

一种高碳低合金钢的热塑剪切带的实验^{*}

叶裕恭 赵士达 沈乐天 陈淑霞 沈 还

(中国科学院力学所, 100080, 北京)

摘要 采用高速锤加载方式, 研究了一种高碳低合金钢处于非剪切变形加载条件下的热塑剪切带的形成发展规律, 试验结果表明, 在目前的加载速率下, 形成的剪切带是一种变形带, 而不是相变带, 带的形成与材料内部的二相粒子的尺度大小没有太大的关联。

关键词 高应变率; 热塑剪切带; 粒子尺度

中图分类号 O348.3

0 引言

在高应变率下, 绝热剪切带是导致高强度钢失效破坏的主要变形模式。金属材料在成形加工(例如冲压, 锻压和爆炸成形等)以及战争中的武器穿甲、破甲等变形过程中, 都处于高应变率下, 因此对绝热剪切带的研究很早就受到材料和力学界的重视。通过长期的研究, 人们对它形成的物理机制以及它自身的物理与几何特征都已有了一定深度的认识。绝热剪切带是指材料中塑性应变集中的狭窄带。在带区中材料应变率已经高达塑性变形功产生的热量难以及时传递到带外的区域, 从而造成带内温度和应变急剧的增高。不同的变形率或加载速率下, 剪切带的带区内外并非都处于绝热过程, 因此更为确切的, 应把绝热剪切带称为热塑剪切带(在本文下面的论述中, 我们称之为热塑剪切带)。在钢中热塑剪切带有两种类型, 一种称为变形带, 另一种称为相变带。顾名思义, 前者是指带中材料未产生相变, 带内外材料具有相同的相结构; 后者是指带中材料已由原来的铁素体相 α 转变成奥氏体相 γ , 带内外材料具有不同的金相结构。

至今为止, 有关热塑剪切带的理论分析和实验研究已经有了许多报导, 但绝大部分研究都局限于高速变形下材料处于单纯的剪切变形或剪切加载条件下的剪切带的形成和发展规律^[1,2]。当材料内部处于复杂应力条件下或者试件并非处于单纯剪切变形条件下, 热塑剪切带是否仍然是高强度钢失效破坏的主要变形模式? 此外, 对于同一种材料其内部具有不同尺度的二相粒子时, 对热塑剪切带的形成和发展是否有本质上的影响? 本文的实验研究内容就是针对这两个问题而提出的。

1 实验方法和程序

• 国家自然科学基金资助项目. 基金批准号, 19672069

收稿日期: 1997-05-20

平面应变加载条件下,材料内部是处于三轴应力状态,我们已经从理论分析和数值模拟上研究了这种情况下的热塑剪切带成核和发展规律^[3],然而实验上要实现却并非易事。

为简便起见,我们将试件加工成长方形,尺寸为:15×4×8(L×B×H)mm。试件的动态加载方向如图1所示,基于试件X轴向的尺寸大于Y、Z轴向的尺寸,因此在该试件中段A截面处可以视为平面应变状态,加载变形后A面将变成鼓形(下面的金相图皆取自该处)。

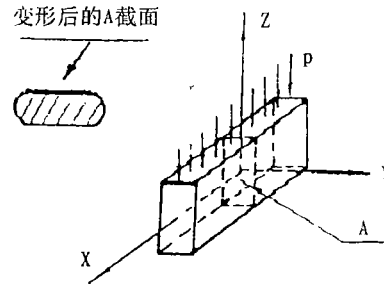


图1

1.1 材料组分和热处理

选取一种高碳低合金钢作为试件的材料,组分如下:

$$\begin{aligned} C &= 1.02\% & Si &= 0.24\% & Mn &= 0.27\% \\ P &= 0.011\% & S &= 0.0086\% & Cr &= 1.57\% \end{aligned}$$

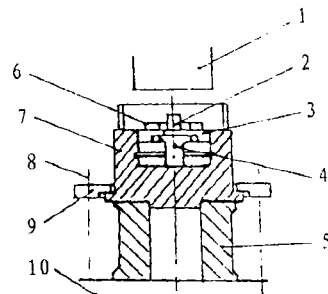
采取高温回火,温度=710℃,时间分别5小时和250小时,使材料内部的碳化物粒子具有不同的尺度。准静态的力学性能实验结果表明,两种不同粒子尺度的材料具有不同的力学性质,从表1可以看出,随着粒子平均直径的增大,材料的 σ_y , σ_u 和 σ_f 皆下降,而断裂应变 ϵ_f 增大^[4]。

表1 材料力学性能

力学性能 粒子平均直径(μm)	屈服强度 σ_y (MPa)	极值强度 σ_u (MPa)	断裂强度 σ_f (MPa)	断裂应变 ϵ_f
0.302	920	1050	1350	0.5
0.794	500	700	1000	0.72

1.2 实验装置和实验方法

加载装置为液气高速锤(见图2)。把试件安装在加载装置上,通过调节高速锤的气室压力可改变锤头对试件打击的初始速度大小。试件下部布设了测力传感器,可以将试件变形过程中的载荷与时间信号之间的 $p \sim t$ 关系记录下来。为了控制试件的变形量大小,在铁砧上安置了变形限位器,通过调节限位器的尺寸高度达到控制试件最终的变形大小。 $p \sim t$ 曲线由三部分组成,第一部分是锤头与试件接触前记录的噪音信号,正常情况应是零线。第二部分是试件变形过程中记录的曲线,曲线的纵坐标值反映了试件变形力的大小,横坐标反映了试件变形所需的时间。第三部分是锤头与限位器接触后载荷



1. 锤头; 2. 试件; 3. 压螺; 4. 测力传感器; 5. 传力环
6. 卸载环; 7. 承击件; 8. 螺栓; 9. 压盘; 10. 锤体

图2

迅速上升时记录的信号。只有曲线的第二部分可用于试件应变、应力以及应变率的实验分析中。

2 实验结果

2.1 动态压缩变形的结果

对于同一种粒子尺度的材料,通过限位器分别进行三种不同变形量的实验。从图3的第二段曲线上可以测得各试件达到不同压缩变形量 ΔH 所需的时间 Δt 以及变形过程中加载压力与时间的关系。由于试件变形的时间短暂,因而可设试件为等速变形,由此可以确定每个试件变形的平均速度 V_{cp} 。表2示出了两种粒子尺度、六个试件的最大名义应变 ϵ_n 和变形的平均速度 V_{cp} 值。 V_{cp} 值确定后,利用图3中段曲线的坐标值进而可以测得每个试件在不同时刻的压力和变形关系以及材料在动态变形下的工程应力~应变关系。图4就是从1-1号试件上采集的数据并利用上述方法得到的。从图3可以看到曲线上都有一个峰值,此结果表明,当试件达到它的最大压力承载能力后,材料的承载能力将开始下降,一直降到锤头与限位器接触后而停止。最大载荷点可以视为材料的失稳点。图3曲线还表明,表2中的六个试件,动态加载后皆已达到它们的最大承载能力,各试件的材料内部都已进入剪切变形局部化的成核阶段,从各试件的金相图谱也证实了此点。

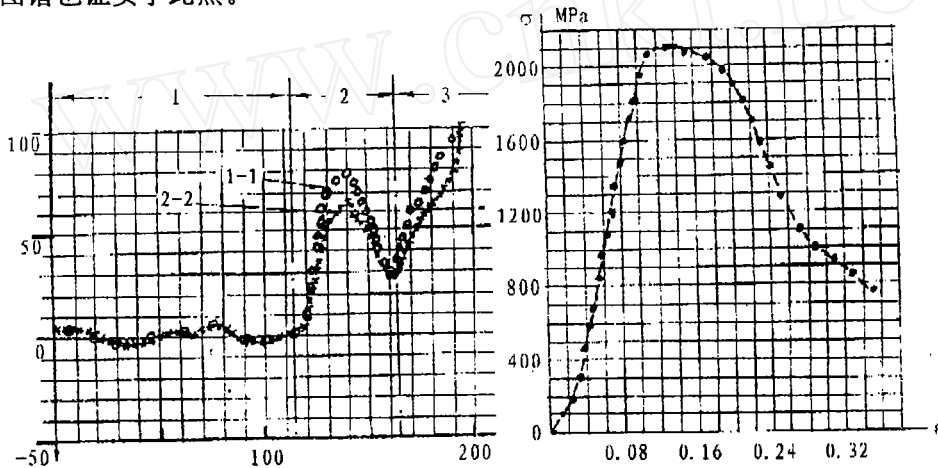


图3

图4

材料塑性变形功产生的热量将引起其内部温度升高,目前尚无办法测量出试件内部的温度分布。我们数值计算模拟结果表明,在目前实验的加载速率,试件材料性能以及试件形状和尺寸下,试件内部剪切带区的最高温度为250℃左右,在此温度下材料不会发生相变。

2.2 金相观察与分析

试件加载变形后,截取它的中段平面(见图1),并制作试样,试样经磨光和3%硝酸酒精腐蚀后,在金相显微镜上可以见到材料内部呈现有白色的带区(见图5a,b),如加长腐蚀时间,可以看到材料中偏析线以及偏析线变形留下的痕迹。从这些痕迹可以清楚看到这些白色的带区都是材料塑性剪切变形的集中区,剪切变形越急剧,变形梯度越大,则带区的尺寸越窄。金相图的形貌已足以说明目前观察到的所有剪切带都不是相变带,而是剪切变形带,进一步提高加载

速率,是否会导致剪切带的性质和形态的转变?这也是需要进一步研究的问题。

表 2

粒子尺寸 μm	试件编号	变形前试件 高度, H, mm	变形后试件 高度, H, mm	压缩变形量 $\Delta H, \text{mm}$	名义应变 ϵ_n	变形时间 $\Delta t, \text{ms}$	变形平均速度 $V_d, \text{m/s}$
0.302	1-1	8.00	5.20	2.80	0.350	0.188	14.9
	1-2	8.00	4.88	3.12	0.390	0.380	8.20
	1-3	8.00	4.62	3.38	0.423	0.500	6.76
0.794	2-1	8.00	4.96	3.04	0.380	0.180	16.9
	2-2	8.00	4.70	3.30	0.413	0.350	9.43
	2-3	8.00	4.34	3.66	0.456	0.512	7.15

通过对含小粒子试样的剪切带区内外多个部位的硬度测量,发现剪切带区内的硬度高于带区外的硬度。带区内硬度在800~1000HV之间,个别点可达到1000HV以上,而剪切带区外硬度为400~500HV之间,个别点也可达到700HV,造成此现象的原因可能有二:①由于带内塑性应变大大的高于带外,应变硬化可能造成带内硬度高于带外。②高应变率下,带内有较高的温升,当温度升到一定高度,会加大碳元素在基体中的扩散,从而提高了带内材料的硬度。

从对具有两种粒子尺度的试样其剪切带区的电镜观察表明,含小粒子试样的剪切带区可以发现较多的粒子与基体脱开形成空洞,而含较大粒子试样中,粒子与基体脱开的现象却不明显(见图6)。

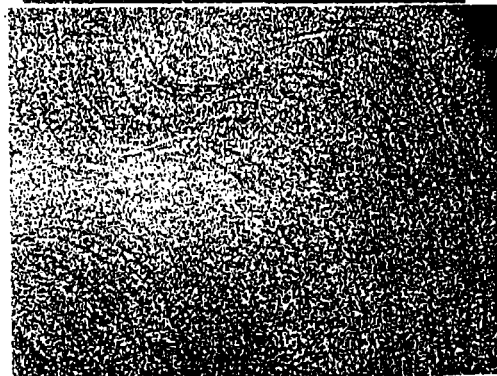
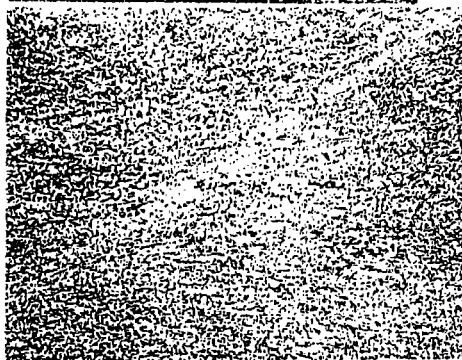
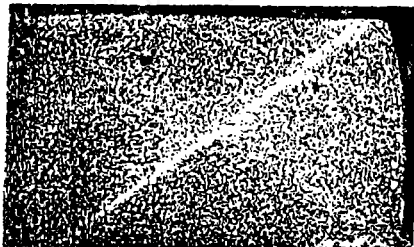


图 5a

图 5b

从目前实验观察到的剪切带仅仅反映了材料内部基体材料的一种变形形态,其尺度较大,

与较小的二相粒子尺度尚无直接关联,但是当材料遭受到更高的变形速率时,是否仍然如此呢?这也是有待研究的。

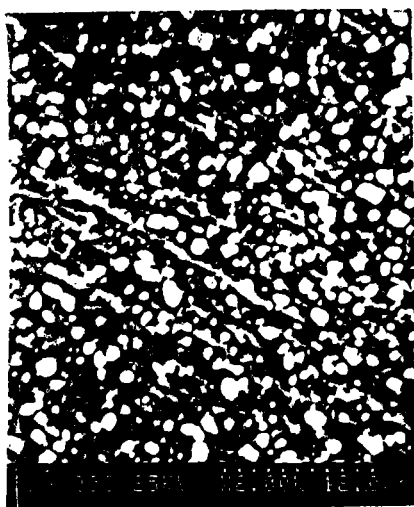


图 6a

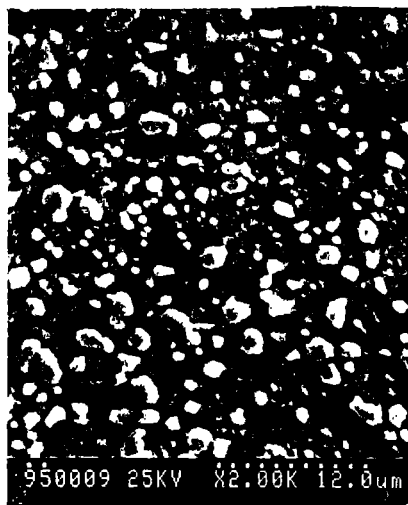


图 6b

3 结 论

通过目前的实验研究,可以得到以下三点结论

- 3.1 在高速加载以及平面应变条件下,剪切带仍然是材料失效的主要变形模式。
- 3.2 对于本文研究的材料以及加载的速率下,变形局部化呈现出的剪切带属于变形带。
- 3.3 二相粒子的尺寸大小对剪切带的形成和发展无直接的关联。

4 参 考 文 献

- 1 Yilong Bai, Res. Mechanica, 1990, (31):133~205
- 2 J. H. Beaty, L. W. Meyer, M. A. Meyers and S. Nemat-Nasser, Shock-Wave and High-Strain Rate Phenomena in Materials, Edited by Mare A. Meyers. etc. Marcel Dekker, Inc. 1992, 645~655
- 3 Ye Yugong, NUMIFORM'95, Cornell University, New York, 1995
- 4 Youshi Hong, Yugong Ye and Xiaoxin Xia, ICM-4, 1983

AN EXPERIMENT ON THE THERMOPLASTIC SHEARING BAND OF A KIND OF HIGH-CARBON LOW-ALLOY STEEL

Ye Yugong · Zhao Shida · Shen Letian

(Research Institute of Mechanics, Academia Sinica, 100080, Beijing)

Abstract

By way of high rate hammer loading, the forming and developing law is studied of the thermoplastic shearing band of a kind of high-carbon low-alloy steel under non-shearing deformation loading conditions. Experimental results show that, at the present loading rate, the shearing band formed turns out to be a deformed band, not a phase-changed one, and the formation of the band does not have much to do with the size of the second phase grains in the material.

Keywords: high strain rate; thermoplastic shearing band; grain size