第 4 卷 第 1 期　　材 料 科 学 进 展　　Vol. 4, No. 1
1 9 9 0 年 2 月　　MATERIALS SCIENCE PROGRESS　　February 1990

20 号钢高速变形时热塑剪切局部化的结构特征*

徐永波　　王中光
(中国科学院金属研究所)

黄小玲　　邢　达　　白以龙
(中国科学院力学研究所)

摘　要　本文报导了 20 号钢在 Hopkinson 扭转杆上以 1500 s^{-1} 高速变形时产生的热塑剪切局部化的微观结构特征。结果指出，在试样标距截面的变形区内分布着一些宽度约为 50μm，间距为 100μm 彼此平行的微细剪切带。变形区的平均应变为 0.83 而剪切带内的应变高达 1.95。剪切带内组织结构损伤严重，主要表现在大量的微裂纹生核和聚合，剪切带内的位错密度很高，位错胞在与剪切带成一定角度方向上沿晶粒拉长方向排列。由于带内的高度变形，剪切中的晶粒严重变形而拉长并产生一定程度的碎化但还未出现非晶现象。

关键词　形变局部化，微结构，裂纹，断裂

1　引　　言

绝热剪切带，即在高速形变过程中出现的一种形变局部化现象，是许多金属与合金在以高应变速率大应变变形时产生的重要的形变方式。剪切带内作为裂纹生核与聚合的地点，一旦出现局部化则常常会导致材料的低韧性和低延性断裂。对绝热剪切带形成机制的研究将有助于我们对在一些特殊条件下诸如枪弹着靶，高速加工成型以及动态扭转过程中材料的动态力学行为作深入了解。

过去，无论从理论上还是在实验上对这种形变局部化现象均作了不少的研究，曾提出不少模型予以描述[1-3]。但对它的形成的力学条件以及与微观结构的关系则仍缺少深入的了解。本文作为一系列研究的一部分，试图从微观结构的角度，对低碳钢（铁素体+珠光体）在高速扭转时出现的剪切局部化现象作初步的观察与讨论。

2　材料与试验程序

用于试验的材料是平炉冶炼的 20 号钢，其化学成分(wt-%): C 0.22, S 0.001, Si 0.35, Mn 0.53, P 0.018。试样从热轧钢棒上切取并加工而成，图 1 示出了用于扭转试验的试样外形和尺寸。

* 中国科学院重大科研项目支持，合同号87-52；1988年6月3日收到初稿。
本文联系人：徐永波，副研究员，沈阳 110015，中国科学院金属研究所材料疲劳断裂实验室

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

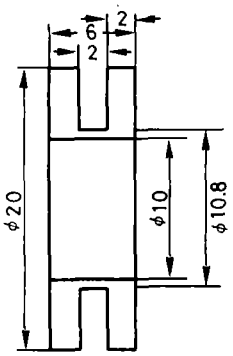

图 1　试验件的外形与尺寸

Fig.1 The profile and dimension of the specimen

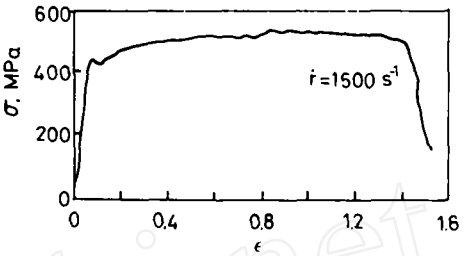

图 2　试验样品的应力–应变曲线

Fig.2 The stress–strain curve of the tested specimen

高速扭转试验是在 Hopkinson 扭转杆上进行。平均应变速率为 1500 s^{-1}。试样在未断之前卸载取下，沿截面剖开进行微观结构研究。

3 实 验 结 果

3.1 力学行为

图 2 绘出了试样的应力–应变曲线。不难看出，由于热软化效应，试样通过一段缓慢的应变强化即 $d\tau / dr > 0$ 之后($d\tau$ 为剪应力，dr 为剪应变)最后导致材料的断裂。假定材料的本构性质是粘塑性的，即有[4]

$$\tau = \tau(r, \dot{r}, \theta)$$

($\dot{r}$ 为应变速率，θ 为试验时的扭转角) 则有

$$\frac{d\tau}{dr} = \left(\frac{\partial\tau}{\partial r}\right)_{\dot{r},\theta} + \left(\frac{\partial\tau}{\partial \dot{r}}\right)_{r,\theta}\left(\frac{d\dot{r}}{dr}\right) + \left(\frac{\partial\tau}{\partial\theta}\right)_{r,\dot{r}}\frac{d\theta}{dr}$$

而在常应变率下，上式中第二项为零 $\left(\frac{\partial\tau}{\partial\dot{r}} = 0\right)$此时有$\left(\frac{\partial\tau}{\partial r}\right)_{\dot{r},\theta} dr = -\left(\frac{\partial\tau}{\partial\theta}\right)_{r,\dot{r}} d\theta$，可以看出，剪切载荷保持一段时间不变量是由于热软化的结果。

如果剪切带形成时塑性功完全转化成热，则根据$\triangle T = \tau^* r^* / \rho C_v$，可以粗略估算出剪切带内的温度升高的数值，其中 τ^* 和 r^* 分别为剪切带内的应力和应变，ρ 为试验材料的密度，C_v 为热容量，经计算得 $\triangle T = 277℃$，这远低于 20 号钢的相变温度。

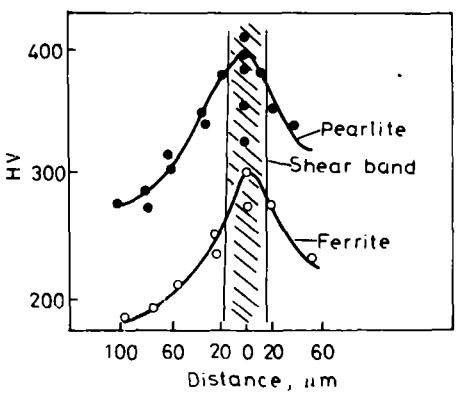

图 3　剪切带中珠光体与铁素体的显微硬度

Fig.3 Microhardness in both pearlite and ferrite structures in the hand

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

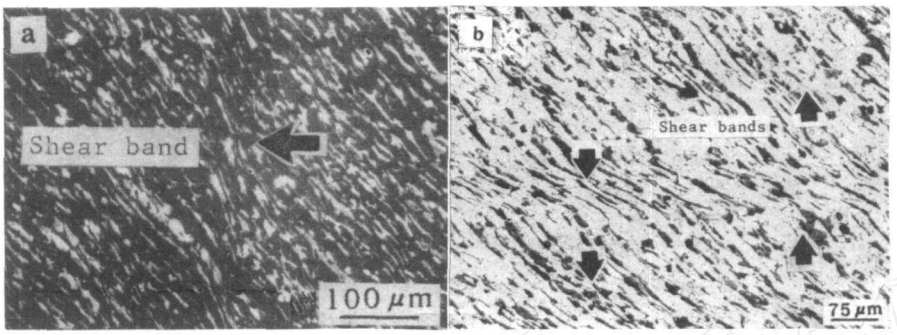

图 4 低碳铁素体–珠光体钢中的局部化剪切带

Fig.4 Localized shear bands in low carbon ferrite–pearlite steel

a. shear bands in deformed region

b. fine structure of shear bands

图 3 示出了沿垂直于剪切带方向从未形变的基体开始横穿剪切带进行显微硬度测试的结果。可以看出，铁素体和珠光体组织中的显微硬度，剪切带内的数值明显高于均匀形变区以及基体内的数值，这是形变强化的结果。在剪切带内铁素体高达 300（基体中铁素体的显微硬度为 200），而珠光体高达 400（基体中珠光体组织的硬度为 280）。还可以发现，剪切带内珠光体组织的硬度值波动很大，低者接近铁素体值，而最高达 400 以上，这种波动可能是剪切带内，特别是珠光体组织发生严重组织损伤造成的。

3.2 微观结构

未变形区内为正常的沿轧向取向的铁素体和珠光体组织。在变形过程中，铁素体晶粒和珠光体团均沿受力方向转动并拉长。图 4a 为金相截面的扫描电镜照片，仔细观察不难发现在均匀的变形区内分布着强烈变形的窄带，带宽约为 50μm，间距为 100μm，如图 4b 示。关于这种高速变形下产生的多条带的现象目前尚未见到报导。它不是简单的卸载效应，很可能与热效应或材料的微结构有关。我们正进行深入研究。

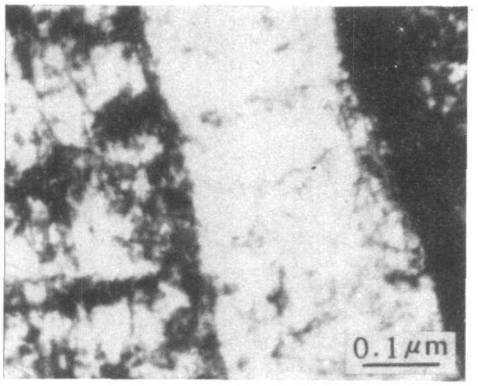

图 5 位错胞沿晶粒拉长方向排列

Fig.5 The tangled arrangement of dislocations along the direction of the elongated grains

观察表明，剪切带内的裂纹多伴由渗碳体片层的断裂而产生，并沿剪切带方向聚合，如果以单位面积中观察到的裂纹数作为表征结构损伤程度，则随应变的增大，铁素体晶粒和珠光体团将渐渐转向剪切力方向并沿与剪切带成一定角度方向拉长，剪切带内结构损伤程度愈趋严重，表现在大量微裂纹生成并沿剪切带方向聚合，最后导致材料沿剪切带断裂[5]。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

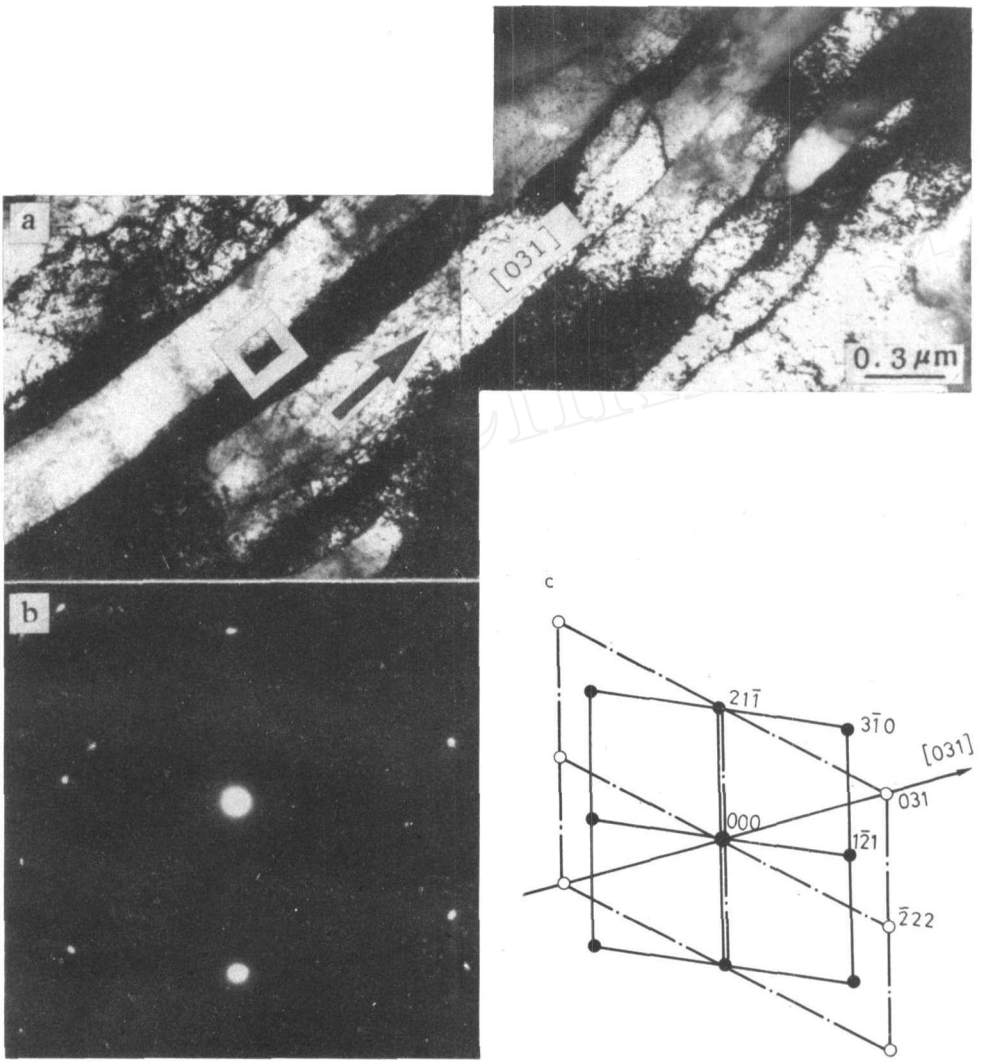

图 6　剪切带的微观结构　(a)明场像，示出剪切带中的拉长的晶粒结构　(b)电子衍射花样　(c)标定

Fig.6　Microstructure of shear band in low carbon steel

a. bright field micrograph showing a deformation shear band

b. selected area diffraction pattern

c. indexing of pattern ●$[135]_{\alpha_2}$ (grain 2), ○$[2\bar{1}3]_{\alpha_1}$ (grain 1)　$[2\bar{1}3]_{\alpha_1}$ // $[135]_{\alpha_2}$

透射电镜薄膜观察表明，剪切带内的位错密度明显高于基体中的位错密度，且位错胞沿剪切带方向排列如图 5 所示。在微观上，剪切带穿过多个晶粒而发展如图 6 所示。带内的高位错密度表明它是高度局部化的强烈形变带。通常，从剪切局部化的出现到沿剪切带的断裂是一个极为短暂的包括裂纹生核、扩展与聚合的过程，一般的方法很难捕捉与追踪每一事件的发展过程。本研究是采用试样在断裂前即行卸载并重点于受力载面切取试片并

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

制取薄膜。从图 6 可以看出，带内的晶粒沿剪切带方向拉长，晶界变得平直，晶粒已出现一定程度的碎化。但尚未发生微晶或非晶的现象。根据电子衍射分析可知，入射电子束分别与晶粒 1 的膜面$[2\bar{1}3]_{\alpha_1}$和晶粒 2 的膜面$[135]_{\sigma_2}$平行。而剪切带与膜面相截的迹线方向为<013>。可以设想，在变形初期，形变可能局限于晶粒内部或限于某个在取向有利的晶粒内部有控制的滑移系统首先启动，伴随应变增加，有些晶粒渐渐转向剪切方向，晶界渐渐与剪切带方向平行，而与剪切成一定角度或垂直的晶界由于应力集中使晶粒内部的变形得以交滑移或多重滑移方式穿过晶界从而很快发展成宏观上的剪切带。

4 讨 论

通常将热塑剪切带分为形变带和相变带两类，它们都是高速变形下产生的热塑失稳现象。一旦发生这种现象则材料将会引起低韧或低延性断裂。已有的研究表明，影响这种剪切变形局部化的因素很复杂。就材料本身来说，如加工硬化率、热软化速率以及应变速率敏感性等都是影响局部化变形的重要因素。Costin [6] 和 Hartley [7] 都曾对 1018 冷轧钢和 1020 热轧钢在高速扭转下产生的剪切变形进行过研究。他们的结果表明，其应变率在 2000—5000s^{-1}，最大应变在 0.65—1.70，临界应变为 0.55—1.40 时均可观察到剪切局部化发生，认为应变速率是影响剪切带产生的重要参量。Rogers [8] 则发现淬火和回火处理的 1040 钢对热塑剪切是比较敏感的。但他们都没有观察到本文提及的多条形变带同时出现的情况。试验表明，对热轧 20 号钢，在铁素体和珠光体双相结构条件下当以 1500 s^{-1} 应变速率扭转时，确实存在一个出现剪切形变局部化的临界应变 (0.83)；而且随着材料强度的提高产生剪切局部化的临界应变值要减小，我们最近对淬火 20 号钢板条马氏体试验结果表明，当达到临界应变 0.3 时同样观察到了剪切局部化现象发生。

总之，热塑剪切局部化是材料的一种十分重要和复杂的形变方式。一旦出现局部化变形便立即发生失稳并最后导致材料的低韧性断裂。换句话说，剪切局部化的出现与材料的断裂几乎同时发生，一般很难捕捉和追踪事件发生与发展的全过程。尽管过去已经在剪切局部化的形成及其结构特征作了一作工作，但对其形成的机制和影响的因素等仍缺少深入和全面的了解。本文只是一系列研究工作的一部分，即报导了初步的观察结果。

5 结 语

1. 低碳铁素体和珠光体钢在高速扭转过程中会发生局部剪切现象，这些彼此平行的多条微细剪切带均匀地分布在变形区域内。剪切带内应变高达 1.95，形成剪切带的临界应变为 0.83。

2. 剪切带内位错密度很高，产生的位错胞结构倾向于沿剪切带方向排列。剪切带内晶粒沿剪切带长度方向拉长、碎化、并出现亚结构，但并未达到微晶及非晶化程度。

3. 剪切带内结构损伤严重，表现在大量微裂纹生成并沿剪切带拉长方向聚合，最后的断裂沿剪切带方向。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参 考 文 献

1 Bai Y L. J Mech Phys Solids, 1982; 30:195

2 Rauch E, Canova G R, Jonas J J et al. Acta Metall, 1985; 33; 465

3 Wu F H, Freund L B. J Mech Phys Solids, 1984; 32; 119

4 Huand X L. Deformed Shear Bands and Ductile Fracture, Master Degree Thesis, Beijing Institute of Mechanics, 1987

5 Xu Y B, Wang Z G, Huang X L, Xing D et al. Mat Sci Engng, 1989, A114, 81–87

6 Costin L S, Duffy J. J Mech Phys Solids, 1987;27;58

7 Hartley K A, Duffy J. J Mech Phy Solids, 1987;35;283

8 Rogers H C. Ann Rer Mat Sci, 1979; 9;283

ADIABATIC SHEAR BAND IN A LOW CARBON STEEL DURING HIGH SPEED DEFORMATION

XU Yongbo　WANG Zhongguang

(Institute of Metal Research, Academia Sinica)

HUANG Xiaoling　XING Da　BAI Yilong

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

ABSTRACT A study has been made of the microstrctures of adiabatic shear band in a low carbon steel, resulting from high speed torsional testing with about 1500 $s^{-1}$of the average strain rate. Several fine shear bands have been found to distribute over the deformation region uniformly (the gauge length of the specimen). The width of the band is estimated to be in the order of magnitude of 50μm, and the space between the bands is about 100μm. Detailed scanning electron microscopy studies indicate that the damage of the microstructure within the band is very apparent, as evidenced by the microcrack initiation and coalescence along the shear band. However, there is no evidence in this study to show that the structure in the band has undergone a micro– or non–crystallization.

The thin foil observations by transmission electron microscopy reveal a high density of dislocation and that these bands are the region of highly deformation localized shear that traverse grains. The tangled arrangement of dislocations tends to be aligned along the direction of the elongated grains.

KEY WORDS deformation localization, microstructure, microcrack, fracture

Correspondent: XU Yongbo, Associate professor, Laboratory of Fatigue and Fracture for Materials, Institute of Metal Research, Academia Sinica, Shenyang 110015

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net