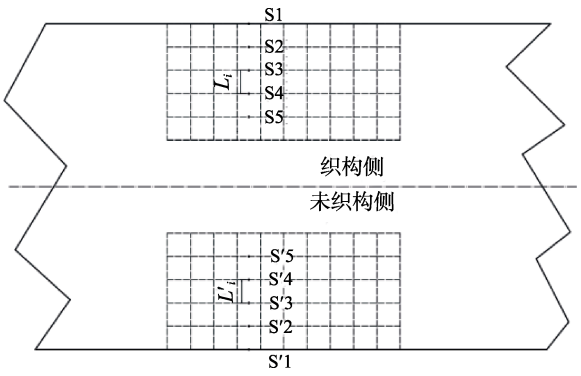


图 10　应变检测示意图

Fig.10 Sketch map of strain detection

3.2.2　残余应力检测

选用 X-350A 型 X 射线应力测定仪对成形件表面残余应力进行测量，测量方法为倾侧固定 Ψ 法，用交相关法定峰。参数为：采用 CrKα 辐射，(211)晶面衍射，X 光管电压 20.0 kV，管电流 5.0 mA，应力常数−318 MPa/(°)，倾斜角 Ψ 分别取 0°、2.24°、35.3°、45°，扫描起始和终止角分别为 159°和 151°，2θ 角扫描步距 0.10°，计数时间 0.50 s，准直管直径 ϕ1 mm。

残余应力检测点分布：织构区域选取 5 个点 S1—S5，非织构区域选取 5 个点 S9—S13，点距为 5 mm，检测点分布如图 11 所示。

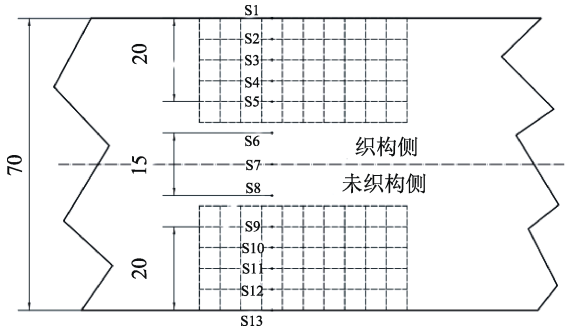


图 11　残余应力测试点分布图

Fig.11 Distribution diagram of test point of residual stress

3.2.3　厚度检测

通过螺旋测微计对成形件厚度进行检测，厚度检测路径与应变检测路径一致。厚度检测点分布如下：同一径向位置，织构区域选取 5 个点，非织构区域选取 5 点，检测点间距为 5 mm。分别检测 3 个试样并取每个检测点厚度的平均值作为板厚最终厚度测量值，检测点分布如图 12 所示。

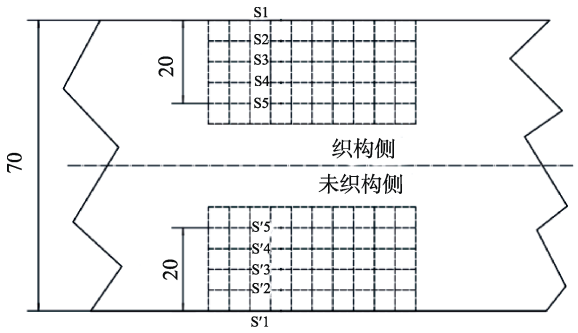


图 12　厚度检测点分布图

Fig.12 Distribution map of thicknessdetection point

4　试验结果分析

4.1　应变

通过检测成形件沿径向的等效应变，其变化趋势如图 13 所示。可以看出，应变变化趋势为边缘大、中心区域小，与有限元模拟结果基本一致；织构侧边缘区域的应变降低了 0.657%。对下辊边缘区域进行减摩处理及对上辊边缘区域进行增摩处理，可改善板料边缘区域的材料流动状态，优化轧辊成形件的应力分布，减小边缘最大应力，提高板料边缘稳定性。

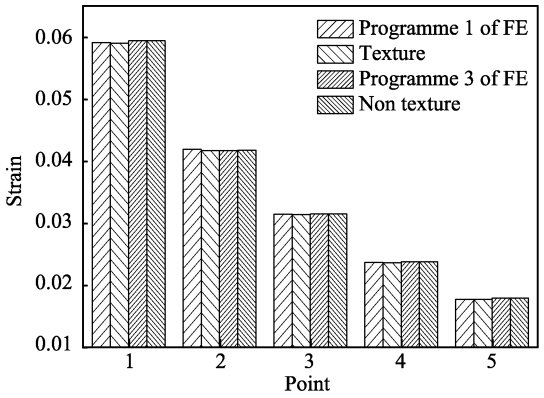


图 13　沿径向应变分布

Fig.13 Radial strain distribution

4.2　径向残余应力

根据残余应力测试报告，织构侧和未织构侧试样的表面残余应力分布如表 3 所示。从表 3 可知，激光复合织构辊子带钢边缘区域和中心区域的残余应力为压应力，普通轧辊成形侧带钢边缘区域的残余应力为拉应力。残余应力状态不同的原因是：激光复合织构模具由于毛化微凸起的存在，对带钢表面材料进行钉扎，成形件的位错密度增加，表面发生硬化，形成了残余压应力。

表 3　不同区域沿径向残余应力分布

Tab.3 Distribution of residual stress along radial direction in different regions

Point	Texture area					Central area			Non texture area				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
σ/MPa	−35	−2	124	123	78	−29	−6	−66	−43	0	9	39	51

4.3　径向厚度

图 14 为成形件沿径向的厚度分布。图中试验曲线与数值模拟结果基本一致，两种方案带钢边缘区域的板厚均有所减小，中心区域板厚有所增大。成形件厚度检测结果表明，普通成形件边缘减薄率为 0.158%，激光复合织构处理后的带钢边缘减薄率为 0.150%，板料边缘区域减薄率降低了 5.06%，即成形件产品的不合格率降低 5.06%。相比普通模具，激光复合织构模具的成形件板厚变化幅度降低了 3.9%，即均匀度提高了 3.9%。试验结果验证了激光复合织构模具表面摩擦特性分布得到优化，可通过表面织构改善轧辊成形工艺。

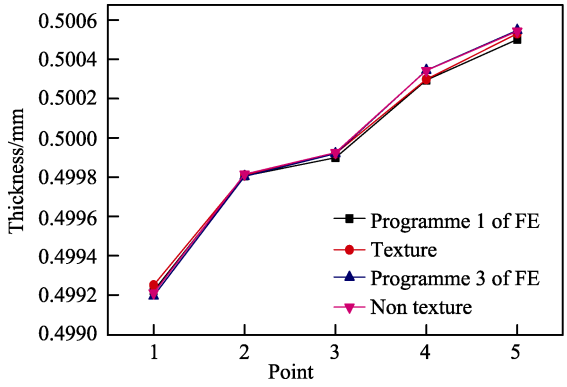


图 14　沿径向厚度分布

Fig.14 Radial thickness distribution

5　结论

1）通过对焊管轧辊成形过程的数值模拟，结果表明，对下辊边缘进行减摩处理、对上辊边缘进行增摩处理可改善成形件的应力应变分布，提高成形件质量。

2）激光表面复合织构轧辊模具成形件的应变和径向厚度结果与数值模拟结果具有良好的一致性，对辊子表面进行激光表面织构处理可降低板料边缘的最大应力分布，提高板料成形均匀性，有利于提高成形件边缘的稳定性。

3）焊管轧辊成形对比试验表明，利用激光表面织构技术对辊子表面进行摩擦特性优化，可优化成形件表面残余应力分布状态，使成形件表面存在残余压应力，可提高成形件的疲劳强度和使用寿命。

参考文献：

[1] 丁国良. 中国冷弯行业发展现状及前景[J]. 钢结构, 2008, 23(1): 75-76.
DING Guo-liang. Development status and prospects of china cold roll-forming steel industry[J]. Steel construction, 2008, 23(1): 75-76.

[2] 乔治·哈姆斯. 冷弯成形技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
GEORGE Harms. Cold forming technology handbook[M]. Beijing: Chemical industry press, 2009.

[3] 小野田義富, 川井彰, 小林英市. 電縫管の W ベンド成形および U ベンド成形における素板の変形特性の有限要素シミュレーション[J]. 塑性と加工, 1993, 34: 1358-1363.
YOSHITOMI Onoda, KAWAI Akira, EIICHI Kobayashi. Finite element simulation of deformation features of sheet metals formed by W-bend and U-bend forming rolls in erw pipe mill[J]. Plastic processing, 1993, 34: 1358-1363.

[4] 李大永, 蒋劲茂, 彭颖红, 等. 辊弯成形过程仿真与参数优化[J]. 系统仿真学报, 2007(4): 893-896.
LI Da-yong, JIANG Jin-mao, PENG Ying-hong, et al. Study on roll forming process simulation and roll diameters optimization[J]. Journal of system simulation, 2007(4): 893-896.

[5] 肖良红, 黎宇, 曹亚雄, 等. 薄壁槽钢零件辊弯成形边波产生机理及影响因素[J]. 塑性工程学报, 2016, 23(1): 32-39.
XIAO Liang-hong, LI Yu, CAO Ya-xiong, et al. Mechanisms and influences of edge-wave in roll-forming for thin-walled channel steel parts[J]. Journal of plasticity engineering, 2016, 23(1): 32-39.

[6] 胡盛德, 张静, 刘勇, 等. HFW 焊管排辊成形预成形段有限元仿真分析[J]. 机械设计与制造, 2014(5): 198-200.
HU Sheng-de, ZHANG Jing, LIU Yong, et al. Analysis on pre-forming step of HFW cage roll-forming with FEM simulation[J]. Machinery design & manufacture, 2014(5): 198-200.

[7] 张楠, 李煜彤, 王昱, 等. 送进量对锻造轧辊残余应力应变的影响[J]. 科技资讯, 2015, 13(22): 70-72.
ZHANG Nan, LI Yu-tong, WANG Yu, et al. Influence of feed rate on residual stress and strain of forging roll[J]. Science & technology information, 2015, 13(22): 70-72.

[8] HU Z W, LIU K, LIU X J. Influence of surface topography deformation on friction atsliding contact interface in metal forming[J]. Tribology, 2015, 98(s2-3): 157-163.

[9] 符永宏, 陆华才, 华希俊, 等. 激光微珩磨缸套润滑耐磨性能理论分析[J]. 内燃机学报, 2006, 24(6): 559-564.
FU Yong-hong, LU Hua-cai, HUA Xi-jun, et al. Theoretical analysis on lubrication and wear-resisting of the honed cylinder liner[J]. Transactions of CSICE, 2006, 24(6): 559-564.

[10] 纪敬虎, 符永宏, 王祖权, 等. 激光表面跨尺度织构化机械密封摩擦性能[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(4): 452-456.
JI Jing-hu, FU Yong-hong, WANG Zu-quan, et al. Tribological property of mechanical seal with laser-induced multi-scale surface texturing[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2012, 30(4): 452-456.

[11] MINAMIDA K, SUEHIRO J, TOSHIMITU T, et al. Laser system for dulling work roll by Q-switched Nd: YAG laser[J]. Journal of laser applications, 1989, 1(4): 587.

[12] POPP U, ENGEL U. Microtexturing of cold forging tools influence on tool life[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers part B: Journal of engineering

manufacture, 2013, 220(1): 27-33.

[13] LIN B T, HUANG K M, KUO C C, et al. Improvement of deep drawabilityby using punch surfaces with microridges[J]. Journal of materials processing tech, 2015, 225: 275-285.

[14] LIN B T, YANG C Y. Using a punch with micro-ridges to shorten the multistage deep drawing process for stainless steels[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2016, 88(9-12): 1-11.

[15] 符永宏, 杨守军, 许华, 等. 基于均匀性的模具表面复合织构[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2014, 35(3): 343-348.
FU Yong-hong, YANG Shou-jun, XU Hua, et al. Composite texture of mold surface based on uniformity [J]. Journal of jiangsu university(natural science edition), 2014, 35(3): 343-348.

[16] 符永宏, 张航成, 戴金跃, 等. 激光复合织构薄壁弯管模具成形试验[J]. 精密成形工程, 2017(1): 59-65.
FU Yong-hong, ZHANG Hang-cheng, DAI Jin-yue, et al. Forming of thin-wall tube bending mould with composite laser texturing surface[J]. Journal of netshape forming engineering, 2017(1): 59-65.

[17] 符永宏, 施余峰, 华希俊, 等. 激光毛化表面的摩擦学性能实验研究[J]. 中国机械工程, 2011, 22(19): 2269-2274.
FU Yong-hong, SHI Yu-feng, HUA Xi-jun, et al. Study on tribological performances of laser textured surfaces[J]. China mechanical engineering, 2011, 22(19): 2269-2274.