

高锰钢在激光冲击作用下的微观特征

张凌峰 熊毅 张毅 刘玉亮

(河南科技大学材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要 将水韧高锰钢试样进行激光冲击,利用 H-800 透射电镜和 JSM-5610LV 扫描电镜对试样进行微观分析,得出以下结论:高锰钢在激光冲击(LSP)后硬度会显著增加,出现加工硬化现象,冲击中心点硬度由 219 HV 升高到 486 HV,升高了大约 122%。在激光冲击过程中,材料经受了较严重的塑性变形,生成大量的位错,进而形成位错塞积以及位错胞状组织等,随变形增加,结构中出现大量孪晶。孪晶和位错共同作用,从而使晶界、相界等界面遭到破坏,晶粒得到细化,形成亚晶。位错、孪晶与细晶强化共同作用,使高锰钢的性能大幅提高。

关键词 激光技术;激光冲击;高锰钢;加工硬化;孪晶;细晶强化

中图分类号 TB303;TN249 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.0603025

Microstructure of High Manganese Steel by Laser Shock Processing

Zhang Lingfeng Xiong Yi Zhang Yi Liu Yuliang

(School of Material Science and Engineering, Henan University of Science and Technology,
Luoyang, Henan 471003, China)

Abstract Water toughened high manganese steel is treated by laser shocking, and the micro-structure is analyzed by H-800 transmission electron microscope and JSM-5610LV scanning electron microscope. The results show that the hardness of high manganese steel will increase significantly after laser shock processing (LSP) and hardening will occur. The hardness of the impacted center increases from 219 HV to 486 HV, which rises about 122%. In the LSP, a more severe plastic deformation is undergone on the materials, a large number of dislocations are generated, and thus the dislocation block and the cellular structure of dislocations form. With the deformation increasing, a large number of twins are generated in the structure. So the grain boundaries, phase boundaries and other interfaces are destroyed by twinning and dislocation interaction, and grain refinement forms. Dislocations and twins share the role with the fine grain strengthening, so a substantial increase of the performance is emerged in high manganese steel.

Key words laser technique; laser shock processing; high manganese steel; work-hardening; twin crystal; fine-grained strengthening

OCIS codes 140.3390; 160.0160; 160.3900; 220.4610

1 引 言

高锰钢是抵抗强冲击、大压力耐磨材料中的最佳选择,具有其他耐磨材料无法比拟的加工硬化特性。近年来,随着现代工业的高速发展和科学技术的突飞猛进,高锰钢已成为磁悬浮列车、凿岩机器人、新型坦克等先进设备中首选的耐磨材料,许多新型材料和现代表面工程技术在性价比上无法与高锰钢相比^[1]。但实践中发现,高锰钢的耐磨性是有条件的,只有在冲击大、应力高、磨料硬的情况下,高锰

钢的高耐磨性才得到体现,而在低应力时,高锰钢工件来不及充分加工硬化而致使工件耐磨性不足,磨损快,使用寿命缩短;另外在高应力条件下,使用初期表面很软,工件磨耗较大,同样使寿命缩短^[2]。

关于高锰钢的加工硬化机理,国内外的学者采用小能量多次冲击的方法进行了大量的研究^[3~5],但其加工硬化机制并没有统一的认识^[6]。且由于加工手段等限制,小能量多次冲击并不能完全和高锰钢大冲击、高应力的使用环境相符合,所以对高锰钢

收稿日期:2011-03-22;收到修改稿日期:2011-04-12

基金项目:国家自然科学基金青年基金(50801021)和河南省教育厅自然科学基金基础研究计划(2010B430010)资助课题。

作者简介:张凌峰(1974—),男,博士,副教授,主要从事激光冲击技术、材料表面强化方面的研究。

E-mail: zh_lingfeng@163.com

实际应用的指导意义受到一定的影响。激光冲击(LSP)技术是利用高功率脉冲激光与材料相互作用过程中产生的高压冲击应力波使材料变形的一种加工手段,具有冲击能量高、应变速率快的特点^[7,8],更适合研究高锰钢在实际使用条件下的加工硬化特征。目前已有研究表明,不少面心立方结构材料在激光冲击作用下会产生大量的位错和孪晶,进而出现晶粒细化现象^[9,10]。这一现象对高锰钢是否适用,目前尚无定论,希望通过对类似材料的研究,找出高能激光冲击下面心立方结构的通用规律,对其他材料的加工起到一定的借鉴意义。

本文采用高能激光冲击高锰钢,通过分析其微观特征,探讨超高速变形对材料组织与性能的影响。激光冲击后高锰钢可以在低冲击载荷下正常使用,并保持较好的强度和硬度,扩展高锰钢的使用范围^[11]。

2 试验材料和方法

试验采用的材料为中国一拖公司提供的高锰钢,主要化学成分(质量分数)如下:Mn:11%~14%,C:1.0%~1.4%,Si:0.3%~1.0%,P:小于0.03%,S:小于0.05%。将试样在1050℃下保温2h进行固溶,然后水韧处理。

使用的激光机为江苏大学强激光技术研究所的钕玻璃脉冲激光器,试验过程中使用的激光参数为:脉冲能量25J;激光波长1.06μm;脉冲宽度23ns;光斑直径8mm。吸收层使用新型的铝箔吸收层,使用水作为约束层^[12]。

试样的微观组织观察是在H-800型透射电镜(TEM)上进行的,截面观察在JSM-5610LV扫描电镜上进行。

3 组织与性能

3.1 微观组织分析

3.1.1 位错分析

由图1可知,激光冲击后,高锰钢内沿晶界、相界等出现大量位错。图1为冲击后在冲击区边缘部位观察到的位错形态,图1(a)为晶界内形成的位错环,图1(b)为位错在晶界、析出相周围富集,形成的位错团和位错塞积。

可见经激光冲击处理后,在晶粒内形成了大量的位错。按照位错形成理论,对高锰钢位错首先在{111}面上滑移,然后促使晶粒其他的滑移系开动,由于高锰钢低层错能限制位错的交互滑移,不同的

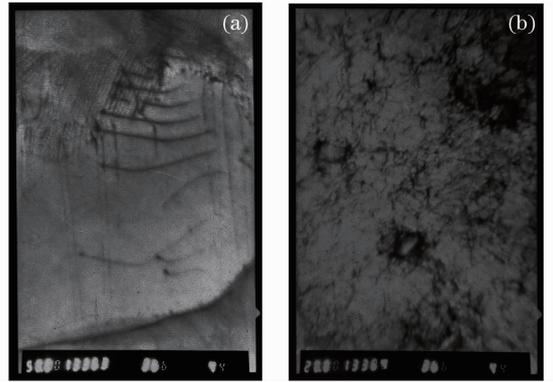


图1 水韧处理高锰钢经激光冲击后的位错形态。

(a)位错环,(b)位错塞积

Fig.1 Dislocation form after LSP. (a) dislocation

loops, (b) dislocation block

位错只能在各自的滑移面上运动,并相互交割形成网格结构。随着应变量和应变速率的增加,大量的位错运动到一定程度,就会出现位错塞积^[13,14]。

3.1.2 孪晶分析

按孪晶形成理论,当因位错塞积而产生的局部应力达到发生机械孪晶变形的临界分切应力时,就会产生孪晶。一般认为,对高锰钢这种低层错能的面心立方结构,由于层错带宽,交滑移困难,在较大变形下将产生大量层错,同时位错的交滑移受到限制,在难于进行交滑移的情况下,孪晶产生,而且随着变形量的加大,孪晶的含量也随之增加^[15]。

图2(a)为靠近激光冲击中心区域观察到的孪晶形态,图2(b)为孪晶的衍射花样。可以清晰地看到光亮的双斑点,表现为典型的孪晶衍射花样,说明随着变形量的增大,在激光冲击的高锰钢内部出现了孪晶特征。

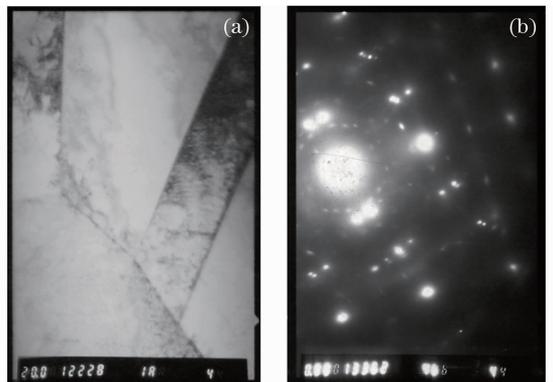


图2 水韧处理高锰钢经激光冲击的孪晶和衍射斑点。

(a)孪晶图像,(b)衍射花样

Fig.2 Twins and its diffraction spots of water toughened high manganese steel after LSP. (a) twins, (b) diffraction spots

3.1.3 晶粒细化

对于位错来说,高密度的位错缠结形成位错胞,当位错密度增加到一定程度时,异号位错反应消失,同号位错发生重组形成了亚微米级的亚晶粒,从而使晶粒得到细化。如图 3(a)所示,大量位错墙在晶内排列,形成亚晶界。

对于孪晶来说,经激光冲击后,随变形的增加,单系孪晶将逐渐过渡到多重孪晶,同时孪晶交割区内存在着大量的位错胞,位错胞进一步演变为亚晶粒,使晶粒得到细化。即孪晶与位错产生交互作用,晶粒表现出了明显的细化倾向。由图 3(b)可以看出,位错与孪晶共同作用分割晶粒,晶粒细化^[16]。

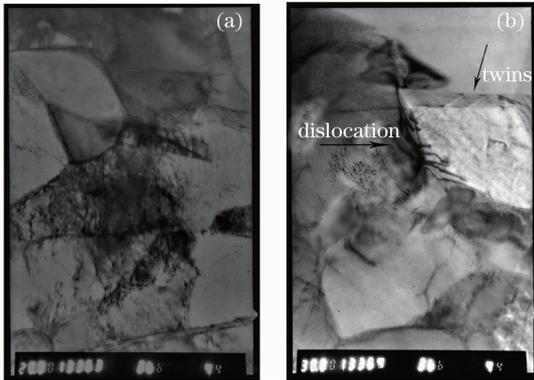


图 3 高锰钢经激光冲击细化晶粒

Fig. 3 Subgrain of high manganese steel by LSP

由此推知,高锰钢奥氏体晶粒是通过位错运动和孪晶变形逐步细化的,在激光冲击过程中,高锰钢表层发生了严重的塑性变形,如果增加冲击次数,变形量将进一步加大,亚晶粒中的位错密度将会继续增大后再次发生位错反应和位错重组,使亚晶粒裂解成纳米晶。而晶粒尺寸的减小将会增加位错运动的障碍,减少晶粒内位错塞积群的长度,导致强度和硬度提高^[17]。

3.2 断面分析

为分析高锰钢表层变形区情况,将试样沿激光冲击斑点中心线切割,然后用树脂将试样镶嵌在塑胶管中,进行机械打磨,并抛光、深度腐蚀。扫描样腐蚀剂为:1)体积分数为 4% 的硝酸乙醇,2)体积分数为 6% 的盐酸乙醇。先在 1) 中浸蚀 10 s,取出用清水冲洗,再入 2) 中浸蚀 8 s,取出用清水冲洗干燥。腐蚀后用虎钳夹破塑胶管取出试样,放在乙醇溶液中用 KQ5200 超声波清洗器清洗,使用 JSM-5610LV 扫描电镜观察。

由图 4(a), (b)对比可以看出,处理后出现明显的硬化层,大约 100 μm 的范围,分析其形成原理,在激光冲击后,由于位错、孪晶和晶粒细化的多重作用,高锰钢的表层得到了大幅的强化,这样在浸蚀过程中,硬化层的腐蚀速度明显低于内部未强化部分,在扫描电镜下即表现出不同的形貌特征。

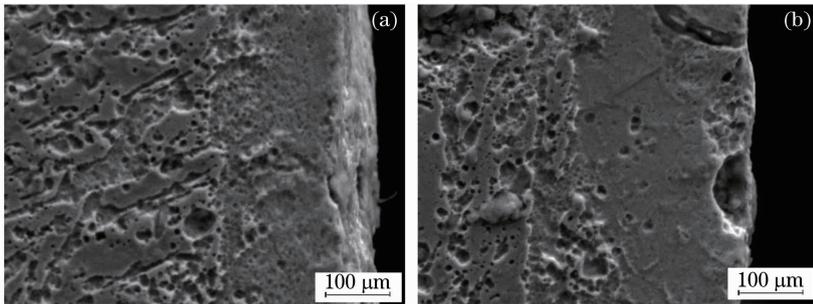


图 4 水韧高锰钢经激光冲击处理后的截面组织。(a)处理前,(b)处理后

Fig. 4 Section organization of high manganese steel by LSP. (a) before processing, (b) after processing

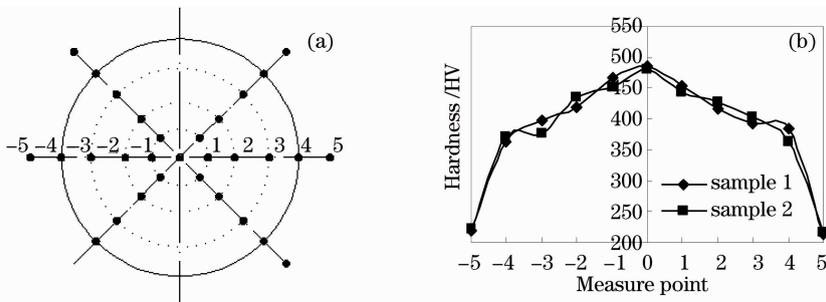


图 5 高锰钢硬度测量位置(a)与冲击区域硬度值的径向分布(b)

Fig. 5 (a) Measure point and (b) hardness distributing of shocking area

由此可知,水韧的高锰钢在激光冲击后,形成的加工硬化层,使得高锰钢的耐磨性、耐蚀性得到提高,即激光冲击对高锰钢表面具有明显强化作用。

3.3 硬度分析

用 MH-3 显微硬度计测量各个状态下高锰钢的显微硬度,结果表明未经激光冲击的水韧高锰钢硬度平均值为 219 HV。图 5(a)为激光冲击结束后,冲击变形区硬度测量的取点情况,为防止取点导致数据产生偏差,分别以同侧、等径位置所测 3 点取平均作为硬度的径向分布特征,图 5(b)为测量结果,由此可见,激光冲击后,其中心点硬度提高了约 122%。

硬度的提高可归因于晶粒细化和加工硬化效应共同作用的结果,在激光冲击过程中高密度的位错缠结和形变孪晶导致高锰钢出现明显的加工硬化现象,使变形层硬度明显升高^[18]。

总之,激光冲击高锰钢组织内的孪晶和位错不是独立存在的,二者相互作用,同时高锰钢晶粒通过位错运动和孪晶变形逐步细化,从而提高硬度与强度。

4 结 论

1) 激光冲击处理强化可以显著提高冲击区的硬度,经过水韧处理的高锰钢硬度最大提升 122%。

2) 激光冲击使高锰钢显微组织出现位错和孪晶,大量的位错运动到一定程度,出现了位错塞积,当因位错塞积而产生的局部应力达到发生机械孪晶变形的临界分切应力时,就会产生孪晶。

3) 当激光脉冲冲击到试样表面时,将晶粒击碎形成亚晶,晶粒尺寸的减小将会增加位错运动的障碍,减少晶粒内位错塞积群的长度,导致强度和硬度提高。

参 考 文 献

- 1 Yan Weilin, Fang Liang, Zheng Zhanguang. Work hardening of high manganese steel[J]. *Foundry Technology*, 2008, **29**(11): 1468~1472
严伟林,方亮,郑战光. 高锰钢加工硬化[J]. *铸造技术*, 2008, **29**(11): 1468~1472
- 2 Petrov Yun, V. G. Gavriljuk, H. Berns *et al.*. Surface structure of stainless and hadfield steel after impact[J]. *Wear*, 2006, **260**(10): 687~691
- 3 M. A. Filippov, B. N. Kodes. Influence of high-pressure shock waves on the fine structure of manganese steel[J]. *Phys. Met. Metallogr.*, 1971, **31**(1): 171~175
- 4 J. L. Ocana, M. Morales, J. J. Garcia-Ballesteros *et al.*. Laser shock microforming of thin metal sheets[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, **255**(10): 5633~5636
- 5 Xu Yunhua, Chen Yumei, Xiong Jianlong *et al.*. Mechanism of strain-induced nanocrystallization of hadfield steel under high energy impact load[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2001, **37**(2): 165~170
许云华,陈渝眉,熊建龙等. 冲击载荷下应变诱导高锰钢表层组织纳米化机制[J]. *金属学报*, 2001, **37**(2): 165~170
- 6 Li Shusuo, Chen Xijie. Work hardening and wearability of superhigh manganese steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 1997, **9**(4): 38~41
李树索,陈希杰. 超高锰钢加工硬化及耐磨性的研究[J]. *钢铁研究学报*, 1997, **9**(4): 38~41
- 7 Zhong Minlin, Liu Wenjin. Leading areas and hot topics on global laser materials processing research[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1653~1659
钟敏霖,刘文今. 国际激光材料加工研究的主导领域与热点[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1653~1659
- 8 Yan Qian, Jian Lu, Xiaowu Ni. Study of laser-induced plasma shock waves by the probe beam deflection technique[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(5): 410~412
- 9 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
- 10 Wang Huaming, Li Xiaoxuan, Sun Xijun *et al.*. Study of surface mechanical properties of laser shock processed austenitic steel and Ni-based superalloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(8): 756~760
王华明,李晓轩,孙锡军等. 激光冲击处理不锈钢及镍基合金后表面力学性能的研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(8): 756~760
- 11 Zu Fangqiu, Li Xiaoyun, Liu Lanjun *et al.*. Research on microstructure and work hardening mechanism of high manganese steel by simulating actual working condition[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2006, **27**(2): 71~74
祖方遒,李小蕴,刘兰俊等. 不同相对冲击功下高锰钢组织与加工硬化机制的研究[J]. *材料热处理学报*, 2006, **27**(2): 71~74
- 12 Zhang Lingfeng, Ren Fengzhang, Zhou Heyu *et al.*. Experimental study on actual role area of plasma in laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1224~1228
张凌峰,任凤章,周合玉等. 激光冲击过程中等离子体实际作用面积实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1224~1228
- 13 Y. X. Hu, Z. Q. Yao. Fem simulation of residual stresses induced by laser shock with overlapping laser spots[J]. *Acta Metall. Sin.*, 2008, **21**(2): 125~132
- 14 N. Fujita, K. Ohmura, A. Yamamoto. Changes of microstructures and high temperature properties during high temperature service of niobium added ferritic stainless steels[J]. *Mater. Sci. Engng.*, 2003, **351**(1-2): 272~275
- 15 G. M. Sim, J. C. Ahn, S. C. Hong. Effect of Nb precipitate coarsening on the high temperature strength in Nb containing ferritic stainless steels [J]. *Mater. Sci. Engng.*, 2005, **396**(1-2): 159~164
- 16 J. Z. Lu, K. Y. Luo, Y. K. Zhang *et al.*. Grain refinement of LY2 aluminum alloy induced by ultra-high plastic strain during multiple laser shock processing impacts[J]. *Acta Materialia*, 2010, **58**(11): 3984~3994
- 17 Y. X. Hu, Z. Q. Yao. Overlapping rate effect on laser shock processing of 1045 steel by small spots with Nd:YAG pulsed laser [J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2008, **202**(8): 1517~1525
- 18 A. King, A. Steuwer, C. Woodward *et al.*. Effects of fatigue and fretting on residual stresses introduced by laser shock peening [J]. *Mater. Sci. Engng.*, 2006, **435-436**(5): 12~18