

试验与研究

H13 钢激光熔覆工艺对熔覆层 气孔缺陷的影响 *

李 涛^{1,2}, 张世通^{1,2}, 高晓龙^{1,2}, 刘 晶^{1,2},
张 柯^{1,2}, 余浩魁^{1,2}

(1. 宝鸡文理学院 机械工程学院, 陕西 宝鸡 721016;
2. 陕西省机器人关键零部件先进制造与评估省市共建重点实验室, 陕西 宝鸡 721016)

摘 要: 为了研究激光熔覆工艺参数对熔覆层宏观形貌和气孔缺陷的影响, 通过设计正交试验, 分析了优化参数下熔覆层的微观组织和力学性能。试验结果显示, 随着扫描速度增加, 气孔数量和熔覆层厚度减小; 当熔覆层厚度小于 200 μm 时, Ar 气卷入熔融金属形成的气泡能够及时逸出, 使得气孔数量降低; 在激光功率 1 300 W、送粉速度 28 g/min、扫描速度 7 mm/s 的熔覆工艺参数下, 能够获得无裂纹和无气孔的熔覆层, 其微观组织由大量的针状马氏体和少量的碳化物组成, 显微硬度值约为 650HV_{0.5}~710HV_{0.5}。研究表明, 扫描速度对气孔数量和熔覆层有着显著影响。

关键词: 激光熔覆; H13 钢; 正交试验; 微观组织; 显微硬度

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2022.10.005

Effect of Laser Cladding Process Parameters on Pore Defects in Cladding Layer of H13 Steel

LI Tao^{1,2}, ZHANG Shitong^{1,2}, GAO Xiaolong^{1,2}, LIU Jing^{1,2}, ZHANG Ke^{1,2}, YU Haokui^{1,2}
(1. School of Mechanical Engineering, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721016, Shaanxi, China;
2. Shaanxi Province Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Detection Technology for
Industrial Robot and Its Major Component, Baoji 721016, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the effect of laser cladding process parameters on the macroscopic morphology and pore defects of the cladding layer, the microstructure and mechanical properties of the cladding layer under optimized parameters were analyzed by orthogonal design test. The experimental results show that the number of pores and the thickness of cladding layer decrease with the increase of scanning speed. When the thickness of the cladding layer is less than 200 μm , the bubbles formed by the Ar gas involved in the molten metal can escape in time, resulting in the reduction of the number of pores. Under the cladding process parameters of laser power 1 300 W, powder feeding speed 28 g/min and scanning speed 7 mm/s, the cladding layer without cracks and pores can be obtained. The microstructure of the cladding layer is composed of a large number of acicular martensite and a small amount of carbide, and the microhardness is about 650HV_{0.5}~710HV_{0.5}. The results show that the scanning speed has a significant effect on the number of pores and the cladding layer.

Key words: laser cladding; H13 steel; orthogonal test; microstructure; microhardness

* **基金项目:** 国家自然科学基金“钛/钢异种金属超声辅助双光束激光熔焊-熔钎焊双界面调控及成形机制研究”(51905006); 陕西省重点研发计划一般项目“航空航海用钛合金大厚板高速高质超声辅助激光填丝焊关键技术及设备研发”(2021GY-322); 陕西省教育厅专项科研项目“共晶合金凝固组织非平衡性与组织演化关联性研究”(No.19JK0037); 宝鸡文理学院研究生创新项目“Ti6Al4V/V/NiTi 异种金属激光焊接技术研究”(YJSCX20YB09)。

0 前 言

H13 钢具有良好的耐热性和优良的抗热裂能力，被广泛用于制造挤压模具，但是在挤压过程中模具频繁受到高温、冲击载荷和冷却液侵蚀等影响，极易损坏^[1-3]。H13 钢挤压模具损坏的部位多集中于刃口，如能将刃口损坏部位修复，可提高模具的循环使用寿命，将会产生巨大的经济价值。

激光熔覆技术利用高能激光束将基体材料表面的粉末颗粒完全熔化并使基体材料表面微熔，冷却凝固后，二者形成一个冶金结合的状态^[4]。由于激光熔覆技术具有激光能量密度高、稀释率低、熔覆层组织致密、工艺过程易于实现自动化等优点，使其在零件修复与再制造方面具有广阔的应用前景。

激光熔覆参数如激光功率、扫描速度、光斑尺寸、送粉量及粉末成分等对熔覆质量有着重要影响。目前国内外学者针对熔覆工艺参数对于熔覆层成形影响进行了相关的研究。Song 等^[5]利用激光熔覆技术在 K403 基底上制备 K403 涂层，结果表明，熔覆层的高度、宽度和熔覆层深度都随着激光功率的增大而增大；随着激光功率的增大，熔覆层底部分别出现柱状枝晶、少量等轴晶、均匀柱状枝晶和晶粒生长。林冉等^[6]通过激光熔覆技术在 GCr15 钢基材上成功制备 FeCr-NiSi 合金熔覆层，结果表明，随着激光功率的降低或扫描速度的增加，熔覆层表面硬度提高；当激光功率为 2 400 W、扫描速度为 7 mm/s 时，熔覆层最高硬度为 781.5HV₀₂，是基材的 3.4 倍。上官芸娟等^[7]以 Ni60A 合金粉末为熔覆材料，在 Q235 钢基体表面制备合金涂层，在 2.5 kW 激光功率下，熔覆层最高硬度是基体硬度的 4.6 倍，摩擦系数较小，有效提高了低碳钢表面硬度及耐磨性。Erfanmanesh 等^[8]利用激光熔覆技术制

备 WC-12Co 金属陶瓷复合涂层，建立了单道熔覆层几何特性与工艺参数关系的数学模型。童文辉等^[9]对激光工艺参数 TiC-钴基合金熔覆层显微组织及性能的影响进行研究，表明熔覆层枝晶含量和间距会随着激光功率的降低或者扫描速度的增加而增大，且熔覆层最高显微硬度达到 1 246.6HV₀₂，相对基体提升接近 5 倍。在激光熔覆过程中，准确预测单道成形层宽度和高度，能够提高成形精度和再制造效率，并且为多道、多层激光熔覆工艺规划提供依据^[10-11]。但是，大部分的研究集中于熔覆参数对熔覆层微观组织和力学性能的影响，而关于熔覆工艺参数对熔覆层气孔缺陷影响的相关研究较少。

本研究采用正交试验方法，研究了激光熔覆参数对 H13 钢熔覆层气孔缺陷和成形的影响规律，分析了在较优工艺下获得的熔覆层的微观组织和力学性能。

1 试验方法

试验基材为 H13 钢，试板尺寸为 100 mm×100 mm×6 mm。利用砂纸对试板进行打磨并用无水乙醇进行清洗，去除试板表面油污和铁锈等杂质。熔覆材料选择与基体成分相同的 H13 钢粉末，其粒度范围为 50~100 μm，宏观形貌如图 1 所示。在使用前需对熔覆粉末进行烘干，其化学成分见表 1。

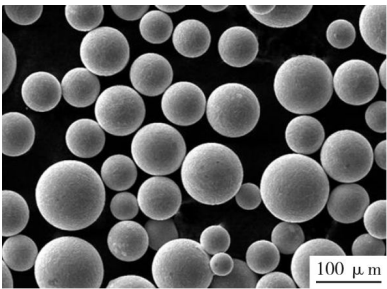


图 1 H13 钢粉末宏观形貌

表 1 H13 钢化学成分

<i>w</i> (C)	<i>w</i> (V)	<i>w</i> (Cr)	<i>w</i> (Si)	<i>w</i> (Mn)	<i>w</i> (Mo)	<i>w</i> (P)	<i>w</i> (S)	<i>w</i> (Fe)
0.37~0.42	0.80~1.20	4.75~5.50	0.80~1.20	0.20~0.50	1.10~1.75	≤0.03	≤0.006	余量

激光熔覆试验设备由 4 000 W 光纤激光器、三轴运动平台、同轴送粉头、送粉器等构成，熔覆过程如图 2 所示。为了防止空气中 H、O、N

对熔覆层造成污染，采用纯度为 99%Ar 作为保护气。光斑直径、搭接率、气流量在整个试验过程中保持恒定，其中光斑直径为 3 mm，搭接率

50%，同轴保护气流量为 20 L/min，载气送粉气流量为 9 L/min。正交试验因素和水平设计见表 2，试验参数见表 3。

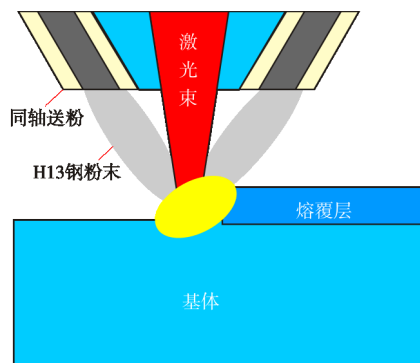


图 2 激光熔覆过程示意图

表 2 正交试验因素和水平设计

水平	激光功率/W	送粉速度/(g·min ⁻¹)	扫描速度/(mm·s ⁻¹)
1	1 300	20	3
2	1 500	24	5
3	1 700	28	7

利用电火花线切割机对熔覆试样进行加工，经预磨、抛光后制备成金相试样。采用 3 mL HNO₃+97 mL C₂H₆O 混合溶液对 H13 钢金相试样进行腐蚀，腐蚀时间为 25 s。利用光学显微镜 (OM)、扫描电 (SEM) 对熔覆层宏观形貌、气孔

表 3 正交试验工艺参数

序号	功率/W	送粉速度/(g·min ⁻¹)	激光扫描速度/(mm·s ⁻¹)
1	1 300	20	3
2	1 300	24	5
3	1 300	28	7
4	1 500	20	5
5	1 500	24	7
6	1 500	28	3
7	1 700	20	7
8	1 700	24	3
9	1 700	28	5

缺陷、微观组织及化学成分进行分析。同时，对熔覆层的显微硬度进行测试，加载力载荷 500 g，保载时间 10 s。

2 试验结果与分析

2.1 熔覆层宏观形貌

图 3 为不同工艺参数下获得的 H13 钢熔覆层横截面形貌，从图 3 可以看出，在所有熔覆工艺参数下，熔覆层均无裂纹产生，但熔覆层易形成气孔缺陷。当采用工艺参数 4、参数 6 和参数 8 时，熔覆层存在大量气孔，但在工艺参数 3 下，熔覆层几乎无气孔存在，这表明激光熔覆工艺参数对气孔数量有较大影响。

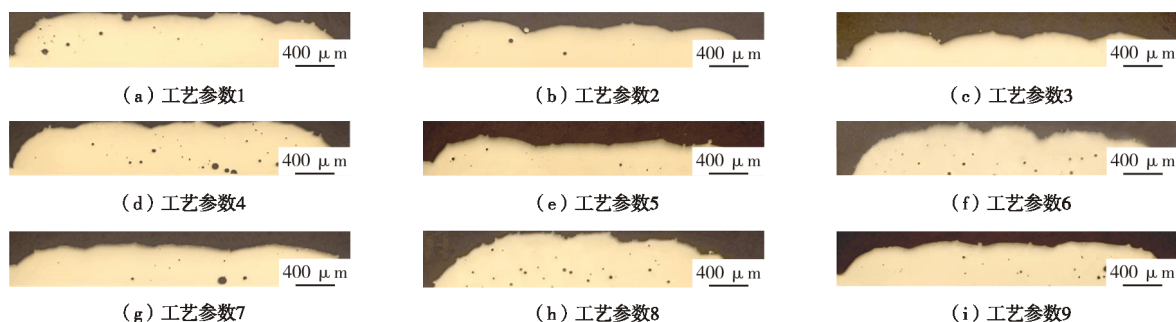


图 3 不同工艺参数下 H13 钢熔覆层横截面宏观形貌

图 4 是熔覆层中气孔缺陷形貌，可以看出，尽管气孔尺寸存在较大差异，但气孔都呈圆形。熔覆过程中，如果熔敷粉末自身存在水分、氧化物或熔覆保护气随着熔覆粉末一起被卷入熔池形成气泡，在高的冷却速度下，气泡不能及时逸出，被凝固组织捕获，就会形成气孔缺陷。图 5 和表 4 是气孔缺陷底部形态和成分测试结果。在气孔内壁，未发现 O、N 等元素存

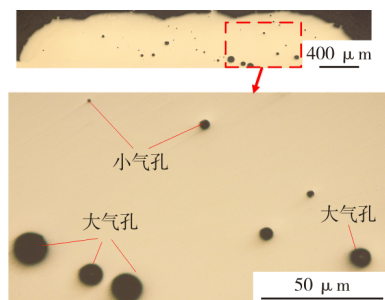


图 4 工艺 4 条件下熔覆层气孔缺陷形貌

在。在试验中，所用粉末被充分干燥，受粉末自身携带水分形成气孔的影响较小，因此可推测 H13 钢熔覆层中气孔形成和 Ar 气的卷入有较大关联。

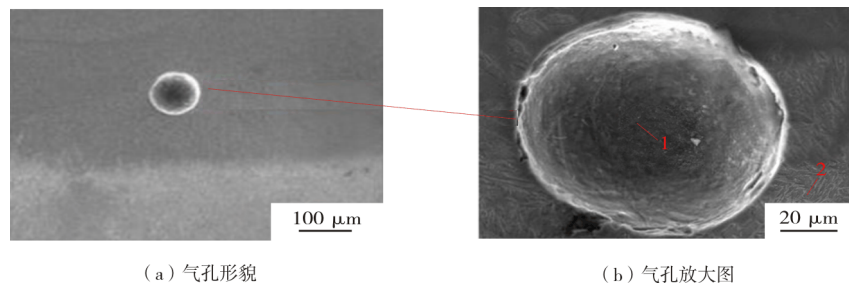


图 5 工艺 4 条件下熔覆层气孔 SEM 形貌

表 4 气孔成分分析结果

区域	原子百分比/%						
	Mo	Fe	Si	Cr	Mn	C	V
1	0.21	93.28	1.52	4.16	—	0.17	0.66
2	0.07	90.23	0.34	6.16	1.02	1.24	0.94

2.2 正交试验结果及分析

表 5~表 7 是对不同工艺参数下气孔数量和熔覆层厚度统计及极差分析结果，通过极差分析可知，熔覆工艺参数对气孔数量和熔覆层厚度影响程度均为：扫描速度>激光功率>送粉速度。

表 5 气孔数量与熔覆层厚度统计结果

序号	功率/W	送粉速度/(g·min ⁻¹)	扫描速度/(mm·s ⁻¹)	气孔数量/个	熔覆层厚度/μm
1	1 300	20	3	29	388
2	1 300	24	5	11	172
3	1 300	28	7	0	193
4	1 500	20	5	41	438
5	1 500	24	7	9	160
6	1 500	28	3	42	536
7	1 700	20	7	16	188
8	1 700	24	3	47	650
9	1 700	28	5	25	296

表 6 气孔数量极差分析结果

试验指标	激光功率/W	送粉速度/(g·min ⁻¹)	扫描速度/(mm·s ⁻¹)
K1	13	29	39
K2	31	22	26
K3	29	22	8
R	18	7	31

表 7 熔覆层厚度极差分析结果

试验指标	激光功率/W	送粉速度/(g·min ⁻¹)	扫描速度/(mm·s ⁻¹)
K1	251	338	524
K2	378	327	302
K3	378	342	180
R	127	15	344

图 6 所示是激光功率、激光扫描速度及送粉速度对气孔数量和熔覆层厚度的影响，从图 6 可以得出，熔覆层厚度和气孔数量均随着激光功率的增加而增大，但随扫描速度的增加而

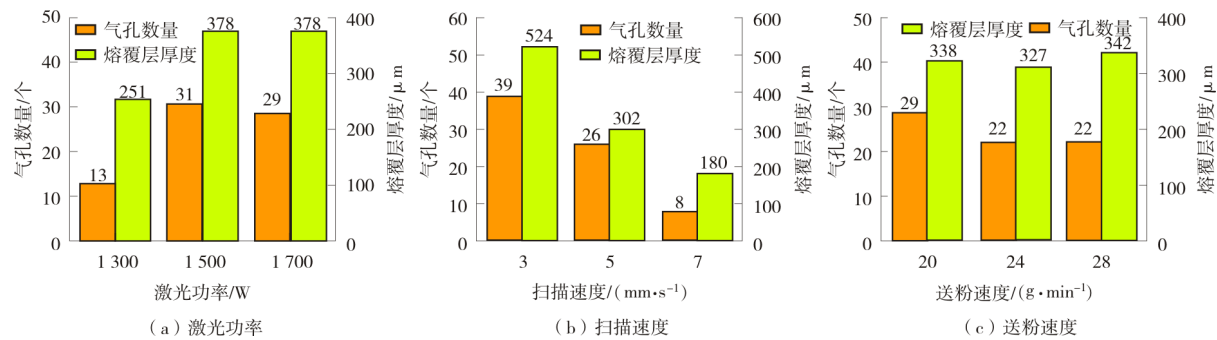


图 6 激光功率、扫描速度及送粉速度对熔覆层厚度和气孔数量的影响

减小。同时,送粉速度对气孔数量和熔覆层厚度基本无影响。

图 7 所示是熔覆层厚度与气孔数量关系曲线,通过图 7 可以看出,当熔覆层厚度低于 200 μm 时,气孔数量较少;当熔覆层厚度大于 200 μm 时,随着熔覆层厚度的增大,气孔

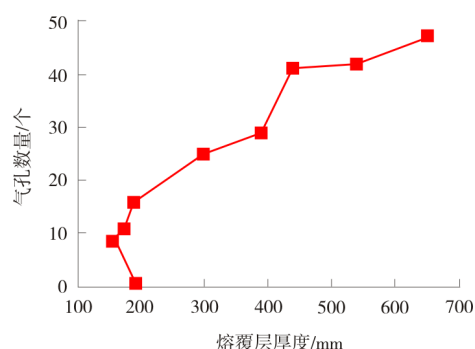
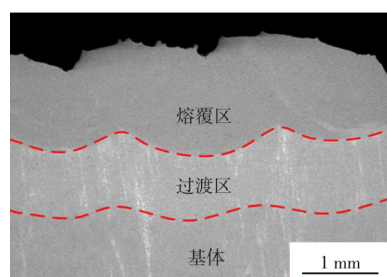
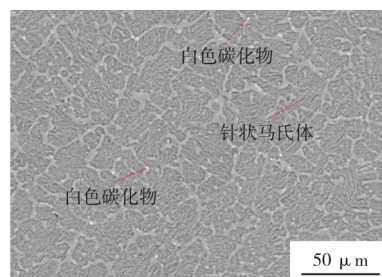


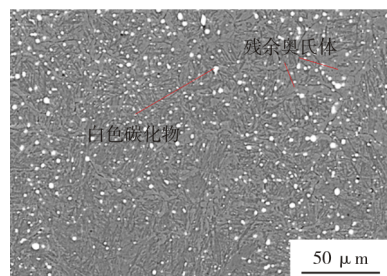
图 7 熔覆层厚度与气孔数量关系曲线



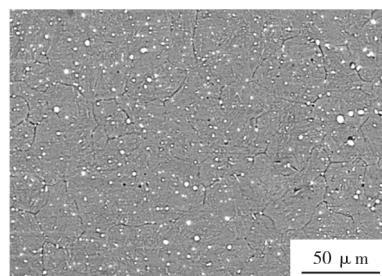
(a) 熔覆层组成



(b) 熔覆区



(c) 过渡区



(d) 基体

图 8 熔覆层试样微观组织形貌

于熔覆层组织,过渡层中马氏体含量减小,有大量的奥氏体和碳化物形成,这是由于过渡层的加热温度和冷却速度低于熔化区,导致奥氏体不能完全转变成马氏体,因此过渡层中存在较多奥氏体^[13]。

熔覆层显微硬度测试结果如图 9 所示,熔覆层显微硬度值为 650HV_{0.5}~710HV_{0.5},约为基体显微硬度的 1.4 倍。在较高的冷却速度下,熔覆层有大量的针状马氏体形成,导致熔覆层硬度升高。

数量也随之增加。这说明当熔覆层较薄时,由保护气卷入熔池形成的气泡能及时的逸出,使得气孔数量下降。另外,从图 7 可以发现,当熔覆层厚度低于 200 μm 时,同一熔覆层厚度对应两个不同的气孔数量。这是因为在相同的扫描速度下,不同的激光功率和送粉速度同时对气孔数量产生影响,导致在同一熔覆层厚度下存在不同的气孔数量。

2.3 微观组织和显微硬度

图 8 所示是激光功率为 1 300 W、送粉速度为 28 g/min、激光扫描速度为 7 mm/s 时的熔覆层微观组织,熔覆层主要由熔覆区、过渡区和基体三部分组成。熔覆区微观组织呈等轴状,主要由大量的针状马氏体和少量的碳化物组成,相关研究也得出了同样的结果^[12]。相比

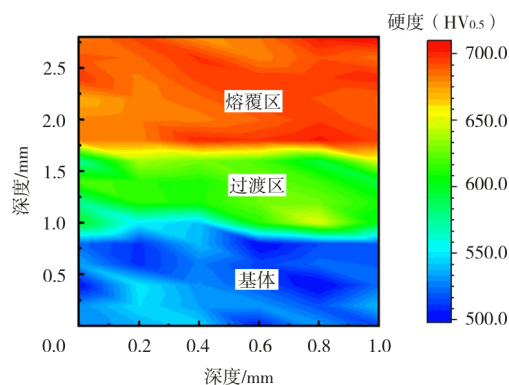


图 9 熔覆层试样硬度云图

3 结 论

(1) 正交试验结果显示, 工艺参数对熔覆层气孔和熔覆层厚度的影响显著性排序均为: 扫描速度>激光功率>送粉速度。

(2) 气孔缺陷的形成和熔覆过程中 Ar 被卷入熔融金属不能及时逸出有关。当熔覆层厚度<200 μm 时, 气孔数量明显减小。

(3) 当激光功率为 1 300 W、送粉速度为 28 g/min、激光扫描速度为 7 mm/s 时, 能够获得无裂纹和无气孔缺陷的熔覆层。

(4) 熔覆层微观组织呈等轴状, 由大量的针状马氏体和少量的碳化物组成, 显微硬度为 650HV_{0.5}~710HV_{0.5}, 是基体硬度的 1.4 倍。

参考文献:

- [1] ZHU L D, WANG S H, PAN H C, et al. Research on re-manufacturing strategy for 45 steel gear using H13 steel powder based on laser cladding technology[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020(49): 344-354.
- [2] VACHHANI H, RATHOD M, SHAH R. Dissolution and erosion behavior of AISI H13 shot sleeve in high pressure die casting process[J]. Engineering Failure Analysis, 2019(101): 206-214.
- [3] CHEN C R, WANG Y, OU H, et al. A review on remanufacture of dies and moulds[J]. Journal of Cleaner Production, 2014(64): 13-23.
- [4] 廖文, 田威, 曾超, 等. 激光熔覆再制造产品热损伤与寿命评估[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 2-7.
- [5] SONG H Y, LEI J B, XIE J C, et al. Laser melting deposition of K403 superalloy: The influence of processing parameters on the microstructure and wear performance[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019(805): 551-564.
- [6] 林冉, 舒林森, 董月, 等. 激光功率和扫描速度对熔覆组织与性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 243-249.
- [7] 上官芸娟, 吴巧荣, 宋瑞宏, 等. 激光功率对 Ni60A 合金熔覆层组织、显微硬度及耐磨性的影响[J]. 工业技术创新, 2021, 8(5): 24-29.
- [8] ERFANMANESH M, ABDOLLAH-POUR H, MOHAMMADIAN-SEMNANI H, et al. An empirical-statistical model for laser cladding of WC-12Co powder on AISI 321 stainless steel[J]. Optics and Laser Technology, 2017(97): 180-186.
- [9] 童文辉, 张新元, 李为轩, 等. 激光工艺参数对 TiC 增强钴基金属激光熔覆层组织及性能的影响[J]. 金属学报, 2020, 56(9): 1265-1274.
- [10] 郗文超, 宋博学, 王钊, 等. 表面熔覆工艺的成形特征及粉末有效利用率研究[J]. 表面技术, 2019, 48(3): 211-218.
- [11] 练国富, 杨谔, 陈昌荣, 等. 激光熔覆沉积 H13 钢组织及力学性能[J]. 热加工工艺, 2021, 51(7): 1-5.
- [12] 员霄, 王井, 何冰, 等. H13 钢激光相变硬化的组织与性能试验研究[J]. 中国机械工程, 2020, 31(4): 432-437, 444.
- [13] AHMADZADEH M, SARANJAM B, FARD A H, et al. Numerical simulation of sphere water entry problem using Eulerian-Lagrangian method[J]. Applied Mathematical Modelling, 2014, 38(5): 1673-1684.
- [14] 李琪, 王煜凯. 基于 CEL 方法的平板入水有限元分析[J]. 技术与市场, 2015(10): 96.
- [15] SILLEM A. Feasibility study of a tire hydroplaning simulation in a finite element code using a coupled Eulerian-Lagrangian method[EB/OL]. [2022-03-01]. https://www.researchgate.net/publication/27342037_Feasibility_study_of_a_tire_hydroplaning_simulation_in_a_finite_element_code_using_a_coupled_Eulerian-Lagrangian_method.
- [16] AKSENOV D V, SHCHERBAKOV V I, LESHCHENKO V V. Selection of structural parameters of an inspection pig for arterial oil and gas pipelines from conditions of dynamics[J]. Chemical and Petroleum Engineering, 2013, 49(3): 265-269.
- [17] 杨理践, 赵洋, 高松巍. 输气管道内检测器压力-速度模型及速度调整策略[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11): 2407-2413.
- [18] 杨文凯. 基于多传感器信息融合的管道机器人管内通过性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2011.
- [19] DENG T, GONG J, LI X P, et al. A Dynamic simulation study of overpressure for pigging process[C]/International Pipeline Conference. [S.l.]: American Society of Mechanical Engineers, 2012(45127): 183-187.

作者简介: 李 涛 (1993—), 男, 汉族, 重庆彭水人, 硕士研究生, 研究方向为激光熔覆、增材制造。

收稿日期: 2022-04-02

修改返回日期: 2022-08-17

编辑: 黄蔚莉

(上接第 23 页)

作者简介: 吴昱达 (1992—), 硕士, 工程师, 主要从事管道内检测器相关研究工作。

收稿日期: 2022-03-25

修改返回日期: 2022-08-16

编辑: 董 超