

文章编号: 1001-3806(2011)01-0039-04

提高金属抗应力腐蚀开裂的激光喷丸技术

陈菊芳¹, 李兴成^{1,2}, 李仁兴¹, 申来娣¹, 张永康²

(1. 江苏技术师范学院 材料工程学院, 常州 213001; 2. 江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

摘要: 介绍了激光喷丸技术的工作原理; 阐述了激光喷丸表面改性层微观组织的变化与残余压应力的形成机理和分布规律; 分析了激光喷丸技术对提高金属抗应力腐蚀开裂性能的效果和机理; 与机械喷丸进行比较, 总结了激光喷丸技术提高金属抗应力腐蚀开裂性能的技术优势; 并展望了激光喷丸技术在抗应力腐蚀方面的应用前景。

关键词: 激光技术; 激光喷丸; 组织; 残余压应力; 应力腐蚀开裂

中图分类号: TG156.99 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j. issn. 1001-3806. 2011. 01. 012

Technique of laser shot peening to improve the metal resistance of stress corrosion cracking

CHEN Ju-fang¹, LI Xing-cheng^{1,2}, LI Ren-xing¹, SHEN Lai-di¹, ZHANG Yong-kang²

(1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu Teachers University of Technology, Changzhou 213001, China; 2.

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

Abstract: The working principle of laser shot peening was introduced. The change of microstructure, the forming mechanism and distribution of compressive residual stress in the surface modification layer were described. The effect and mechanism of laser shot peening on resistance of stress corrosion cracking were analyzed in detail. On the base of comparing with shot peening, the superiorities of laser shot peening in improving metal resistance of stress corrosion cracking were summarized. Finally its potential application was also presented.

Key words: laser technique; laser shot peening; microstructure; compressive residual stress; stress corrosion cracking

引言

金属材料的应力腐蚀开裂是指在拉应力和特定的腐蚀环境联合作用下引起的脆断现象。它是一种极为隐蔽的局部腐蚀形式, 而且往往事先无明显预兆, 因此常常造成灾难性事故。石油、化工、核电等设备在服役过程中常常接触酸、碱、盐等各种腐蚀性介质, 应力腐蚀开裂是造成这些设备众多事故的重要破坏形式之一, 事故的发生不仅造成能源的巨大浪费, 而且污染环境, 破坏生态^[1-2]。

研究表明, 发生应力腐蚀开裂应具备3个条件^[3]: 一是材料对腐蚀敏感; 二是处于特定的腐蚀环境中; 三是存在拉应力且其值大于应力腐蚀开裂的门槛值。消除其中的任何一个条件, 应力腐蚀开裂将不会发生。

基金项目: 江苏省高校自然科学基金资助项目(09KJB460002); 江苏技术师范学院基础及应用基础研究基金资助项目(KYY09015)

作者简介: 陈菊芳(1971-), 女, 博士, 副教授, 现主要从事激光表面改性的研究。

E-mail: jfchen1031@sina.com

收稿日期: 2010-03-15; 收到修改稿日期: 2010-03-31

半个多世纪以前, 人们发现大量弹丸在压缩空气的推动下, 形成高速运动的弹丸流不断喷向金属零件表面, 通过对表层材料实施冷挤压可使表层产生残余压应力, 即工业中广泛应用的机械喷丸(shot peening, SP)强化技术。喷丸强化在表层形成的残余压应力可减小或消除应力腐蚀开裂的拉应力条件, 从而使材料的抗应力腐蚀开裂性能得到大幅提高^[4,5]。ALOBAID等人^[4]采用铸钢弹丸对不锈钢2205表面进行了机械喷丸处理, 在沸腾的MgCl₂溶液中进行了拉伸应力腐蚀试验, 结果显示, 机械喷丸使应力腐蚀开裂时间延缓了15倍以上。国内NI等人^[5]采用玻璃弹丸对304[#]不锈钢焊缝进行了机械喷丸处理, 在沸腾的MgCl₂溶液中进行加速应力腐蚀试验。由于采用玻璃弹丸代替铸钢弹丸, 克服了喷丸过程中铸钢弹丸碎片残留在工件表面易引起电化学腐蚀的缺点, 达到了更好的抗腐蚀效果。未经喷丸处理的焊接试样6h后就发生了腐蚀开裂, 而喷丸处理后的试样经3500h后仍未开裂。

世界上第1台激光器诞生以后, 随着对激光技术应用研究的深入和相关学科技术的发展, 近年来, 人们开始利用强脉冲激光诱导的冲击波在金属材料表层产

生塑性应变,获得表面残余压应力。由于该技术的强化原理类似喷丸,因此,称作激光喷丸(laser shot peening, LSP)或激光冲击。激光喷丸技术具有残余压应力层深、表面粗糙度小、冲击区域和压力可控、易于自动控制等特点,在抗应力腐蚀方面具有很好的技术优势。

1 激光喷丸技术

激光喷丸技术是采用短脉冲强激光束代替有质弹丸,用它诱导的冲击波强化金属零件表面的先进技术。图1为激光喷丸强化示意图^[6],短脉冲(脉宽仅几十

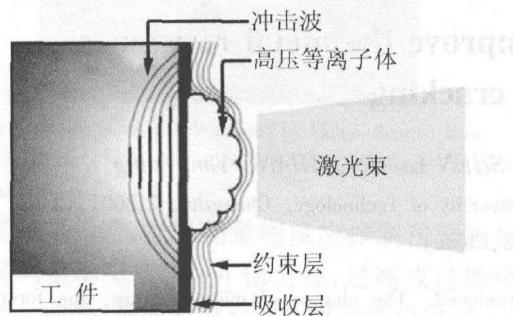


图1 激光喷丸强化原理图^[6]

纳秒)、强激光(功率密度高达 GW/cm^2 量级)透过透明约束层(水帘或玻璃等),作用于覆盖在金属靶材表面的能量吸收牺牲层(黑漆涂层或金属箔等)。吸收层吸收激光能量后气化并形成等离子体,等离子体继续吸收激光能量后爆炸产生高强度冲击波(峰值压力高达吉帕斯卡量级)冲击金属表面并向内部传播,使表层材料得到强化。约束层的存在限制了等离子体的膨胀空间,延长了等离子体的喷射时间,从而提高了激光诱导的冲击波的压力峰值并延长了其对靶材的作用时间^[7]。吸收层不仅能有效吸收激光能量,还保护了金属靶材表面不被高能激光灼伤^[8]。由于吸收层的“牺牲”保护作用,激光喷丸后的表面无热损伤,激光喷丸强化是利用了激光诱导的冲击波的力学效应,而非热效应。

激光喷丸过程中,激光诱导的强冲击波沿轴线向靶材内部传播,使靶材表层材料沿轴向压缩变形,同时导致这部分材料在平行于表面的平面内沿径向伸展。应力波向靶材内部传播过程中强度逐渐衰减,由于靶材表面冲击波峰值压力高达吉帕斯卡量级,远远超过一般金属材料的动态屈服强度,因此,可使一定深度的表层材料发生塑性变形,见图2a。冲击波作用结束后,塑性变形层阻挡了表层下既已发生弹性变形层的恢复,因此,在表层产生残余压应力场,见图2b^[9]。

研究表明,金属表层经激光喷丸后会有大量位错产生,高密度位错是由于金属表层承受冲击时经受了

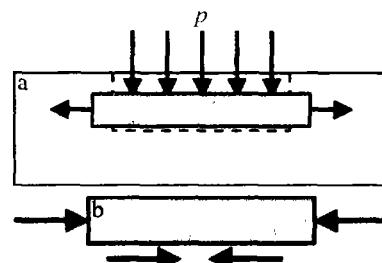


图2 激光喷丸残余压应力场的形成原理
a—冲击区材料的变形 b—激光喷丸引起残余压应力场

激烈的塑性变形过程,使位错滑移并大量增殖的结果。参考文献[10]中对2024-T64铝合金进行激光喷丸处理,采用透射电子显微镜观察了激光喷丸区表层材料微观组织的变化(见图3),由图可见,未经激光喷丸的

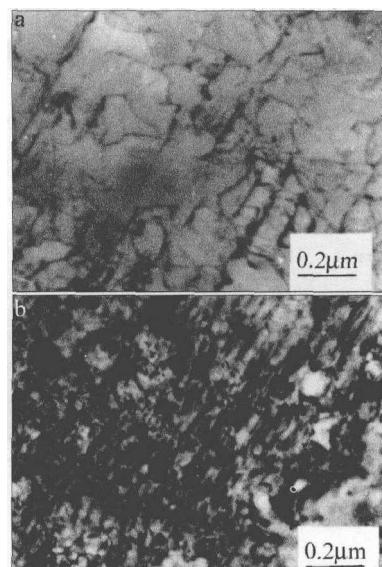


图3 激光喷丸前后的组织^[10]

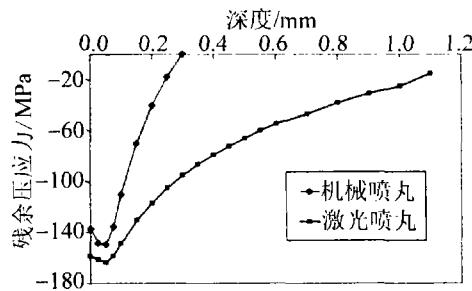
a—未处理 b—激光喷丸后

试样,材料内位错密度较低,激光喷丸后,材料内的位错密度很高,而且位错与位错间相互缠绕、交割,交互作用明显。有不少研究表明,激光喷丸还会造成材料内孪晶的形成,孪晶是由于晶粒来不及滑移变形而发生的孪生变形,一般冲击波压力越大,材料应变速率越高,压力作用时间越长,越有利于孪晶的形成^[11]。激光喷丸后的材料,由于孪晶穿越,位错密度提高,导致更多晶界形成,使得晶粒细化,材料的强度、硬度提高。

2 激光喷丸技术特点

激光喷丸强化与传统的机械喷丸相比具有鲜明的特点和更大的优势,分析如下。

(1) 激光喷丸形成的残余压应力层比机械喷丸形成的残余压应力层要深。传统的机械喷丸获得的残余压应力层较浅,一般约为0.25mm,激光喷丸获得的残余压应力层通常可达0.5mm~1.5mm^[12]。美国GRAHAM等人^[13]用镍合金INCONEL718做了机械喷丸强化和激光冲击强化的对比实验,实验结果见图

图4 两种喷丸形成的残余压应力沿深度的分布^[13]

4, 激光喷丸后形成的残余压应力比机械喷丸更大, 深度约为传统机械喷丸的4倍。

(2) 激光喷丸后的表面粗糙度低于机械喷丸^[14]。传统的机械喷丸在表面留下的弹坑较深, 不仅增大了表面粗糙度, 还会形成较大的应力集中, 削弱了材料的抗应力腐蚀开裂效果。激光喷丸由于应变速率大(高达 10^7 s^{-1})、塑性应变值小(不足5%), 表面留下的弹坑深度为微米量级, 基本不改变零件的表面粗糙度。

(3) 激光喷丸消除了弹丸碎片对腐蚀的不利影响。传统的机械喷丸需要对弹丸进行收集清理, 有时弹丸碎片残留在工件表面易引起电化学腐蚀, 还要对受喷工件进行阳极化处理。激光喷丸采用激光束代替有质弹丸, 不存在弹丸清理和弹丸碎片对腐蚀的不利影响问题。

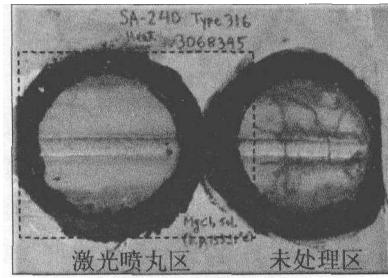
(4) 激光喷丸具有参数可控、适应性强的特点。激光脉冲参数和作用区域可以精密控制, 因而残余压应力的大小和压应力层的深度精确可控。激光的光斑大小可调, 可以对狭小的空间如狭缝、沟槽等进行喷丸处理, 而传统机械喷丸由于受弹丸直径等因素的限制却无法进行。

3 激光喷丸抗应力腐蚀开裂

激光喷丸处理后表面的残余压应力有很大提高, 可达几百兆帕斯卡^[12]。由于残余压应力能平衡零件在工作时的拉应力, 能将金属零件因机械加工、热处理、焊接等加工中形成的残余拉应力转化为残余压应力^[6,15], 减小或消除了材料应力腐蚀开裂的拉应力条件, 使腐蚀裂纹不易萌生与扩展, 因而能显著提高零件抗应力腐蚀能力。另外, 经过激光喷丸后的表层材料内位错密度和孪晶会有很大提高, 由于孪晶穿越, 位错密度提高, 导致更多晶界形成, 使得晶粒显著细化。晶粒的细化, 增加了裂纹萌生与扩展的阻力, 从而提高了材料的抗应力腐蚀性能。在裂纹萌生阶段, 裂纹萌生的驱动力可由更多细小的晶粒承受, 材料受力均匀, 应力集中较小, 裂纹不易萌生; 在裂纹扩展阶段, 由于晶粒细化, 晶界体积分数提高, 微裂纹的扩展受到晶界的阻碍作用增强, 腐蚀微裂纹不易扩展长大。

已有的研究表明, 激光喷丸比传统的机械喷丸具有更好的抗应力腐蚀开裂效果^[12]。2000年法国学者PEYRE等人^[15-16]率先开展了激光喷丸抗应力腐蚀研究, 采用Nd:YAG激光对经过轧制加工的316L不锈钢表面进行了喷丸处理。激光喷丸将轧制表面的残余拉应力转化为残余压应力, 在MgCl₂溶液中的应力腐蚀实验结果表明, 激光喷丸完全抑制了应力腐蚀裂纹的萌生与扩展, 未经激光喷丸处理的试样则发生了较严重的应力腐蚀开裂, 腐蚀裂纹的起源与扩展方向垂直于试样表面轧制加工的方向, 该方向上因轧制产生的残余拉应力最大。参考文献[16]中研究了激光喷丸对316[#]不锈钢在NaCl溶液中电化学腐蚀行为的影响, 结果显示腐蚀电位增加, 抗点蚀性提高, 而点蚀坑往往是应力腐蚀裂纹的起源。PEYRE认为激光喷丸形成的是机械改性层而非化学层, 是致密的残余压应力层提高了材料的抗腐蚀性能。2006年日本学者SANO等人^[17]对预置腐蚀裂纹的304[#]不锈钢表面进行了激光喷丸处理, 应力腐蚀实验表明, 激光喷丸阻止了腐蚀裂纹的扩展。

核电是未来各国大力发展的方向, 目前对大量核废料的处理方法是将核废料储存在特制的容器中并焊接密封, 然后埋在深深的山洞中, 这需要保证焊缝一万人年不会发生应力腐蚀而泄露。为了满足这苛刻的条件, 美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室的学者对激光喷丸焊缝的抗应力腐蚀开裂性能展开了研究。参考文献[18]中对核废料储存容器材料镍基不锈钢合金22焊缝的残余应力场进行了研究, 结果表明, 由于焊接过程的快速加热和冷却以及添加焊接材料等工艺特点, 焊缝中残余的拉应力值高达300MPa, 激光喷丸将焊缝内的残余拉应力转化为残余压应力, 残余压应力层深约4mm, 最大残余压应力值为400MPa。参考文献[6]中对激光喷丸后的316[#]不锈钢焊缝在沸腾的MgCl₂溶液中进行了应力腐蚀实验, 结果见图5。激光喷丸区域

图5 激光喷丸阻碍了316[#]不锈钢焊缝的应力腐蚀开裂^[6]

没有出现应力腐蚀开裂, 而未经激光喷丸的焊缝周围则出现了严重的应力腐蚀开裂, 且腐蚀裂纹扩展到激光喷丸区边界时停止了扩展, 可见激光喷丸有效阻止了腐蚀裂纹的萌生与扩展, 对抗应力腐蚀具有很好的效果。

4 结束语

激光喷丸强化是利用强脉冲激光诱导的高达数吉帕斯卡的冲击波压力使材料表层发生微观塑性变形,形成致密的残余应力层。激光喷丸具有如下特点:(1)高压。冲击波峰值压力高达数万个大气压;(2)超快。塑性变形时间仅仅几十纳秒;(3)高应变率。达到 10^7s^{-1} ,比机械喷丸强化高出万倍,比爆炸高出百倍;(4)环保清洁,没有污染。与常规机械喷丸相比,激光喷丸获得的残余应力值更大,残余应力层更深,表面粗糙度较小,在提高金属零部件抗应力腐蚀开裂方面具有独特的优势。应力腐蚀涉及石油化工、海洋船舶、核电等多个领域,应力腐蚀开裂又极具破坏性,这意味着激光喷丸抗应力腐蚀具有很大的研究和应用空间。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Y L, XU J Q, WANG Y C. Stress corrosion and residual stress of H_2S in petrochemical special equipment [J]. Engineering Science, 2009, 11(8):38-43 (in Chinese).
- [2] LU J Sh, WANG B F, ZHANG J Y. A review of stress corrosion cracking studies of stainless steels and nickles base alloys in high temperature water [J]. Nuclear Power Engineering, 2001, 22(3): 259-263 (in Chinese).
- [3] ZHANG L, LI X G, DU C W, et al. Process in study of factors affecting stress corrosion cracking of pipeline steels [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2009, 21(1): 62-65 (in Chinese).
- [4] ALOBAID Y F. Effect of shot peening on stress corrosion cracking behaviour of 2205 duplex stainless steel [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1995, 51(1):19-25.
- [5] NI H F, LING X, PENG W W. Prevention of stress corrosion cracking in weld joint of type 304 stainless steel by glass bead peening [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2005, 25 (3):152-156 (in Chinese).
- [6] HILL M R, DEWALD A T, DEMMA A G, et al. Laser peening technology [J]. Advanced Materials and Processes, 2003, 161 (8):65-67.
- [7] ZHOU Y J, ZHANG Y K, ZHOU J Zh, et al. Study on properties of overlay in laser shock forming [J]. Laser Technology, 2005, 29(6): 626-628 (in Chinese).
- [8] GU Y Y, ZHANG X Q, SHI J G, et al. Investigation of inverse deformation in laser shock forming with half die [J]. Laser Technology, 2008, 32(1):95-97 (in Chinese).
- [9] PEYRE P, FABBRO R, MERRIEN P, et al. Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour [J]. Materials Science and Engineering, 1996, A210(1):102-113.
- [10] ZHANG H, YU C Y. Laser shock processing of holes [J]. Surface Engineering, 2006, 22(2): 153-156.
- [11] GUO N G, LUO X M, YING Q. The effects of laser shock processing on microstructure and properties of metal [J]. Materials Review, 2006, 20(6):10-13 (in Chinese).
- [12] MONTROSS C S, WEI T, YE L, et al. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review [J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(10):1021-1036.
- [13] GRAHAM H, LLOYD A H, FRITZ H. Surface prestressing to improve fatigue strength of components by laser shot peening [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 34(4):327-337.
- [14] WANG F, YAO Zh Q. Experimental research of laser shock processing brass [J]. Laser Technology, 2006, 30 (5): 511-513 (in Chinese).
- [15] PEYRE P, BRAHAM C, LEDION J, et al. Corrosion reactivity of laser peened steel surfaces [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2000, 9(6):656-662.
- [16] PEYRE P, SCHERPEL X, BERTHE L, et al. Surface modifications induced in 316L steel by laser peening and shot peening. Influence on pitting corrosion resistance [J]. Materials Science and Engineering, 2000, A280(2):294-302.
- [17] SANO Y, OBATA M, KUBO T, et al. Retardation of crack initiation and growth in austenitic stainless steels by laser peening without protective coating [J]. Materials Science and Engineering, 2006, A417(1):334-340.
- [18] HILL M R, DEWALD A T, RANKIN J R, et al. The role of residual stress measurement in the development of laser peening [J]. Journal of Neutron Research, 2003, 11(4): 195-200.