DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0255-06

炸药参数对高锰钢爆炸硬化性能的影响*

胡晓艳[1,2],沈兆武[2],刘迎彬[1],刘天生[1]
(1.中北大学化工与环境学院,山西 太原 030051;
2.中国科学技术大学近代力学系,安徽 合肥 230027)

摘要:为了研究炸药参数对高锰钢爆炸硬化效果的影响,对两种不同密度的炸药进行爆速测试,并利用该炸药分别对高锰钢试样进行爆炸硬化实验,测试了从硬化表面向材料内部的硬度、抗拉强度和冲击韧性随深度的变化。测试结果表明:高锰钢试样在相同深度下,经过密度 1.38 g/cm^3 炸药 3 次爆炸硬化得到的硬度大于密度 1.48 g/cm^3 炸药 2 次爆炸硬化后的硬度,而冲击韧性小于密度 1.48 g/cm^3 炸药作用后的冲击韧性;从爆炸硬化表面向下 15 mm 内,经过密度 1.38 g/cm^3 炸药 3 次爆炸硬化得到的抗拉强度大于密度 1.48 g/cm^3 炸药 2 次爆炸硬化后的抗拉强度,但深度大于 15 mm 时,经过密度 1.38 g/cm^3 炸药 3 次爆炸硬化得到的抗拉强度小于密度 1.48 g/cm^3 炸药 2 次爆炸硬化后的抗拉强度。从硬化后试件的硬度、抗拉强度以及冲击韧性这 3 方面考虑,使用单次爆炸冲量较小的炸药进行多次爆炸硬化效果较好。

关键词:爆炸力学;硬化效果;爆炸硬化;高锰钢;炸药参数;爆炸冲量
中图分类号:O346.4 **国标学科代码**:1301540 **文献标志码**:A

由于高锰钢的表面在使用初期很软,硬化性能没有充分发挥,导致高锰钢在使用过程中会提前退役。为了提高高锰钢的使用寿命,常需在使用前对高锰钢进行硬化处理[1]。爆炸硬化技术作为一种操作简单方便、效率高、具有较好的硬化效果的金属硬化加工技术,被广泛应用于高锰钢的预硬化过程[2]。

N. A. Macleod[3]申请了第一个关于高锰钢爆炸硬化技术的专利。从此以后,人们对高锰钢爆炸硬化技术进行了相关深入研究。为了满足爆炸硬化的需要,相继给出了用于爆炸硬化的板状炸药的配方和性能[4]。陈维波[5]提出了两种用于爆炸硬化的板状炸药,陈勇富[6]将爆炸硬化用炸药改良为橡塑炸药,安二峰等[7]提出一种用于爆炸硬化的高聚物粘结塑性炸药。

在研究爆炸硬化用炸药的同时,人们对高锰钢爆炸硬化机理进行了广泛的研究,通过观察爆炸硬化后高锰钢的微观结构来分析高锰钢的硬化机理。由于实验条件不同,观察到的微观结构也不尽相同,因此得到的相关爆炸硬化机理也不一致。传统的爆炸硬化机理主要包括位错、孪晶和动态应变时效等[8]。在正常应变率和真应变大于 0.15 的作用下,高锰钢的工作硬化机理主要是机械孪晶,机械孪晶的贡献是位错积累贡献的两倍[9]。在高应变率的作用下,高锰钢的硬化机理主要是由孪晶和位错组成[10]。但也有人认为高锰钢爆炸硬化机理是孪晶硬化、晶粒细化[11]和位错及孪晶的相互作用[12]、冷作硬化机理[13],在硬化层表面是纳米级变形孪晶和位错硬化,在硬化层内部是位错硬化,位错和层错硬化等[14-16]。最近,发现高密度的层错和位错阻止位错运动使高锰钢硬化[17-18]。目前,对高锰钢爆炸硬化机理还没有得出一致的结论。

综上所述,对高锰钢爆炸硬化所用炸药、爆炸硬化后的微观组织和性能、硬化机理等方面已有了较多的研究,但对炸药参数与硬化效果的关系研究尚不深入,尤其对爆炸后高锰钢的抗拉强度、冲击韧性上未见报道。本文中,通过制备两种不同密度的炸药,测试其爆炸参数,并利用这两种密度的炸药对高锰钢进行爆炸硬化实验,测试高锰钢爆炸硬化后的硬度、抗拉强度和冲击韧性等性能,分析研究炸药参数对高锰钢爆炸硬化性能的影响。

* **收稿日期**:2013-07-11;**修回日期**:2013-12-04
基金项目:国家自然科学基金项目(11072222)
第一作者:胡晓艳(1985—),女,博士研究生,huxy85@mail.ustc.edu.cn。

1 高锰钢爆炸硬化实验

以黑索金为主要成分,在此基础上添加一些成型剂和黏结剂制备成密度分别为 1.48 和1.38 g/cm^3 的高锰钢爆炸硬化用炸药。采用探针法测试这两种炸药的爆速,实验装置如图 1 所示。

高锰钢试件的组分为碳 1.22%、硅 0.45%、锰 12.5%、磷 0.04%、硫 0.02%,其初始硬度 h_B=180~190。

分别将两种密度的炸药压制成厚度 3 mm 的板状炸药,并将其直接贴敷在高锰钢试件需要硬化的部位上,用 8 号电雷管来引爆导爆索,再用导爆管来引爆炸药,实验装置如图 2 所示。每种密度的炸药对 3 个不同的高锰钢试件进行爆炸硬化实验,并测试爆炸硬化后表面硬度。



图 1 炸药测速装置

Fig. 1 Assembly detonation velocity experiment



图 2 实验装置图

Fig. 2 Assembly experimental system

利用线切割方法,分别对 3 个使用密度 1.48 g/cm^3 炸药爆炸硬化及 3 个使用密度 1.38 g/cm^3 炸药爆炸硬化的高锰钢试件从硬化表面层向试样内部,每隔 3 mm 进行切片取样,利用布氏硬度仪 HB-3000,分别在试样的表面测试 3 个硬度值,将 3 个硬度值取其平均值作为该处的硬度值。

按照材料抗拉强度力学性能测试实验的要求,利用线切割技术,对 6 个爆炸硬化后的高锰钢试样进行线切割,在试件的中部从爆炸硬化表面向下每隔 5 mm 切割出拉伸试样,每个高锰钢试件上取 5 个拉伸试样。在室温(25 ℃)条件下利用万能试验机进行拉伸实验。

根据 GB/T229-2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》的要求,利用线切割技术,对 6 个爆炸硬化后高锰钢试件从上表面向下每隔 5 mm 进行取样,每个试件共取 6 个试样,试样为 U 型缺口,尺寸为 55 mm×10 mm×5 mm。在室温下,利用冲击试验机 JB-5 测试试样的冲击韧性。

2 结果与分析

2.1 结 果

每种密度的炸药测试 3 次爆速,取其平均值作为相应的爆速。测试结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出,密度 1.48 g/cm^3 炸药的爆速为 7.200 km/s,密度 1.38 g/cm^3 炸药的爆速为 6.470 km/s,且都比较稳定。这说明,在配方相同的情况下,炸药的爆速随着密度的增加而增加。

表 1 炸药爆速测试结果

Table 1 Experimental result of detonation velocity

ρ/(g·cm^{-3})	D_1/(km·s^{-1})	D_2/(km·s^{-1})	D_3/(km·s^{-1})	$\overline{D}$/(km·s^{-1})
1.38	6.480	6.435	6.495	6.470
1.48	7.210	7.175	7.215	7.200

3 个使用 1.48 g/cm^3 炸药进行 2 次爆炸硬化以及 3 个使用 1.38 g/cm^3 炸药进行 3 次爆炸硬化的高锰钢试件的平均硬度随深度变化关系,如图 3 所示。

从图 3 可以看出，使用密度分别为 1.48 和 1.38 g/cm³ 炸药爆炸硬化的高锰钢试件的硬化表面的硬度值增加最大，自距硬化表面约 3 mm 处向下硬度值缓慢降低，其硬化深度均在 21 mm 以上。然而，自硬化表面向下，使用密度 1.38 g/cm³ 炸药进行 3 次爆炸硬化的高锰钢试件的硬度大于使用密度 1.48 g/cm³ 炸药进行 2 次爆炸硬化的高锰钢试件的硬度。

使用不同密度炸药爆炸硬化后高锰钢试件的平均抗拉强度变化规律，如图 4 所示。

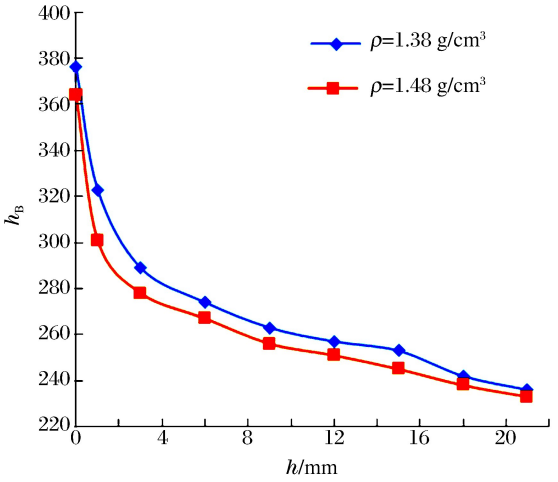

图 3 爆炸硬化后试件的硬度

Fig. 3 Hardness variation of sample explosion hardened

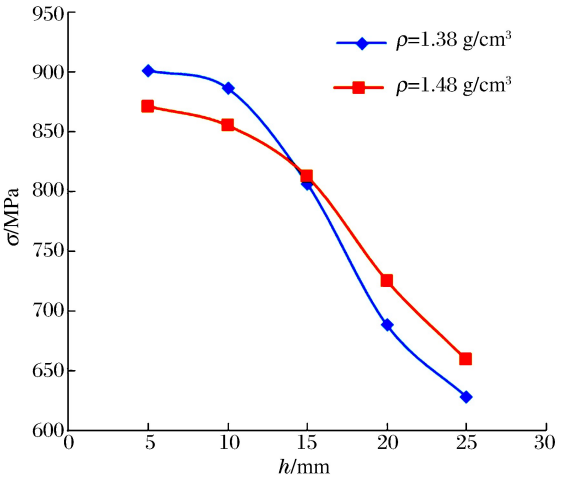

图 4 爆炸硬化后试件的抗拉强度

Fig. 4 Tensile strength of sample explosion hardened

从图 4 可以看出，使用两种不同密度炸药进行爆炸硬化的高锰钢试件的抗拉强度，自硬化表面向下均呈现逐渐降低的趋势。使用密度 1.38 g/cm³ 炸药爆炸硬化 3 次的高锰钢试件硬化表面的抗拉强度较大，然而自硬化表面向下抗拉强度降低较快。

使用不同密度炸药爆炸硬化后高锰钢平均冲击韧性变化规律，如图 5 所示。

从图 5 可以看出，自硬化表面向下使用两种不同密度进行爆炸硬化的高锰钢试件硬化表面的冲击韧性均为最小，自距硬化表面 5mm 处向下其冲击韧性基本相同。同一深度下，使用密度 1.38 g/cm³ 进行三次爆炸硬化的高锰钢试件的冲击韧性较大，且硬化表面与其他深度之间冲击韧性值相差较小。

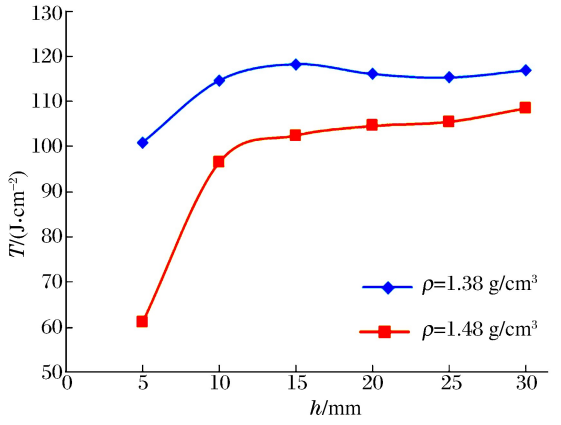

图 5 爆炸硬化后试件的冲击韧性

Fig. 5 Impact toughness of sample explosion hardened

2.2 结果分析

由于高锰钢的爆炸硬化效果不仅受冲击波压力的影响，而且还受冲击波压力持续时间的影响，可以从炸药爆炸作用于高锰钢材料的冲量来分析炸药参数对爆炸硬化的影响。高锰钢爆炸硬化所用的炸药为板状，且高锰钢试件较厚，3 mm 厚板状炸药直接放于试件表面进行起爆，因此，可将其看成是接触爆炸爆轰波对正面固壁的作用。由 CJ 爆轰理论[19]可知：

$$p=\frac{\rho_0 D^2}{k+1} \tag{1}$$

式中：p 为爆轰压力，ρ_0 为炸药密度，D 为爆速，$k=3$，为绝热指数。

由爆炸动力学理论[20]可知：当炸药爆炸产生的爆轰波到达高锰钢表面，在其表面产生的压力为：

$$p_1=\frac{64}{27}\frac{\rho_0 D^2}{k+1}=\frac{16}{27}\rho_0 D^2 \tag{2}$$

假设装药的横截面积为 A,则作用于高锰钢表面上的比冲量为:

$$i=\int_{d/D}^{\infty}p_1\,\mathrm{d}t=\frac{8}{27}\rho_0 Dd \tag{3}$$

总冲量为:

$$I=\frac{8}{27}\rho_0 DdA \tag{4}$$

式中:I 为单次爆炸硬化总冲量,p_1 为试件表面压力,t 为爆轰波作用时间,d 为炸药厚度。

由上述各式,可计算出单次爆炸硬化下密度 1.38 和 1.48 g/cm^3 炸药的爆轰压力分别为 14.44 和 19.18 GPa,在试件表面产生的压力分别为 34.23 和 45.46 GPa,单次爆炸硬化下对单位面积冲量分别为 7 936.5 和 9 472 N·s。

炸药爆炸产生的极强的冲击波作用到高锰钢试件表面并进入其内部,使内部材料也受到冲击波的作用。强烈的冲击波使高锰钢发生较大的塑性变形,在材料表面处产生大量的层错和位错,高密度的层错和位错阻碍位错的运动,使高锰钢硬度增加[17]。炸药单次爆炸后,密度 1.38 g/cm^3 炸药在试件表面产生的压力低于密度 1.48 g/cm^3 炸药在试件表面产生的压力,且单次爆炸硬化下对单位面积的冲量也低于密度 1.48 g/cm^3 炸药单次爆炸硬化下对单位面积的冲量。因此,每次爆炸之后,密度 1.38 g/cm^3 炸药使高锰钢产生的层错和位错的密度低于密度 1.48 g/cm^3 炸药使高锰钢产生的层错密度和位错密度,导致密度 1.38 g/cm^3 炸药使高锰钢表面硬度的增加量低于密度 1.48 g/cm^3 炸药使高锰钢表面硬度的增加量。随着爆炸次数的增加,层错密度和位错密度的增加量减少,使硬度的增加量减少。密度 1.38 g/cm^3 炸药爆炸 3 次的总冲量高于密度 1.48 g/cm^3 炸药 2 次爆炸硬化的总冲量,使密度 1.38 g/cm^3 炸药对高锰钢进行 3 次爆炸硬化之后的表面硬度略高于密度 1.48 g/cm^3 炸药对高锰钢进行 2 次爆炸硬化之后的表面硬度。

随着深度的增加,冲击波在高锰钢试件中不断衰减,衰减到不能使层错密度和位错密度增加为止。密度 1.38 g/cm^3 炸药爆炸产生的冲击波在高锰钢试件中的衰减速度低于密度 1.48 g/cm^3 炸药爆炸产生的冲击波在高锰钢试件中的衰减速度,从而使材料在同一深度处,密度 1.38 g/cm^3 炸药爆炸硬化 3 次的硬度高于密度 1.48 g/cm^3 炸药爆炸硬化两次的高锰钢试件的硬度。

在强烈冲击波的作用下,高锰钢试样吸收炸药爆炸作用产生的能量,发生严重的塑性变形,在材料内产生大量的层错和位错,高密度的层错和位错阻碍位错的运动,在使高锰钢硬度增加的同时也使其抗拉强度增加。随着深度的增加,层错密度和位错密度下降,从而使硬度和抗拉强度随深度的增加而降低。在距离爆炸硬化表面 15 mm 以内的材料,经过密度 1.38 g/cm^3 炸药爆炸硬化 3 次的高锰钢试件承受的冲量高于密度 1.48 g/cm^3 炸药爆炸硬化两次的高锰钢试件承受的冲量,相应的抗拉强度也较大。在距爆炸硬化表面 15 mm 以下部分,因为密度 1.38 g/cm^3 炸药在试件表面产生的压力低于密度 1.48 g/cm^3 炸药在试件表面产生的压力,其在高锰钢试件内部的传播距离较短,使其总冲量低于密度 1.48 g/cm^3 炸药作用的总冲量,从而使密度 1.38 g/cm^3 炸药爆炸硬化之后得到试件的抗拉强度低于密度 1.48 g/cm^3 炸药爆炸硬化之后得到试件的抗拉强度。

在经受较大压力的冲击作用下,高锰钢试件表面发生了较大的塑性变形,在材料内部产生大量的层错和位错,在界面塞积处可能产生应变集中,导致其冲击韧性降低[17]。由于表面材料受的冲击最大,在界面塞积处产生应变集中最大,最终导致经过爆炸硬化后的高锰钢试件表面的冲击韧性小于材料内部的冲击韧性。由于单次爆炸作用后,密度 1.48 g/cm^3 炸药在试件表面产生的冲量高于密度 1.38 g/cm^3 炸药在试件表面产生的冲量,从而使在界面塞积处产生应变集中较大,并且随后爆炸作用使层错和位错密度增加困难,从而使应变集中增加也较少,最终使密度 1.38 g/cm^3 炸药 3 次爆炸产生的应变集中低于密度 1.34 g/cm^3 炸药爆炸 2 次产生的应变集中。因此,密度 1.38 g/cm^3 炸药爆炸 3 次作用下的高锰钢试件的冲击韧性大于密度 1.34 g/cm^3 炸药爆炸 2 次作用下的高锰钢试件的冲击韧性。冲击韧性是反映材料在冲击载荷作用下吸收塑性变形功和断裂功的能力。冲击韧性越大,其抗击冲击的能力越强。

3 结　论

使用不同密度炸药进行不同爆炸硬化次数下高锰钢试件的硬度、抗拉强度以及冲击韧性的实验测量，得出以下结论：

(1)在相同深度的情况下，密度 1.38 g/cm^3 炸药进行 3 次爆炸硬化后高锰钢试件的硬度高于密度 1.48 g/cm^3 炸药进行 2 次爆炸硬化后高锰钢试件的硬度。

(2)从爆炸硬化表面向下 15 mm 内，密度 1.38 g/cm^3 炸药进行 3 次爆炸硬化后高锰钢试件的抗拉强度高于密度 1.48 g/cm^3 炸药进行 2 次爆炸硬化后高锰钢试件的抗拉强度，但深度在 15 mm 以上时，密度 1.38 g/cm^3 炸药进行 3 次爆炸硬化后高锰钢试件的抗拉强度低于密度 1.48 g/cm^3 炸药进行 2 次爆炸硬化后高锰钢试件的抗拉强度。

(3)在相同深度的情况下，密度 1.38 g/cm^3 炸药进行 3 次爆炸硬化后高锰钢试件的冲击韧性高于密度 1.48 g/cm^3 炸药进行 2 次爆炸硬化后高锰钢试件的冲击韧性。

(4)从硬化后试件的硬度、抗拉强度以及冲击韧性这 3 方面考虑，使用单次爆炸冲量较小的炸药进行多次爆炸硬化效果较好。

参考文献：

[1] 张观军，杨涤心，魏世忠，等. 高锰钢爆炸硬化[J]. 热加工工艺，2006(12)：62-65.
Zhang Guan-jun, Yang Di-xin, Wei Shi-zhong, et al. Explosion hardening of high manganese steel[J]. Hot Working Technology, 2006(12):62-65.

[2] 陈勇富，洪有秋. 高锰钢爆炸硬化[J]. 矿冶工程，1986(4)：8-12.
Chen Yong-fu, Hong You-qiu. Explosion hardening of high manganese steel[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1986(4):8-12.

[3] Macleod N A. Method of hardening manganese steel: US, 2703297[P]. 1955-03-01.

[4] 赵士达，陈维波. 高锰钢整铸辙叉爆炸予硬化的研究[J]. 爆炸与冲击，1982，2(1)：11-23.
Zhao Shi-da, Chen Wei-bo. On explosive hardening of hadfield steel rail frogs[J]. Explosion and Shock Waves, 1982,2(1): 11-23.

[5] 陈维波. 塑料板状炸药[J]. 爆炸与冲击，1984，4(3)：65-70.
Chen Wei-bo. Plastic sheet explosive[J]. Explosion and Shock Waves, 1984,4(3):65-70.

[6] 陈勇富. SEP-3 橡塑板片炸药[J]. 矿冶工程，1994(2)：8-12；70.
Chen Yong-fu. SEP-3 rubbery-plastic sheet explosive[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1994(2):8-12; 70.

[7] 安二峰，陈鹏万，杨军. 一种爆炸硬化用高聚物粘结塑性炸药及应用研究[J]. 含能材料，2008(6)：734-737.
An Er-feng, Chen Peng-wan, Yang Jun. Application study on a polymer bonded plastic explosive after explosion hardening[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008(6):734-737.

[8] Dastur Y N, Leslie W C. Mechanism of work hardening in Hadfield Manganese steel[J]. Metallurgical Transactions, 1981,12(5):749-759.

[9] Hutchinson B, Ridley N. On dislocation accumulation and work hardening in Hadfield steel[J]. Scripta Materialia, 2006,55(4):299-302.

[10] Murr L E, Meyers M A, Niou C, et al. Shock-induced deformation twinning in tantalum[J]. Acta Materialia, 1997,45(1):157-175.

[11] 薛继仁，于启湛，史春元. 高锰钢爆炸加工硬化及其硬化机理[J]. 大连铁道学院学报，1997(4)：67-71.
Xue Ji-ren, Yu Qi-zhan, Shi Chun-yuan. Explosive hardening and it's mechanism on manganese steel[J]. Journal of Dalian Railway Institute, 1997(4):67-71.

[12] 陈富生. 高锰钢爆炸硬化机理实验研究[J]. 武汉钢铁学院学报，1991(4)：390-392.
Chen Fu-sheng. An experimental study on explosion hardening of high Mn steels[J]. Journal of Wuhan Steel Science Institute, 1991(4):390-392.

[13] 陈勇富,梁季夫,陶颂霖.高锰钢爆炸硬化机理研究[J].江西有色金属,1993(2):55-56;54.
Chen Yong-fu, Liang Ji-fu, Tao Song-lin. Research of explosion hardening mechanism of high Mn steels[J]. Jiangxi Nonferrous Metals, 1993(2):55-56;54.

[14] Zhang Fu-cheng, Lü 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.

[15] Zhang F C, Lü B, Wang T S, et al. Explosion hardening of Hadfield steel crossing[J]. Materials Science and Technology, 2010,26(2):223-229.

[16] Zhang M, Lü B, Zhang F, et al. Explosion deformation and hardening behaviours of hadfield steel crossing[J]. ISIJ International, 2012,52(11):2093-2095.

[17] 李兴霞,赵干,张观军.高锰钢爆炸硬化机理分析[J].热加工工艺,2013(6):94-96.
Li Xing-xia, Zhao Gan, Zhang Guan-jun. Analysis on explosion hardening mechanism of high manganese steel[J]. Hot Working Technology, 2013(6):94-96.

[18] 赵干,李兴霞,张观军.爆炸硬化对高锰钢滑动磨料磨损性能的影响[J].热加工工艺,2013(8):101-103.
Zhao Gan, Li Xing-xia, Zhang Guan-jun. Effects of explosion hardening on sliding wear behavior of high manganese steel[J]. Hot Working Technology, 2013(8):101-103.

[19] 金韶华,松全才.炸药理论[M].西安:西北工业大学出版社,2010.

[20] 孟宪昌.爆炸动力学[M].太原:太原机械学院出版社,1984.

Influence of explosive parameter on the performance of explosion hardening of Hadifield steel

Hu Xiao-yan[1,2], Shen Zhao-wu[2], Liu Ying-bin[1], Liu Tian-sheng[1]

(1. *School of Chemical Engineering and Environment, North University of China, Taiyuan* 030051, *Shanxi, China*;
2. *Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *Anhui, China*)

Abstract: In order to study the influence of explosive parameter on the effect of explosion hardening of the Hadifield steel, detonation velocities of two different densities of explosive were tested respectively. The variation of internal hardness, tensile strength and impact toughness from the hardened surface to inside the material with depth was tested respectively. The hardness and impact toughness of the sample for triple explosion with the density of 1.38 g/cm^3 are larger than those for twice explosion with the density of 1.48 g/cm^3 at the same hardening depth. The tensile strength for triple explosion with the density of 1.38 g/cm^3 is higher from the surface to 15 mm below the hardened surface but is lower from 15 mm down. For the hardness, tensile strength and impact hardened toughness consideration, the effect of explosion hardening for the smaller single impulse is better.

Key words: mechanics of explosion; hardening effect; explosion hardening; Hadifield steel; explosive parameter; explosion impulse

(责任编辑 丁 峰)