

文章编号:1674-2974(2016)12-0011-06

## 高锰钢形变过程中加工硬化机理的研究\*

张福全<sup>1†</sup>, 何 翠<sup>1</sup>, 周惦武<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082)

**摘 要:**采用 Gleeble-3500 试验机对 ZGMn13Cr2 高锰钢进行  $0.1\text{ s}^{-1}$  应变速率下的室温压缩实验, 应变率分别为 5%, 30% 和 50%。利用金相显微镜、维氏显微硬度机、XRD 和 TEM 等方法, 研究了压缩变形量对 ZGMn13Cr2 显微组织演变及加工硬化机制的影响。结果表明:高锰钢压缩变形后晶粒内出现大量变形带, 变形带相互交叉、缠结、割截。压缩变形量为 5% 时, 高密度位错相互缠结呈位错胞或者位错墙, 压缩变形量为 30% 时, 基体内出现形变孪晶, 随着变形量的进一步增大, 孪晶的密度和体积分数增大, 水韧态高锰钢在压缩变形量为 50% 的条件下, 其显微硬度与初始态相比提高了 125%, 达到 HV560.8。XRD 结果显示, 压缩变形后基体组织为奥氏体和少量的碳化物, 未发现相变诱发马氏体组织。随着变形量的增大, 高锰钢加工硬化机理由位错强化机制向形变孪晶强化为主、位错少量层错强化机制为辅的机制转变。

**关键词:**高锰钢; 加工硬化机理; 压缩变形量; 组织; 性能

**中图分类号:** TG145

**文献标识码:** A

## Study on Work Hardening Mechanism of Hadfield Steel during Deformation Process

ZHANG Fu-quan<sup>1†</sup>, HE Cui<sup>1</sup>, ZHOU Dian-wu<sup>2</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract:** Compression test of ZGMn13Cr2 Hadfield steel was carried out by Gleeble-3500 thermal simulator at the deformation temperature of 298 K under a constant loading strain rate of  $0.1\text{ s}^{-1}$  and with the compressive deformation of 5%, 30%, and 50%, respectively. The effects of compressive deformations on the microstructure evolution and work hardening mechanism of ZGMn13Cr2 Hadfield steel were analyzed by optical microscope, vickers micro-hardness machine, transmission electron microscopy and X-ray diffraction. The test results show that a large number of deformation bands appeared in the grains of compressed high manganese steels. The deformation bands intersected, tangled and isolated with each other. A great deal of high density dislocation was entangled into dislocation cells or dislocation walls with the compression amount of 5%. Deformation twins appeared in the matrix when the compression amount was

\* 收稿日期: 2016-03-11

基金项目: 湖南省战略性新兴产业科技攻关项目(湘财企指(2014)66号)

作者简介: 张福全(1962-), 男, 湖北大冶人, 湖南大学教授, 博士

† 通讯联系人, E-mail: zhangfq@hnu.edu.cn

30%。With the increasing of compressive deformation, the amount and volume fraction of the twins increased gradually. When the compression amount was 50%, the micro-hardness of water-quenched high manganese steel increased by 125% compared with the initial state, showing HV560.8. Meanwhile, XRD results show that the matrix structure remained austenite and with a bit of carbide, but no deformation-induced martensites were founded in these deformed samples. With the increasing of compressive deformation, work hardening mechanisms of Hadfield steel changed from dislocation strengthening into mainly relying on deformation twin supplemented by dislocation and stacking fault mechanisms.

**Key words:** Hadfield steel; work-hardening mechanism; compression amounts; microstructure; properties

高锰钢因具有高强度、高韧性、高耐磨性、良好的加工硬化能力而广泛地应用于矿山机械、铁路、冶金、电力等承受冲击载荷的设备中。近年来为提高高锰钢铸件在实际应用中的加工硬化能力和耐磨性,研究者在合金化、表面预硬化等方向做出了大量的努力。如许云华等<sup>[1]</sup>、冯晓勇<sup>[2]</sup>利用高速重击的方式获取表面纳米化晶层,提出了纳米晶强化机制。胡晓艳<sup>[3]</sup>利用爆炸硬化技术获得了表层含高密度位错和孪晶等微观缺陷的加工硬化层。但是,关于高锰钢的加工硬化机制,多年来并没有统一的说法,除了形变诱发马氏体相变硬化说<sup>[4]</sup>被大多数学者否定之外,还有孪晶硬化说<sup>[5-8]</sup>、位错硬化说<sup>[9]</sup>、Fe-Mn-C 原子团硬化说<sup>[10]</sup>、综合硬化说<sup>[11]</sup>、纳米晶与非晶相镶嵌硬化说<sup>[12]</sup>等。目前针对高锰钢的研究主要在低应变速率( $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以下)<sup>[13]</sup>、小能量多次冲击<sup>[14]</sup>的工况下进行,这与高锰钢承受较高能量和高应变速率的实际工况不符。本文则采用 Gleeble-3500 热模拟机对高锰钢在较高应变速率、较大变形量条件下进行压缩实验,探究其加工硬化规律及机制,为实际应用中充分发挥高锰钢的耐磨性和加工硬化能力提供理论依据。

## 1 实验材料及方法

实验材料为 ZGMn13Cr2,其主要化学成分见表 1。采用中频炉熔炼,树脂石英砂造型,浇注标准 Y 形试块。为获得碳化物分布均匀、综合性能优良的奥氏体组织,试块在真空管式炉内(GSL1600)加热至 650 °C 保温 1.5 h,再以相同的升温速率升至 1 080 °C 保温 1.5 h 后进行水韧处理,经线切割加工成  $\Phi 6 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$  的热模拟标准试样。

热模拟压缩实验在 Gleeble-3500 型试验机上进

行,压缩过程中抽真空。试验采用中轴压缩的方式,为减少摩擦力,试样与压头之间添加润滑油,为防止润滑油污染压头,压头和试样之间垫钼片,变形过程全部由微机处理系统控制并自动采集有关数据,最后以表格形式输出载荷-行程和真应力-真应变等数据。热模拟压缩实验方案如下:变形温度为 298 K,应变速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$ ,变形量分别为 5%, 30% 和 50%。

表 1 ZGMn13Cr2 高锰钢的主要化学成分  
Tab. 1 Chemical compositions of ZGMn13Cr2 Hadfield steel

元素	C	Si	Mn	P	S
质量分数/%	1.11	0.536	13.34	0.068 4	0.004
元素	Cr	Mo	Ni	V	Fe
质量分数/%	1.61	0.005 7	0.037 6	0.016 5	余量

利用 OM, XRD(RigakuD/max2550V)及 TEM (F20)对经不同应变变量变形后的试样进行微观组织结构表征,利用 HV-1000 显微维氏硬度计测量高锰钢经压缩后的硬度。金相样品的制备过程:试样机械磨平抛光后,用 4% 硝酸和盐酸酒精反复擦拭腐蚀 80~90 s; TEM 样品的制备过程:机械抛光研磨至 70~80  $\mu\text{m}$  后,冲成  $\Phi 3 \text{ mm}$  薄片,再减薄至 40  $\mu\text{m}$ ,液氮冷却至  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$  以下,采用 3%  $\text{HClO}_4 + 97\% \text{ CH}_3\text{COOH}$  溶液进行电解双喷,双喷电压为 75 V,电流为 45 mA。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 真应力-真应变曲线与加工硬化率曲线

高的加工硬化能力是高锰钢在实际应用过程中耐冲击耐磨损的重要原因,通过真应力-真应变曲线

所获得的加工硬化率( $\theta = d\sigma / d\epsilon$ )曲线,可以很好地反映高锰钢压缩变形过程中内部位错、层错、孪晶等相关的微观缺陷的变化特征<sup>[15]</sup>.图 1a 为室温下高锰钢在 Gleeble-3500 机上以  $0.1 \text{ s}^{-1}$  恒应变速率压缩 50% 后获取的真应力-真应变曲线,图 1b 为对真应力-应变曲线求一阶导数获得的加工硬化率-真应变曲线,图 1c 为根据 Hutchinson 和 Ridley<sup>[9]</sup> 在压缩过程中建立的纯位错密度模型拟合出来的加工硬化率曲线,相关函数如下:

$$\sigma = \alpha G b \rho_{\text{dis}}^{1/2}, \quad (1)$$

$$\rho_{\text{dis}} = 1.7 \times 10^{16} \epsilon, \quad (2)$$

$$\theta = \frac{d\sigma}{d\epsilon} = 1.3 \times 10^8 \alpha G b \epsilon^{-1/2}. \quad (3)$$

将式(2)代入式(1)后求导可得出式(3).其中  $\alpha$  为常数; $G$  是剪切模量; $b$  是柏氏矢量.相关文献资料显示<sup>[9]</sup>, $\alpha = 0.25$ , $G = 70 \text{ GPa}$ , $b = 2.64 \times 10^{-1} \text{ nm}$ .

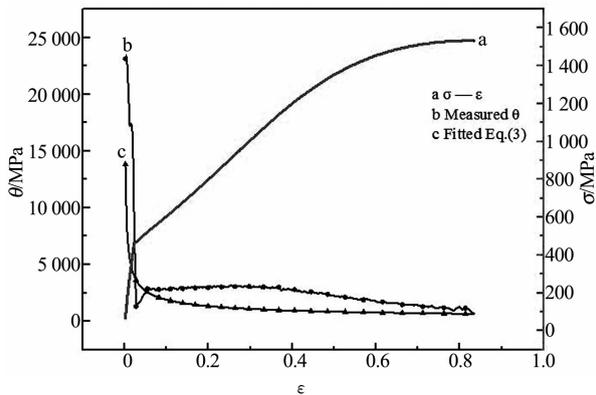


图 1 真应力-真应变曲线、加工硬化率-真应变曲线及位错硬化机制拟合曲线

Fig. 1 True stress-true strain curve of Hadfield steel at strain rate  $0.1 \text{ s}^{-1}$ , measured work hardening rate curve, fitted work hardening rate curve by equation(3)

从图 1a 可看出应力随着应变量的增大而增大,曲线可分为 3 个阶段: $0 < \epsilon \leq 5\%$  时为弹性变形阶段,流变应力几乎呈线性迅速增加; $5\% < \epsilon \leq 30\%$  为直线硬化阶段,流变应力增加的趋势有所放缓; $30\% < \epsilon \leq 50\%$  为抛物线硬化阶段,流变应力增加的趋势进一步减缓.从图 1b 可看出加工硬化率曲线随着应变的增加先快速递减,在约为 5% 处递增,随着变形的继续,加工硬化率曲线出现了一个平台.

对比曲线 b 与曲线 c 可以看出在应变变量大于 5% 时,实验测得的加工硬化率曲线较纯位错模型拟合出来的加工硬化率曲线有一个明显的增值,这表明在压缩过程中基体硬化机理发生了变化,高锰钢

内部强化机制并非为单一的位错强化机制.经后续的 TEM 和 XRD 可以证明由位错强化机制变成位错+层错+孪晶强化机制.

## 2.2 XRD 物相分析

图 2 所示是应变速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$ ,压缩变形量分别为 5%, 30% 和 50% 的 XRD 衍射图谱,图中显示压缩变形后物相仍为奥氏体和少量碳化物,并未检测到  $\epsilon$ -马氏体.随着压缩量的增加, $(111)_\gamma$  衍射峰强度异常增加,而  $(311)_\gamma$  和  $(200)_\gamma$  衍射峰强度减小,说明高锰钢晶粒内部发生偏转,产生大量的  $(111)_\gamma$  织构;各衍射峰的宽度增加,这是因为高锰钢层错能较低,约为  $23 \text{ mJ/m}^2$ <sup>[16]</sup>,压缩变形后层错增加,生成变形孪晶,使晶粒碎化,孪晶的生成以及内应力的增大共同造成了衍射峰加宽这一现象.

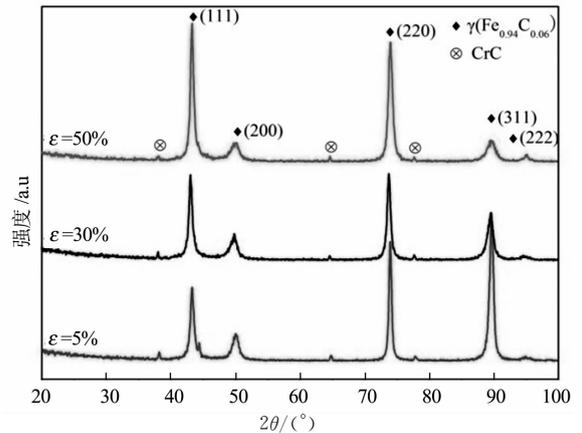


图 2 应变速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$  时不同压缩变形量下高锰钢 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of Hadfield steel compressed at the strain rate of  $0.1 \text{ s}^{-1}$  with different compression amounts

## 2.3 压缩量对微观组织的影响

### 2.3.1 金相组织

图 3 是应变速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$ ,压缩变形量分别为 5%, 30% 和 50% 时高锰钢的显微组织图片.在外部轴向压缩应力的作用下,基体内部出现大量相互交叉、阻滞和割截的变形带.变形量为 5% 时变形带大多呈平直状,间距较宽(如图 3(a) 所示).变形量为 30% 时,变形带密度增大,自身宽度变宽,出现折截状台阶(如图 3(b) 所示).变形量为 50% 时,变形带的间距缩短,痕迹加深,密度进一步增大,台阶状变形带明显增加(如图 3(c) 所示),相互交叉、阻滞和割截的变形带,将基体分割成细小的区域,使得高锰钢的硬度增大,高锰钢加工硬化能力加强.由于光学显微镜下无法清晰地辨别变形带为滑移线还是孪

晶,为了更进一步地了解加工硬化的深层次原因和

机制,必须对其微观晶体缺陷进行表征.

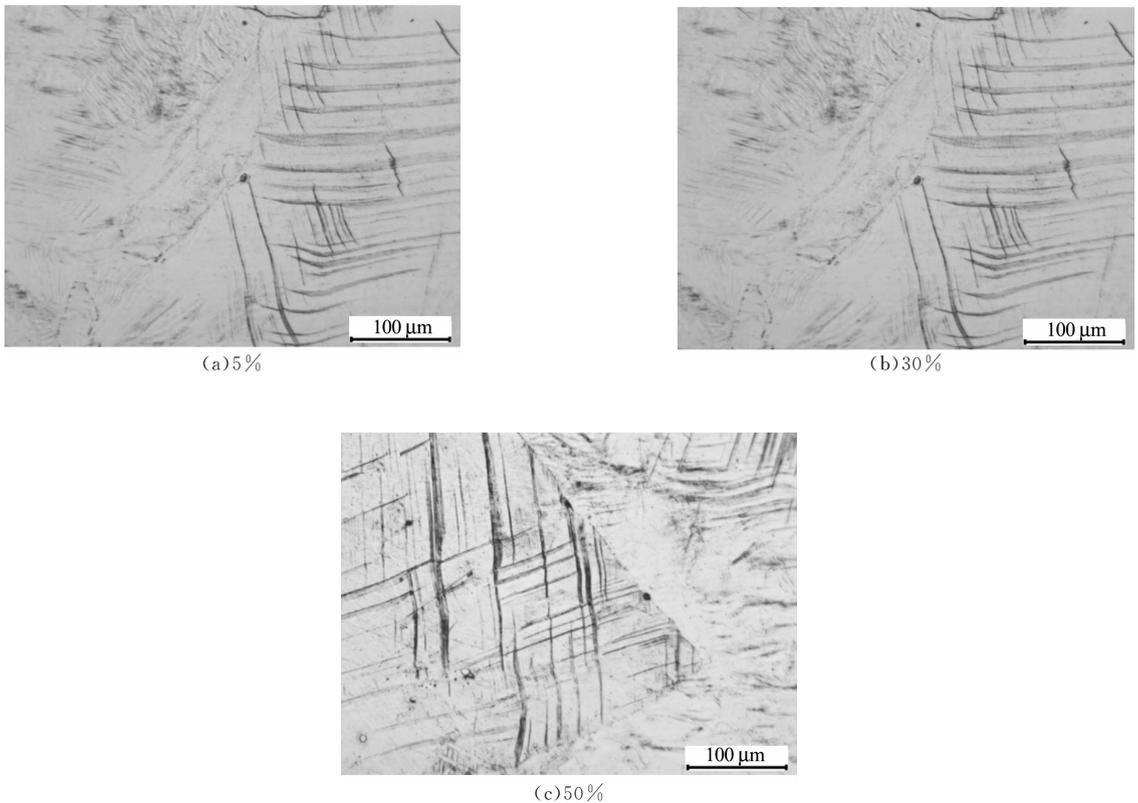


图3 不同压缩形变量下高锰钢的显微组织

Fig. 3 The microstructure pictures of Hadfield steel at different compression amounts

### 2.3.2 透射电镜组织

图4所示为室温下应变速率为 $0.1\text{ s}^{-1}$ ,压缩变形量分别为5%,30%和50%时高锰钢的透射形貌及特征电子衍射花样.图4(a)为压缩变形量为5%时高锰钢的透射电镜形貌,从图中可看出高密度位错相互缠结呈位错胞或者位错墙;图4(b)(c)(d)是压缩变形量为30%时透射电镜形貌的明暗场及其衍射斑点,从图中可看出基体内出现了形变孪晶和少量层错;图4(e)(f)(g)是压缩变形量为50%时透射电镜形貌的明暗场及其衍射斑点,从图中可看出孪晶衍射斑点强度增大,其密度和体积分数增大.

由不同压缩变形量的透射照片可还原静态压缩过程中高锰钢内部微观晶体缺陷的变化情况:高锰钢属于FCC结构,晶体中的滑移系较多,在变形初期晶粒内部的滑移系大量启动,位错则通过滑移、累积、重排、湮灭等方式在基体中形成大量平直的位错墙和位错胞<sup>[2]</sup>,随着变形的增大,位错不断增殖,位错单个或多个连续分布或塞积于晶界处,大量塞积的位错群引起应力集中,当局部的切应力达到孪晶

生成的临界切应力时,高锰钢开始以孪生的形式进行塑性变形.随着变形量的继续增大,孪晶体积分数不断增大,位错密度也有所增大,局部区域孪晶中间出现少量的层错,孪晶及层错形成了位错难以逾越的壁垒,这将导致位错运动的阻力增大.综上所述,随着变形量的增大,高锰钢在压缩变形过程中加工硬化机制发生了改变,由位错强化机制逐渐向位错+少量层错+形变孪晶机制转变.

### 2.4 压缩变形量对加工硬化能力的影响

硬度是衡量材料软硬程度的一种指标,可通过显微硬度来衡量高锰钢承受静态压缩载荷后样品加工硬化的程度.图5所示是应变速率为 $0.1\text{ s}^{-1}$ ,压缩变形量分别为5%,30%和50%时的显微硬度变化曲线,硬度值均由5个点求平均值得到.

从图中可知经压缩变形后高锰钢显微硬度随变形量的增加近似呈线性增长,水韧态高锰钢在压缩变形量为50%的条件下,其显微硬度与初始态的相比提高了125%,达到HV560.8,由此可知高锰钢在变形量为50%的条件下加工硬化能力得到充分

发挥. 硬化能力受变形量的影响较大,这与高锰钢在不同压缩变形量时的微观硬化机理不同有关:在变形初期,对应的强化机制为位错强化,所以高锰钢硬度增值较小,加工硬化并没有得到充分发挥.随着压缩变形的继续进行,晶体内应力不断增大,孪晶和层

错不断形成,其强化机制为位错+少量层错+孪晶,孪晶和层错对位错的阻滞作用更强,导致一定孪晶内部会形成多系孪晶,孪晶系增多与孪晶重复交割强度加大使得碎化晶粒的尺寸进一步减少,起到细化晶粒的作用,所以材料的硬度不断增加.

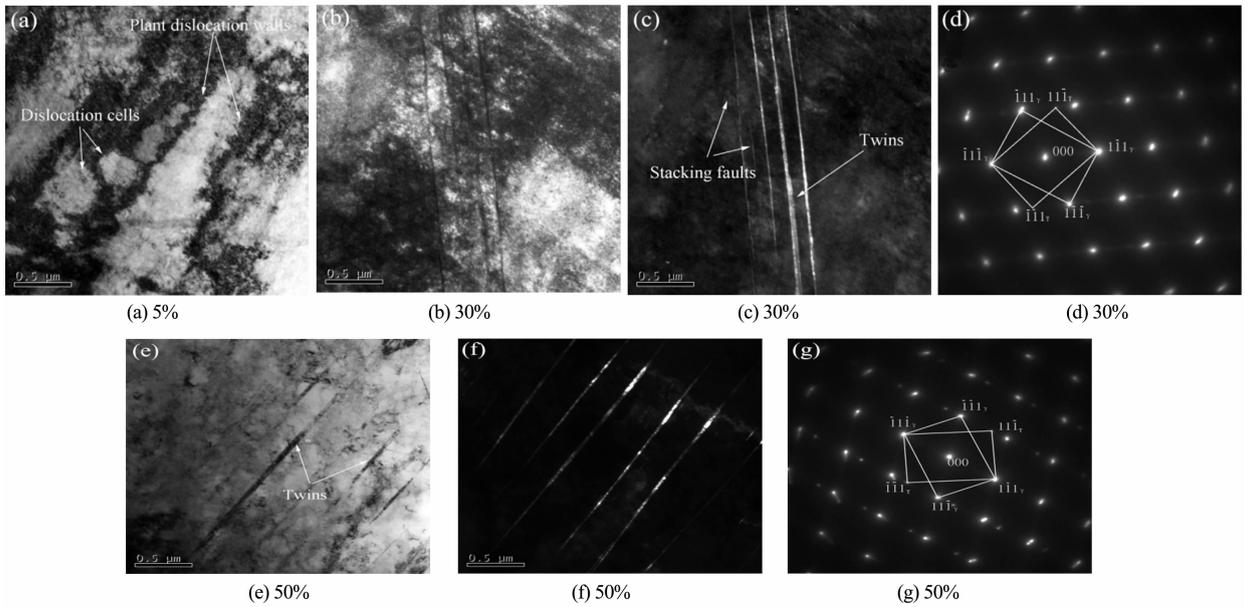


图 4 室温下应变速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$  时不同压缩变形量下高锰钢的透射形貌及其电子衍射花样  
Fig. 4 Transmission electron microscopy of Hadfield steel and corresponding electron diffraction patterns at the strain rate of  $0.1 \text{ s}^{-1}$  with different compression amounts

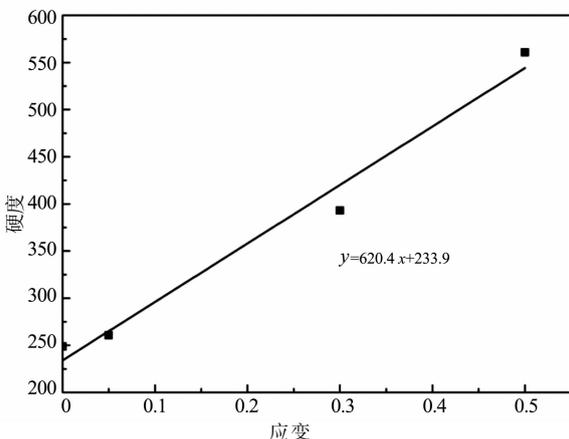


图 5 应变速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$  时不同压缩变形量下高锰钢的显微硬度变化曲线  
Fig. 5 Micro-hardness curve of Hadfield steel at the strain rate of  $0.1 \text{ s}^{-1}$  with different compression amounts

### 3 结 论

1) ZGMn13Cr2 高锰钢在恒应变速率等温压缩时,流变应力随应变的增大而增加,  $0 < \epsilon \leq 0.05$  时

为弹性变形阶段,流变应力几乎呈线性迅速增加;  $0.05 < \epsilon \leq 0.30$  时为直线硬化阶段,流变应力增加的趋势有所放缓;  $0.30 < \epsilon \leq 0.50$  时为抛物线硬化阶段.

2) 应变速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$  时,压缩量在  $0\% \sim 50\%$  的形变范围内基体为奥氏体和少量碳化物,未发现相变诱发马氏体组织.水韧态高锰钢在压缩变形量为  $50\%$  的条件下,其显微硬度与初始态的相比提高了  $125\%$ ,达到 HV560.8.

3) 压缩变形量为  $5\%$  时,基体内部位错密度较高,形成了大量平直的位错墙和位错胞,对应的强化机制为位错强化;压缩变形量为  $30\%$  时,基体内出现形变孪晶;压缩变形量为  $50\%$  时,孪晶的密度和体积分数进一步增大,强化机制以形变孪晶强化为主,位错+少量层错为辅.

### 参考文献

[1] 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.

- XU Yun-hua, CHEN Yu-mei, XIONG Jian-long, *et al.* Mechanism of strain-induced nanocrystallization of Hadfield steel under high energy impact load[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2001, 37(2):165—170. (In Chinese)
- [2] 冯晓勇. 高速重击条件下高锰钢表面纳米晶的制备及组织性能研究[D]. 秦皇岛:燕山大学材料科学与工程学院, 2015:12—19.
- FENG Xiao-yong. Investigation on the nanocrystallization microstructure and properties of Hadfield steel induced by high speed pounding[D]. Qinhuangdao: College of Materials Science and Engineering, Yanshan University, 2015:12—19. (In Chinese)
- [3] 胡晓艳. 高锰钢爆炸硬化专用炸药与硬化机理的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学工程科学学院, 2014:76—79.
- HU Xiao-yan. Explosive and mechanism of explosion hardening of high manganese steel[D]. Hefei: School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, 2014:76—79. (In Chinese)
- [4] 张维娜, 刘振宇, 王国栋. 高锰 TRIP 钢的形变诱导马氏体相变及加工硬化行为[J]. *金属学报*, 2010, 46(10):1230—1236.
- ZHANG Wei-na, LIU Zhen-yu, WANG Guo-dong. Martensitic transformation induced by deformation and work-hardening behavior of high manganese trip steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2010, 46(10):1230—1236. (In Chinese)
- [5] IDRISSE H, RENARD K, RYELANDT L, *et al.* On the mechanism of twin formation in Fe-Mn-C TWIP steels[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(7):2464—2476.
- [6] EFSTATHIOU C, SEHITOGLU H. Strain hardening and heterogeneous deformation during twinning in Hadfield steel[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(5):1479—1488.
- [7] WANG T S, HOU R J, LV B, *et al.* Microstructure evolution and deformation mechanism change in 0.98C-8.3Mn-0.04N steel during compressive deformation[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2007, 465(1):68—71.
- [8] IDRISSE H, RENARD K, SCHRYVERS D, *et al.* On the relationship between the twin internal structure and the work-hardening rate of TWIP steels[J]. *Scripta Materialia*, 2010, 63(10):961—964.
- [9] HUTCHINSON B, RIDLEY N. On dislocation accumulation and work hardening in Hadfield steel[J]. *Scripta Materialia*, 2006, 55(4):299—302.
- [10] IGLESIAS C, SOLÓRZANO G, SCHULZ B. Effect of low nitrogen content on work hardening and microstructural evolution in Hadfield steel[J]. *Materials Characterization*, 2009, 60(9):971—979.
- [11] KARAMAN I, SEHITOGLU H, GALL K, *et al.* Deformation of single crystal Hadfield steel by twinning and slip[J]. *Acta Materialia*, 2000, 48(6):1345—1359.
- [12] 张增志. 耐磨高锰钢[M]. 北京:冶金工业出版社, 2002:111—112.
- ZHANG Zeng-zhi. Wear-resistant high manganese steel [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002:111—112. (In Chinese)
- [13] BAYRAKTAR E, KHALID F A, LEVAILLANG C. Deformation and fracture behaviour of high manganese austenitic steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 147:145—154.
- [14] 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.
- ZU Fang-qiu, LI Xiao-yun, LIU Lan-jun, *et al.* Research on microstructure and work hardening mechanism steel by simulating actual working condition[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2006, 27(2):71—74. (In Chinese)
- [15] 项建英, 宋仁伯, 侯东坡, 等. 316L 不锈钢加工硬化机制及孪生行为[J]. *材料科学与工艺*, 2011, 19(4):128—133.
- XIANG Jian-ying, SONG Ren-bo, HOU Dong-po, *et al.* Mechanism of work hardening and twinning for 316L stainless steel[J]. *Materials Science and Technology*, 2011, 19(4):128—133. (In Chinese)
- [16] LEE W S, CHEN T H. Plastic deformation and fracture characteristics of Hadfield steel subjected to high-velocity impact loading[J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2002, 216(10):971—982.