

热处理和激光冲击对 2Cr13 马氏体不锈钢冲击韧性的影响

冯爱新 周鹏程* 聂贵锋 王俊伟 韩振春 施芬 李彬

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 采用冲击试验机、X 射线应力检测仪、光学显微镜(OM)和扫描电子显微镜(SEM)等仪器观察和分析了 2Cr13 不锈钢在 920 °C~970 °C 温度下淬火、700 °C 回火与激光冲击(LSP)复合处理后的冲击韧性、残余应力、金相组织和断口形貌。结果表明,随着淬火温度的升高,2Cr13 钢的冲击韧性为先增加后减少;尤其是在淬火温度为 940 °C、回火 700 °C 热处理后,LSP 强化得到的冲击韧性最高。在这种条件下,其残余压应力相比其他热处理的残余应力要稍高,冲击断口断裂为准解理与韧窝的混合型断裂。

关键词 激光技术;热处理;激光冲击;2Cr13 不锈钢;冲击韧性

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.0803002

Influence of Heat Treatment and Laser Shock Processing on Impact Toughness of 2Cr13 Martensite Stainless Steel

Feng Aixing Zhou Pengcheng Nie Guifeng Wang Junwei Han Zhenchun
Shi Fen Li Bin

(School of mechanical engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract The impact toughness, residual stress, metallographic organization and fracture morphology of 2Cr13 steel quenched temperature at 920 °C ~ 970 °C, tempering at 700 °C and laser shock processing (LSP) are investigated by means of impact testing machine, X-ray diffraction, optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM). The experimental results demonstrate that the impact toughness of 2Cr13 steel increases firstly, but decreases afterwards as the temperature of quenching rises, particularly, the impact toughness of 2Cr13 steel reaches the peak in the quenching temperature at 940 °C, tempering at 700 °C and LSP. Under this condition, the residual stress is a little higher than that of the other heat treatment, and the impact fracture of 2Cr13 steel is quasi-cleavage and dimple.

Key words laser technique; heat treatment; laser shock processing; 2Cr13 stainless steel; impact toughness

OCIS codes 140.3390; 140.3380; 140.3538; 350.3850

1 引 言

2Cr13 作为一种典型的 Cr13 马氏体不锈钢,具有高强度、高耐腐蚀性和抗氧化性特点,其广泛应用于承受高应力负荷零件的制造,如汽轮机叶片、热油泵轴和轴套及叶轮水压机阀片等^[1,2]。但是,在应用中

经常出现脆性断裂^[3],选用 2Cr13 作为低温泵叶片的材料,在常温下 V 型缺口的冲击韧性只有 8 J/cm²,在低温工况下,其韧性更低。

热处理可以改变材料内部组织结构获得良好的力学性能。徐文亮等^[4~6]对调整热处理工艺提高材

收稿日期: 2012-03-12; 收到修改稿日期: 2012-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(51175237)、中国博士后基金(20100481096)、江苏省自然科学基金(BK2007512, BK2010352, BK2011487)、江苏省博士后基金(1002029C)、江苏大学高层次人才启动基金(09JJDG090)、江苏大学拔尖人才培养工程项目、江苏省元大人才高峰(A)和江苏省博士聚集计划项目资助课题。

作者简介: 冯爱新(1970—),男,博士,教授,主要从事激光冲击强化方面的研究。E-mail: aixfeng@ujs.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zhoupengchen@126.com

料韧性进行了深入研究,发现材料在热处理后表面存在残余拉应力,容易引起裂纹的扩展。激光冲击(LSP)强化技术利用高功率密度的激光对材料进行辐照,使表面晶粒细化,产生残余压应力,从而达到表面改性的目的^[7~9]。顾永玉等^[10]对LSP强化技术影响材料韧性进行了研究。如果将热处理工艺和LSP强化有效地结合起来,发挥各自工艺的特点,材料将具有特殊的复合效果。目前关于热处理与LSP强化复合工艺对材料韧性影响的研究报道很少。本文运用热处理与LSP复合处理的工艺对2Cr13不锈钢韧性影响进行研究,分析其复合处理工艺对2Cr13马氏体不锈钢的韧性性能的影响,并对残余应力值,金相组织以及断口形貌进行分析。

2 试验内容与与方法

以2Cr13作为试验钢,截取一定的尺寸,将试样放置在电阻炉中进行加热,分别依次在淬火920℃~970℃温度下保温30min,油冷,回火700℃,保温1h,出炉油冷。将热处理后的试样按照GB/T 229-2007国家标准^[11]的要求加工成V形缺口,尺寸为55mm×10mm×10mm,缺口深度2mm,其尺寸示意图如图1所示。

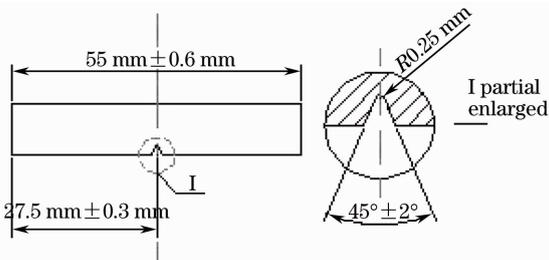


图1 冲击试样尺寸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of impact sample size

LSP强化试验是在Gaia-R系列YAG脉冲激光器装置上进行,试验中LSP的参数为:激光波长

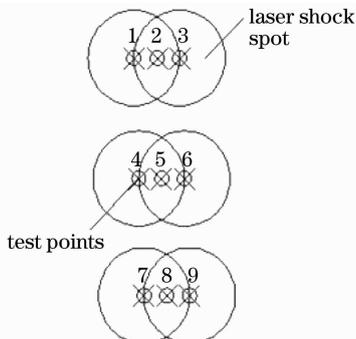


图2 测试点示意图

Fig. 2 Schematic diagram of testing points

1064 nm,脉宽10 ns,激光能量6 J,光斑直径3 mm,半圆搭接。LSP标准试样缺口4周后,利用X-350A型X射线应力仪沿光斑直径方向测量了3种热处理温度下各试样上3个点,如图2所示。采用光学显微镜(OM)观察试样的组织成分,利用扫描电镜(SEM)对断口部分进行观察,分析马氏体不锈钢2Cr13断裂机理。

3 试验结果与分析

3.1 冲击韧性

图3为不同热处理、热处理与激光复合后2Cr13钢在室温以及低温-10℃下的冲击韧性。从图中可以看出不锈钢的冲击韧性与周围的环境温度有关。无论材料是否做了处理,低温环境下的冲击韧性没有室温下的高,这也说明了低温条件下材料会变得更脆。从图3还可看出无论是常温、-10℃,热处理与激光复合后的冲击韧性比单一热处理的冲击韧性要高。在淬火温度920℃~970℃之间,随着淬火温度的升高,两种处理方式后的钢韧性值都是先升高后降低,其中2Cr13马氏体不锈钢在940℃淬火,回火700℃与激光复合后,在常温、低温下冲击韧性达到了最大值,分别为51.4 J/cm²和30.025 J/cm²。这是因为当淬火温度低时,碳化物不能充分溶解,冲击韧性偏低,当淬火温度过高时,晶粒逐渐粗化,导致强度和韧性下降。试验中2Cr13马氏体不锈钢在淬火940℃,回火700℃后,再进行LSP强化可以进一步使组织晶粒细化^[12~14],可以阻碍裂纹的扩展,从而提高韧性。

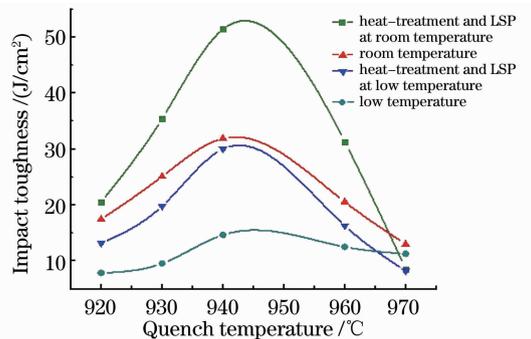


图3 热处理与LSP复合处理的冲击韧性

Fig. 3 Distribution of impact toughness of heat treatment and LSP on specimens

3.2 残余应力

马氏体不锈钢2Cr13经过热处理与LSP复合后,利用X射线应力测定仪分别对经过淬火温度920℃、940℃、970℃,回火700℃热处理以及激光

复合强化的试样进行表面测试点残余应力的测定,如表 1 所示,在 3 种热处理温度的试样中,经过 LSP 复合处理后,热处理后的表面由拉应力变为压应力状态,在淬火 940 ℃回火 700 ℃的处理后,经过 LSP 强化后其残余应力比其他两种的残余应力值要稍高,其最大值为 -195 MPa。比较光斑直径方向的残余应力分布,在靠近光斑中心点处的残余应力相对较大,在激光光斑边缘处残余应力相对较小,由于搭接冲击的影响使得冲击区域的残余应力分布相对

表 1 冲击前后残余应力测试结果

Table 1 Test results and data processing of residual stress before and after LSP

Heat treatment temperature / °C	Test point	Test results without LSP / MPa	Test results with LSP / MPa
920+700	1	89	-118
	2	73	-176
	3	120	-158
940+700	4	141	-158
	5	67	-195
	6	129	-139
970+700	7	131	-154
	8	82	-168
	9	105	-135

较为均匀。试样经过热处理与 LSP 复合后,改变了表层的应力状态,使之处于高幅值残余压应力下,可以抑制裂纹的萌生和扩展^[15],这导致冲断该试样时,必然要消耗更多的能量,因此能够提高韧性。

3.3 金相分析

图 4 为 2Cr13 钢在相同回火温度下,不同淬火温度与激光复合后得到的显微组织。图中 3 个淬火温度以及较高的回火温度的金相表明,在这个范围内回火后得到的组织特征是马氏体开始分解为铁素体并析出大量的碳化物。区别在于在 920 ℃淬火时,回火后析出了碳化物,不能充分地溶解,阻碍了基体的再结晶,其中析出的碳化物有部分沿晶界呈连续分布,在晶界处的碳化物会削弱晶界间的结合力,从而降低韧性。当淬火温度升高到 940 ℃时,然后回火,析出的碳化物增多,呈弥散分布,晶粒较细,提高了韧性。在淬火温度 970 ℃回火后,由于淬火温度的升高,晶粒变得粗大,从而降低了韧性。在淬火温度 940 ℃并回火热处理后,相比其他两种温度而言,经过 LSP 复合后,材料表层的晶粒进一步细化,组织变得致密,而晶粒越细,晶界曲折多,不利于裂纹的扩展与传播。尽管 LSP 的影响层只有 2 mm 左右,但是提高了整体的韧性。

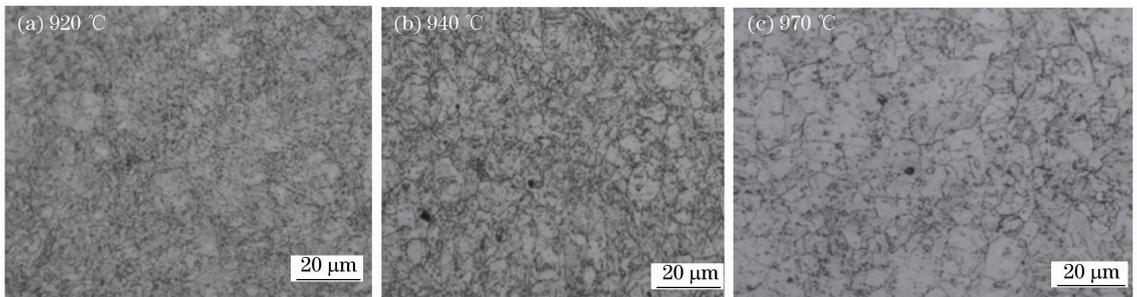


图 4 2Cr13 马氏体不锈钢热处理与 LSP 复合的微观组织

Fig. 4 Optical micrographs of 2Cr13 martensite stainless steel preprocessed by heat treatment and LSP

3.4 断口分析

图 5 是在不同淬火温度,回火 700 ℃与激光复

合处理后 2Cr13 钢常温下的冲击断口形貌。在高倍放大下[图 5(a)]可以看出断口晶面出现少量部分

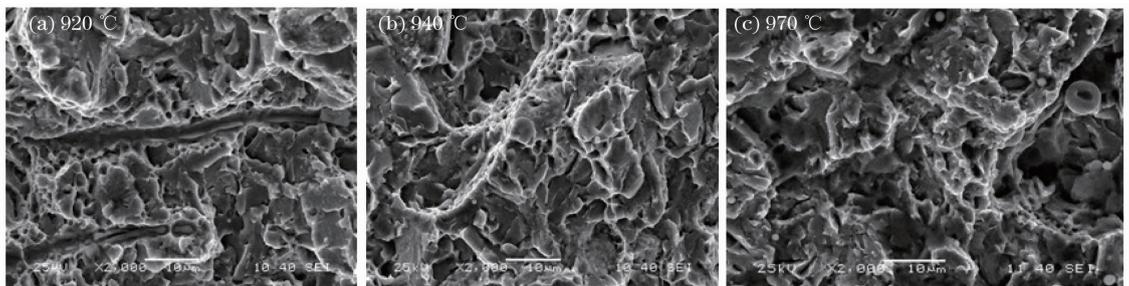


图 5 2Cr13 马氏体不锈钢热处理与 LSP 复合的断口形貌

Fig. 5 SEM micrographs of martensite stainless steel by heat treatment and LSP

韧窝,所以断口为准解理与韧窝的混合型断口,分布也不均匀,韧性不好。从图 5(b)可以发现存在准解理刻面,这部分断口中还有韧窝与聚集的微孔存在,形状不规则。这种方式仍属于混和型断裂的方式,由于韧窝和微孔的存在,在承受载荷时伴随着韧性断裂的发生,在裂纹的形成和扩展时需要更大的能量,因此需要更大的冲击能量,表现出较好的韧性。图 5(c)表明有少量的韧窝存在,其中还有一些球状夹杂物,它破坏了基体的连续性,在有外在载荷时易引起应力集中,使得裂纹扩展功减小,也说明了材料的韧性较差。

4 结 论

2Cr13 钢经过热处理与激光复合处理的试样的冲击韧性比单一热处理的冲击韧性高。在 920 °C~970 °C 淬火,700 °C 回火与 LSP 复合后,随着淬火温度的升高,冲击韧性先升高后下降,在淬火 940 °C 时,韧性达到了最大值。对比淬火温度 920 °C、940 °C、970 °C,回火 700 °C 热处理以及激光复合强化的方式中,淬火 940 °C 回火 700 °C 的处理后,再经过 LSP 强化后其残余应力比其他两种方式的残余应力值要稍高,比较光斑直径方向的残余应力分布,在靠近光斑中心点处的残余应力相对较大。淬火 940 °C 回火 700 °C 与 LSP 复合后,在常温下的断口断裂为准解理与韧窝的混合型断裂。

参 考 文 献

- 1 Liu Hongxi, Tang Baoyin, Wang Langping *et al.*. Surface modification of 2Cr13 steel by plasma immersion ion implantation combined with ion beam enhanced deposition[J]. *J. Aeronaut. Mater.*, 2005, **25**(2): 32~37
刘洪喜, 汤宝寅, 王浪平等. 2Cr13 钢的全方位离子注入与离子束增强沉积复合表面强化处理[J]. *航空材料学报*, 2005, **25**(2): 32~37
- 2 Zhu Xiangqun, Dai Qixun, Zhou Ming *et al.*. Effect of tempering temperature on stress-corrosion cracking and mechanical hysteresis of 2Cr13 stainless steel[J]. *Trans. Mater. Heat. Treat.*, 2009, **30**(1): 11~19
朱向群, 戴起勋, 周明等. 回火温度对 2Cr13 不锈钢应力腐蚀开裂和力学滞后的影响[J]. *材料热处理学报*, 2009, **30**(1): 11~19
- 3 Xu Hongfei, Liu Sufen, He Huashan *et al.*. 2Cr13 turbine blade fracture analysis[J]. *Physical Test*, 1999, **17**(5): 38~42
许宏飞, 刘素芬, 贺华山等. 2Cr13 汽轮机叶片断裂分析[J]. *物理测试*, 1999, **17**(5): 38~42

- 4 Xu Wenliang, Tang Haoqing, Sun Yuanning. Influence of alloy elements on microstructure and properties of 2Cr13 martensitic stainless steel[J]. *Baosteel Technology*, 2008, **26**(5): 39~43
徐文亮, 唐豪清, 孙元宁. 合金元素对 2Cr13 马氏体不锈钢组织及性能的影响[J]. *宝钢技术*, 2008, **26**(5): 39~43
- 5 Liu Xiao, Yang Jichun, Gao Xuezhong. Effects of RE on the inclusions and impact toughness of 2Cr13 stainless steel[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2010, **32**(5): 606~608
刘 晓, 杨吉春, 高学中. 稀土对 2Cr13 不锈钢夹杂物的变质及对冲击韧性的影响[J]. *北京科技大学学报*, 2010, **32**(5): 606~608
- 6 T. V. Rajan, C. P. Sharma, A. Sharma *et al.*. 14th International Conference on Wear of Materials[M]. New Delhi: Prentice Hall of India Private Limited, 1998
- 7 Zhang Lingfeng, Xiong Yi, Zhang Yi *et al.*. Microstructure of high manganese steel by laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603025
张凌峰, 熊毅, 张毅等. 高锰钢在激光冲击作用下的微观特征[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0603025
- 8 Lu Jinzhong, Luo Kaiyu, Feng Aixin *et al.*. Micro-structural enhancement mechanism of LY2 aluminum alloy by means of a single laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2662~2666
鲁金忠, 罗开玉, 冯爱新等. 激光单次冲击 LY2 铝合金微观强化机制研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2662~2666
- 9 Wu Xianqian, Huang Chenguang, Song Hongwei. Parameters analysis of residual stress induced by laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2632~2637
吴先前, 黄晨光, 宋宏伟. 激光冲击强化诱导的残余应力影响因素分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2632~2637
- 10 Gu Yongyu, Zhang Lingfeng, Lu Jinzhong *et al.*. Micro-plastic deformation of ZrO₂ in high strain rate by laser shocking[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3319~3322
顾永玉, 张凌峰, 鲁金忠等. ZrO₂ 陶瓷激光冲击预处理研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3319~3322
- 11 National Standardization Technical Committee. GB/T229-2007, Metal Material Charpy Pendulum Impact Test Method [S]. Beijing: China Standard Press, 2007. 1~16
国家技术标准委员. GB/T229-2007, 金属材料夏比摆锤冲击试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007. 1~16
- 12 C. S. Montross, T. Wei, L. Ye *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review[J]. *International J. Fatigue*, 2002, **24**(10): 1021~1036
- 13 Zhang Yongkan, Chen Jufang, Xu Renjun. Experimental research of laser shock strengthening AM50 magnesium alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1068~1072
张永康, 陈菊芳, 许仁军. AM50 镁合金激光冲击强化实验研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1068~1072
- 14 Ren Xudong, Zhang Tian, Zhang Yongkang *et al.*. Improving fatigue properties of 00Cr12 alloy by laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2111~2115
任旭东, 张 田, 张永康等. 激光冲击处理提高 00Cr12 合金的疲劳性能[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2111~2115
- 15 L. A. Hackel, H. Chen. Laser Peening a Processing Tool to Strengthen Metals or Alloys to Improve Fatigue Lifetime and Retard Stress Induced Corrosion Cracking[M]. New York: Laser Science and Technology, 2003. 487