

激光喷丸处理对 X70 管线钢焊接接头低温冲击 断口形貌的影响

孔德军 吴永忠 龙 丹 周朝政

(常州大学机械工程学院, 江苏 常州 213016)

摘要 利用激光冲击波对 X70 管线钢焊接接头进行强化处理,进行了低温冲击韧性试验,分析了激光冲击处理后显微组织的有效晶粒度,用扫描电镜观察断口形貌,研究激光冲击处理对 X70 管线钢焊接接头冲击韧性的影响机制。结果表明,激光冲击处理后 X70 管线钢焊接接头获得了均匀细小的铁素体晶粒,具有优异的冲击韧性;原始状态冲击断口为脆化特征。激光冲击处理经激光冲击处理后试样断口呈现韧化特征,改善了 X70 管线钢焊接接头的低温冲击性能,有利于提高管线钢使用的安全性。

关键词 光学制造;X70 管线钢;焊接接头;冲击试验;断口形貌

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.s100511

Effects of Laser Peening on Fracture Morphologies of X70 Pipeline Steel Welded Joints at Low Temperature by Impact Test

Kong Dejun Wu Yongzhong Long Dan Zhou Chaozheng

(College of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213016, China)

Abstract The surfaces of X70 pipeline steel welded joints are strengthened with laser shock wave. The test of impact toughness at low temperature is carried out. The available grain sizes of the structures by laser shock processing are analyzed, and its fracture morphologies are observed with scanning electron microscope (SEM). The affecting mechanism of laser shock processing on impact toughness of X70 pipeline steel welded joints is investigated. The experimental results show that uniform refined ferrite grains are obtained in the surface of X70 pipeline steel welded joints by laser shock processing, which has excellent impact toughness. The fractures of X70 pipeline steel welded joints in primitive state exhibit embrittlement characteristics, while those after laser shock processing exhibit strengthening characteristics. The impact properties of X70 pipeline steel welded joints at low temperature are improved by laser shock processing, which is beneficial to increasing the usage security of pipeline steel transmission.

Key words optical fabrication; X70 pipeline steel; welded joint; impact test; fracture morphology

OCIS codes 350.3850; 350.0350

1 引 言

管线运输是长距离输送石油、天然气最经济合理的运输方式,管道的安全性在其输送过程中具有重要意义^[1~3]。石油天然气输送管线钢须具备高强度、高韧性、耐腐蚀性和高焊接性,从安全性考虑,管线钢还需有低屈强比^[4,5]。冲击韧性是管线钢重要的性能之一,也是管道设计所必须考虑的最重要的因素^[6]。管线钢在低温服役时容易发生脆断失效,低温时脆性断裂在焊接接头中发生最为频繁,如何提

高低温钢焊接接头的冲击韧性一直是国内外研究的热点之一^[7~10]。目前主要通过外场作用如喷丸、超声波、爆炸、碾压和锤击等方法改善焊接接头的性能。与上述传统工艺方法相比,激光冲击处理是细化晶粒的有效方法之一,有利于提高材料冲击韧性^[11]。本文利用激光冲击波对 X70 管线钢焊接接头进行了改性处理,分析了其在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时激光冲击处理对夏比冲击韧性的影响,研究了 X70 管线钢焊接接头冲击韧性的改善机理。

收稿日期: 2011-02-19; 收到修改稿日期: 2011-03-08

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2009104)资助课题。

作者简介: 孔德军(1966—),博士,副教授,主要从事激光表面改性处理方面的研究。E-mail: kong-dejun@163.com

2 试验方法

试验材料为 X70 管线钢卷板(厚度 14.9 mm),材料成分为 C, Si, Mn, P, S, Cr, Mo, Ni, Nb, V, Ti, Cu。其质量分数分别为 0.06%, 0.19%, 1.58%, 0.014%, 0.002%, 0.024%, 0.24%, 0.176%, 0.05%, 0.046%, 0.019%, 0.23%。焊接工艺为埋弧自动焊,内焊双丝,外焊双丝,焊接速度 1.0~1.2 m/min,使用 CHF101 焊剂,双面焊接,采用 X 型坡口,坡口角度为 90°。根据国家标准 GB2650-1989 焊接接头冲击试验,取 10 mm×10 mm×55 mm U 形标准冲击试样,如图 1 所示。焊接接头沿轧制钢板横向切取 U 型夏比冲击试样,中间为焊接接头,用 THALES 型激光器对其进行表面强化处理,工艺参数:激光光斑直径 5 mm,功率 5 J,冲击次数 3,脉宽 12 ns。激光冲击处理后的试样在乙醇槽内浸渍 15 min 后,在 JB-300B 冲击试验机进行 -20 °C 温度冲击试验,用扫描电镜观察激光冲击处理前后表面晶粒尺寸和夏比试样的断口形貌。

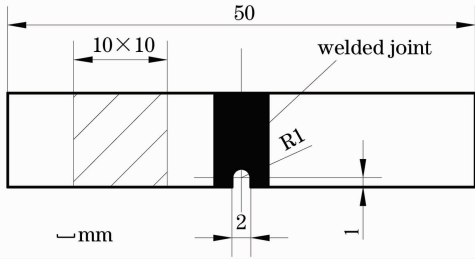


图 1 冲击试样尺寸

Fig. 1 Sketch of impact sample

3 试验结果与分析

3.1 冲击韧性

冲击韧性是影响 X70 管线钢焊接接头粗晶区

低温韧性的主要因素之一^[12],试验对激光冲击处前后试样进行了 -20 °C 冲击试验,同时对比分析一组基材的冲击试验。冲击吸收功越低,抗裂性越差。在 -20 °C 温度下,基材冲击吸收功高达 225 J,原始状态焊接接头冲击吸收功最低(80 J)。经激光冲击处理后,焊接接头的冲击吸收功比原始试样提高了 16 J(提高 20%)。X70 管线钢及其焊接接头的夏比冲击试验结果如表 1 所示。

表 1 X70 管线钢焊接接头冲击功测试结果

Table 1 Measured results of X70 pipeline steel welded joints

Sample	$C_v(-20\text{ }^\circ\text{C})/\text{J}$
Substrate	235
Welded joint in primitive state	80
Welded joint after laser shock processing	96

3.2 断口形貌

X70 管线钢基材和焊接接头在 -20 °C 时冲击断口形貌如图 2 所示。冲击试样的断口分为纤维区、放射区和剪切唇 3 个区^[12]。基材冲击断口表现为韧性断裂,放射区完全消失,断口主要为纤维区和剪切唇,同时断口出现了分层现象[图 2(a)],试样断口表面产生较大的分层裂纹,称为一次分层裂纹,在一次分层裂纹两边又会产生长度和宽度较小的二次分层裂纹。整个断口存在较明显的凹凸不平,试样有相当大的延伸,断口边缘有比较大的拉边。原始状态焊接接头断口平齐,放射区特征最为突出,放射区几乎为解理性断裂,此时焊接接头的塑性相对较低,为解理性断裂[图 2(b)],激光冲击处理后焊接接头断口为准解理性断裂[图 2(c)],这表明激光冲击处理改善了 X70 管线钢焊接接头的冲击断裂韧性,这与表 1 冲击功的分析是一致的。

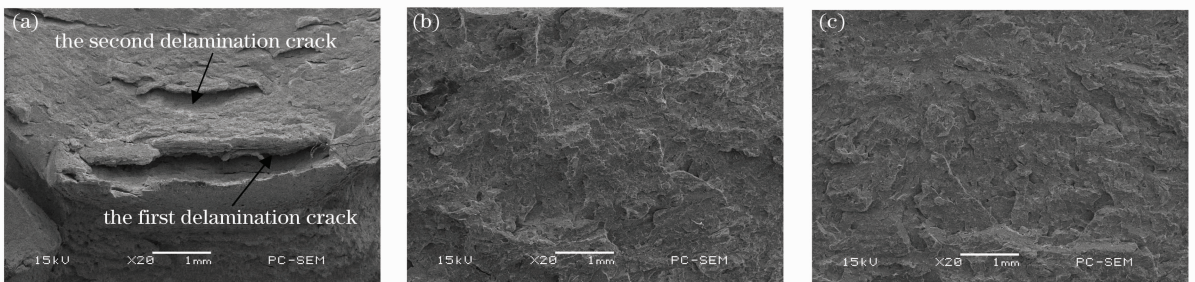


图 2 -20 °C 时基材和焊接接头冲击断口形貌。(a) 基材, (b) 原始状态焊接接头, (c) 激光冲击处理后焊接接头

Fig. 2 Fracture morphologies of X70 pipeline steel substrate and welded joints by impact at -20 °C. (a) substrate, (b) welded joint in primitive state, (c) welded joint after laser shock processing

X70 管线钢基材在 -20 °C 时冲击断口形貌如图 3 所示,基材断口为韧性断裂[图 3(a)],韧窝的底部均能看见细小的球形第二相粒子[图 3(b)]。基材

断口韧窝大小比较均匀,剪切唇为韧窝状[图 3(c)],韧窝被拉长,呈抛物线形,呈现明显的延性断裂。基材断口出现了分层现象,如图 3(d)所示。这说明钢

板沿厚度方向的中间部位存在组织不均匀性或微观缺陷,从而导致冲击过程中裂纹首先沿试样中间层脆性相或缺陷处裂开并沿垂直于力的方向扩展,在

较大的分层裂纹之间还出现了许多小的分层裂纹,最终出现分层现象。

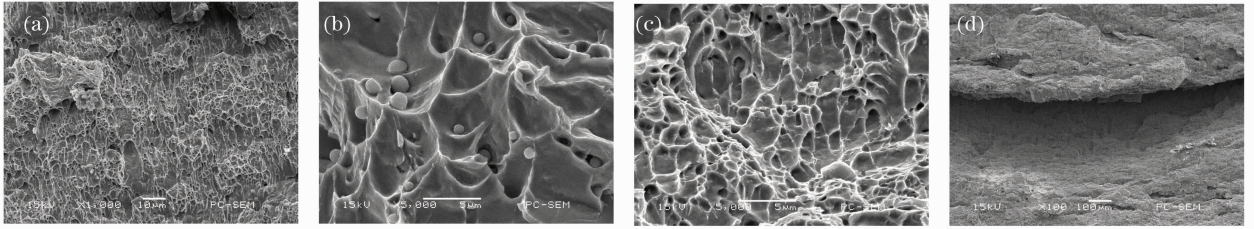


图3 -20 °C时基材断口形貌。(a)韧性断口,(b)球形第二相粒子,(c)韧窝状剪切唇,(d)分层现象

Fig. 3 Fracture morphologies of X70 pipeline steel substrate at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. (a) tough fracture, (b) globular second phase particle, (c) dimpled shear lip, (d) delamination phenomenon

X70 管线钢原始状态焊接接头在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时冲击断口形貌如图 4 所示,其断口呈河流状的解理纹[图 4(a)],为典型的脆性断裂。断口韧窝的边缘可见解理面[图 4(b)],说明有脆性断裂存在。断口剪切唇出现韧窝状[图 4(c)]。断口出现了裂纹现象,如图 4(d)所示,裂纹扩展以剪切方式发生,整个裂纹扩展平面与加载方向成 45° 角。

激光冲击处理后断口有小的解理面,出现一定

数量的韧窝[图 5(a)],断口具有明显的韧性断裂的特征,介于解理断裂与韧性断裂之间,属于准解理断口形貌,说明试样在断裂前产生了较大的塑性变形。理论上,焊接接头在出现韧性断裂特征时,它的冲击韧性值应该有所提高。断口韧窝中出现了球形第二相粒子[图 5(b)],说明有韧性断裂存在。断口剪切唇出现韧窝状[图 5(c)]。断口无裂纹现象,如图 5(d)所示。

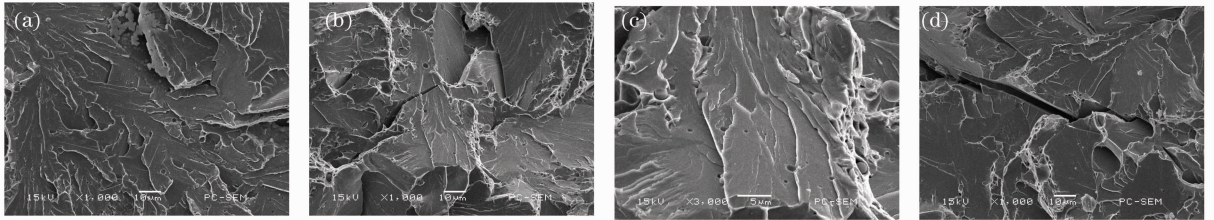


图4 -20 °C时原始状态焊接接头断口形貌。(a)解理纹,(b)解理面断口,(c)韧窝状剪切唇,(d)断口裂纹

Fig. 4 Fracture morphologies of X70 pipeline steel welded joints in primitive state at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. (a) cleavage veins, (b) cleavage fracture, (c) dimpled shear lip, (d) fracture crack

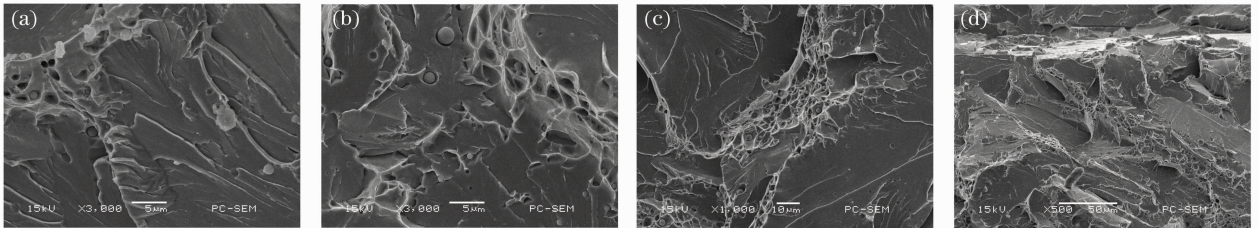


图5 -20 °C时激光冲击处理后焊接接头断口形貌。(a)准解理面和韧窝,(b)球形第二相粒子,(c)韧窝状剪切唇,(d)准解理面和少量韧窝

Fig. 5 Fracture morphologies of X70 pipeline steel welded joints by laser shock processing at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. (a) quasi-cleavage surface and dimple, (b) globular second phase particle, (c) dimpled shear lip, (d) quasi-cleavage surface and a little dimple

3.3 分析与讨论

X70 管线钢基材为细小且均匀的针状铁素体组织,如图 6(a)所示,其晶粒度为 11~12 级,晶粒尺寸 $2\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 。X70 管线钢焊接接头原始状态如图 6(b)

所示,晶粒度为 8~9 级。经激光冲击处理后焊接接头产生细化现象,晶粒度达到 10~11 级[图 6(c)],在焊接接头表面形成了细晶强化层,如图 6(d)所示。晶粒细化改善了断裂韧性,可以延缓或阻止断裂事

故的过程。韧性是管线钢最重要的性能指标之一^[13],而晶粒细化是提高强度,改善韧性的强韧化方式之一。因此,在针状铁素体组织中,细小的有效

晶粒尺寸对韧性更为有益^[14]。在激光冲击波的作用下,焊接接头表层产生高位错密度的位错亚结构^[11],可以提高其对脆性断裂的抗力。

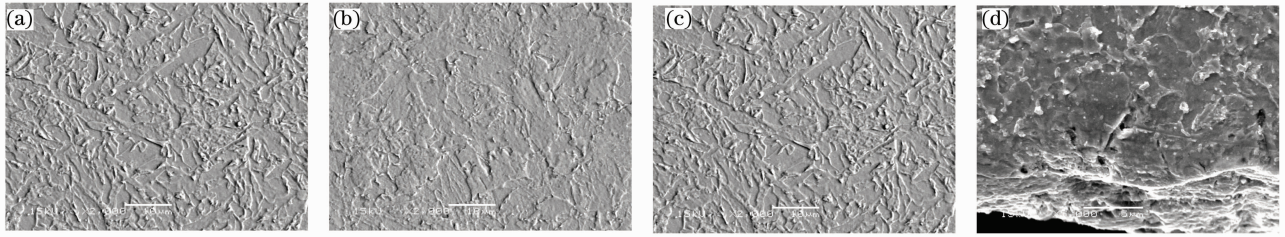


图 6 X70 管线钢焊接接头激光冲击处理前后材料组织结构。(a)基材,(b)原始状态焊接接头,(c)激光冲击处理后焊接接头,(d)强化层

Fig. 6 Structures of X70 pipeline steel welded joints before and after laser shock processing. (a) substrate, (b) welded joint in primitive state, (c) welded joint after laser shock processing, (d) strengthened layer

图 6 中针状铁素体组织拥有极好匹配的力学性能,其强韧性与有效晶粒尺寸相关,激光冲击处理后产生的细化的晶粒使得 X70 管线钢焊接接头韧性有所提高。晶粒尺寸愈小,材料塑性愈高,从而使材料的韧性提高^[15]。从断裂单元进行的断裂过程受到针状铁素体条束的阻碍,也会进一步提高其强韧性^[16,17]。经激光冲击处理后 X70 管线钢焊接接头铁素体组织晶粒尺寸比原始状态小,因此,其冲击韧性比原始状态高。

4 结 论

1) 在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,基材断口出现了不同程度的分层裂纹,为韧性断裂,原始状态焊接接头断口为脆性断裂,没有出现分层裂纹,经激光冲击处理后焊接接头断口为韧脆性断裂,激光冲击处理改善了 X70 管线钢焊接接头的断口形式。

2) 激光冲击处理后 X70 管线钢焊接接头表面产生了细晶区,降低了 X70 管线钢焊接接头的有效晶粒尺寸,获得了良好的低温冲击韧性,提高了 X70 管线钢焊接接头的冲击韧性。

参 考 文 献

- Jiang Haitao, Kang Yonglin, Liang Zhengwei. Microstructure and impact toughness of high strength pipeline steel [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2006, **27**(1): 33~37
江海涛, 康永林, 梁正伟. 高强度管线钢的微观组织与冲击韧性 [J]. *钢铁钒钛*, 2006, **27**(1): 33~37
- Zhang Xiaoli, Zhuang Chuanjing, Ji Linggang *et al.*. Structure feature and strength-toughness of high grade pipeline steels [J]. *Special Steel*, 2006, **27**(6): 27~29
张小立, 庄传晶, 吉玲康等. 高钢级管线钢的组织特征和强韧性 [J]. *特殊钢*, 2006, **27**(6): 27~29
- S. H. Hashemi, D. Mohammadyani, M. Pouranvari *et al.*. On the relation of microstructure and impact toughness characteristics of DSAW steel of grade API X70 [J]. *Fatigue and Fracture of*

- Engineering Materials and Structures*, 2009, **32**(1): 33~40
- Xu Xueli, Xin Xixian, Zhi Yanli *et al.*. Study on low temperature toughness and microstructure on base metal and welded joint of X80 pipeline steel [J]. *Welding Technology*, 2005, **34**(3): 11~14
徐学利, 辛希贤, 智彦利等. 管线钢及其接头的低温韧性和显微组织 [J]. *焊接技术*, 2005, **34**(3): 11~14
- Yang Zheng, Guo Wanlin, Dong Huiru *et al.*. Fracture toughness of X70 pipeline steel [J]. *J. Iron and Steel Research*, 2003, **15**(5): 40~45
杨政, 郭万林, 董惠茹等. X70 管线钢的断裂韧性 [J]. *钢铁研究学报*, 2003, **15**(5): 40~45
- Jin Xiaojun, Huo Lixing, Zhang Yufeng. Research on microstructure and low temperature toughness of X65 pipeline steel jointer weld [J]. *Welded Pipe and Tube*, 2002, **25**(6): 12~14
金晓军, 霍立兴, 张玉凤. X65 管线钢焊接接头的显微组织和低温韧性研究 [J]. *焊管*, 2002, **25**(6): 12~14
- Hwang Byoungchul, Kim Yang Gon, Lee Sunghak *et al.*. Effective grain size and Charpy impact properties of high-toughness X70 pipeline steels [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 2005, **36**(8): 2107~2114
- Shin Sang Yong, Hwang Byoungchul, Lee Sunghak *et al.*. Correlation of microstructure and Charpy impact properties in API X70 and X80 line-pipe steels [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, **458**(1-2): 281~289
- Deng Wei, Gao Xiuhua, Qin Xiaomei *et al.*. Impact fracture behavior of X80 pipeline steel [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2010, **46**(5): 533~540
邓伟, 高秀华, 秦小梅等. X80 管线钢的冲击断裂行为 [J]. *金属学报*, 2010, **46**(5): 533~540
- Yang Zheng, Guo Wanlin, Dong Huiru *et al.*. The Charpy notch impact test of X70 pipeline steel [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2003, **39**(2): 159~163
杨政, 郭万林, 董惠茹等. X70 管线钢冲击韧性实验研究 [J]. *金属学报*, 2003, **39**(2): 159~163
- Y. K. Zhang, J. Z. Lu, X. D. Ren *et al.*. Effect of laser shock processing on the mechanical properties and fatigue lives of the turbojet engine blades manufactured by LY2 aluminum alloy [J]. *Material and Design*, 2009, **30**(5): 1697~1703
- Yang Zheng, Guo Wanlin, Huo Chunyong. Fracture toughness of X70 pipeline steel at different temperatures [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2003, **39**(9): 908~913
杨政, 郭万林, 霍春勇. X70 管线钢不同温度下断裂韧性实验研究 [J]. *金属学报*, 2003, **39**(9): 908~913

- 13 Zhang Xiaoli, Feng Qiang, Liu Yinglai *et al.*. Effect of reheating on toughness index and microstructure of high grade pipeline steels [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2008, **29**(6): 66~69
张小立, 冯强, 刘迎来等. 二次加热对高钢级管线钢韧性及其组织的影响[J]. *材料热处理学报*, 2008, **29**(6): 66~69
- 14 Zhao Xicheng, Yu Daquan. Influences of pretreatment on austenite grain size and impact toughness of 20 MnVB steel [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 1999, **23**(4): 14~15, 21
赵西成, 于大全. 预先热处理对 20 MnVB 钢奥氏体晶粒度及冲击韧性的影响[J]. *机械工程材料*, 1999, **23**(4): 14~15, 21
- 15 Wang Xuhua, Zhang Jinnan. Research on impact toughness and effective grain of X80 grade pipeline steel [J]. *Welded Pipe and Tube*, 2009, **32**(12): 20~23
王绪华, 张劲楠. X80 级管线钢冲击韧性及其有效晶粒研究[J]. *焊管*, 2009, **32**(12): 20~23
- 16 Liao Bo, Xiao Furen. Research on microstructure and strength-toughening mechanism of acicular ferrite pipeline steel [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2009, **30**(2): 57~62
廖波, 肖福仁. 针状铁素体管线钢组织及强化机理研究[J]. *材料热处理学报*, 2009, **30**(2): 57~62
- 17 Zhao Mingchun, Shan Yiyin, Xiao Furen *et al.*. Study on formation and strength and toughness behavior of acicular ferrite in a pipeline steel [J]. *Material Science and Technology*, 2001, **9**(4): 356~358
赵明纯, 单以银, 肖福仁等. 管线钢中针状铁素体的形成及其强韧性的分析[J]. *材料科学与工艺*, 2001, **9**(4): 356~358