

几种不同硬度和热导率的钢中的绝热剪切带特征

Characteristics of Adiabatic Shear Bands in Several Steels with Different Hardness and Thermal Conductivity

苏铁健, 高书娟, 李树奎, 王富耻, 张朝晖
(北京理工大学, 北京 100081)

SU Tie-jian, GAO Shu-juan, LI Shu-kui, WANG Fu-chi, ZHANG Zhao-hui
(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

摘要: 研究了几种不同硬度和热导率的钢铁材料在约束爆破条件下的绝热剪切带特征。研究结果表明: 钢的高硬度和低热导率有利于形成相变带; 反之, 则倾向于形成形变带; 对于具有高硬度和高热导率的钢, 由于高温相变带区域的热量迅速传递到周围的基体组织而使其温度升高、硬度降低, 形成的相变带会向形变带转化。

关键词: 硬度; 热导率; 绝热剪切带

中图分类号: TG301 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2004) 07-0006-04

Abstract: Research was conducted on characteristics of adiabatic shear bands (ASBs) in several steels by contained exploding cylinder technology. It is shown that the high hardness and low thermal conductivity promote the formation of transformed ASBs, and the deformed ASBs will form if low hardness and high thermal conductivity are involved; for steel with both high hardness and thermal conductivity, the transformed ASBs will transform into deformed ones, due to that the fast heat conduction from high temperature ASBs results in rapid temperature rise around and thus decreasing the hardness.

Key words: hardness; thermal conductivity; adiabatic shear bands

绝热剪切现象是材料在例如高速切削和爆炸等高应变率加载条件的一种特殊破坏现象。其特点是剪切应变在很窄的带状区域发生, 这一区域即通常所说的绝热剪切带 (ASB)。高应变率加载条件下的剪切应变集中是变形过程中塑变功转变为热量引起材料的热软化效应超过应变硬化效应的结果, 即所谓“热塑失稳”^[1]。

绝热剪切带根据其组织形貌可以分为相变带和形变带两大类。试样侵蚀后, 相变带在光学显微镜下呈白亮的带状, 其组织结构和基体不同, 并和基体之间有明显的界面, 其中可能发生了相变或者再结晶; 形变带实际上是基体的局域化变形区, 和基体之间没有明显的界面, 侵蚀后在光学显微镜下不呈白亮的形貌^[2]。

绝热剪切带与材料失效有着密切关系, 材料构件出现 ASB 即意味着材料的承载能力的下降或丧失, 被认为是材料失效的前兆。例如对于装甲材料来说, 绝热剪切是其主要失效形式之一。而在某些场合, 也需要利用绝热剪切现象, 如制造动能穿甲弹的材料,

就要求有强的剪切失稳和绝热剪切敏感性, 从而在穿甲、侵彻过程中出现“自锐”现象^[3]。

虽然有很多的理论 and 实验工作对绝热剪切带的形成条件、形成规律、剪切带内的微观组织结构特征以及演化规律等做了详细的研究^[4-7]。但目前有关材料性能对绝热剪切带特征及其演化规律影响的比较系统的研究工作还很少。而这样的工作对高应变率服役条件下的材料选择和设计是非常重要的。由于绝热剪切过程主要涉及传质过程 (塑性变形) 和传热过程, 而材料的力学性能指标屈服强度是反映传质过程阻力的重要参数, 材料的热学性能指标热导率之倒数是反映传热过程阻力的重要参数, 其中屈服强度和硬度密切相关, 本工作对钢的硬度和热导率与高应变率加载条件下钢中的绝热剪切带特征的关系进行初步的实验研究。

1 试验材料和条件

试验材料选择热导率差别较大的 60 钢、35CrMnSi 和 1Cr18Ni9Ti, 材料及其热处理条件如表

1 所示。热处理后测试其洛氏硬度，加工成内径 26mm，长 140mm，壁厚 5mm 的圆筒形试样。

表 1 试验用钢及其热处理工艺
Table 1 Steels and heat treatments

Steels	Heat treatment
60 steel	Heating at 850 , water quenched, tempering at 250 , air cooled
35CrMnSiA	Heating at 850 , oil quenched, tempering at 250 , air cooled
1Cr18Ni9Ti	Hot rolled
60 steel	Heating at 850 and furnace cooled to 650 , air cooled

试验采用约束爆破圆筒实验技术 (Contained Exploding Cylinder Technology, CEC)。试验装置如图 1 所示。当金属壳体内的高能炸药被引爆后，产生的压

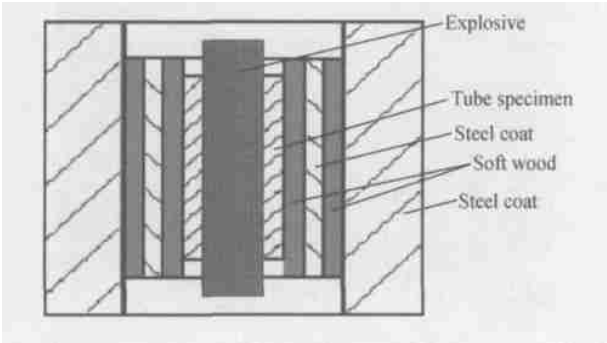


图 1 圆筒约束爆破简图

Fig. 1 Schematic of contained exploding cylinder technology

应力波沿径向向外膨胀对金属壳体加载，金属壳体则在压应力波的作用下向外膨胀，处于圆筒试样和两个钢套约束体之间的软木起缓冲作用，用来减少应力波的反射。这项技术是 Shockey 和 Erlich^[8] 于 20 世纪 80 年代左右发展的一类有效的检验剪切局部化的二维方法，其最初的目的是为了进行破片研究。该实验技

术的特点是：(1) 人为地制造了剪切带的二维分布，可以进行剪切带间相互作用的研究工作；(2) 可以提供一般实验技术所无法达到的高应变率，其平均应变率最高可以达到 10⁶/s，并且能够在大幅度范围内调整加载应变率；(3) 也是最重要的特点，该实验技术的装置和一般的战斗部十分接近，其实验结果有很好的可移植性。

圆筒形试样内填充 TNT 炸药，一端启爆。选择典型的破片垂直圆管轴线剖开，制成金相样品后用扫描电镜观察绝热剪切带的形貌特征。

2 试验结果与分析

2.1 材料组织硬度及热导率分析结果

材料热处理后的组织和硬度分析结果见表 2。其中热导率数据 (室温) 参考中国机械网材料数据库。

表 2 钢的组织、硬度和热导率
Table 2 Microstructures, hardness and thermal conductivities of steels

Steels	Microstructure	HRC	Thermal conductivity/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)
60 steel (quenched and tempered)	Tempered martensite	59. 4	47. 0
35CrMnSiA	Tempered martensite	55. 6	27. 6
1Cr18Ni9Ti	Austenite	47. 2	16. 0
60 steel (isothermally holded at 650)	Pearlite and a little ferrite	33. 7	47. 0

2.2 绝热剪切带特征分析

图 2 是约束爆破试验后四种试样的破片金相照片。可以看出破片尺寸由大到小的试样顺序为 35CrMnSiA、60 钢 (经淬火+ 回火)、1Cr18Ni9Ti 和

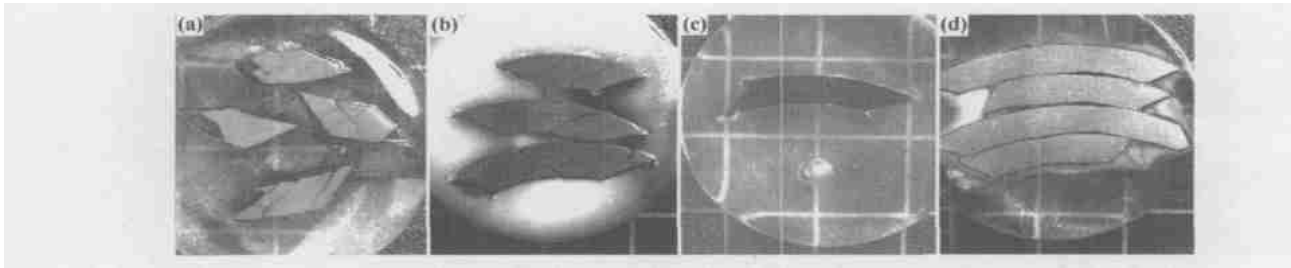


图 2 试样破片照片 (有机玻璃镶样)

(a) 35CrMnSiA; (b) 60 钢 (经淬火+ 回火); (c) 1Cr18Ni9Ti; (d) 60 钢 (经 650 等温)

Fig. 2 Photos of fragments (mounted in polymethyl methacrylate)

(a) 35CrMnSiA; (b) 60 steel (quenched and tempered); (c) 1Cr18Ni9Ti; (d) 60 steel (isothermally transformed at 650)

60 钢 (经 650 等温)。其中在 35CrMnSiA 和 60 钢 (经淬火+回火) 的破片金相试样中可以用肉眼观察到密集的剪切带和微裂纹, 而后二者观察不到破片中剪切带和微裂纹的存在。表明高硬度的 35CrMnSiA 和 60 钢 (经淬火+回火) 比后二者的绝热剪切敏感性

高得多, 这一点与文献 [6] 中提到的随着钢的屈服强度和硬度增加, 钢中剪切带的密度增加, 表现的绝热剪切敏感程度增加的事实是一致的。

图 3 为 60 钢 (经淬火+回火) 破片金相试样的 SEM 照片, 原圆筒内表面在照片底部。试样中观察到

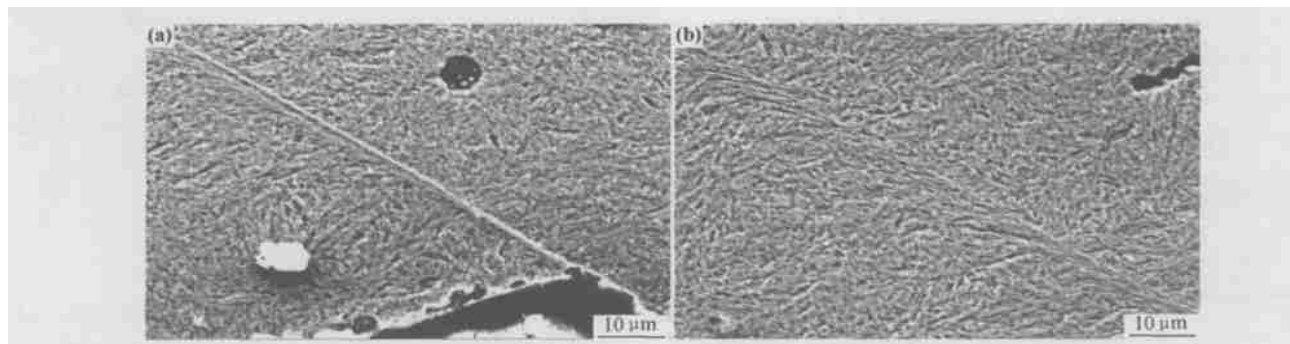


图 3 60 钢 (淬火+250 回火) 圆筒试样破片中的绝热剪切带

Fig. 3 Adiabatic shear band within sample of quenched and tempered 60 steel

的绝热剪切带主要是相变带, 其宽度约为 $1.3\mu\text{m}$ 。相变带与内表面呈 45° 角, 这是剪切应力最大的方向。但有些相变带在扩展过程中沿一侧发展出形变带并逐渐展宽, 而相变带部分则逐渐变细 (图 3a), 最后完全发展成为宽度 $5\mu\text{m}$ 左右的形变带, 如图 3b 所示。原因可以解释为由于钢的硬度很高, 有利于在开始时刻形成相变带, 但由于 60 钢导热能力高 (表 2), 高温相变带区域的热量迅速传递到周围的基体组织而使之温度升高而软化, 而基体硬度的降低则有利于形成形变带。可以看到, 相变带只是在它的靠近圆筒内表面的一侧发展出形变带, 这是由于这一侧的金属受爆炸产物的热影响较大、温度比另一侧高的缘故。

35CrMnSi 破片中的密集的绝热剪切带和剪切裂纹如图 4 所示, 原圆筒内表面在照片底部。图中的每条裂纹都沿着各自的剪切带扩展 (图 5), 裂纹和剪切带也大致与圆筒内表面呈 45° 角。剪切带是明显的相变带, 宽度约为 $1\sim 2\mu\text{m}$, 如图 5 所示。与 60 钢 (经淬火+回火) 不同的是不存在相变带向形变带过渡的

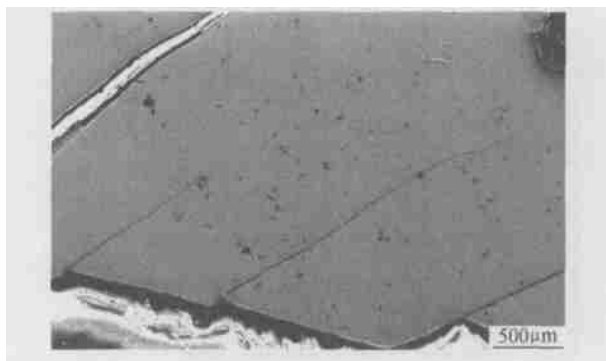


图 4 35CrMnSi 破片中的剪切裂纹

Fig. 4 Cracks within fragment of 35CrMnSi

现象。这是由于 35CrMnSi 钢的热导率低 (表 2), 在爆破的高速瞬时加载条件下, 相变带区域的热量在相变带扩展过程中还来不及向周围基体组织传递而使之软化。

图 5a 和图 5b 显示裂纹沿剪切带扩展的不同情况。图 5a 中沿剪切带扩展的裂纹的尖端呈钝形, 表现

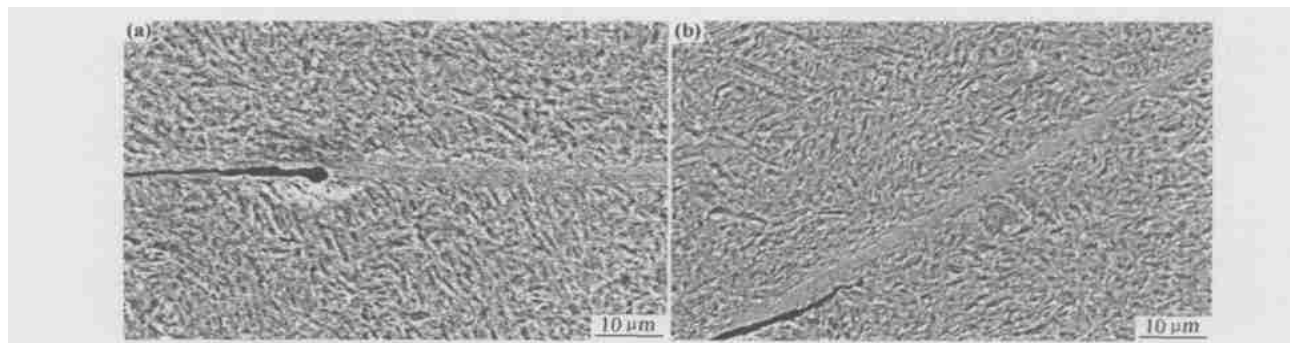


图 5 35CrMnSi (淬火+250 回火) 圆筒试样破片中的绝热剪切带

Fig. 5 Adiabatic shear band within sample of quenched and tempered steel 35CrMnSi

出微孔聚集性开裂的塑性断裂特征。裂纹在剪切带中间形成并扩展。这是裂纹生长初期的特征。图 5b 中的裂纹已从剪切带中间偏转到剪切带外, 并沿剪切带和基体之间的界面的附近区域扩展。裂纹尖端锐利, 有显著的脆性开裂特征。后者可能是由于裂纹的形成和扩展滞后于剪切带的形成和扩展, 当先形成的剪切带迅速冷却到硬度高于基体时, 裂纹偏转到较软的基体而继续扩展。

另外, 在 35CrMnSi 破片中观察到的剪切带比 60 钢 (经淬火+回火) 破片更密集, 表明其绝热剪切敏感性比后者更高, 这也可以根据前者比后者具有更低的热导能力来解释^[5]。

图 6 显示不锈钢 1Cr18Ni9Ti 破片中的剪切带和裂纹。可以看到剪切带具有形变带特征, 宽度约为 20~40 μm , 和基体之间没有类似图 5 的明显的分界面。破片中剪切带分布不密集。同前两者相比, 它的绝热剪切敏感性明显要低, 这显然取决于它较低的硬度 (表 2)。对于硬度更低的 60 钢 (经 650 等温) 破片试样, 加上它高的热导能力, 表现的绝热剪切敏感性

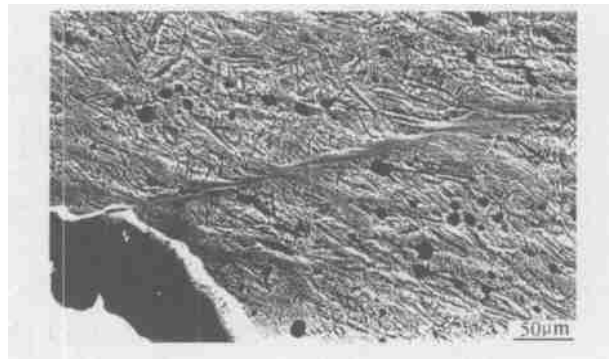


图 6 1Cr18Ni9Ti 圆筒试样破片中的绝热剪切带和裂纹

Fig. 6 Adiabatic shear band and crack within sample of stainless steel 1Cr18Ni9Ti

更低, 如图 7 所示。图 7a 所示的塑性变形区域是一条很短的、发育不完整的剪切形变带。图 7b 所示的沿形变带扩展的裂纹是一个明显的在拉应力作用下的张开型裂纹, 而其它试样中沿剪切带扩展的裂纹都是在剪应力作用下的滑开型裂纹 (图 3~6)。这种断裂方式显然也与材料的低硬度和高导热能力有关。

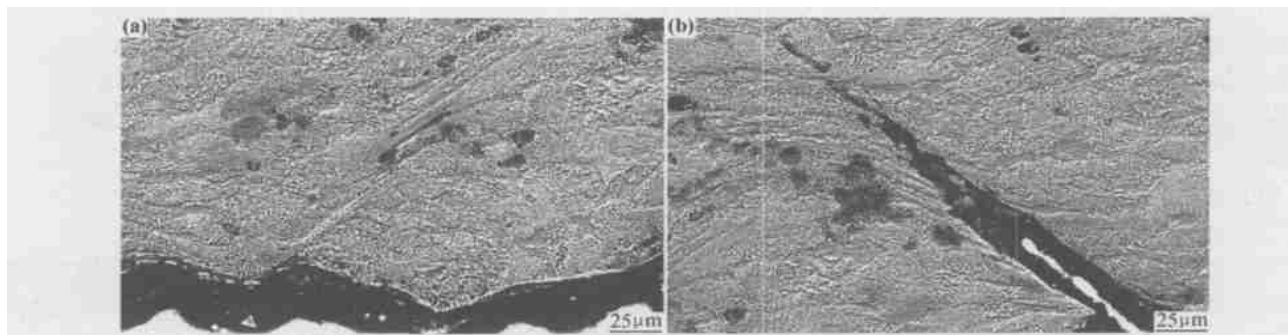


图 7 60 钢 (经 650 等温) 的圆筒试样破片中的绝热剪切带和裂纹

Fig. 7 Adiabatic shear band and crack within sample of 60 steel isothermally transformed at 650

3 结论

(1) 钢的高硬度和低热导率有利于形成相变带; 反之, 则倾向于形成形变带。

(2) 对于具有高硬度和高热导率的钢, 由于高温相变带区域的热量迅速传递到周围的基体组织而使之温度升高、硬度下降, 形成的相变带会向形变带转化。

参考文献

- [1] 王礼立, 余同希, 李永池. 冲击动力学进展 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1992. 3-33.
- [2] 杨扬, 程信林. 绝热剪切的研究现状及发展趋势 [J]. 中国有色金属学报, 2002, 13 (3): 401-408.
- [3] Magness L S. Improving Mechanical Properties of Tungsten Heavy Alloy Composites through Thermomechanical Processing [A]. Proc First Int Conf on tungsten and Tungsten alloys [C]. Arlington: Metal Powder Industries Federation, 1992. 127-132.
- [4] T W Wright. Scaling Laws for Adiabatic Shear Bands [J]. Int J

Solids Structures, 1995, 32 (17/18): 2745-2750.

- [5] L Chen, R C Batra. Effects of Material Parameters on Shear Band Spacing in Work-hardening Gradient Dependent Thermoviscoplastic Materials [J]. International Journal of Plasticity, 1999, 15: 551-574.
- [6] M Nabil Bassim. Study of the Formation of Adiabatic Shear Bands in Steels [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 119: 234-236.
- [7] M A Meyers, Y B Xu, Q Xue, et al. Microstructural Evolution in Adiabatic Shear Localization in Stainless Steel [J]. Acta Materialia, 2003, 51: 1307-1325.
- [8] D A Shockey and D C Erlich. In Shock Waves and High-Strain Rate Phenomena in Metals [M]. New York: Plenum Press, 1981. 249-261.

基金项目: 国家安全重大基础研究项目 (TJTJ01)

收稿日期: 2003-12-04; 修订日期: 2004-04-06

作者简介: 苏铁健 (1971-), 男, 副教授, 博士, 联系地址: 北京理工大学材料科学与工程学院 (100081)。