

脉冲电流对再制造毛坯裂纹尖端组织及性能的影响

邓德伟^{1,3}, 刘倩倩¹, 李晓娜¹, 于涛², 张林³, 王罡⁴, 张洪潮²

(1. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116023)

(2. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116023)

(3. 沈阳鼓风机集团股份有限公司, 辽宁 沈阳 110869)

(4. 清华大学, 北京 100084)

摘要: 以再制造为目标, 利用高能脉冲电流冲击装置对含有单边裂纹的 316 奥氏体不锈钢进行脉冲电流处理。采用金相显微镜、X-射线衍射仪、电子背散射衍射 (EBSD)、透射电子显微镜 (TEM) 等表征手段, 研究高密度脉冲电流对裂纹尖端区域微观组织与结构的影响, 分析裂纹尖端组织加热熔化及热处理时的组织演变过程。结果表明: 脉冲电流处理后, 裂纹尖端组织发生了明显细化并出现组织梯度, 包括柱状晶区、再结晶区及基体区。脉冲电流的快速加热和快速冷却、高速电子风的产生、电致塑性等作用降低了再结晶或相变时的热力学屏障, 提高了形核率, 抑制了晶粒长大过程, 获得了比原始晶粒尺寸小的再结晶晶粒, 材料的力学性能得到提高。

关键词: 再制造; 脉冲电流; 再结晶; 组织细化

中图分类号: TG115.21⁺3.1; TG142.71

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)08-2208-06

当下, 坚持可持续发展之路和建设节约型社会已成为世界的主流, 而降低能耗、节能减排也就成为实现这一目标的关键之举。在此背景下, 采用再制造能最大限度地减少制造对环境带来的负面影响, 同时使原材料和能源的利用效率达到最高, 再制造的循环经济发展模式正在被越来越多的业界人士所认同。对再制造毛坯中的微裂纹进行修复能够缓解有限资源和过度消耗之间的矛盾, 最大限度地利用废旧产品的剩余价值, 契合中国的可持续发展战略。

国内外对裂纹止裂技术及机理进行了大量研究, 根据断裂力学对裂纹形成及扩展的研究, 可以利用降低裂纹尖端应力强度^[1,2]、引入残余压应力^[3,4]、降低裂纹尖端应力集中^[5]等方法来抑制主干线上裂纹的进一步扩展, 达到止裂的目的, 具体工艺如填充裂纹、焊接修复、设置浅坑、冷膨胀和钻止裂孔等。然而, 这些方法对未损伤部位也会造成影响, 甚至对其是一种危害, 并且因对内部裂纹难以操作而受到限制。

近年来, 在材料科学与工程领域中高密度脉冲电流以其独特的特点而备受关注。脉冲电流在金属中会产生一些特殊的效应, 如热电效应、焦耳热效应、力效应、电迁移效应、电子风效应和趋肤效应等, 研究

表明^[6-8]脉冲电流可以改变材料的微观结构和力学性能。另外, 当高密度脉冲电流流经含有缺陷的金属样品时, 在缺陷处电流的绕流和集中效应非常明显, 这种效应产生的强化加热使裂纹尖端材料发生熔化, 同时裂纹尖端区域温度分布的不均现象, 导致裂纹前缘形成相当大的局部热压应力场, 而在没有缺陷的地方电流作用很小, 因此可以利用脉冲电流的绕流集中作用对缺陷进行修复。

1 实验

该实验所用材料为实际生产应用比较广泛的 316 奥氏体不锈钢, 其化学成分 (质量分数, %) 如表 1 所示。试样 (110 mm×25 mm×1.8 mm) 自 316 奥氏体不锈钢热轧板切取下来。首先利用线切割在相同尺寸的 316 奥氏体不锈钢薄片上切出一条裂缝, 然后利用拉伸试验机预制出一定长度的单边疲劳裂纹。

脉冲电流止裂实验在自行设计的 HCPD-I 型脉冲电流冲击装置上进行, 此装置主要由主电路系统、触发系统及控制系统等组成, 实验过程中放电电流随着时间呈周期性逐渐递减的变化。脉冲电流止裂技术主要利用脉冲放电瞬间产生的电磁-热耦合作用, 因此,

收稿日期: 2016-08-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) (2011CB013402); 辽宁省自然科学基金 (2014028002); 辽宁省科技创新重大专项 (201303002); 沈鼓-大工重大科研发展基金; 中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 邓德伟, 男, 1974 年生, 博士, 副教授, 大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116023, 电话: 0411-84706561-8051, E-mail: deng@dlut.edu.cn

脉冲电流冲击装置的负载为带有单边疲劳裂纹的试件。有研究表明^[9],当电流通入方向与裂纹走向呈 90° 时,电流的绕流与集中效应最为明显,呈 45° 角的电流集中效应只是 90° 的 30%,而当电流方向平行于裂纹走向通入时,裂纹尖端几乎没有任何变化,本实验采用电流通入方向与裂纹的走向呈 90°。实验原理如图 1 所示。

脉冲电流冲击装置中放电电流的大小与周期和放电回路中的电容、电压、电感及电阻有关。当测试系统确定后,回路中的电阻及电感也就相应确定为一定值,放电电流的最大值与电容及电压成正比,且放电电流的周期与电容成正比,与电压几乎没有关系。因此,实验中通过改变电压和电容这 2 个参数调整放电电流的密度及放电周期。本实验中具体工艺参数如表 2 所示。

利用 Nikon-MA100 型金相显微镜对止裂后裂纹尖端进行显微组织分析;利用 EMPYREAN 型 X 射线衍射仪对止裂前后裂纹尖端进行物相分析;利用 ZISS Supra55 型中的电子背散射衍射 (EBSD) 技术对脉冲电流止裂前后裂纹尖端组织分布进行分析;利用 FEI Tecnai G2F20 型透射电子显微镜对止裂前后裂纹尖端的微观组织结构进行分析;利用国产 AO LAN (SBSL-5T)型电子拉伸试验机对试样的拉伸性能进行测量。

2 结果与讨论

2.1 脉冲电流处理对裂纹尖端宏观尺寸的影响

串联在回路中的试件由控制电路通电,在通电瞬间高密度脉冲电流流过试件,在裂纹尖端区域,电流

表 1 316 奥氏体不锈钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of 316 stainless steel (ω/%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
0.08	0.72	1.46	0.035	0.03	14	16.54	2.31	Bal.

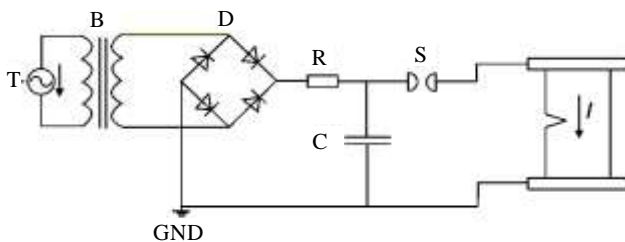


图 1 脉冲电流止裂实验原理图

Fig.1 Principle diagram of pulse current crack prevention experiment

表 2 316 奥氏体不锈钢放电工艺参数及实验结果

Table 2 Experimental parameters and results of samples

Capacitance/ μF	Voltage/ V	Energy/ J	Molten hole area/mm ²	Tensile strength/ MPa	Elongation/ %
-	-	-	-	624.902	13.681
200	6000	3600	0.11	631.712	13.754
200	7000	4900	0.30	658.135	14.720
200	8000	6400	0.63	662.766	16.248
200	9000	8100	0.95	634.000	15.187
200	10000	10000	1.09	624.302	15.452

运动通道受到阻碍而发生绕流,电流密度高度集中,温度升高,使裂纹尖端区域熔化,形成熔孔,降低了裂纹尖端的应力集中。放电参数不同,熔孔尺寸也不同。随着工作能量的增加,裂纹尖端熔孔尺寸也相应增加。不同工艺参数处理后裂纹尖端熔孔的尺寸如表 2 所示。

2.2 脉冲电流处理对裂纹尖端微观组织的影响

不同脉冲电流处理后,裂纹尖端组织发生改变。图 2 为不同工艺参数处理下裂纹尖端区域的金相显微组织形貌,可见脉冲电流作用后裂纹尖端组织发生了不同程度细化。能量输入太小,裂纹尖端影响区较小,止裂效果不好。能量输入太大,引起裂纹尖端的过烧,形成的熔孔较大,且裂纹尖端的晶粒尺寸也不断长大,影响止裂效果。从脉冲电流处理后裂纹尖端的整体形貌可以看出在最靠近裂纹尖端区域处组织为柱状晶,紧邻柱状晶区处为方向各异的细小等轴晶区,在柱状晶与细小等轴晶的交界处可以看到尺寸比较薄的紊乱极细等轴晶,细小等轴晶区域外围为预制疲劳裂纹过程中形成的变形晶粒,可以看到等轴晶区组织比较细小且分布比较均匀。对 8000 V 电压处理下试样裂纹尖端的晶粒尺寸进行测量,基体晶粒比较粗大,晶粒尺寸大约为 21 μm,而等轴晶区晶粒尺寸为 6~7 μm。

液态金属凝固过程中,金属原子要克服能量屏障从高能态的液态结构转变成低能态的晶体结构,而高密度脉冲电流的作用,能够降低金属凝固过程中的热力学屏障,利于生核过程的发生^[10]。当高密度脉冲电流通过带有单边疲劳裂纹的金属导电板时,在裂纹尖端电流发生绕流集中现象,伴随产生的焦耳热效应使裂纹尖端发生熔化,在随后的冷却凝固过程中组织发生变化。组织的结构形态与细化程度主要受温度梯度 (G) 与凝固速度 (R) 的影响。脉冲电流作用时的加热与冷却速度极高,且在裂纹尖端的温度梯度很高,快速加热与冷却有助于组织的细化,但高的温度梯度却不利于等轴晶的形成,所以在最靠近裂纹尖端由于受到未融化金属的影响,产生较大的过冷度而大量生核,形成无方向性的薄层极细等轴晶区。在极细等轴

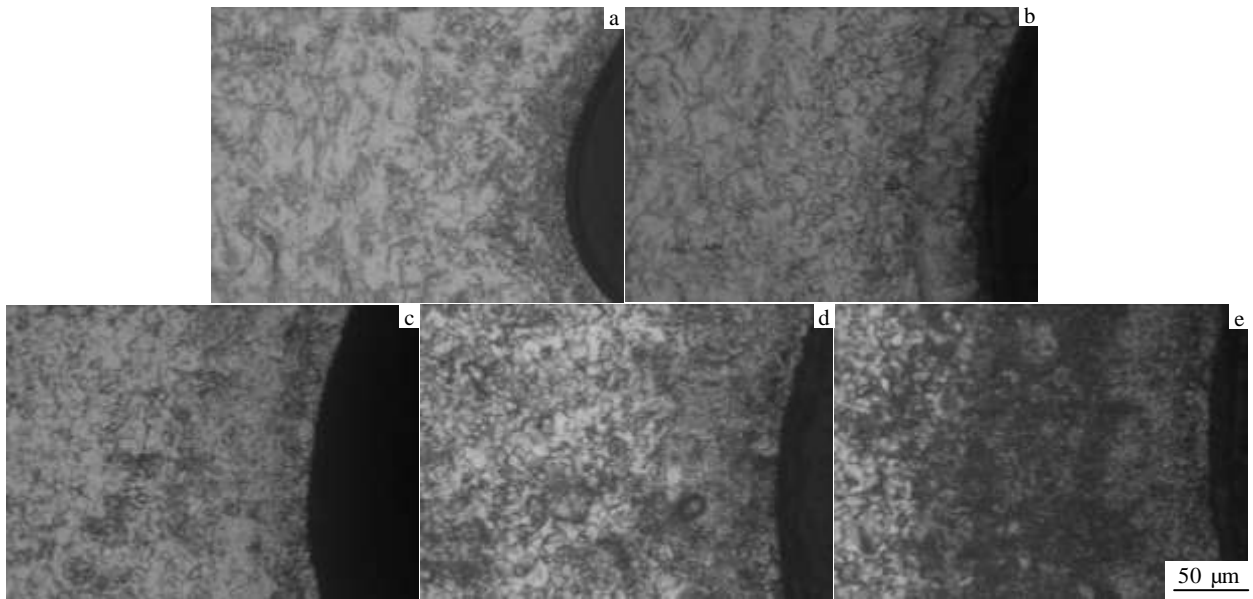


图 2 不同工艺参数处理后裂纹尖端的金相显微组织

Fig.2 OM microstructures of the crack tip with different experimental parameters: (a) 200 μF-6000 V, (b) 200 μF-7000 V, (c) 200 μF-8000 V, (d) 200 μF-9000 V, and (e) 200 μF-10 000V

晶前沿，晶粒逆着热流方向生长，通过择优取向最后成为柱状晶区。

在裂纹尖端，柱状晶区域所占比例较小，细小等轴晶区域占主要部分，细小等轴晶区域为再结晶区，可以发现原本变形的粗大晶粒被无畸变的等轴新晶粒所代替，组织结构发生了明显细化。由于脉冲电流在裂纹尖端作用时间极短，以至于产生很高的温度梯度，在细小等轴晶区域温升达不到奥氏体发生相变所需的温度，在预制单边疲劳裂纹过程中，塑性变形使材料内部的组织结构及性能发生变化，金属中的点阵畸变、空位及位错等结构缺陷增多，使材料处于不稳定的高能态。试样的形变储能为再结晶过程提供了重要的驱动力。

图 3 为脉冲电流处理前后裂纹尖端区域的 X-射线衍射物相分析结果，可以看出经过不同脉冲电流工艺参数处理后裂纹尖端区域物相未发生变化，基体仍为奥氏体组织，并还有一些富铬型碳化物，如 Cr₂₃C₆ 和 Cr₇C₃，但晶粒呈显了细化现象。

图 4 为脉冲电流处理前后裂纹尖端区域的电子背散射衍射 (EBSD) 分析结果，图 4a, 4d 分别代表裂纹尖端区域的形貌及晶粒取向。可以看出，脉冲电流处理前，裂纹尖端区域组织为被拉长的变形晶粒，晶粒取向分布在 2°~10° 和 85°~90° 区间内的比例很大，这可能与预制裂纹过程中，材料发生变形产生大量的

位错，位错相互缠结形成高能态，为释放能量，位错重新排布，形成小角度晶界有关，其中大角度晶界可能与变形过程中产生的变形孪晶有关，如图 4a, 4b 所示。脉冲电流处理后，可以清楚地看到裂纹尖端共分为 3 个区域，即靠近裂纹尖端的柱状区、再结晶等轴晶区及拉伸变形的基体区。裂纹尖端的热影响区很小，但也发现晶粒取向在 2°~10° 和 85°~90° 区间内的分布比例有所降低，说明脉冲电流促进了位错的运动，发生了再结晶现象，大角度晶界的减少，也说明再结晶晶粒

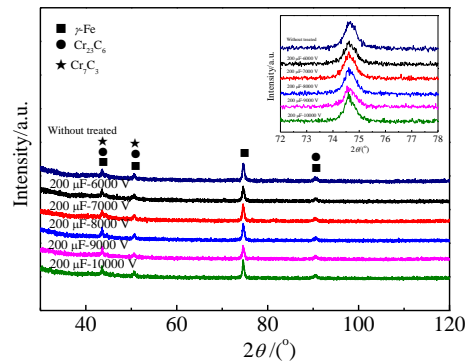


图 3 不同工艺参数处理后裂纹尖端的 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of the crack tip with different experimental parameters

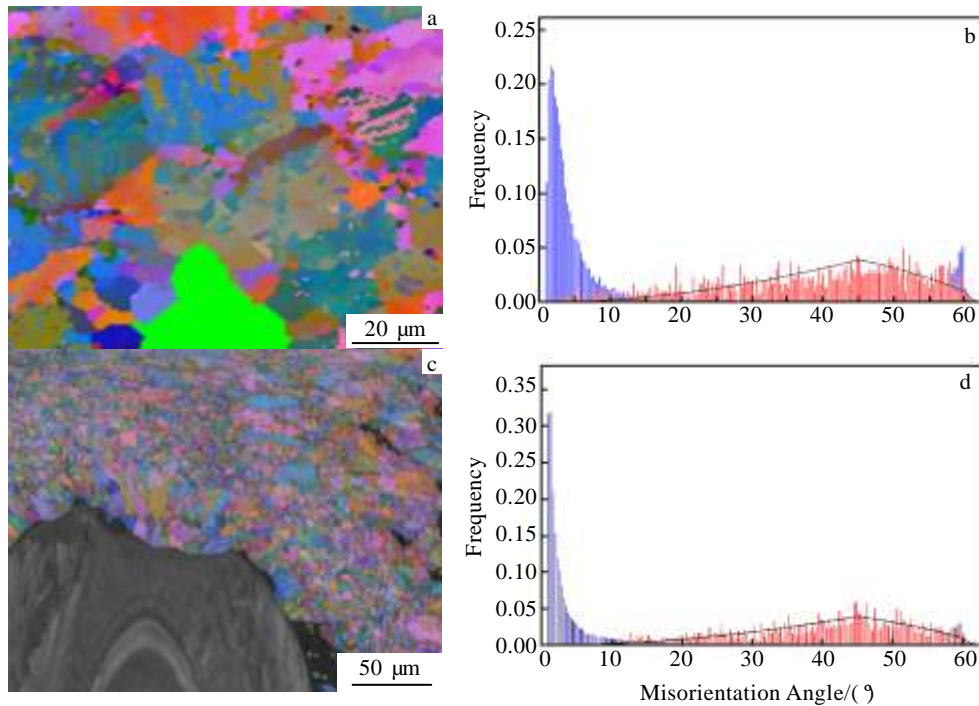


图 4 脉冲电流止裂前后 EBSD 形貌及晶粒取向

Fig.4 EBSD images (a, c) and grain orientation (b, d) around the crack tip: (a, b) before pulsed current treatment and (c, d) after pulsed current treatment

可能在变形孪晶内部发生了形核与长大过程。脉冲电流作用的瞬时性,使得再结晶过程形核率增大,但抑制了随后晶粒长大过程,使得再结晶晶粒尺寸远小于原始样品的晶粒尺寸。

裂纹扩展主要在晶界处出现扭折,并伴有较强的变形和受阻现象,而在晶粒内部,裂纹却比较平直。晶粒尺寸越小,晶界越多,对裂纹扩展的阻力越大,从而抑制裂纹的进一步扩展^[11-13]。

图 5 为脉冲电流作用前后裂纹尖端区域的透射电镜 (TEM) 照片。可见,在未放电之前,奥氏体不锈钢被拉伸,晶体发生滑移,晶体滑移时伴有晶体的转动和旋转,其结果使得晶体应力轴的取向发生变化,晶体转动和旋转的总效果是滑移方向向拉伸轴靠拢。所以拉伸之后,晶粒如图 5a, 5b 所示被拉长成条状。晶体的塑性变形是位错的运动与增殖的过程,随着变形程度的增加,位错密度大量增加,位错发生聚集塞积,杂乱的分布于晶体中,形成较为均匀分布的网络结构,如图 5c 所示。

脉冲电流处理后晶粒形貌发生很大变化,原试样中被拉长的变形晶粒被尺寸较小的等轴晶晶粒所替代,组织中出现孪晶,并发现晶粒内部位错密度大大降低,且位错趋向于平行分布向晶界处聚集,如图 5d,

5e 所示。组织中出现尺寸比较小、形状比较圆整的富铬型析出相,如图 5f 所示。试样在拉伸变形的过程中,会造成位错密度的不同,位错密度分布的不均匀性为再结晶过程提供了重要的前提条件^[14]。高密度脉冲电流通过带有裂纹的导电薄板时,伴随产生的电迁移及电致塑性效应可以加速位错的运动,利于位错的滑移和攀移^[15]。当位错运动到一定距离时异号位错相互抵消,形成亚晶粒,造成位错密度梯度增大。在位错密度较低的地方,亚晶粒通过消耗周围高能量区而成为再结晶的有效核心^[16,17]。脉冲电流处理过程是一个快速加热快速冷却的过程,加热过程中组织中的碳化物发生溶解,在随后的急速冷却过程中,碳化物形核率很大,但生长速度受到抑制,从而出现细小圆整的形状。

2.3 脉冲电流处理对裂纹尖端拉伸性能的影响

图 6 为不同工艺参数脉冲电流处理后,试件的拉伸曲线。对于此试样,实验结果如表 2 所示,脉冲电流处理后,试样的抗拉强度和延伸率都得到了提高,性能的提高与工作能量的大小并不成正比关系,电容 200 μF 、电压 8000 V 处理后试样的抗拉强度与延伸率最好,其中抗拉强度最高提高 6.06%,延伸率提高 18.76%。当放电能量低于此时,随着能量的增加抗拉强度和延伸率逐渐增加。当能量高于此时,随着能量

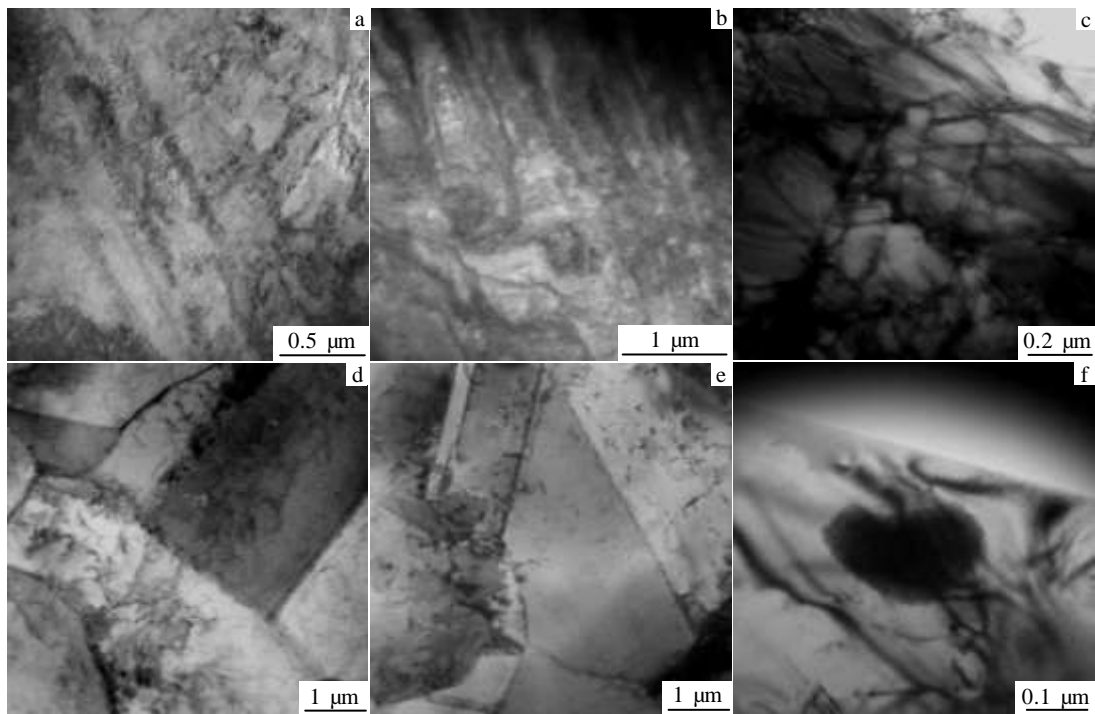


图 5 脉冲电流处理前后裂纹尖端透射电子显微镜照片

Fig.5 TEM images around the crack tip before (a~c) and after (d~f) pulsed current treatment

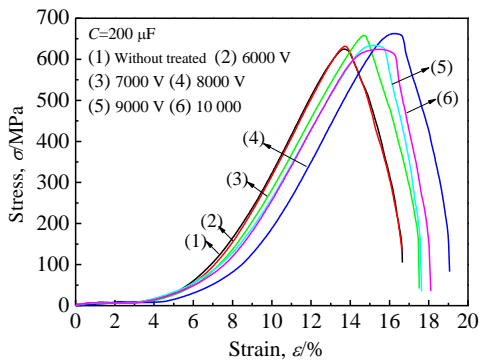


图 6 不同工艺参数处理后试样拉伸曲线

Fig.6 Tensile curves of samples with different experimental parameters

的增加，试样的性能有所降低。脉冲电流处理后，裂纹尖端发生再结晶现象，变形晶粒被细小等轴晶代替，试样近似恢复成无变形状态，需要更大的力才能使其损伤，另外，晶界数目增多，晶界对裂纹的扩展有阻碍作用，提高了试样的抗拉强度。

3 结 论

1) 宏观上脉冲电流处理后在裂纹尖端形成熔孔，降低了应力集中。微观上脉冲电流处理后裂纹尖端区域出现了组织梯度，包括柱状晶区，等轴再结晶区及基体。

2) 脉冲电流处理后裂纹尖端主要发生再结晶现象。原始试样中的变形晶粒逐渐被再结晶晶粒取代，随着输入能量的增加，再结晶晶粒不断在长大。脉冲电流快的冷却速度，抑制了再结晶晶粒的长大，从而达到细化晶粒的目的，提高材料的综合力学性能。

3) 脉冲电流作用后，降低了裂纹尖端区域晶粒内部的位错密度，且位错由未处理前的复杂网状向趋于平行分布状态转变。

4) 脉冲电流处理后，试样的力学性能都得到了不同程度提高，其中电容 200 μF、电压 8000 V 参数处理后试样的力学性能最好。

参考文献 References

[1] Song P S, Sheu B C, Chou H H. *International Journal of Fatigue*[J], 2001, 23(3): 259
 [2] Wang Gang(王 刚), Zhang Binggang(张秉刚), Feng Jicai(冯吉才) et al. *Welding & Joining*(焊接)[J], 2008(1): 20
 [3] Buxbaum O, Huth H. *Engineering Fracture Mechanics*[J],

- 1987, 28(5-6): 689
- [4] Goto M, Miyagawa H, Nisitani H. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*[J], 1996, 19(1): 39
- [5] Murdani A, Makabe C, Saimoto A *et al. Engineering Failure Analysis*[J], 2008, 15(4): 302
- [6] Conrad H. *Materials Science and Engineering A*[J], 2000, 287(2): 205
- [7] Conrad H, Karam N, Mannan S. *Scripta Metallurgica*[J], 1984, 18(3): 275
- [8] Conrad H, Sprecher A F, Cao W D *et al. JOM*[J], 1990, 42(9): 28
- [9] Bai Xiangzhong(白象忠), Hu Yuda(胡宇达), Tan Wenfeng(谭文锋). *Advances in Mechanics(力学进展)*[J], 2000, 30(4): 546
- [10] Song H, Wang Z J. *Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 490(1-2): 1
- [11] Wang Junshi(王钧石). *Materials for Mechanical Engineering(机械工程材料)*[J], 1993, 17(5): 9
- [12] Knobbe H, Köster P, Christ H J *et al. Procedia Engineering*[J], 2010, 2(1): 931
- [13] Long M, Crooks R, Rack H J. *Acta Materialia*[J], 1999, 47(2): 661
- [14] Zhu R F, Tang G Y, Shi S Q *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2013, 581: 160
- [15] Xiao Suhong(肖素红), Guo Jingdong(郭敬东), Wu Shiding(吴世丁) *et al. Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2002, 38(2): 161
- [16] Lv Baochen(吕宝臣), Zhou Yizhou(周亦胄), Wang Baoquan(王宝全) *et al. Chinese Journal of Materials Research(材料研究学报)*[J], 2003, 17(1): 15
- [17] Hosoi A, Kishi T, Ju Y. *Materials*[J], 2013, 6(9): 4213

Effects of Pulsed Current on Microstructure and Properties of Crack Tip in Remanufacturing Blank

Deng Dewei^{1,3}, Liu Qianqian¹, Li Xiaona¹, Yu Tao², Zhang Lin³, Wang Gang⁴, Zhang Hongchao²

(1. School of Materials Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

(2. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

(3. Shenyang Blower Works Group Corporation, Shenyang 110869, China)

(4. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A high energy pulsed current impacting device was used to treat 316 austenitic stainless steel containing prefabricated unilateral fatigue crack aiming for remanufacturing. The influence of high density pulsed current on the microstructure at crack tip was investigated by metallographic microscope, X-ray diffraction, electron backscattered diffraction (EBSD) and transmission electron microscope (TEM). And the evolution of microstructure during melting treatment was analyzed. Results show that the structure at crack tip is obviously refined after the pulsed current processing, and the gradient structure including the columnar crystal area, recrystallization zone and matrix is observed. Due to the rapid heating and cooling, the generation of high-speed electronic wind and electrically induced plasticity effect reduce the thermodynamic barrier of recrystallization or phase change. Thus, the rate of nucleation is increased, and the grain growth process is inhibited. Therefore the grain size of recrystallization zone is smaller than that of the matrix, and hence the mechanical properties of materials are improved.

Key words: remanufacturing; pulsed current; recrystallization; structure refinement

Corresponding author: Deng Dewei, Ph. D., Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, P. R. China, Tel: 0086-411-84706561-8051, E-mail: deng@dlut.edu.cn