65-73

高应变率下三种钢材性能及损伤机理的实验研究

杨道明　于捷　李紫桐　　段祝平
（北京理工大学）　　（中科院力学研究所）

TG142.1

摘要　用 Hopkinson 拉杆装置系统地研究了高应变率下三种钢材（D60、58SiMn 和 45 钢）的动态拉伸性能。实验结果表明，这三种材料的动态屈服应力和延伸率比各自的静拉伸值均有提高，但它们的应变速率敏感性各不相同。此外，利用剖面法和金相分析对损伤演化进行了详细的研究。

关键词　Hopkinson 拉杆装置　动态拉伸性能　损伤演化　高应变率　钢材　金属材料

1　前言

高速加载下，对材料变形、损伤和断裂机理的理论和实验研究是材料科学和力学相互交缘的重要领域。研究应变速率对材料变形和断裂性质的影响是其中一个重要课题。

这类研究一般在一维 Hopkinson 装置上进行，包括压、扭、拉及复合加载，并有不同环境温度与之配合[1][2]。国内的研究起步较晚，大部分是在 Hopkinson 压杆或扭杆上进行的，但前者不能用以研究动态破坏和断裂，后者只能研究绝热剪切破坏过程。本文根据 Hopkinson 原理设计了一套拉杆装置，对三种钢材 D60、58SiMn 和 45 钢的动态拉伸应力一应变关系进行了系统的测试，并分别研究了它们的应变率效应。通过对不同应变量的试样剖面观察，认识了这三种钢材由变形到断裂的动态损伤演化过程，包括孔洞成核、长大和聚合等，获得了一些有意义的实验结果。

2　实验装置和测试原理

试验在自行设计的分段 Hopkinson 拉杆装置上进行（图 2.1）[3]。它由压缩气枪、冲击杆（子弹）、输入输出导杆、挡环、阻尼器、导轨和试样等组成。

压气枪发射高速子弹（冲击杆）以速度 V_c 撞击导杆 I，产生弹性压缩波。当其传至 A 处时，由于挡环与输入、输出杆端面密切接触，绝大部分弹性压缩波通过挡环传入杆 II。此时试件只承受很小压力，并保持此弹性范围。压缩波传至杆 II 自由端，反射后成为拉伸波 ε_r。该波传至 A 处时，由于挡环不受拉伸，该波部分反射回导杆 II，部分通过试件透射至导杆 I（分别记为 ε_r 和 ε_t，行波图见图 2.2）。这时导杆 I 和 II 上的应变片 E 片和 F 片同时记录 ε_i、ε_r 和 ε_t。典型波形如图 2.3 所示。

1989 年 11 月收稿，1990 年 9 月定稿。

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

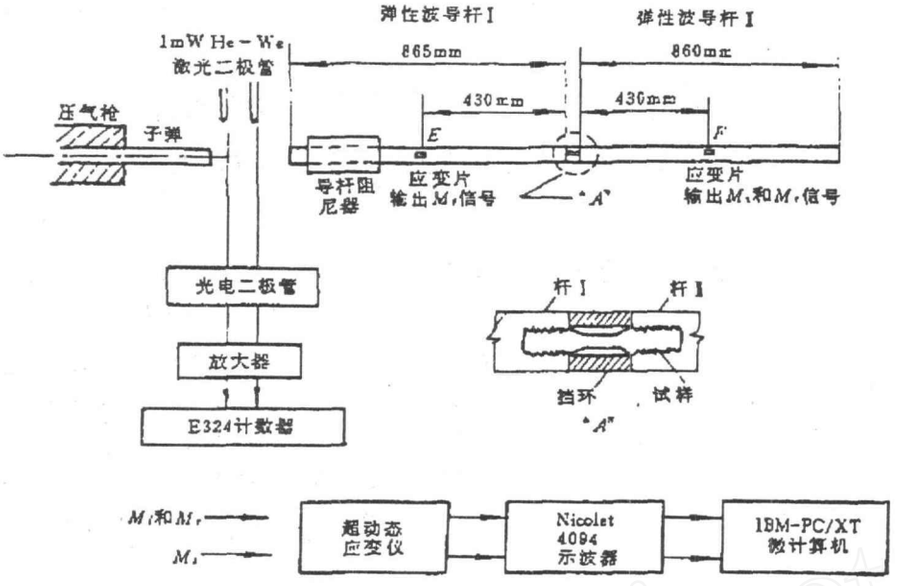


图 2.1 Hopkinson 拉伸测试装置示意图

Fig. 2.1 Hopkinson apparatus for dynamic tensile testing

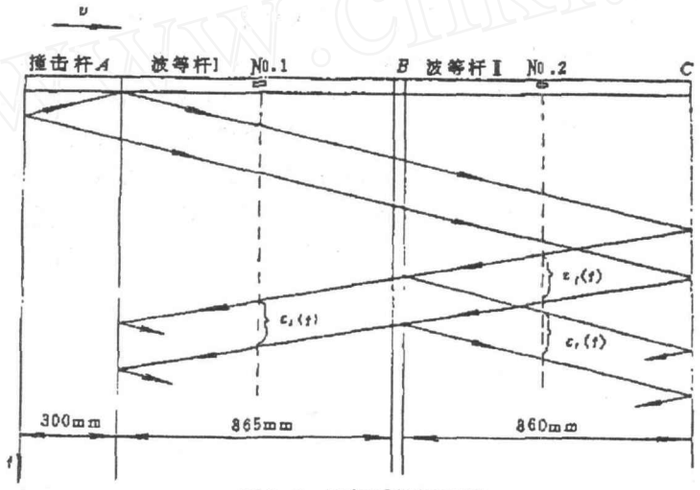


图 2.2 拉杆系统行波图

Fig. 2.2 Tension bar system and wave transmission

这样，在一维应力基本假定下，根据 Hopkinson 拉杆原理，得到试件中的平均应力、应变和应变率的计算公式

$$\dot{\varepsilon} = \frac{C_0}{L_s}(\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \tag{2.1}$$

$$\varepsilon = \int \dot{\varepsilon} dt = \frac{C_0}{L_s}\int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt \tag{2.2}$$

$$\sigma = \frac{E}{2}\frac{A_0}{A_s}(\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \tag{2.3}$$

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

式中 C_0 为导杆一维弹性波速，E 为导杆弹性模量，L_s、A_s 分别为试样有效长度及截面积，A_0 为导杆截面积，$\bar{t}$ 为某一选定的时刻。

上述应变信号的记录、标定和处理是通过动态应变仪、Nicolet 4094 数字示波器和 IBM PC/XT 微机系统完成的。本文编制的软件可以得到被测试件的动态拉伸应力一应变一应变率关系。这里暂且忽略了横向惯性效应的影响。

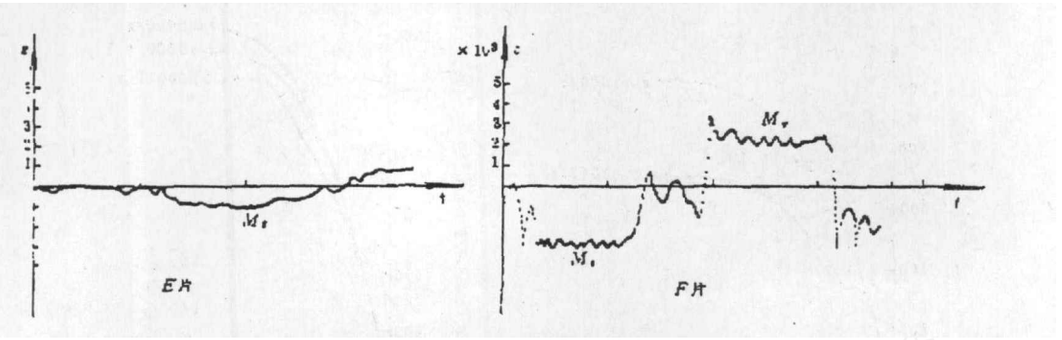


图 2.3　E 片和 F 片记录的典型波形

Fig. 2.3　Typical wave forms recorded by gage E and gage F

3　试验结果及其分析

三种试验用钢的成分见表 3.1。将 D60 钢处理成锻造态和淬火回火态。将这三种材料按其组织分为四组，分别进行 100 多个试件的拉伸试验，测定了不同应变率下的拉伸性能（表 3.2）。按(2.1)～(2.3)式计算得到三种材料的动态应力一应变曲线(图 3.1)。

表 3.1

Tab. 3.1

材　料	成　分					
	C	Si	Mn	P	S	Al
58SiMn	0.59	1.28～1.37	1.17～1.15	0.025	0.02	0.035
D60	0.58	0.62～0.63	0.27	0.03～0.023	0.018	---
45	0.44	0.22	0.66	0.022	0.029	---

从试验结果可以看出：

(1) A、C 组试样对应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 较敏感，而 B 组则不敏感。$\dot{\varepsilon}$ 提高到 10^3s^{-1} 时，A 组抗拉强度 σ_b 比静态的增加 44%；C 组 σ_b 增加 24%。当 $\dot{\varepsilon}$ 再增至 $1700s^{-1}$ 时，σ_b 达到 1260MPa，比静态增加 40%；而 B 组在 $\dot{\varepsilon}$ 为 $1300s^{-1}$ 时，σ_b 比静态只增加 6.5%，为 1150MPa。

(2) A、C 组试样在静态拉伸有明显物理屈服现象，在高应变速率下也同样存在物理屈服，且屈服点明显提高。如在 $\dot{\varepsilon}$ 为 10^3s^{-1} 时，A 组的 σ_s 从静态的 350MPa 提高到 730MPa。这种迟屈服现象是高应变速率下材料的普遍现象，是由于高应变速率下位错的激活和滑移难以得到热起伏能量的补偿的结果。宏观上，它表现为迟屈服效应。

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

(3) 高速加载下，各试样的 δ 均比静态下稍大，这与通常的高速脆化概念相反。本文认为这是由于在高应变速率下，由位错组态变化而带来的动态软化过程难以进行，形变硬化效应充分得以发挥，从而限制了颈缩的过早出现，是均匀变形阶段增长的结果。有关高速加载下材料强度与塑性同时增加的现象，Nichlas 等人亦曾有过报道。

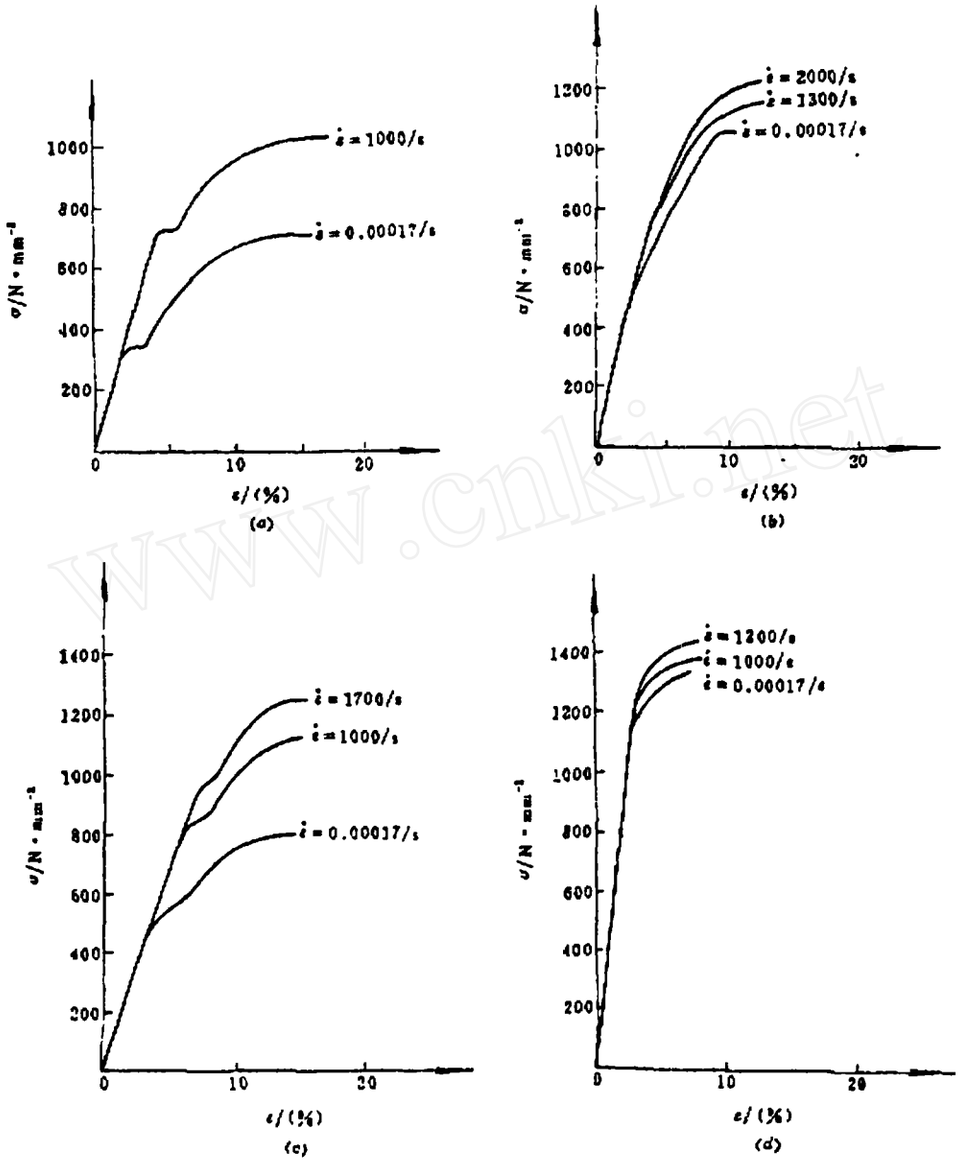


图 3.1 三种材料四种处理状态的动态应力—应变关系

(a) 45 钢正火态；(b) 58SiMn 钢锻造态；(c) D60 钢锻造态；(d) D60 钢淬火回火态

Fig. 3.1 Dynamic stress—strain curves of three materials in four conditions

(a)steel 45 normalized; (b)steel 58SiMn forged; (c)steel D60 forged; (d)steel D60 quenched and tempered

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

表 3.2

Tab. 3.2

材料	状态和组织	应变率 $/s^{-1}$	规定残余应力 $\sigma_{r(0.02)}$/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa	断后伸长率 δ/(%)	断面收缩率 ψ/(%)
45钢 (A组)	正火珠光体+少量铁素体	0.00017(静)	350	720	40.47	60.20
		1000	730	1040	36.00	56.00
58SiMn (B组)	锻造 (1150～1200℃) 珠光体+沿晶少量铁素体	0.00017(静)	560	1080	27.50	45.00
		1300	---	1150	---	---
		2000	---	1240	29.88	47.10
D60 (C组)	锻造 (1100～1150℃) 珠光体+沿晶铁素体	0.00017(静)	560	820	30.00	44.00
		1000	850	1080	---	---
		1700	950	1260	33.00	36.68
D60 (D组)	880℃淬火 420℃回火 回火屈氏体	0.00017(静)	1320	1350	24.00	47.00
		1000	---	1400	---	---
		1200	---	1420	27.30	46.72

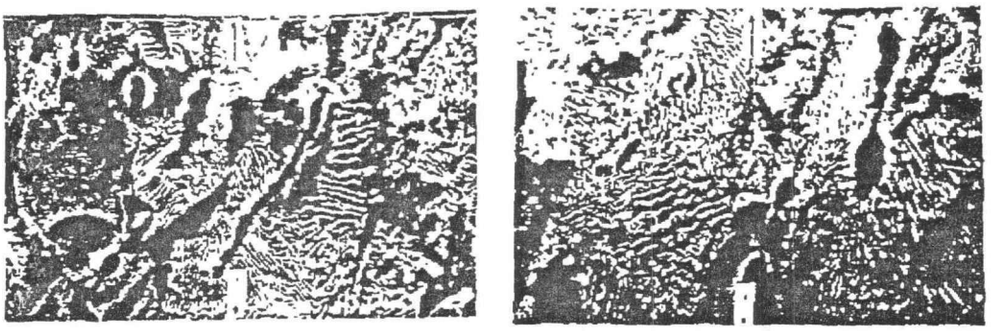
4 断裂时损伤演化过程的观察与分析

在 Hopkinson 拉杆系统上安装一限位装置，使一批拉伸试样在相同应变速率下拉伸至不同的应变量，将这些已拉伸而未断的试样用线切割机沿中心轴线附近切割剖面，然后在制备金相试样时，控制其剖面准确位于中心轴上。在 Olympus 光学显微镜及 Philips 525－2B 扫描电镜、QA－1 型图象分析仪上观察制备好的剖面试样，研究材料在断裂前的损伤演变过程。

首先，在金相显微镜上观察材料受载前的组织及不同应变量下的变形与损伤情况，观察表明，45 钢热轧后为珠光体加铁素体组织；58SiMn 钢锻造态为珠光体加沿晶断续分布的少量铁素体；D60 钢锻造态为珠光体加沿晶铁素体，而淬火加 420℃回火后的组织为回火屈氏体。可知，这四组材料的强度应按 D、B、C、A 顺序降低，这与试验结果基本吻合。但在高应变速率下，由于材料的应变速率敏感性不同，其强度值逐渐接近，这说明静态下对强度贡献少的铁素体组织，由于应变速率提高时其形变强化效果得以充分发挥，使它对强度的贡献增大。

通过彩色金相和扫描电镜观察，证实四组试样动态断裂都是内部损伤（孔洞或微裂纹）积累的结果。在高速拉伸未出现颈缩以前，已观察到试样内部有孔洞产生。孔洞长大到一定尺寸后就停止长大，但孔洞数量随变形量增加而增加。孔洞的分布是不均匀的。颈缩前，由于三轴应力和应力集中造成中心轴附近孔洞数量明显增多。除 45 钢外，孔洞呈长条状，沿拉伸方向长大，横向长大不多，组织不同，孔洞长度也不同。图 4.1 为锻造态 D60 钢及 58SiMn 钢中萌生的孔洞照片。

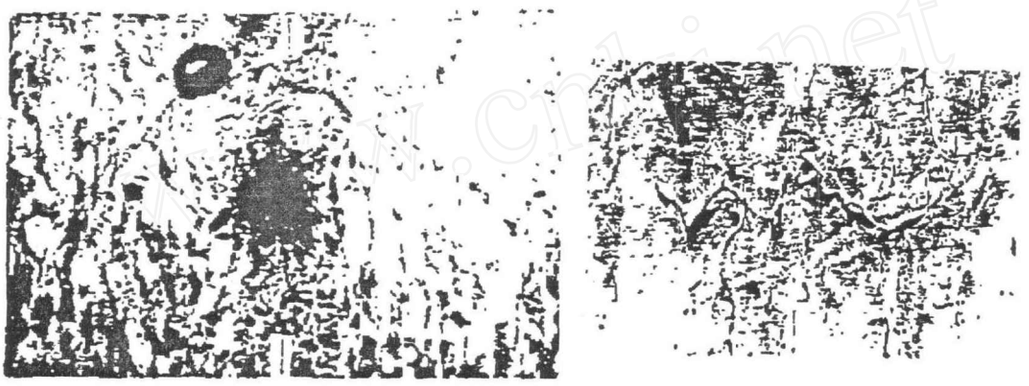
© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) (b)

图 4.1 58SiMn 钢(a),锻态 D60 钢中孔洞的萌生,SEM 2500×

Fig. 4.1 Occurance of voids in steel 58SiMn (a) and forged steel D60, SEM 2500×



(a) (b)

图 4.2 45 钢孔洞聚合(a)及 D60 锻造态试样中孔洞横向连接,SEM 640×

Fig. 4.2 Collection of voids in steel 45 (a) and across connection of voids in forged steel D60 specimen, SEM 640×

孔洞的形核与长大。观察发现，变形初期，孔洞主要在夹杂物界面成核，如 45 钢多在 MnS 夹杂边界形核。夹杂物尺寸愈大，孔洞形核愈早，但孔洞长大到一定尺寸后即停止长大并在其它地方形核。早期形成的孔洞往往不是导致最终断裂的策源地。随变形量增加，或材料原始组织的差别，孔洞还会在晶界、相界、珠光体团边界以及渗碳体片断裂处形成。孔洞长大既可沿着珠光体片层方向（图 4.1b），也可垂直珠光体片层方向，可知，孔洞形核主要是铁素体基体塑性变形受阻，造成局部应力集中的结果。孔洞形成是促使局部应力松弛的原因，而渗碳体片对孔洞形核的影响主要是通过限制铁素体基体变形来体现的。

目前，许多学者都希望通过孔洞萌生的研究来建立孔洞成核的力学判据，从而建立

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

宏观微观相结合的开裂准则。但从本文的观察结果来看，要确定一个孔洞或第一个孔洞萌生的力学模型，对工业用钢来说，意义不大。因为第一个孔洞萌生主要不决定于外加宏观应力，而取决于材料微观组织特征和材料内局部应力集中程度。第一个孔洞的萌生对最终断裂影响不大。

孔洞的会聚长大。实验发现，孔洞密度达到一定程度后，孔洞会通过会聚、长大、连接成宏观裂纹。这个过程是在接近断裂的瞬间完成的，它发生时的应力水平直接决定材料的断裂抗力。实验观察到的孔洞萌生方式有两种：一是聚合长大，如 45 钢比较明显；二是靠自身沿拉伸方向长大，并最终沿晶界横向连接成宏观裂纹。图 4.2 为接近最终断裂时两种会聚方式的剖面扫描照片。图 4.2(a)为 45 钢的轴向剖面，其大孔洞是由微孔洞聚合而成。开始时孔洞为圆形，然后沿拉伸轴方向长大。当达到某种临界载荷时，大孔洞周围急剧萌生许多小孔洞，在缩颈的轴心处形成大孔洞群。图 4.2(b)为 D60 锻造态轴向剖面照片。孔洞一般沿平行轴向的晶界、相界生长。当达到某一临界应力时，相邻条状孔洞沿垂直应力轴的晶界发生横向连接，聚合成照片上可见的沿晶裂纹。

采用剖面法对经过不同变形量但未断裂的试样进行了损伤演化过程的定量测量。测量在图象仪上进行，测量结果如图 4.3 所示。纵坐标 f_v 表示孔洞所占示场的体积百分比，横坐标 $\varepsilon_{\text{真}}$ 表示真实应变量。变形初期（$\varepsilon_{\text{真}}<10\%$），B 组试样损伤严重，A 组试样损伤轻微。随着 $\varepsilon_{\text{真}}$ 增大，两组试样损伤程度差别增大。可见，两组试样的损伤演化过程有很大差别。曲线上均存在一个转折点，根据转折点将损伤演化过程分为两个阶段。第一阶段，B 组试样的 $df_v/d\varepsilon_{\text{真}}$ 明显高于 A 组，而第二阶段 A 组试样的 $df_v/d\varepsilon_{\text{真}}$ 却明显高于 B 组。根据孔洞萌生与聚合过程的分析，曲线的第一阶段正对应于萌生过程，而第二阶段对应于聚合过程。了解这一特征有利于建立损伤演化方程。

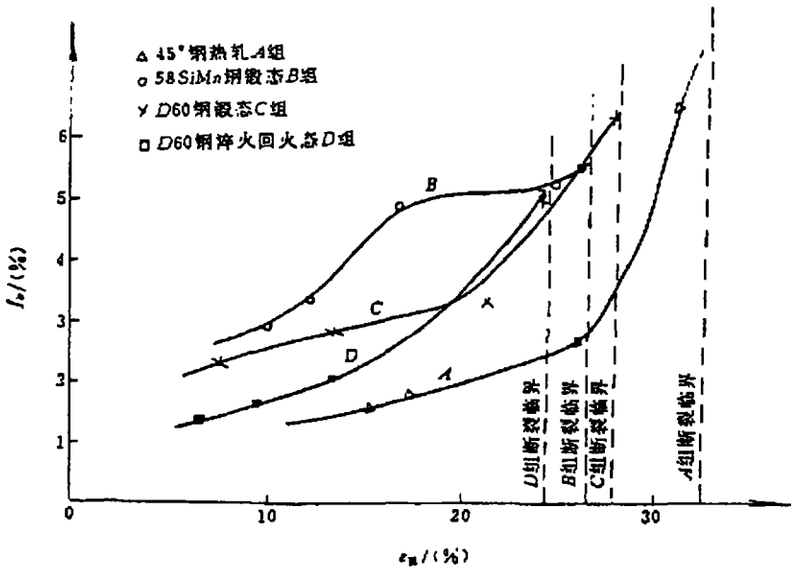


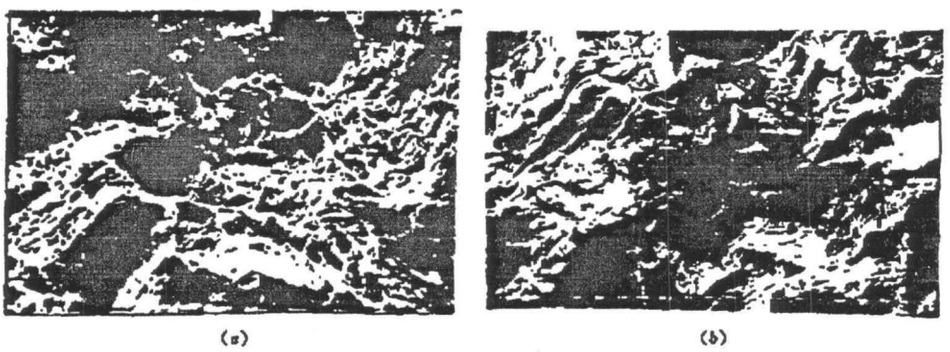
图 4.3　中心剖面损伤面积比 f_v 与真应变 $\varepsilon_{\text{真}}$ 的关系

Fig. 4.3　Damaged area fraction f_v on center section versus real strain

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

可根据材料成分、组织的不同来解释两组材料损伤演化过程的差别，而损伤演化过程的差异又可进一步说明两组材料应变速率敏感性不同的原因。A组材料45钢，为铁素体加珠光体组织，当承受高速载荷时，由于迟屈服，塑性变形在较高应力下启动。此时同时参予滑移的滑移系多，多数晶粒能同时参予变形。这种变形有力地松弛了局部应力集中，除一些大夹杂附近产生少量孔洞外，一般损伤轻微。这就是第一阶段 $df_v/d\varepsilon_{pl}$ 低的原因。由于高速加载，均匀变形阶段的增长，形变强化得以充分发挥，动态断裂强度提高，断裂时的真实应变量也大，所以在接近断裂载荷时，已充分强化的铁素体以及珠光体会同时萌生大量孔洞，并迅速会聚至断裂。这就是第二阶段 $df_v/d\varepsilon_{pl}$ 很高的原因。宏观表现为动态强度明显高于静态强度。B组试样58SiMn钢，组织为珠光体加断续网状铁素体，其珠光体基体受到Si、Mn等合金元素的强化，其静强度比A组高得多，但塑性较差。当受到高速载荷作用时，由于珠光体中渗碳体片的制约，在产生加工硬化的同时会出现局部高应力集中区。为了松弛应力集中，会沿晶界、相界等形式如图4.1(a)所示的长条形孔洞。因此第一阶段该钢 $df_v/d\varepsilon_{pl}$ 比A组高得多。但在第二阶段，因其会聚过程是通过沿横向晶界连接而进行的，这种横向连接使 f_v 虽增加不大，但易造成较长的裂纹使承载能力迅速下降而最终断裂，故这类钢断裂时的 ε_{pl} 和临界损伤度 f_v 都比A组小得多。宏观表现为对应变速率不敏感，动、静态性能相差较小。

D、C两组试样损伤演变过程介于A、B两组之间，这也是由其成分、组织决定的。D、C试样同为D60钢，但D组为回火屈氏体组织，C组为珠光体加沿晶铁素体。从组织特征看，C组接近于A组，只是铁素体量少，夹杂较多；D组接近于B组，只是它是通过热处理而强化。对比损伤演化曲线，C组曲线完全类似于A组，只是第一阶段损伤度大，断裂时临界损伤度小，这正是由于C组试样碳含量高、夹杂物多的结果。由于经过热处理强韧化，D组试样初始损伤度低于C组，但 $df_v/d\varepsilon_{pl}$ 和B组一样明显高于A组，而且在比较小的临界真应变下发生断裂，断裂时的临界损伤 f_v 小。这两组材料的损伤特征决定了它们动态力学性能对应变率的敏感性。C组敏感性较大、D组较小。



(a) (b)

图4.4 58SiMn钢断口微观形貌

a—动拉伸断口，SEM 640×； b—静拉伸断口，SEM 640×

Fig. 4.4 Micro fracture morphology of steel 58SiMn

a—Dynamic tension fracture, SEM 640×； b—Static tension fracture, SEM 640×

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

由于损伤演化过程不同，最终导致断口特征也存在很大差别。本文对四组材料的动、静态拉伸断口在扫描电镜下进行了观察与对比。45 钢的动、静态拉伸宏观断口均为杯锥状断口，微观均为韧窝，只是动态断口因韧窝密集而小些，这是孔洞萌生更多的缘故。58SiMn 钢的动、静拉伸断口有明显差别：宏观上，静态为结晶状断口，动态为杯锥状断口；微观上，动态为韧窝加沿晶韧窝，而静态为解理加沿晶断。这说明 58SiMn 钢随应变率增加，韧性断口成分增加。对 D60 钢，不论是锻造态还是回火态，其断口均为纤维状，微观形貌为密集韧窝。图 4、4 为 58SiMn 钢拉伸断口微观形貌。

5 结论

材料的性能与应变率有很大关系。实验分析表明，某些材料对应变率很敏感，动、静态性能之间有很大差别，某些材料对应变率不敏感，动、静态性能相近，而另一些材料则介于两者之间。因此，研究材料的应变率效应有重要意义，它可为高应变速率下选材、用材提供依据。对于受载构件，为保证其安全性，应选用应变率敏感性高、强度和韧性好的材料。相反，对于榴弹类材料，为使其爆炸时获得较多而均匀的破片，则应选用诸如 B 类材料，或如 D 类材料采用热处理强化，使其在变形初期出现大量均匀分布的损伤，它可起到预制破片的作用。

参考文献

1 Campbell J D, Dynamic plasticity: macroscopic and microscopic aspects. Mat. Sci. Engng, 1973 (12): 3～21

2 Kolsky H. Proc. Phys. Soc (London), 1949 (B62): 676

3 段祝平，孙瑀清等. 力学进展, 1980 (10): 1

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE TENSILE PROPERTIES AND DAMAGE MECHANISM OF THREE ALLOY STEELS AT HIGH STRAIN RATE

Yang Daomang　Yu Jue　Li Zelong

(Beijing Institute of Technology)

Duan Zhuping

(Institute of Mechanics, Chinese Academy Sciences)

Abstracts　The dynamic properties of three steels D60, 58SiMn and No. 45 are systematically studied at high strain rate by using a well-designed SHTB equipment. The experimental results show that the dynamic yield stress and tensile elogation of all tested materials are higher than their static values, respectively. However, different materials indicate different strain-rate sensitivity. In addition, the dynamic process of damage evolution is studied in detail with the metallographic technique for observing the cross and logitudinal sections of the tested specimen.

Key words　Split Hopkinson Tension Bar, dynamic tensile properties, damage evolution, high strain rate

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