爆炸加载下 AISI304 不锈钢板表面硬化和数值模拟

王呼和，史志铭，佟铮

（内蒙古工业大学 材料科学与工程学院，呼和浩特 010051）

摘　要：目的 提高 AISI304 不锈钢板表面硬度。**方法** 利用爆炸加载表面硬化方法对 3 mm 厚的 AISI304 不锈钢板进行了表面硬化处理，通过 HXD-1000YM 型显微硬度计和 JEM-2010 型透射电子显微镜对爆炸加载处理后试样的不同部位横截面进行了硬度测量和微观组织表征。采用大型有限元数值模拟软件 ANSYS/LS-DYNA 对爆炸加载表面硬化过程进行了数值模拟，计算了撞击面平均压力和速度。通过对比数值模拟结果与理论计算结果，分析了特征点碰撞压力和速度对爆炸加载处理后表面硬度的影响。**结果** 数值模拟结果表明，撞击面压力平均值为 5.5 GPa，撞击面平均速度达到了 178 m/s，撞击面压力和速度的理论计算值与数值模拟值误差不超过 5%。试验结果与数值模拟结果具有一致性。爆炸加载后，试样近起爆端和爆轰末端的撞击压力和撞击速度小于稳定爆轰阶段，导致前者表面硬度小于后者。横截面硬度分布表明撞击表面硬度大于炸药接触面硬度，撞击表面硬度值从 210HV 提高至 450HV，炸药接触面硬度值从 210HV 提高至 390HV。**结论** 爆炸表面硬化过程中存在边界效应。爆炸表面硬化方法能够显著提高板材表面硬度，同时可以提高板材整体硬度，且硬度提高与变形带和位错阵列形成有关。

关键词：AISI304 不锈钢板；爆炸表面硬化；数值模拟；变形带；复板应力；复板速度

中图分类号：TG392　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-3660(2018)11-0054-06

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.11.008

Surface Hardening and Numerical Simulation on AISI304 Stainless Steel Plates by Explosive Impact Treatment

WANG Hu-he, SHI Zhi-ming, TONG Zheng

(School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the surface hardness of AISI304 stainless steel plate. Surface hardening treatment was carried out on 3 mm thick AISI304 stainless steel plate by explosive surface hardening technique. The microhardness and the microstructures of the cross sections at the different locations in the treated samples were measured and characterized by HXD-1000YM Micro-hardness tester and JEM-2010 transmission electron microscopy. Numerical simulation was carried out on process of explosive surface hardening by finite element software ANSYS/LS-DYNA. The average pressure and velocity of impact surface were calculated. The effect of the impact pressure and velocity on surface microhardness of treated samples at the

收稿日期：2018-05-04；修订日期：2018-06-24

Received：2018-05-04；**Revised**：2018-06-24

基金项目：国家自然科学基金项目（51161013）；内蒙古工业大学科学研究项目（X201411）

Fund：Supported by National Natural Science Foundation of China (51161013), Scientific Research Project of the Inner Mongolia University of Technology (X201411)

作者简介：王呼和（1983—），男，博士，讲师，主要研究方向为爆炸加工。邮箱：huhe2009@imut.edu.cn

Biography：WANG Hu-he (1983—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: explosive forming. E-mail：huhe2009@imut.edu.cn

specific points was analyzed by comparison of the numerical simulation results and the experiment results. From the numerical results, the average pressure at impact point was approximately 5.5 GPa and the average velocity at impact point reached 178 m/s. Error between the theoretical calculation and the numerical calculation of pressure and velocity on impact surface was less than 5%. Experimental results agreed with the numerical simulation results. The impact pressure and velocity near initiation and detonation ends after explosive hardening were less than that at the stage of stabilization detonations. Therefore, microhardness in the former is less than that in the latter. Distribution of hardness on the cross sections indicated that the microhardness of the impact surface was larger than that of the explosive surface and increased from 210HV to 450HV and the microhardness on the explosive surface increased from 210HV to 390HV. There exists the boundary effect in the explosive hardening process. Explosive impact treatment can enhance the surface hardness and entire hardness of plate remarkably. Improvement of surface hardness is related to formation of deformation bands and planar dislocation arrays.

KEY WORDS: AISI304 stainless steel plate; explosive surface hardening; numerical simulation; deformation bands

AISI304 不锈钢具有较强的耐腐蚀性和优异的综合力学性能，广泛应用于医疗器具、船舶、食品工业及石油化工等行业。但不锈钢表面硬度较低，耐磨性较差，疲劳寿命较短，常常在复杂工况下产生应力腐蚀开裂和疲劳裂纹扩展[1-5]。因此，探索一种高效的表面处理技术对扩大 AISI304 不锈钢应用范围和领域显得尤为重要。

金属爆炸表面硬化方法是一种有效的表面处理技术，现阶段主要应用于高锰钢道岔硬化[6-10]，该方法能够使金属表面微观组织细化，并提高其硬度、耐磨性和耐腐蚀性。然而，利用该方法硬化后的表面相对粗糙，有严重的烧伤现象，无法满足复杂工况服役下板材的表面硬化要求。为了拓宽爆炸表面硬化方法的应用领域，有研究者改进了传统的爆炸硬化方法，使硬化表面不再是炸药接触面，而是与刚性基座撞击面[11]，其原理是通过炸药爆炸产生的冲击波驱使金属板以极高速度向刚性基座撞击，使表面产生高应变速率塑性变形，进而达到细化晶粒、提高性能的目的。文献[12]利用该方法在 6 mm 厚的中碳钢表面制备了纳米层，分析了纳米层形成的机理，指出中碳钢在爆炸加载下晶粒细化的同时，表面形成了纳米级奥氏体相。文献[13]进行了低碳钢和纯铜板爆炸表面硬化试验，指出表面硬化是由于表面形成大量的位错墙和位错胞，从而阻碍了位错运动。文献[14]利用爆炸冲击方法对纯铜进行爆炸硬化试验，结果表明，纯铜板机械性能受到整体影响，杨氏模量和屈服强度都不同程度地得到提高，但延伸率降低幅度较大。

上述工作主要集中在炸药药量和材料内部结构对硬度以及耐磨性的影响，对爆炸硬化过程中板材不同部位应力应变、撞击速度对硬度变化的影响规律尚未涉及。同时，板材爆炸硬化过程中运动参数的测定也是极其重要而困难的工作，需花费大量的人力和资金，所以爆炸硬化数值模拟工作就显得尤为重要。为了获得爆炸表面硬化数值模拟参数以及相应的组织和硬度分布规律，本文以 AISI304 不锈钢板为研究对象，进行爆炸表面硬化试验和数值模拟，获得应力和碰撞速度时间历程曲线，并通过分析该撞击速度和应力下微观组织形貌和硬度分布规律，讨论 AISI304 不锈钢板爆炸表面硬化机理。

1　试验

AISI304 不锈钢板尺寸为 0.3 m×0.05 m×0.003 m，试验用炸药为 2#岩石炸药，密度 900 kg/m^3，爆速为 3600 m/s。炸药量既要满足不锈钢板表面冲击所需的能量，又要避免过大而造成基板与复板之间产生冶金结合。因此，装药厚度的选择范围是试验关键，通过参考相关文献[15-16]及现场试验，定义单位面积炸药量为两种金属爆炸焊接药量的 60%~70%：

$$W = 0.6K\sqrt{\delta\rho} \tag{1}$$

式（1）中 W 为单位面积药量（kg/m^2）；ρ 为复板密度 8000 kg/m^3；K 为单位面积药量系数，本次试验取值 2[17]；δ 为金属板厚度（m）。通过上式计算出单位面积药量为 10 kg/m^2，炸药层的厚度为 0.011 m。

利用 JEM-2010 型透射电子显微镜观察特征点撞击面微观组织，每一个特征点进行两次不同位置的取样观察。透射电镜试样经过机械研磨、离子减薄等步骤制得。使用 HXD-1000YM 型显微硬度计测量样品横截面显微硬度，测试载荷为 5 N，每 40 μm 测量一个点，每一测量值均为 5 个点的平均值。

基板与复板（AISI304 不锈钢板）碰撞应力和速度可通过动态碰撞角 β 和碰撞点速度 V_p 进行理论计算。动态碰撞角 β 可利用经典 Richter 公式[18]计算：

$$\beta=\frac{R\phi_0}{R+C\phi_0} \tag{2}$$

其中 β 为动态碰撞角；ϕ_0 为炸药侧向分散角，其表达式为 $\phi_0=\frac{\pi}{2}\left(\sqrt{\frac{r+1}{r-1}}-1\right)$（$r$ 为炸药有效多方指数，对于硝铵炸药在稳定爆轰条件下可取 2.5[15]）；C 值与

参数 r 有关，其表达式为 $C=\frac{\sqrt{3}}{2}\sqrt{\frac{r^2-1}{r^2-r\sqrt{r^2-1}}}$；$R$ 为炸药与复板质量比，R=0.2。据此可求得 β=7.5°。

碰撞点速度 V_p 由下式计算：

$$V_p=2V_d\sin\frac{\beta}{2} \tag{3}$$

式中：V_p 为复板飞行速度（m/s），V_d 为炸药爆速 3200 m/s，求得 V_p=372 m/s。

碰撞点压力由碰撞点速度、复板密度和声速公式计算[19]：

$$P_{基板}=\rho_{steel}(C_{steel}+S_{steel}U_p)U_p \tag{4}$$

$$P_{复板}=\rho_{steel}\left[C_{steel}+S_{steel}(\upsilon_p-U_P)\right](\upsilon_p-U_P) \tag{5}$$

式中 ρ 为基板、复板密度 7800 kg/m^3，冲击加载条件下，基板、复板 C_{steel} 和 S_{steel} 取 3570 m/s 和 1.92[19]。由于碰撞瞬间满足 $P_{基板}=P_{复板}$，联合（4）和（5）可求出未知量 P 和 U_p，碰撞压力 P=5.3 GPa，碰撞点 U_p=180m/s。

2　数值模拟

爆炸硬化数值模型假设如下：（1）爆炸加载过程在完全真空下进行，忽略外部空气对复板的作用。（2）爆炸加载后，复板动能转化为变形能和动能，忽略碰撞区域温升导致的能量变化。（3）淬火后，基板只发生弹性变形。

根据以上假设，利用 ANSYS/LS-DYNA 建立爆炸表面硬化数值模型，如图 1 所示。由于基板和复板碰撞区域意义重大，为了获得精确的分布规律，复板下表面 0.3 cm 范围内细化单元至 0.02 cm，单元类型为 SOLID164，采用 Lagrange 算法，单位制为 g-cm-μs。

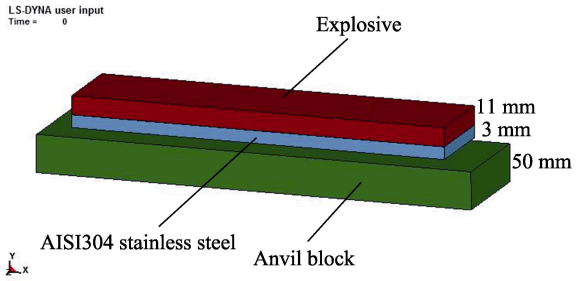


图 1　爆炸硬化数值模型

Fig.1 Numerical model of explosive hardening

复板采用经典弹塑性应变与应变率相关的 Cowper-Symonds 模型，本构关系为[20]：

$$\sigma_y=\left[1+\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)^{1/P}\right]\left(\sigma_0+\beta E_P\varepsilon_{eff}^p\right) \tag{6}$$

其中 σ_y 为屈服应力（MPa）；$\dot{\varepsilon}$ 为应变速率，其表达式为 $\dot{\varepsilon}=\sqrt{\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}}$（$\dot{\varepsilon}_{ij}$ 为应变速率张量）；C 和 P 为材料常数，分别取 40 和 5[18]；σ_0 为初始屈服应力；应变硬化参数 β 取 0.5[21]；E_p 为塑性硬化模量（GPa），由弹性模量 E 和剪切模量 E_t 确定，即 $E_p=\frac{E_tE}{E-E_t}$；ε_{eff}^p 为有效塑性应变，表达式为 $\varepsilon_{eff}^p=\int_0^t\left(\frac{2}{3}\varepsilon_{ij}^p\varepsilon_{ij}^p\right)^{1/2}\mathrm{d}t$（$\varepsilon_{ij}^p$ 为塑性应变张量）。炸药材料模型*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BU-RN 与 JWL 状态方程连用。高能炸药爆轰产物的单元压力 P 由状态方程求得，状态方程的 P-V 关系如下[21]：

$$P=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)\mathrm{e}^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)\mathrm{e}^{-R_2V}+\frac{\omega E_0}{V} \tag{7}$$

其中，V 为相对体积。其余参数为利用圆筒试验确定的常数[22]，2#岩石炸药参数如表 1 所示。

表 1　炸药 JWL 状态方程参数

Tab.1 State equation model parameter of explosive at JWL state

Parameters	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa	ρ_0/(kg·m^{-3})
Ammonium nitrate explosive	132	0.439	5.3	1.2	0.21	0.32	900

3　结果与讨论

3.1　试验结果

AISI304 不锈钢板爆炸表面硬化前后如图 2 所示。由图可知，表面硬化后试样厚度减薄不均匀，表面积增大，两端部分有不同程度的翘曲现象。特征点（A、B、C、D、E）横截面显微硬度变化曲线（图 3）表明，原始组织平均硬度值为 210HV。爆炸硬化后，板材沿厚度方向，显微硬度均有大幅度提高，表明爆炸冲击能够显著提高板材表面硬度。特征点 B、C、

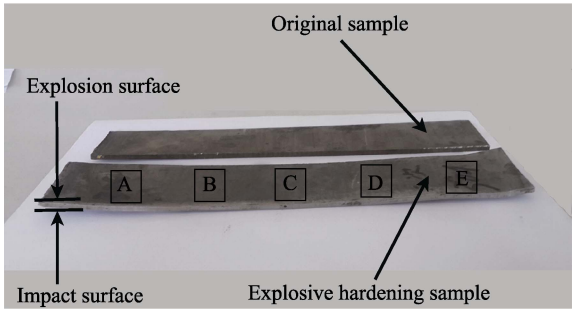


图 2　爆炸表面硬化前后实物

Fig.2 Samples before and after explosive hardening

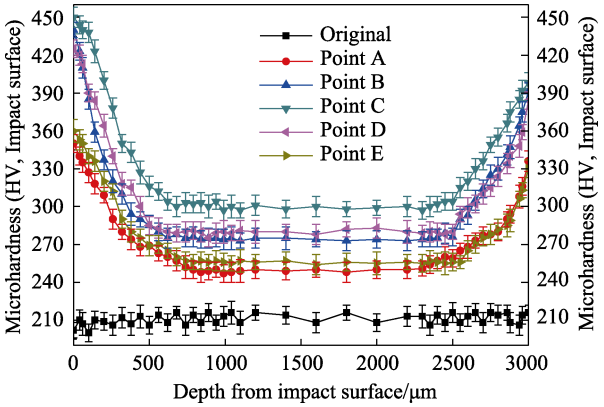


图 3　特征点横截面显微硬度变化规律

Fig.3 Variation of microhardness on cross section at the specific points

D 位置的表面硬度接近 450HV，相比原始试样，其硬度提高了 1 倍。然而，A、E 位置的表面硬度为 360HV，尽管硬度有一定程度提高，但与 B、C、D 位置相比，硬度提高不明显，说明虽然板材整体硬度得到了大幅提高，但爆炸硬化后试样硬度分布不均匀，存在边界效应。进一步观察发现撞击面（与基座碰撞面）硬度高于炸药接触面硬度，说明撞击面产生局部大变形，硬度提高更明显，而与炸药接触面由于爆炸热量，导致了较低的硬度。

试验过程中，复板与刚性基座碰撞时，板材不同部位的应力应变、撞击速度分布不均匀，从而产生了边界效应。因此，爆炸硬化过程中，获得板材不同部位处应力应变及撞击速度分布对解释硬度分布规律具有非常重要的意义。通常利用数值模拟方法获得爆炸加工过程中复板应力应变及运动参数分布。

爆炸表面硬化过程中，不同时刻复板飞行姿态及等效应力分布如图 4 所示。图 4a 为炸药起爆后 20 μs 复板与基座碰撞瞬间。图中箭头所示为爆轰波传播方向，等效应力最大值达到 2.9 GPa 左右。图 4b 表示起爆 40 μs 后复板飞行姿态，1 点为爆轰波前沿，2 点为试样与基座碰撞处，此处等效应力值最大，达到了 4 GPa 左右。爆轰 84 μs 后，应力分布如图 4c 所示。从中可以看出，碰撞点处应力达到了 5.9 GPa，仍然保持在最大值，而近起爆点处由于弹性恢复力作用，有部分翘起现象。图 4d 为爆轰结束段等效应变分布结果，表明应变量较大部位集中在撞击表面，最大值大约为 5.9%，而其他部位应变量相对较小。对比图 2 和图 4d，结果表明板材整体变形量不大，应变量分布不均匀，试验结果和模拟结果具有良好的一致性。

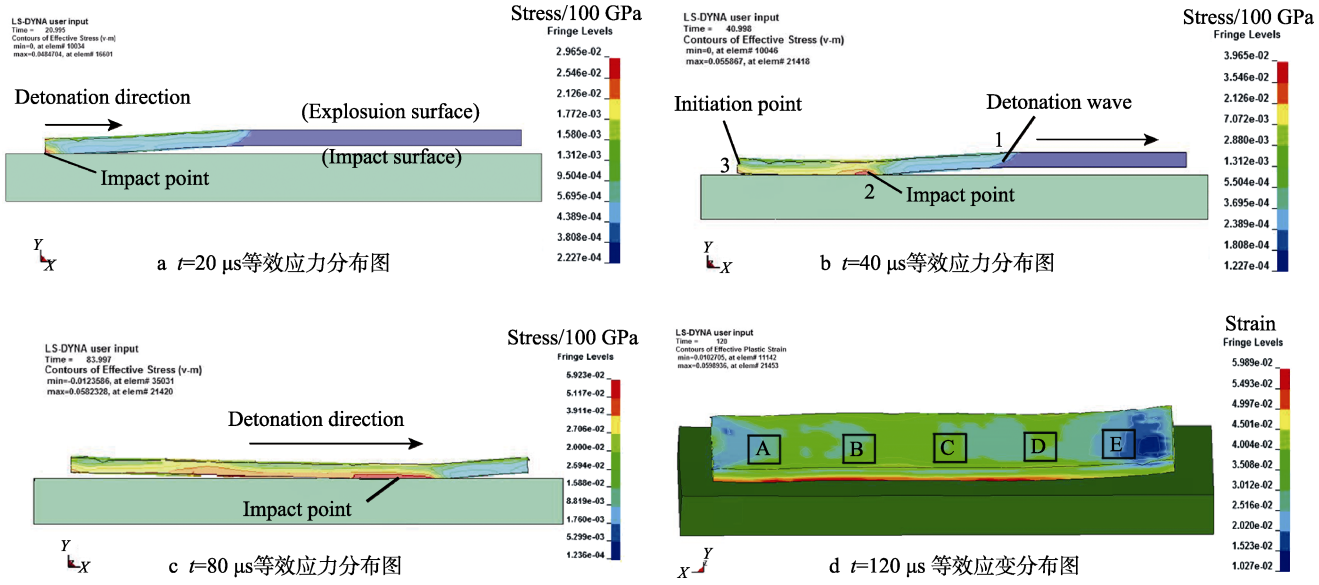


图 4　爆炸表面硬化过程数值模拟

Fig.4 Numerical simulation of explosive hardening process: a) t=20 μs distribution of equivalent stress; b) t=40 μs distribution of equivalent stress; c) t=80 μs distribution of equivalent stress; d) t=120 μs numerical simulation results of strains

3.2　数值模拟结果

为了获得板材特征点碰撞压力和速度，输出特征点压力和速度时间历程曲线如图 5、6 所示。图 5 表明碰撞瞬间，特征点压力急剧上升，此后又逐渐衰减到 0 值。近起爆点 A 和爆轰结束点 E 处应力明显小于稳定爆轰处 B、C、D，证明爆炸表面硬化过程存在边界效应。特征点平均压力为 5.5 GPa。图 6 为特征点速度时间历程曲线，爆轰波引起特征点与基板碰撞并达到极值，加速时间大约在 20 μs 左右，此后由于与基板产生弹性恢复，复板各点速度趋于反方向稳定值，各点平均值大约为 178 m/s。以上数值模拟结果与公式（3）和（4）理论计算结果误差范围不超过 5%，具有较高的一致性。说明本文所建立的爆炸硬化三维数值模型能够给类似试验研究提供理论参考。

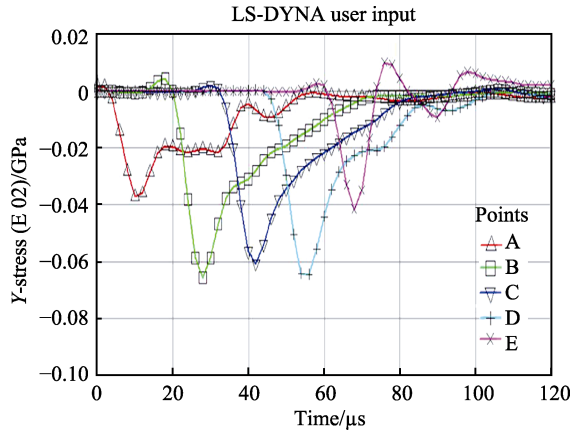


图 5　特征点压力时间历程曲线

Fig.5 Pressure-time at specific points

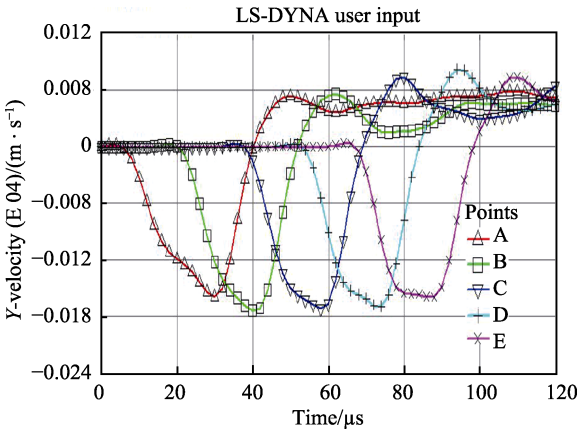
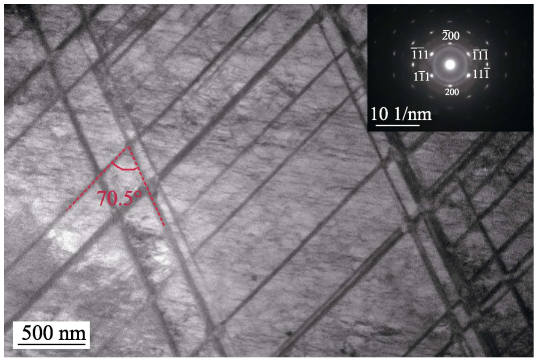


图 6　特征点速度时间历程曲线

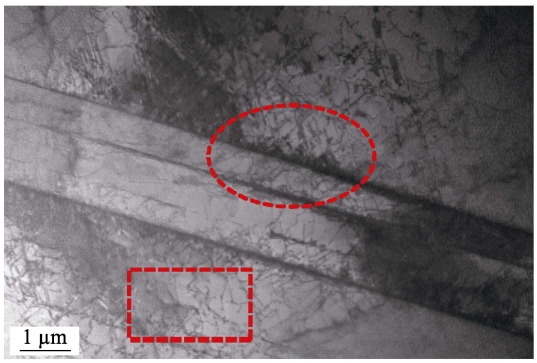
Fig.6 Velocity-time at specific points

3.3　特征点微观组织

为了获得特征点对应的微观组织结构，从而说明硬度分布与微观组织结构的关系，进行了爆炸表面硬化后板材特征点（图 4d）的微观组织分析。由于 B、C、D 特征点和 A、E 特征点变形微观组织类似，因此只分析位置 C 和位置 A 的微观组织。图 7a 为 C 位置处形变微观组织（虚线表示变形带角度）。从图中可以观察出，晶粒内部变形不明显，产生了大量的变形带。变形带间距大约为 200~500 nm，变形带交叉角以及选区电子衍射花样标定结果表示变形带平行于（111）面。根据文献[20-21]，在撞击压力 5.5 GPa 和速度 180 m/s 内，变形带由少量 ε 马氏体、α 马氏体和基体奥氏体相组成，说明在爆炸冲击过程中产生了马氏体相变。图 7b 为 A 位置处微观组织（方框表示位错缠结，椭圆框表示平面型位错阵列），由于碰撞应力和速度相对特征点 C 较小（大约 3.8 GPa 和 160 m/s），所以缺陷形式主要以平面型位错阵列为主（图中椭圆所示），该位置处形变微观组织与 E 点相同，未发现变形带。对于低层错能 AISI304 不锈钢，位错很难进行交滑移或攀移，因此，透射电镜形貌常常以平面形阵列存在。如果应力或应变量达到了产生



a C点变形带形貌



b 特征点A处微观组织

图 7　特征点微观组织

Fig.7 Microstructure of the specific points: a) morphology of the deformation bands at the point c; b) morphology of microstructures at the point a

相变的临界值，晶粒内部强烈的位错运动将会导致马氏体相变。因此，爆炸硬化后形貌将从平面型位错阵列转向变形带交叉。实际上，板材中马氏体(ε、α)分布不均匀造成了爆炸表面硬化后的板材显微硬度分布不均匀（如图 3 所示）。通过以上特征点微观组织观察表明，由于 B、C、D 点变形带中存在 ε 马氏体、α 马氏体，所以相对于 A、E 点平面型位错阵列，其引起的硬化程度更大[25-27]。特征点微观组织差异与图 3 中硬度分布结果一致。不同部位的微观组织观察表明，大量变形带及平面型位错阵列阻碍了位错运动，从而导致爆炸硬化后其表面硬度提高。

4　结论

本文对 AISI 304 不锈钢板进行了爆炸表面硬化试验和数值模拟，分析了撞击面应力与速度的分布规律，进行了微观组织观察与表面硬度分析，获得如下结论：

1）爆炸硬化试验结果与模拟结果吻合，特征点应力应变和撞击速度分布不均匀，近起爆区域和爆轰末端硬度较小，而爆轰稳定区域硬度相对较大，爆炸硬化过程中存在边界效应。

2）理论计算与数值模拟值误差不超过 5%，说明本文建立的爆炸冲击加载数值模型能够提供类似试验研究的理论参考。

3）爆炸表面硬化方法不仅能够显著提高板材表

面硬度，同时还可以强化板材整体硬度，爆炸表面硬化是变形带及平面型位错阵列共同作用的结果。

参考文献：

[1] WANG Hai-bo, SONG Guo-lin, TANG Guo-yi. Effect of electropulsing on surface mechanical properties and microstructure of AISI304 stainless steel during ultrasonic surface rolling process[J]. Materials science and engineering A, 2016, 662(26): 456-467.

[2] 丁国清, 杨海洋, 杨万国, 等. 两种不锈钢在冷却塔冷凝酸液中的耐蚀性能[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 13-17, 38.
DING Guo-qing, YANG Hai-yang, YANG Wan-guo, et al. Corrosion resistance analysis of two stainless steels exposed in cooling tower condensed acid[J]. Equipment enviromental engineering, 2014, 11(1): 13-17, 38.

[3] 朱培珂, 闫伟, 李令东, 等. 油管钢在模拟超临界 CO_2 中耐蚀特性的研究[J]. 表面技术, 2016, 45(12): 167-173.
ZHU Pei-ke, YAN Wei, LI Ling-dong, et al. Corrosion resistance of tubing steels in simulated supercritical carbon dioxide[J]. Surface technology, 2016, 45(12): 167-173.

[4] 杜建强, 杜敏. 不锈钢在海水中阴极保护研究现状[J]. 表面技术, 2016, 45(5): 26-32.
DU Jian-qiang, DU Min. Research progress in cathodic protection of stainless steel in sea water[J]. Surface technology, 2016, 45(5): 26-32.

[5] TAO N R, SUI M L, LU J. Surface nanocrystallization of iron induced by ultrasonic shot peening[J]. Nanostructured materials, 1999, 11(4): 433-440.

[6] 徐滨士. 纳米表面工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 352.
XU Bin-shi. Nano surface engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 352.

[7] LIU F C, LV B, ZHANG F C, et al. Enhanced work hardening in hadfield steel during explosive treatment [J]. Materials letters, 2011, 65(8): 2333-2336.

[8] ZHANG Fu-cheng, LV Bo, WANG Tian-sheng, et al. Microstructure and properties of purity high Mn steel crossing explosion hardened[J]. ISIJ international, 2008, 48(12): 1766-1770.

[9] HU Xiao-yan, SHEN Zhao-wu, LIU Ying-bin, et al. Influence of explosive density on mechanical properties of high manganese steel explosion hardened[J]. Journal of applied physics, 2013, 114(6): 1-5.

[10] ZHANG F C, LV B, WANG T S, et al. Explosion hardening of hadfield steel crossing[J]. Materials science and technology, 2010, 26(2): 223-230.

[11] 佟铮, 史志铭, 佟姝婕. 爆炸制备金属材料表面纳米层的方法: 中国, CN102392123A[P]. 2012-03-28.
TONG Zheng, SHI Zhi-ming, TONG Shu-jie. Preparation method of the nanolayers induced by explosion for metals: China, CN102392123A[P]. 2012-03-28.

[12] TONG Zheng, SHI Zhi-ming, TONG Shu-jie, et al. Surface nanocrystallization austenization and hardening of medium carbon steel by an explosive impact technique[J]. Surface and coating technology, 2014, 251: 293-299.

[13] TONG Zheng, SHI Zhi-ming, TONG Shu-jie. An explosive impact technique to nanocrystallize and harden surface of metal materials[J]. Nanotechnology conf expo NSTI-nanotech, 2013, 1: 306-309.

[14] VESENJAK M, HOKAMOTO K, ANŽEL I, et al. Influence of the explosive treatment on the mechanical properties and microstructure of copper[J]. Materials and design, 2015, 75(8): 85-94.

[15] MOUSAVI S A A A, SARTAMGI P F. Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel[J]. Materials and design, 2009, 30(3): 459-468.

[16] MOUSAVIA S A A A, BARRETT L M, AL-HASSANI S T S. Explosive welding of metal plates[J]. Journal of materials processing technology, 2008, 20(2): 224-239.

[17] CHIZARI M, AL-HASSANI S T S, BARRETT L M. Effect of flyer shape on the bonding criteria in impact welding of plates[J]. Journal of materials processing technology, 2009, 209(1): 445-454.

[18] 谢飞鸿, 关惠平, 王军, 等. 爆炸焊接有效多方指数 γ 及可焊窗口[J]. 焊接学报, 2004, 25(8): 36-38.
XIE Fei-hong, GUAN Hui-ping, WANG Jun, et al. Study on valid exponent and welded restrict of explosive welding[J]. Transactions of the China welding institution, 2004, 25(8): 36-38.

[19] MEYERS M A, MURR L E. Shock waves and high-strain-rate phenomena effects in metals[M]. New York: Springer, 1981: 265-278.

[20] GLADMAN B. Ls-dyna keyword user'manual[M]. USA: Livermore Software Technology Corporation, 2007: 143.

[21] HERNANDEZ C, MARANON A, ASHCROFT I A, et al. A computational determination of the Cowper-Symonds parameters from a single taylor test[J]. Applied mathematical modelling, 2013, 37: 4698-4708.

[22] 于川, 刘文翰, 李良忠, 等. 钝感炸药圆筒试验与爆轰产物 JWL 状态方程研究[J]. 高压物理学报, 1997, 11(9): 228-233.
YU Chuan, LIU Wen-han, LI Liang-zhong, et al. Studies on cylinder test and JWL equation of state of detonation product for insensitive high explosive[J]. Chinese journal of high pressure physics, 1997, 11(3): 228-233.

[23] LEE W S, LIN Chi-feng. Impact properties and microstructure evolution of 304L stainless steel [J]. Materials science and engineering A, 2001, 308(1): 124-135.

[24] CHEN A Y, RUAN H H, WANG J, et al. The influence of strain rate on the microstructure transition of 304 stainless steel[J]. Acta materialia, 2011, 59(9): 3697-3709.

[25] MURR L E, ESQUIVEL E V. Review observations of common microstructural issues associated with dynamic deformation phenomena: twins, microbands, grain size effects, shear bands, and dynamic recrystallization[J]. Journal of materials science, 2004, 39(2): 1153-1168.

[26] LU J Z, LUO K Y, ZHANG Y K, et al. Grain refinement mechanism of multiple laser shock processing impacts on ANSI 304 stainless steel[J]. Acta materialia, 2010, 58(16): 5354-5362.

[27] ZHANG H W, HEI Z K, LIU G, et al. Formation of nanostructured surface layer on AISI 304 stainless steel by means of surface mechanical attrition treatment[J]. Acta materialia, 2003, 51(7): 1871-1881.