

汽车薄钢板应力应变曲线及屈服轨迹的研究¹⁾

吴向东 万 敏 周贤宾

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘要 采用十字形双向拉伸的实验方法对两种汽车用薄钢板 BH220 和 SPEN 进行了不同加载路径下的双向拉伸试验, 得到了不同应力状态下的应力应变关系曲线, 同时, 根据单位体积塑性功相等的原则, 确定了两种钢板等效塑性应变从 0.2%~2% 的实验屈服轨迹. 结果分析表明: 不同加载路径下板料的应力应变关系不同, 随着加载比例由单拉到等双拉状态, 板料的硬化指数逐步增大; 实验屈服轨迹呈外凸性, 且以等双拉为界的上下部分屈服轨迹不对称, 随着变形程度的增加, 屈服轨迹向外扩大, 但单拉时强化程度最小, 而等双拉时最大. 对 BH220 和 SPEN 钢板的实验屈服轨迹与几种常用理论屈服轨迹的比较发现, Hosford 各向异性屈服准则的理论轨迹与实验结果最为接近, Hill48 准则与实验结果相差最大, 此外一向被视为只适用于各向同性材料的 Mises 准则与实验结果也较为接近, 其他几个屈服准则的理论屈服轨迹与实验点相差较大.

关键词 双向拉伸试验, 十字形试件, 应力应变曲线, 屈服轨迹, 各向异性板料

引 言

板料成形技术在汽车、航空航天、家电等领域占有重要的地位. 汽车覆盖件要通过落料、拉深、切边、翻边等多道工序才能完成零件的加工, 在这个过程中, 板料的变形行为会对零件的尺寸和精度产生很大的影响. 因此, 如何准确描述板料的本构关系以及预测成形缺陷如破裂、起皱、回弹的产生, 以便更好地优化模具和工艺, 具有重要的理论和实际意义.

在板料本构关系的研究中, 如果确定了材料的初始屈服面, 那么结合一定的强化规律, 根据 Drucker 公设, 就可以推导出相应的本构关系式. 因此, 对屈服行为的研究是研究板料成形过程中变形行为的关键问题之一. 特别地, 由于板料在生产时经过多次辊轧和热处理, 一般都具有一定的变形取向而呈现出明显的各向异性, 它对板料的塑性变形行为有着显著的影响, 因此必须考虑各向异性来进行研究^[1].

从 1948 年 Hill^[2] 提出 Hill48 各向异性屈服准则开始, 很多学者^[3~7] 相继提出关于各向异性板料的屈服准则. 这些新的屈服准则的出现对各向异性板料的屈服行为的理论描述起到了一定的改进作用, 但是同时也带来了一些问题, 比较突出的问题就是屈服准则准确度及适用范围.

从 20 世纪 60 年代开始, 各国学者对各向异性

屈服准则进行了大量的实验研究, 研究方法主要有两种, 一种是利用平面应变拉伸、平面应变压缩、双向等拉以及采用带槽试件进行顺纤维或横纤维的单拉等试验来得到一些特征点^[8]. 另一种是采用薄壁管进行拉伸-内胀或拉伸-扭转的试验^[9,10]. 由于板料成形主要在面内双向应力状态下以拉应力作用、沿不同的加载路径而成形, 这些试验研究方法由于其本身的局限性, 并不适合于研究各向异性板料的成形过程.

在研究不同加载路径下各向异性板料变形行为的试验方法中, 采用十字形试件进行双向拉伸试验是目前的研究热点^[11~16]. 因为该方法可通过控制两轴的载荷或位移大小, 使中心区得到不同的应力应变状态, 从而得到不同加载路径下双拉区的任意屈服点.

本文在十字形双向拉伸试验系统上, 采用开缝型十字形试件, 对两种汽车用薄钢板进行不同加载路径下的双向拉伸试验, 以此确定不同加载路径下的应力应变曲线和实验屈服轨迹, 并对实验屈服轨迹与几种常用的理论屈服轨迹做了对比分析.

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本文选用上海宝钢产 BH220 钢板(厚度 0.74 mm) 和 SPEN 钢板(厚度 0.73 mm) 两种汽车薄钢板进行

2003-04-22 收到第 1 稿, 2004-04-17 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金(59975006)和华中科技大学塑性成型模拟及模具技术国家重点实验室基金(99-2)资助项目.

试验. 其中 BH220 为烘烤硬化钢, 特点是强度高, 抗凹性好, 用于汽车的车门、顶盖、发动机罩等. SPEN 为深冲钢, 具有良好的成形性, 主要用于汽车

的后驱、车顶、尾段板等等. 两种板料的力学性能见表 1.

表 1 BH220 和 SPEN 钢板力学性能参数

Table 1 Mechanical properties of BH220 and SPEN sheets

Material	Cutting direction	Yield strength	Ultimate tensile strength	Young's modulus	Strain hardening exponent	Strength constant	Lankford coefficient
		σ_s /MPa	σ_b /MPa	E /GPa	n value	K /MPa	R value
BH220	0°	248.0	380.0	185.3	0.187	622	1.910
	45°	257.0	389.0	193.3	0.179	630	1.550
	90°	241.0	361.0	267.7	0.171	590	2.330
SPEN	0°	216.0	333.0	267.5	0.194	556	1.445
	45°	225.5	342.5	256.2	0.187	564	1.328
	90°	220.0	331.5	280.3	0.191	551	2.024

1.2 试验方法

采用北航自行研制开发的由微机控制的三轴加载试验系统 [17,18] 对十字形试件进行双向拉伸 (试件形状见图 1), 控制方式为载荷控制, 加载比例 (轧制方向与横向的比例) 分别为 4:0, 4:1, 4:2, 4:3, 4:4, 3:4, 2:4, 1:4, 0:4, 试验采集的数据为试件十字臂上的载荷和试件中心区的应变.

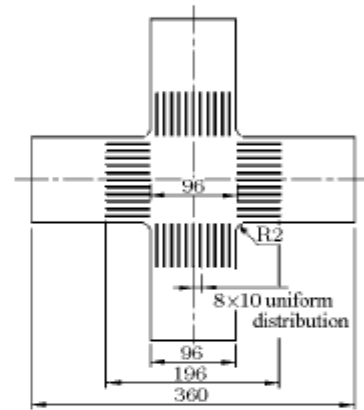


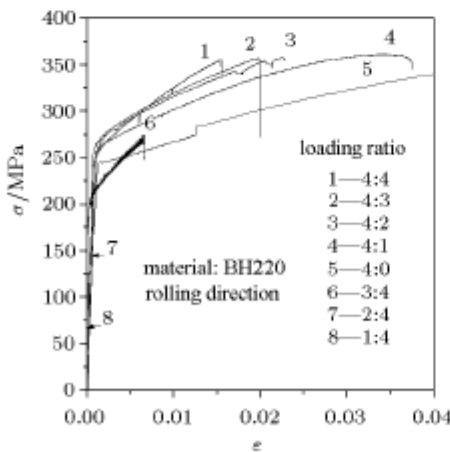
图 1 臂上开缝型十字形试件

Fig.1 Cruciform specimen with slots in the arms

2 不同加载路径下的应力应变曲线及其分析

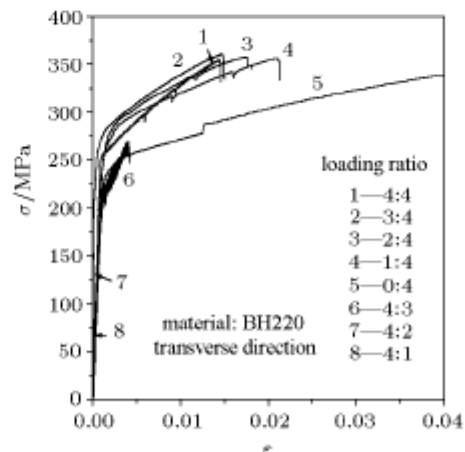
本文针对两种钢板做了 7 种不同加载路径下的双向拉伸试验, 整个试验过程中加载主轴和变形主轴始终保持重合. 图 2, 图 3 为两种钢板在不同加载路径下得到的双向拉伸真实应力 - 对数应变曲线,

其中的加载比例为轧制方向与垂直于轧制方向的载



(a) 轧制方向

(a) Rolling direction



(b) 垂直于轧制方向

(b) Transverse direction

图 2 不同加载路径下 BH220 钢板的真实应力应变曲线

Fig.2 True stress-true strain curves of BH220 for different loading ratios

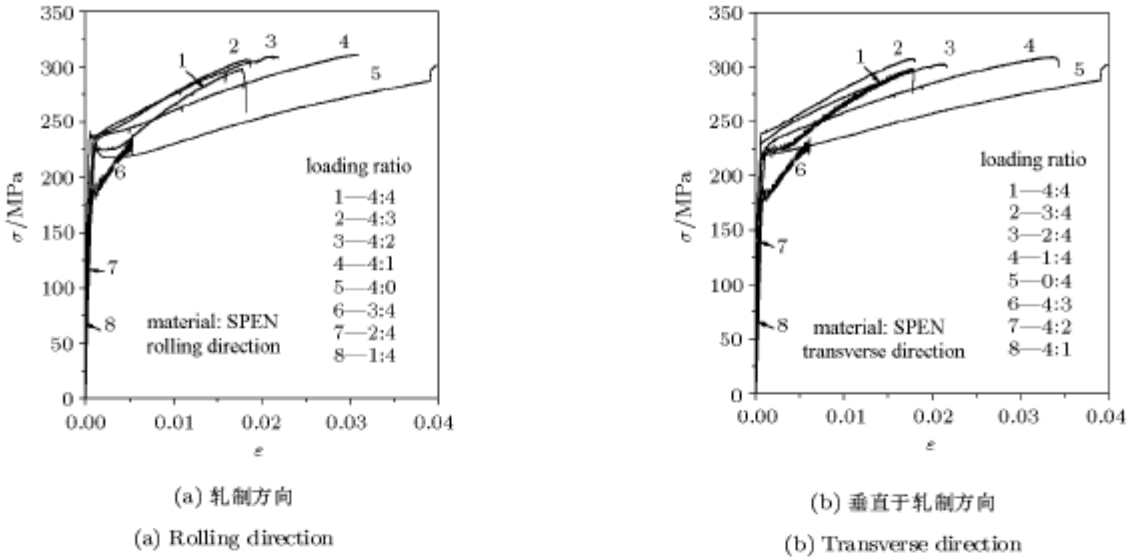


图 3 不同加载路径下 SPEN 钢板的真实应力应变曲线
Fig.3 True stress-true strain curves of SPEN for different loading ratios

荷的比例。

由图 2, 图 3 可以看出, 不同加载路径下板料的应力应变关系不同, 而且, 随着加载比例接近等双拉状态, 板料的硬化系数也逐渐增大. 此外, 两种钢板在本文所述十字形双向拉伸试验方案下, 试件中心区可以达到比较大的变形, 在所有加载路径下应力应变曲线中, 变形最小的等双拉路径下中心区产

生的等效塑性应变达到 4%.

3 实验屈服轨迹及其分析

根据试验得到的应力应变曲线, 本文采用塑性功相等的原则, 计算得出 BH220 和 SPEN 钢板当等效塑性应变为 0.2%, 1% 和 2% 时双拉区的屈服轨迹, 如图 4 所示.

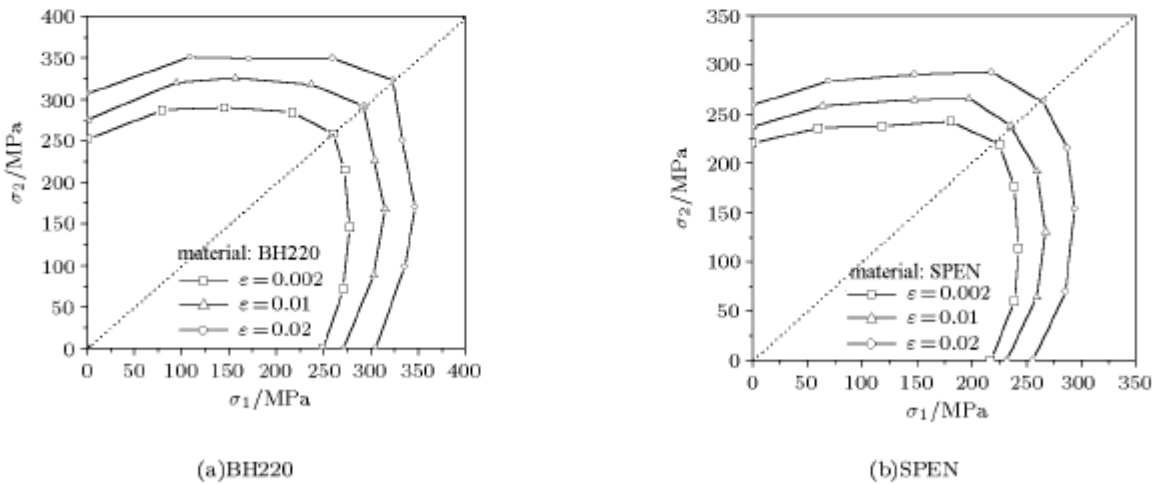


图 4 BH220 和 SPEN 钢板实验屈服轨迹
Fig.4 Experimental yield loci of BH220 and SPEN steel sheets

由图可见, 两种钢板不同变形阶段的实验屈服轨迹是外凸的, 应力状态由单拉到等双拉状态, 不同变形阶段的实验屈服点之间的间隔不同, 单拉时

最小, 等双拉时最大, 表明随着变形程度的增加, 屈服轨迹向外扩大, 单拉时强化程度最小, 而等双拉时最大. 此外由于板料面内各向异性的存在, 以等

双拉为界的上下部分屈服轨迹不对称.

4 实验屈服轨迹与理论屈服轨迹的比较和分析

在已有的各向异性理论屈服准则中, 本文选取几种常用的准则 Hill48, Hill90, Hosford 和 Barlat89 屈服准则, 同时选取 Mises 屈服准则, 与两种钢板的实验屈服轨迹进行比较.

图 5 为 BH220 钢板不同应变硬化阶段时几个屈服准则的理论轨迹和实验屈服轨迹的对比. 由于曲线较多, 对每种塑性应变下的曲线分两个图进行对

比.

由图可见, Hill48 屈服轨迹曲线比试验点高出很多, Hill90 准则的结果在等双拉点与试验点吻合得很好, 但其他部分与试验点相差较大; Barlat89 准则在轨迹的上半区与试验点接近, 但下半区相差较大; Mises 准则在等双拉点附近与试验点相差较大, 其他部分较为接近; 总体上看, Hosford 准则与试验点吻合得较好, 在以等拉线为界的上半区试验点轨迹与 Hosford 准则轨迹接近, 而在下半区则稍小于 Hosford 准则轨迹.

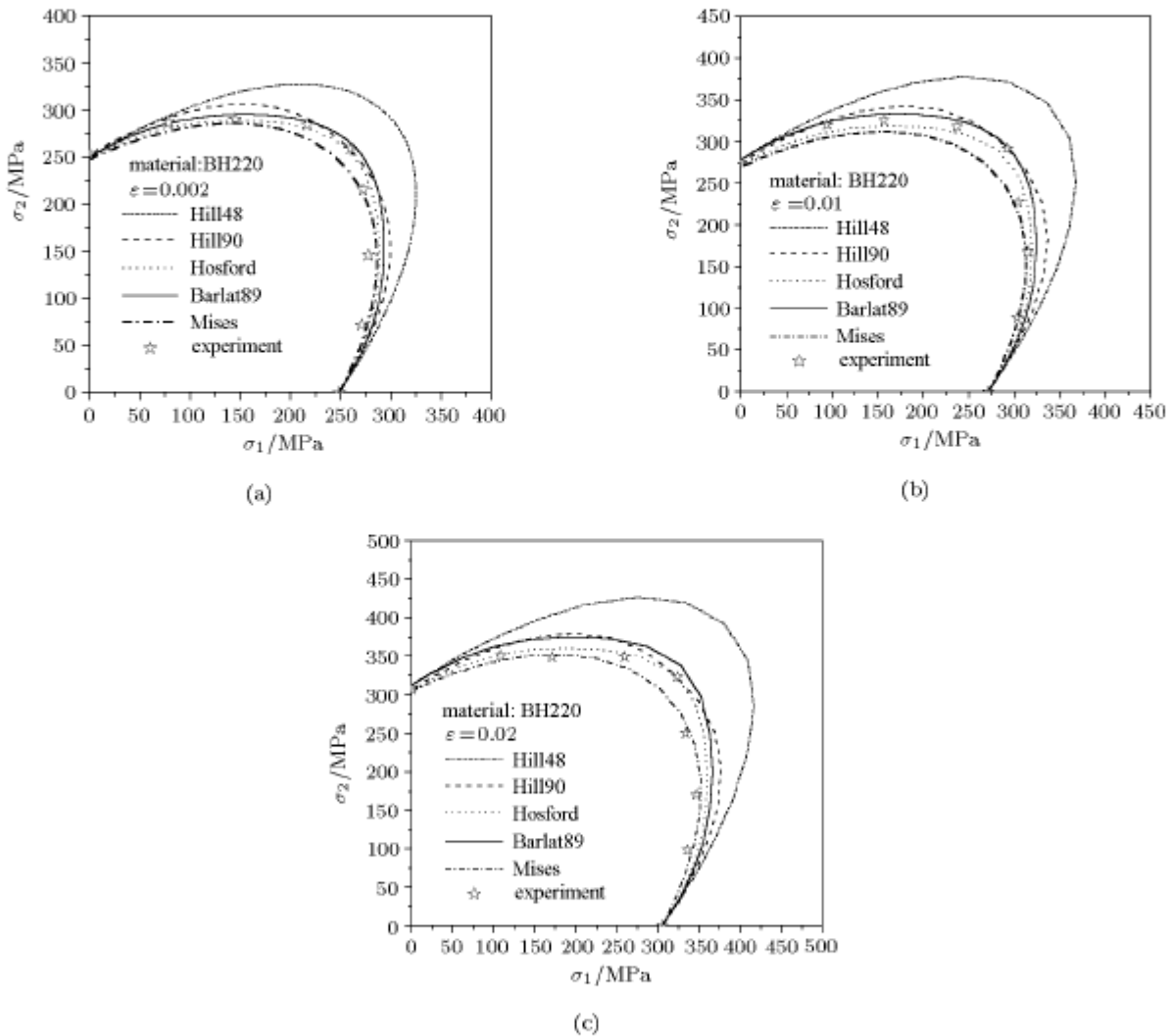


图 5 等效塑性应变为 (a)0.002,(b)0.01 和 (c)0.02 时 BH220 钢板实验屈服轨迹和理论轨迹的比较

Fig.5 Comparison of experimental yield points of BH220 steel sheet and existing yield loci for equivalent plastic strain

(a) 0.002, (b) 0.01 and (c) 0.02

图 6 为 SPEN 钢板不同硬化阶段时几个屈服准则的理论轨迹和实验屈服轨迹的对比. 由图可见, Hosford 屈服准则与试验点最接近, 其次是 Mises,

Barlat89, Hill90 等准则, Hill48 准则的理论轨迹与试验点相差最大. 这个结果和采用 BH220 钢板实验得到的结果类似.

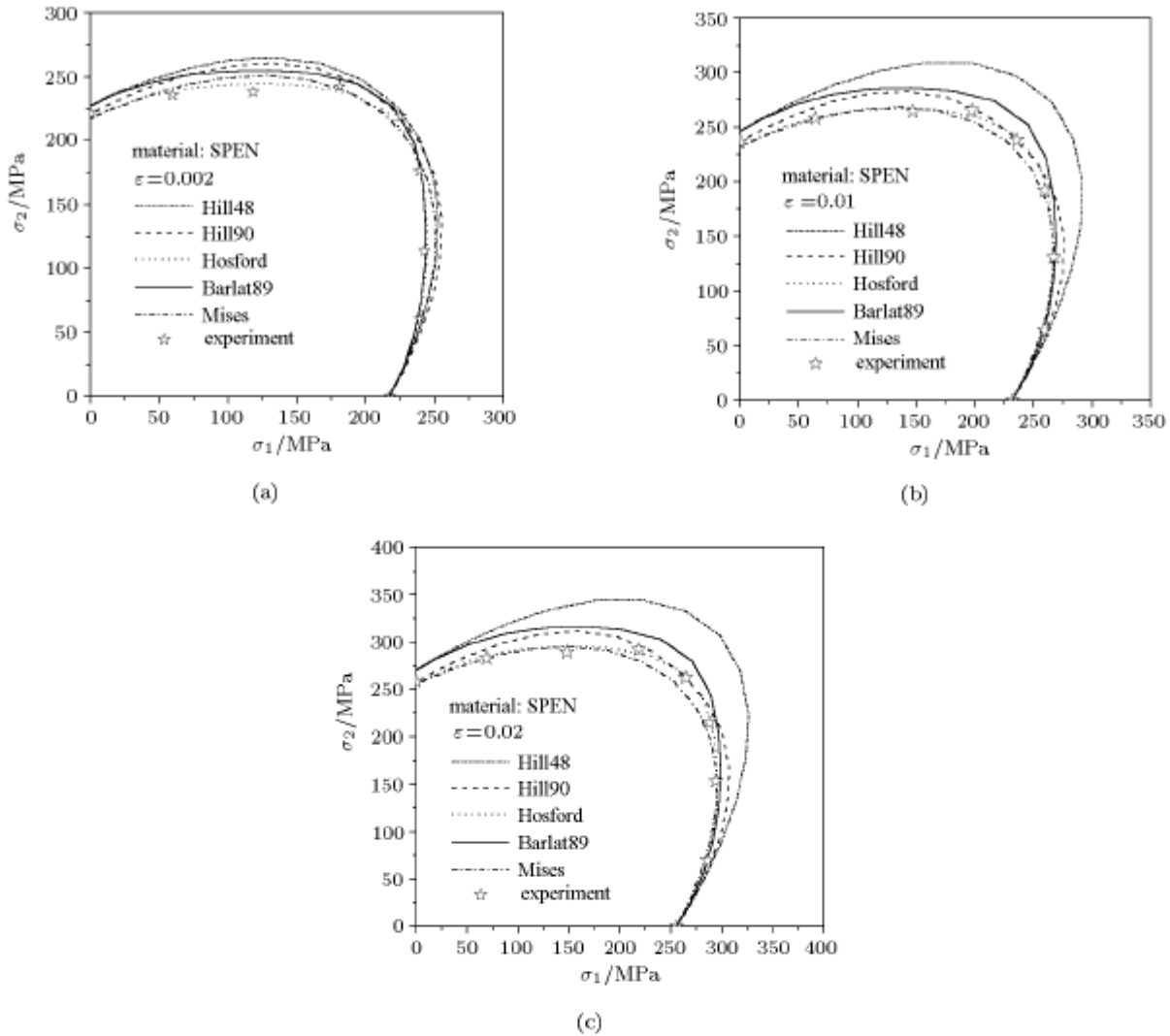


图 6 等效塑性应变为 (a)0.002, (b)0.01 和 (c)0.02 时 SPEN 钢板实验屈服轨迹和理论轨迹的比较

Fig.6 Comparison of experimental yield points of SPEN steel sheet and existing yield loci for equivalent plastic strain

(a)0.002, (b) 0.01 and (c) 0.02

5 结 论

十字形双向拉伸的试验表明,不同加载路径下板料的应力应变关系不同,且随着加载比例接近等双拉状态,板料的硬化指数增大。

对两种汽车用薄钢板 BH220 和 SPEN 的实验屈服轨迹分析可以看到,两种钢板不同变形阶段的实验屈服轨迹是外凸的,由于各向异性的存在,双拉区的实验屈服轨迹以等双拉为界并不对称。并且随着变形程度的增加,屈服轨迹向外扩大,单拉时强化程度最小,等双拉时最大。

通过对 BH220 和 SPEN 钢板的实验屈服轨迹与几种常用理论屈服轨迹的比较发现, Hosford 各向异性屈服准则的理论轨迹与实验结果最为接近, Hill48 准则与实验结果相差最大,此外一向被视为只

适用于各向同性材料的 Mises 准则与实验结果也较为接近,其他几个屈服准则的理论屈服轨迹与实验结果相差较大。

参 考 文 献

- 1 万敏,周贤宾. 复杂加载路径下板料屈服强化及成形极限的研究进展. 塑性工程学报, 2000, 7(2): 35~39 (Wan Min, Zhou Xianbin. Research progress on the yielding, hardening and forming limit of sheet metals under complex loading paths. *Journal of Plasticity Engineering*, 2000, 7(2): 35~39 (in Chinese))
- 2 Hill R. Theoretical plasticity of textured aggregates. *Math Proc Camb Phil Soc*, 1979, 85(1): 179~191
- 3 Hill R. Constitutive modeling of orthotropic plasticity in sheet metals. *J Mech Phys Solids*, 1990, 38(3): 405~417
- 4 Hill R. A user-friendly theory of orthotropic plasticity in sheet metals. *Int J Mech Sci*, 1993, 35(1): 19~25

- 5 Logan RW, Hosford WF. Upper-bound anisotropic yield locus calculations assuming $\langle 111 \rangle$ -pencil glide. *Int J Mech Sci*, 1980, 22(7): 419~430
- 6 Barlat F, Lian J. Plastic behaviour and stretchability of sheet metals. *Int J Plasticity*, 1989, 5(1): 51~66
- 7 Karafillis A, Boyce BC. A general anisotropic yield criterion using bounds and a transformation weighting tensor. *J Mech & Phys Solids*, 1993, 41(12): 1859~1886
- 8 Lee D, Backofen WA. An experimental determination of the yield locus for titanium and titanium alloy sheet. *Trans Met Soc AIME*, 1966, 236: 1077~1084
- 9 Hecker SS. Yield surfaces in prestrained aluminum and copper. *Metall Trans*, 1971, 12(2): 2077~2086
- 10 Phillips A, Liu CS, Justusson JW. An experimental investigation of yield surfaces at elevated temperature. *Acta Mech*, 1972, 14(1): 119~146
- 11 Tozawa Y, Nakamura M. Methods of testing in-line compression of sheets. *Sosei to Kato*, 1967, 8: 444~448
- 12 Monch E, Galster. A method for producing a defined uniform biaxial tensile stress field. *Brit J Appl Phys*, 1963, 14: 810~812
- 13 Shiratori E, Ikegami K. Experimental study of the subsequent yield surface by using cross-shaped specimens. *J Mech Phys Solids*, 1968, 16(1): 373~394
- 14 Kelley DA. Problems in creep testing under biaxial stress system. *J Strain Anal*, 1976, 11(1): 1~6
- 15 Ferron G, Makinde A. Design and development of a biaxial strength testing device. *J Testing Eval*, 1988, 16(3): 253~256
- 16 Kuwabara T, Ikeda S, Kuroda K. Measurement and analysis of differential work hardening in cold-rolled steel under biaxial tension. *J Mat Proc Tech*, 1998, 80~81(8): 517~523
- 17 万敏, 洪强, 吴向东等. 十字形试件双向拉伸试验系统的建立及加载精度分析. *机械工程学报*, 2001, 37(1): 57~62 (Wan Min, Hong Qiang, Wu Xiangdong, et al. Establishment of biaxial tensile test of cruciform specimen and analysis of accuracy. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2001, 37(1): 57~62 (in Chinese))
- 18 吕晓东, 吴向东, 万敏等. 十字形试件双向拉伸试验系统的 PID 控制. *中国机械工程*, 2003, 14(8): 631~634 (Lü Xiaodong, Wu Xiangdong, Wan Min, et al. PID control for testing system of biaxial tensile test of cruciform specimen. *China Mechanical Engineering*, 2003, 14(8): 631~634 (in Chinese))

STRESS-STRAIN CURVES AND YIELD LOCI OF AUTO STEEL SHEET¹⁾

Wu Xiangdong Wan Min Zhou Xianbin

(School of Mech. Eng. and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract On the basis of biaxial tensile experimental system, two types of steel sheet were studied under different loading paths using optimized cruciform specimens with slots in the arms. According to the experimental true stress-logarithmic strain curves, the stress-strain curves of steel sheet vary with the stress state, and the strain-hardening exponent become larger when the load ratio is near the ratio 1:1.

The contours of experimental yield loci for two steel sheets from 0.2% to 2% plastic strain were determined based on the equivalent plastic work principle. It is found that the shape of yield loci does not show symmetry along equibiaxial stretching path because of anisotropic mechanical properties.

The geometry of the experimental yield loci were compared with the yield loci calculated from several existing yield criteria and the analytical result shows that the Hosford yield criterion describes the general trends of experimental yield loci of steel sheets very well, whereas the Hill48 yield criterion overestimated the yield stress in all the contours. In addition, the Mises yield criterion that is generally used in isotropic materials also gives good fitness to the experimental yield loci.

Key words biaxial tensile test, cruciform specimen, stress-strain curves, yield locus, anisotropic sheet metal

Received 22 April 2003, revised 17 April 2004.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (59975006) and the State Key Laboratory of Plastic Forming Simulation and Die & Mould Technology (99-2) of HUST.