

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.02.014

非满管电磁流量计用不锈钢表面喷丸处理研究

邹明伟^{1*}, 周兵¹, 贾伯阳^{2,3}, 明庭云¹, 陈建霖¹, 陈彦霖^{2,3}, 贾改革^{2,3}

(1. 重庆川仪自动化股份有限公司, 重庆 401121; 2. 重庆市三峡生态环境技术创新中心有限公司, 重庆 400000; 3. 长江生态环保集团有限公司, 湖北 武汉 430062)

摘要: 为验证表面喷丸处理工艺作为非满管电磁流量计最终正产制造工序的可行性, 通过盐雾试验评估了喷丸处理试验样机外壳耐腐蚀性能。结果表明: 喷丸处理后, 试验样机表面形貌均匀, 无不良缺陷。喷丸处理后, 外壳材料发生塑性变形, 表面粗糙度由 $(0.4\pm0.1)\mu\text{m}$ 增加至 $(56.8\pm6.5)\mu\text{m}$ 。盐雾试验显示喷丸处理后的试验样机 960 h 腐蚀后无明显锈蚀, 满足产品外壳防护等级要求, 喷丸处理技术可作未最终生产制造工序, 替代常规涂漆工序。

关键词: 非满管电磁流量计; 喷丸; 腐蚀

中图分类号: TH162 **文献标识码:** A

Shot peening treatment of stainless steel for electromagnetic flowmeter in partially filled pipes

Zou Mingwei^{1*}, Zhou Bing¹, Jia Boyang^{2,3}, Ming Tingyun¹,
Chen Jianlin¹, Chen Yanlin^{2,3}, Jia Gaige^{2,3}

(1. Chongqing Chuanyi Automation Co., Ltd., Chongqing 401121, China; 2. Chongqing Three Gorges Ecological & Environment Technology Innovation Center, Chongqing 400000, China; 3. Yangtze Ecology and Environment Company, Wuhan 430062, China)

Abstract: To verify the feasibility of shot peening as the final production process for electromagnetic flowmeter in partially filled pipes, the corrosion resistance of the shell of prototype was evaluated by using salt spray testing. Results showed that the surface morphology was uniform and non-defects after shot peening. Plastic deformation was introduced in the shell material after shot peening, and the surface roughness was changed from $(0.4\pm0.1)\mu\text{m}$ to $(56.8\pm6.5)\mu\text{m}$. The salt spray test showed that after 960 h of corrosion, no obvious rust could be detected on the surface of prototype. It indicated that shot peening could meet the requirements of the product's shell protection level. Consequently, shot peening could be used as the final production and manufacturing process, replacing the conventional painting process.

Keywords: electromagnetic flowmeter in partially filled pipes; shot peening; corrosion

非满管电磁流量计是基于法拉第电磁感应定律测量流体流速, 通过流体的液位及流道结构获得流

收稿日期: 2024-06-06

修回日期: 2024-06-22

通信作者: 邹明伟(1982—), 男, 学士, 正高级工程师, 研究方向为先进流量仪表研制, email: mingweizou@126.com

基金项目: 长江生态环保集团有限公司资助项目(HBZB2022096)

引用信息: 邹明伟, 周兵, 贾伯阳, 等. 非满管电磁流量计用不锈钢表面喷丸处理研究[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(2): 94-98, 105.

Zou Mingwei, Zhou Bing, Jia Boyang, et al. Shot peening treatment of stainless steel for electromagnetic flowmeter in partially filled pipes[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(2): 94-98, 105.

体流动截面积,进而获得非满管情况下的流量结果^[1]。现阶段,非满管电磁流量计主要应用在市政排水、污水处理和农用灌溉等领域,用于计量地表水、生物和化工污水、污水处理厂进出水等的流动^[2]。实际应用时,非满管电磁流量计需要安装于掩埋在土壤中的管道和城市地下水通道等具有腐蚀性的介质中,然而流量计外壳腐蚀后可能导致测量失效,严重时甚至会引发安全事故^[3-5]。因此,需要对非满管电磁流量计的外壳进行表面处理,增强耐蚀性,延长仪表服役寿命。

目前,常用于各类仪表表面防护的处理方式包括涂漆和镀膜。表面喷涂或刷涂油漆需要先进行外壳基材除油和除锈前处理,随后进行底漆和面漆等漆膜的制备。众所周知,涂漆可能存在环保和安全问题。此外,漆膜干燥阶段会增加仪表制造周期,降低生产效率。流量仪表接触介质的部件包括衬里、法兰和外壳等,上述结构使得镀膜工艺也无法很好地应用于流量仪表的生产制造。大量研究表明,表面喷丸强化处理可改变材料的表层结构并引入残余应力,进而增强耐腐蚀性能^[6-7]。李玉等^[8]使用传统喷丸对S31035奥氏体耐热钢进行表面处理,研究结果显示强化处理后的样品在高温水蒸气介质中的腐蚀速率比原始样品低三个数量级。门延会等^[9]研究了喷丸强化对小型船舶钢板焊接接头腐蚀行为的影响。研究结果表明,未进行强化处理的试件的最大腐蚀深度约1.1 mm,而强化处理后最大腐蚀深度仅约0.2 mm,喷丸强化处理可大幅提升焊接接头的耐腐蚀性能。Ebrahimzadeh等^[10]指出316L不锈钢喷丸强化处理所形成的力学和组织特性变化有助于材料的耐蚀性提升。此外,门延会等^[9]的研究显示喷丸处理还可消除焊接时在焊缝中的夹渣缺陷,进而提升疲劳抗性。上述结果显示,表面喷丸强化处理不仅适用于单一金属及合金,而且也满足焊接件的表面强化。非满管电磁流量计的外壳通常由两块圆弧形上下盖板和两块侧板焊接制造而成,上述构件及焊接形成的四条焊缝均需要进行表面处理。由此可见,表面喷丸处理极有可能替代涂漆处理,对仪表进行外表面保护。本文旨在验证表面喷丸处理替代传统喷漆处理的可行性,明确喷丸处理对非满管流量计外壳腐蚀防护的影响。

1 实验

本文的研究对象为完成焊接后的非满管电磁流量计样机,样机外壳为316L不锈钢材质,其化学成分

(wt.%)为: 65.04 Fe、17.33 Cr、12.35 Ni、2.25 Mo、2.00 Mn、1.01 Si、0.02 C。为验证表面喷丸处理技术在非满管电磁流量计最终制造工序中的适用性,选择同为316L材质外壳的常规小口径电磁流量计为研究对象(图1)。



图1 试验样机

Fig.1 Experimental prototype

使用青岛淳九机器控股有限公司的ZPQ7.5-2吊钩转台式工业喷丸机对试验样机外壳进行表面处理,设备内置两个400型喷丸器。喷丸处理前,使用定制喷丸盖板工装遮盖法兰两侧,防止喷丸损伤流道的衬里部件。喷丸处理期间使用的风量为1 000 m³/h,冲击丸料为 $\Phi 0.3$ mm的耐磨合金钢丸。表面处理,使用压缩空气对试验样机进行彻底清洁,随后开展外观检查和防护性验证。使用光学相机检测喷丸处理后试验样机的宏观形貌。根据GB/T 7704—2017,使用Proto LXR D微区应力仪通过X射线衍射 $-\sin^2\psi$ 法测量喷丸处理后的表面残余应力^[11]。使用Q10A+维氏硬度计测量材料的硬度变化。硬度测试所用载荷为0.98 N,加载时间为10 s,卸载时间为5 s。使用ZEISS Sigma 300扫描电子显微镜对材料微观结构进行表征分析。扫描电子显微镜的工作电压为20 kV。使用凯达DNT150型便携式表面粗糙度仪对喷丸前后的表面粗糙度进行测试表征。外观检验规定因丸粒冲击造成的凹坑最大面积不超过16 mm²(且不超过3处),焊缝位置应无损伤、裂纹、气孔和变色等缺陷。外观检查合格后,参考GB/T 10125—2012《人造气氛腐蚀试验》,使用YWX-016型盐雾试验箱进行中性盐雾试验^[12]。中性盐雾试验使用5%的NaCl溶液进行连续喷雾,温度为(35 \pm 2)℃,盐雾沉降为1.8~2.2 mL/h。

2 结果与讨论

2.1 喷丸工艺参数优化

如图2所示,试验样机外壳经过不同周期表面

喷丸处理后,均发生塑性变形。其中,喷丸处理300 s和480 s后,表面可见明显微观高低起伏。进一步延

长喷丸周期至600 s和720 s后,可以发现明显的材料损伤,大量表层材料因过度强化而脱落。

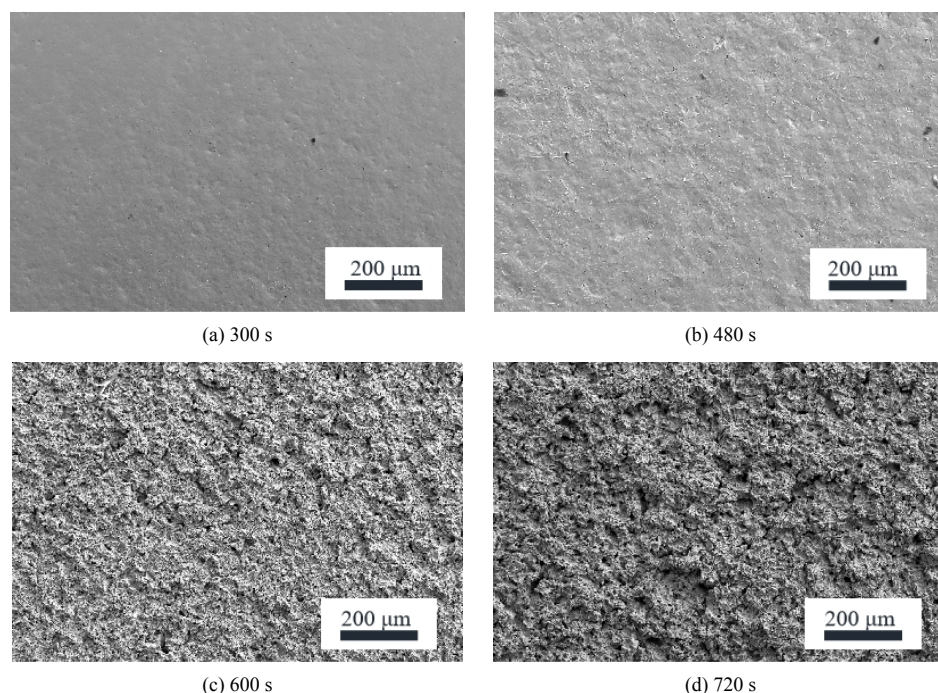


图2 不同时间喷丸处理前后表面微观结构

Fig.2 Surface microstructure of the experimental prototype after different peening durations

为获得最优的喷丸处理周期,进一步对喷丸处理后材料的残余应力和硬度变化进行了表征分析。如表1所示,随着喷丸周期的延长,表面残余应力和维氏硬度均呈现先增加后减小的趋势。值得注意的是,最大残余压应力和维氏硬度均在喷丸周期为480 s时获得,这与图2的微观结构相似,上述结果说明,材料表面的过度强化脱落会导致残余应力和硬度的降低。因此,后续实验结果均为喷丸周期为480 s后所得。

表1 不同处理周期的试验样机表面残余应力和硬度

Tab.1 Surface residual stress and hardness of the experimental prototype after different peening durations

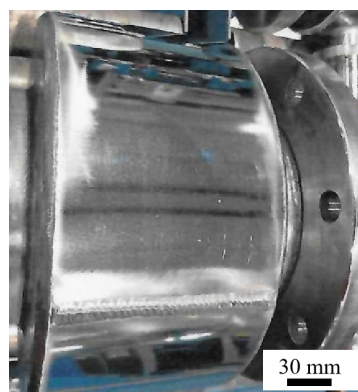
喷丸周期/s	表面残余应力/MPa	维氏硬度/HV
300	-198±15	263±8
480	-389±23	348±9
600	-323±18	328±18
720	-298±15	309±23

2.2 表面喷丸处理对样机外观及粗糙度的影响

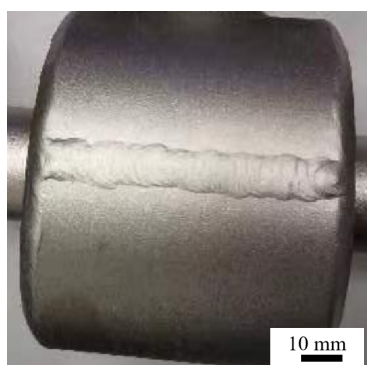
如图3所示,试验样机外壳经过表面喷丸处理后,从初始的抛光态(图3(a))变为哑光态(图3(b))。近

距离观察可以发现,喷丸处理后表面存在大量密集凹坑(图3(c))。此外,如图4所示,喷丸处理后,环焊缝和面对接焊缝的形貌差异较大。面对接焊缝因受到丸粒近90°直冲,冲击作用强,处理后焊缝与基材无明显过渡,且焊缝纹路几乎不可见。法兰和衬管之间的角焊缝与两侧基材存在明显的差异,且焊缝纹路仍清晰可见。

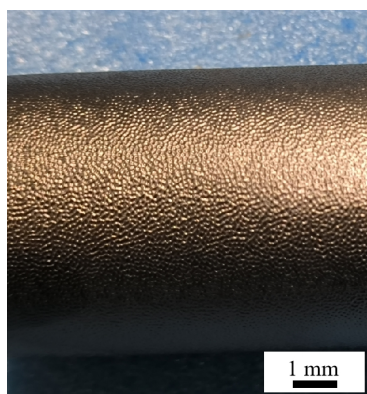
图5所示为试验样机喷丸强化处理前后非焊缝区的表面粗糙度结果,试验样机经过480 s喷丸处理后,表面粗糙度由 $(0.4\pm0.1)\mu\text{m}$ 增加至 $(56.8\pm6.5)\mu\text{m}$,这说明喷丸处理后表层材料发生了塑性变形。



(a) 喷丸前



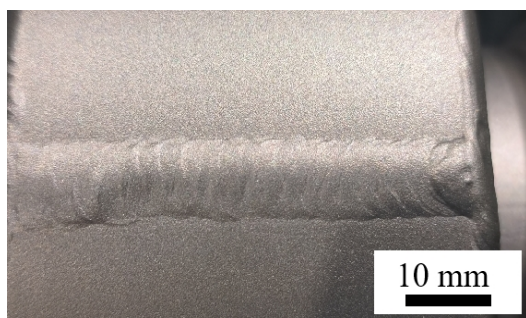
(b) 喷丸后



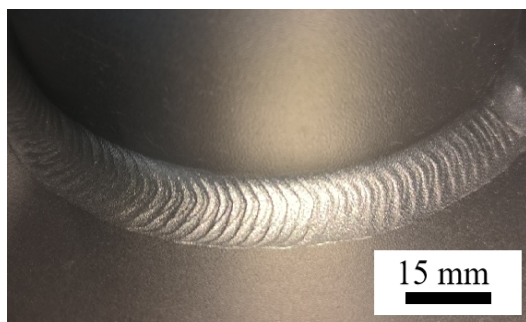
(c) 喷丸后近距离视图

图 3 喷丸处理前后表面形貌

Fig.3 Surface morphology of the experimental prototype before and after shot peening



(a) 面对接焊缝



(b) 角焊缝

图 4 喷丸处理后焊缝表面形貌

Fig.4 Surface morphology of weld seam after shot peening

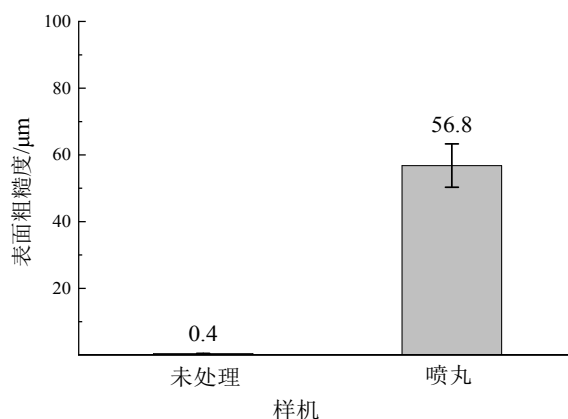


图 5 喷丸处理前后试验样机表面粗糙度变化情况

Fig.5 Surface roughness of the experimental prototype before and after the shot peening

2.3 表面抛丸处理对样机耐腐蚀性的影响

电磁流量计外壳防护等级要求盐雾腐蚀480 h, 表层不起泡、不剥落、不生锈、不开裂。图6所示为喷丸处理后经过不同时长盐雾腐蚀试验后的表面形貌。经过240 h和552 h盐雾腐蚀实验后, 样机表面无锈点; 经过960 h盐雾腐蚀实验后, 样机表面出现大面积腐蚀。大量研究表明, 焊接形成的气孔、夹杂、裂纹等缺陷以及焊材和母材化学性质差异等均会导致焊缝耐腐蚀性能远低于母材。Moteshakker等^[13]使用AWS ER 347焊丝对SAF2205不锈钢和316L不锈钢进行焊接, 焊后脆相的产生会使焊缝区的耐蚀性远低于两侧的母材。相似地, Sánchez-Tovar等^[14]的研究也显示焊缝区的耐腐蚀性低于母材。然而, 960 h的结果显示焊缝区与母材区未发现明显的腐蚀性差异。上述结果说明, 喷丸处理技术可替代传统涂漆方法作为非满管电磁流量计的最终制造工序, 且该技术对焊缝耐蚀性的提升更优。相对于涂漆方法, 喷丸处理将涂漆所需的多次喷涂/刷涂及干燥时间缩短至480 s喷丸, 大幅增加了电磁流量计的生产效率。



(a) 腐蚀 0 h



(b) 腐蚀 240 h



(c) 腐蚀 552 h



(d) 腐蚀 960 h

图 6 盐雾腐蚀试验结果**Fig.6 Results of the salt spaying tests**

3 结论

本文利用盐雾腐蚀实验研究喷丸处理后试验样机的外壳腐蚀性能,验证了喷丸处理技术作为非满管电磁流量计最终制造工序的可行性,得出的主要结论如下:

(1)喷丸处理后,样机外壳发生塑性变形,表面粗糙度由 $(0.4\pm 0.1)\mu\text{m}$ 增加至 $(56.8\pm 6.5)\mu\text{m}$ 。

(2)试验样机经过喷丸处理后,正面对接焊缝处理效果较法兰处角焊缝更明显。

(3)喷丸处理提升了产品生产效率,可作为电磁流量计的最终制造工序,喷丸后焊缝耐腐蚀性与316L母材无明显区别。

参考文献

- [1] 卫开夏,李斌,朱信诚.导电性液体新型液位测量方法研究及应用[J].电子测量与仪器学报,2010,24(10): 964-968.
- [2] 田杰,杨勇.非满管电磁流量计测量方法[J].仪表技术与传感器,2010(12): 19-21.
- [3] 卫开夏,李斌,陈坚祯.非满管电磁流量计液位测量方法研究[J].传感技术学报,2008,21(12): 2106-2110.
- [4] Kim D, Shim H, Ryu G, et al. Analysis on annular flow of liquid transported through a partially filled axially rotating pipe[J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2022, 95: 289-302.
- [5] Cunliffe C, Dodds J, Dennis D. Flow correlations and transport behaviour of turbulent slurries in partially filled pipes[J]. Chemical Engineering Science, 2021, 235: 116465.
- [6] Bai Z, Wu X. Improving stress corrosion resistance and wear resistance of austenitic hot-stamping die steels via synergistic effects of shot peening and plasma nitriding[J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 478: 130448.
- [7] Han M, Du J, Chen Y, et al. Influence of ultrasonic shot peening on the microstructure and corrosion behavior of AZ80M magnesium alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 980: 173633.
- [8] 李玉,何思凡,刘光明,等.喷丸强化处理对S31035奥氏体耐热钢抗高温水蒸气氧化行为的影响[J].机械工程材料,2023,47(8): 65-71.
- [9] 门延会,王强,严瑞强,等.喷丸对小型船舶钢板焊接接头的腐蚀和疲劳影响[J].船舶工程,2021,43(9): 101-104.
- [10] Ebrahimzadeh P, Peral L, González-Martínez R, et al. Influence of severe surface plastic deformation induced by shot peening on microstructure and corrosion resistance of fine grained 316L stainless steel[J]. Corrosion Science, 2024, 231: 111988.
- [11] Ming Tingyun, Xue Hao, Zhang Tao, et al. Improving the corrosion and stress corrosion cracking resistance of 316L stainless steel in high temperature water by water jet cavitation peening[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 438: 128420.
- [12] 刘天,杨国昊,张露,等.GH907高温合金在中性盐雾环境下的初期腐蚀行为[J].材料保护,2024,57(2): 43-50.

下转 105 页