

1997年7月

钢 铁 研 究

第 4 期(总第 97 期)

July 1997

Research on Iron &amp; Steel

No. 4 (Sum 97)

# 表层弥散预应变硬化对薄钢板变形局部化的影响\*

沈 还 陈光南 李国琛

(中国科学院力学研究所)

**摘 要** 试验研究了具有一定形貌及粗糙度的激光毛面薄钢板及同材质普通薄钢板的失稳行为。结果表明激光毛面薄钢板变形局部化过程明显滞后于普通板,其表层弥散分布的预应变硬化点在稳定薄板变形、延缓变形局部化过程中起到重要作用。

**关键词** 薄钢板 激光板 弥散预应变硬化 变形局部化

## EFFECT OF SURFACE DISPERSED PRESTRAIN HARDENING ON STEEL SHEET ON STRAIN LOCALIZATION

Shen Huan Chen Guangnan Li Guochen

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

**Synopsis** The plastic instability behavior of the laser-textured steel sheet with defined surface features is investigated. Comparison is made with the normal sheet taken from the same coil of metal sheet. It is found that, the laser-textured sheet has the tendency to postpone strain localization; the dispersed prestrain hardening on the surface of laser-textured sheet plays an important role in stabilizing deformation and delaying the process of strain localization.

**Keywords** steel sheet laser-textured sheet dispersed prestrain hardening strain localization

### 1 前 言

变形局部化是薄板拉伸断裂的先兆,是薄板成形过程正常进行的主要障碍。薄板拉伸变形的局部化研究课题历来为学术界和工程界所关注。近年来发展起来并已在薄板冷轧生产中成功应用的激光毛化技术,除了可明显提高轧制速度和轧辊使用寿命<sup>[1]</sup>,还在改善所轧薄板的表面质量、成形性能及涂漆光亮度方面显示了独特优势,已有不少研

究工作<sup>[1~3]</sup>。关于激光毛面薄钢板的优良成形性能,一般认为是由于它有规则的凹坑与凸包结构、较低的摩擦系数和良好的润滑条件,并未注意到激光毛面板表面特征在薄板变形局部化过程中的作用。为此,本文试验研究了具有一定形貌和粗糙度特征的激光毛面薄钢板(简称激光板)与同材质普通薄钢板(简称普通板)的拉伸变形失稳和损伤特征,探讨了激光板变形局部化进程得以延缓的原因。

\* 本文得到国家和北京市自然科学基金资助(N 99572074, 2962001)

联系人:沈还,北京市(100080)中国科学院力学研究所LNM 开放实验室

## 2 试验材料与方法

本试验材料选用 0.4mm 厚的退火 08F 冷轧钢板。钢中各元素含量 (wt%) 为: C 0.08, Mn 0.30, Si 0.03, S 0.04, P 0.04, 余量 Fe。将同一板卷分为两部分, 在同一台四辊轧机上, 采用相同工艺条件, 用激光毛化辊与普通砂轮打磨辊分别轧制, 压下量均为 12.5%, 最终板厚 0.35mm。激光板表面均布着环形微坑, 微坑直径约为 200 $\mu$ m, 微坑中心距离约为 250 $\mu$ m, 它们是冷轧过程中激光毛化辊上的凸包与凹坑复制到板表面上形成的, 其纵、横两个方向的表面粗糙度值  $R_a$  分别为 1.1 $\mu$ m 和 1.2 $\mu$ m。普通板表面的形貌为轧向条纹, 其纵、横方向的表面粗糙度分别为 0.70 $\mu$ m 和 1.0 $\mu$ m。

拉伸试样沿轧制方向切取, 试验平行部长度为 75mm, 宽度为 12.5mm。拉伸试验在 Instron 1195 试验机上进行, 十字头移动速度为 1mm/min, 记录纸记录位移与载荷曲线。试验板的力学性能见表 1。两种板的强度性能相似, 延伸率却有显著差别。

表 1 试验板的力学性能

类别	编号	板厚 (mm)	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	延伸率 (%) ( $l_0=50$ mm)
激光板	L	0.35	393	408	11.4
普通板	G	0.35	398	410	2.4

为了揭示试验板内空洞随变形量的变化规律, 将试样分别拉伸到不同应变水平后取下, 在试样平行部分最大变形处切取金相试样, 磨抛其纵截面, 在日立 S570 扫描电镜下逐个视场拍摄试样颈区及其相邻区域的空洞形貌照片; 空洞面积百分比的统计测量在剑桥 Q520 图像分析仪上进行。

激光板的动态拉伸试验在 S570 扫描电镜上进行, 以观察其板面形貌在变形过程中的变化规律。

## 3 结果与分析

### 3.1 试验板的拉伸特征

图 1 所示为激光板与普通板的名义应力、应变曲线。在加载阶段, 试样变形基本均匀; 超过最大载荷后, 变形逐渐局限于试样中部区域。为了充分揭示两种试样的非均匀变形特征并兼顾其变形均匀性, 本文计算名义应变所用标距长度为 10mm, 这一尺度与分散失稳变形区的范围相当。

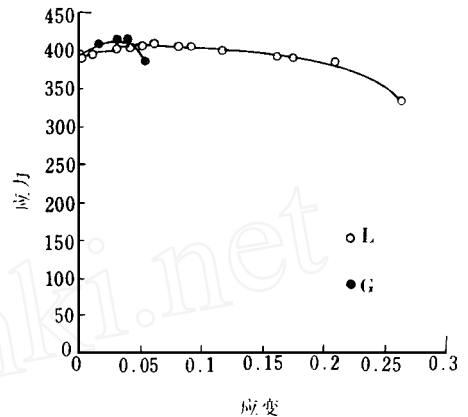


图 1 试验板的名义应力—应变曲线

在最大载荷点, 普通板试样所对应的应变为 0.03, 超过最大载荷之后, 其承载能力迅速下降(图 1)。试样厚向减薄量陡然增加, 而其宽向的收缩仅略有变化并且始终低于厚向的变化(图 2(a)), 变形局部化过程发展十分迅速。

激光板试样的最大载荷应变为 0.06。最大载荷之后, 特别是在 0.06~0.21 的应变范围内, 激光板试样宽向的变化始终大于厚向的变化, 且厚向的变化相当平缓, 直至应变大于 0.21, 厚向的减薄才迅速增加(图 2(b))。此外, 激光板的承载能力下降非常缓慢, 其极限变形能力亦大大高于普通板。

### 3.2 试验板的失稳行为

激光板与普通板表现出显著不同的失稳

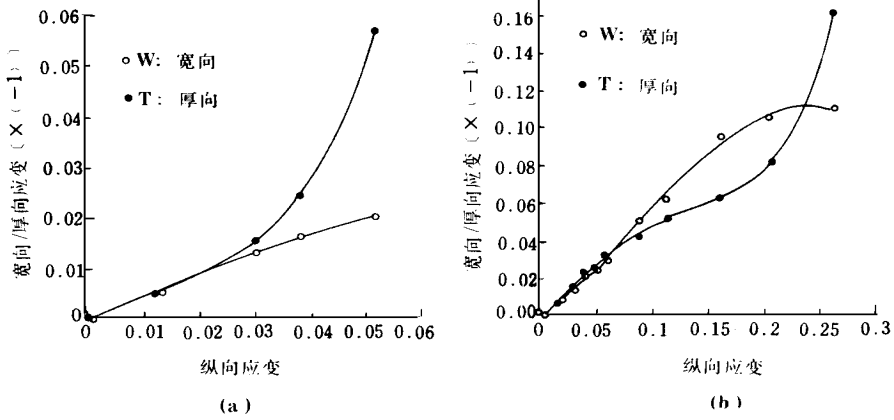


图2 试验板宽向、厚向应变与纵向应变的关系

(a) 普通板 (b) 激光板

特征。当试样加载至最大载荷时，普通板中部表面很快显现两条交叉的与拉伸轴约呈60度角的明锐剪切带（集中失稳颈），似无明显的分散失稳阶段（图3(a)），随后的变形完全集中在狭窄的剪切带内直至断裂发生。激光板有明显的分散失稳阶段。最大载荷后在激光板试样中部会相继出现多条剪切带，形成了一个宽阔的剪切变形区，其宽度约是普通板剪切带宽度的10倍左右（图3(b)），变形在剪切区内不同剪切带间交替进行，逐渐形成明显的分散失稳颈。当某一剪切带内变形无法再转移出去时，集中失稳发生，变形才完全被限制于此剪切带内直至断裂。显然，能够

形成宽阔的剪切变形区是变形局部化过程得以延缓的关键。

### 3.3 试验板的空洞演化规律

已有的试验研究表明：应变的局部化过程与其内部空洞的演化规律密切相关<sup>[4,5]</sup>。

图4是两种试验板中空洞面积分数随应变的变化曲线。从图4可以看出，尽管激光板与普通板的初始空洞含量相同，但其随应变的演化规律存在显著差异。载荷失稳（普通板与激光板的相应应变分别为0.03和0.06）之后，普通板中空洞的面积分数增长速率急剧上升（图4），且这种快速增长仅局限于集中失稳颈区的狭窄范围之内。由图5可以看

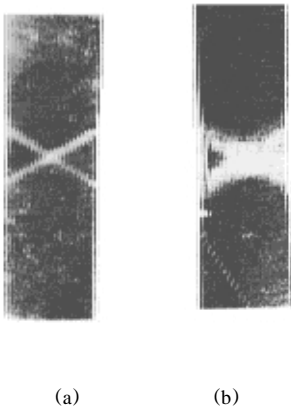


图3 试验板的宏观失稳特征

(a) 普通板 (b) 激光板

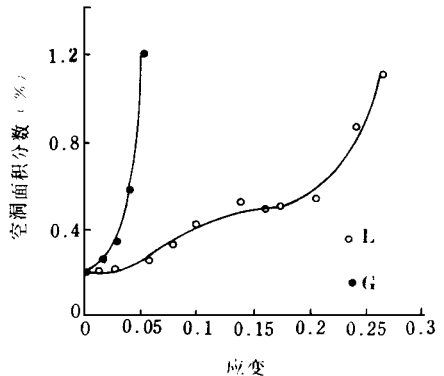


图4 空洞面积分数随应变的变化

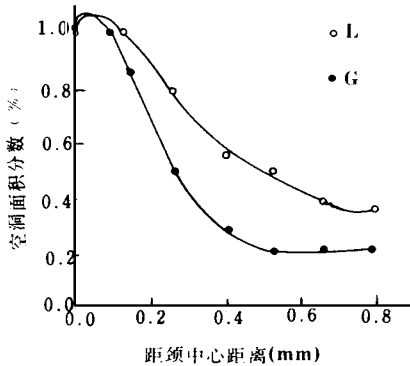


图5 集中颈及相邻区域空洞面积分数分布, 0~ 0.15mm 为集中颈区

到, 在离颈区中心 0.5mm 处, 板内空洞面积分数即已降至 0.2%, 接近试验板拉伸前的空洞含量。局部区域内空洞的快速发展表明普通板具有很强的应变局部化倾向。

与普通板相比, 激光板拉伸时其内部空洞的增长速率要缓慢得多, 特别是在 0.06~0.21 的应变范围内(即最大载荷至集中失稳发生之前), 空洞生长相对平稳, 其增长速率在变形大于 0.21 后才显出快速上升趋势(图 4)。对比图 4 与图 2(b) 不难发现, 激光板的厚向应变与空洞具有相似的变化规律, 即也在最大载荷和集中失稳发生时存在突变点, 集中失稳后两者的变化率都急剧上升, 直至断裂发生。这一事实反映了薄板拉伸时厚向应变与空洞增长速率之间的密切关系, 而激光板与普通板厚向变化率和空洞增长速率之间的密切关系, 而激光板与普通板厚向变化率和空洞增长速度之间的显著差异则与激光板表面存在的弥散微坑密切相关。

### 3.4 表面微坑在激光板变形过程中的作用

前已述及, 激光板表面均匀分布的弥散微坑, 是轧制过程辊面激光毛化形貌复制到钢板上形成的。因此在轧制过程中, 激光板表面材料除要参加薄板整体变形外, 微坑处材料还要经受因辊面凸包压入而产生的额外变

形。根据微坑环形谷的深度与宽度可以估算出微坑处材料的额外变形量高达 0.04, 甚至更高。对这种激光板进行拉伸变形时, 板面微坑处因有这种额外变形而成为预应变区。从普通板的试验结果可知, 其载荷失稳的对应应变为 0.03, 激光板微坑处的额外应变硬化程度显然会对其周围材料的变形发生影响。另外根据微坑的尺度和分布, 可以估算出激光板表面微坑约占整个板表面积的 30%。可见, 不仅有足够的额外应变(预应变)硬化程度, 而且这种应变硬化区域又占有很大的面积百分比, 故微坑在激光板变形失稳过程中的重要作用显然不容忽视。

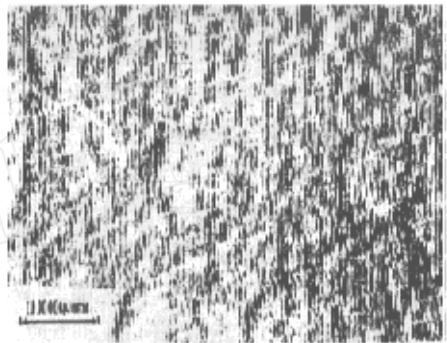


图6 载荷失稳后激光板表面形貌

为了证实激光板表面微坑在变形过程中的作用, 进行了扫描电镜下的动态拉伸试验观察。试验发现, 在均匀变形阶段, 随滑移线数目的不断增加, 微坑边缘往往堆积着较密集的滑移线, 表明这些微坑对周围材料的塑性流动有阻滞作用。随着变形程度的增加, 晶体滑移和晶粒转动不断加剧薄板表面的起伏和粗化, 但试验观察发现, 微坑处的表面起伏程度始终低于其它地区, 甚至在最大载荷后, 整个板面已完全粗化时, 微坑仍基本保留原有形态, 清晰可辨(图 6), 表明这些有预应变硬化的微坑确实起到了稳定变形的作用。

(下转第 5 页)

护渣接触的面积和时间有关,接触面积大,接触时间长,钢水增硅量多。

为防止中包增硅,在生产超低碳钢时应选用碱性绝热包衬和高碱度中包保护渣。文献[5]给出了一种碱性中包保护渣,成分如下:(%)

SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
6.9	52.8	29.1	1.4
MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1.0	0.1	0.2	0.8

这种渣有很高的碱度,能很好地防止钢水的二次氧化和增硅,适合于生产超低碳钢。这种保护渣的不足之处是熔点较低(1370~1390),保温性能不够好。

钢水在结晶器中也可能增硅,增硅的多少也由钢水中的铝与渣中SiO<sub>2</sub>反应的动力学所确定。但是一般情况下,因钢水与保护渣的接触面积和接触时间有限,增硅不会很多。

### 3 结 论

根据对钢渣反应的理论分析可以得出以

(上接第52页)

对薄板而言,随着变形程度的进一步增加,应变的不均匀程度也随之增加。激光板表面由于存在众多弥散分布的预应变硬化区,使变形不易在某个局部区域集中而起到了均分变形的作用,从而形成3.2节所述的宽阔的剪切变形区,延缓了变形局部化的发展。

### 4 结 论

(1)在本文所述试验条件下,激光毛面板与普通薄钢板相比具有显著不同的失稳特征并具有延缓局部化变形的倾向。

(2)激光板表面均匀、弥散分布的预应变

下结论:

(1)超低碳钢钢水在脱氧之前不会发生增硅。

(2)脱氧后钢水必然增硅,增硅的多少主要由大包渣的碱度和钢水中的铝含量所确定。要使大包钢水中的硅含量稳定控制在0.01%左右,应使大包渣的碱度大于5,钢中溶解铝控制在0.01%左右。

(3)为防止中包增硅,在生产超低碳钢时,中包绝热层必须是碱性的,并且使用高碱度中包保护渣。

### 参 考 文 献

- 1 魏寿昆著 冶金过程热力学 上海:上海科学技术出版社,1980年10月
- 2 王俭等译 渣图集 北京:冶金工业出版社,1989年2月
- 3 Y. FuKuZaki, et al, 1992 Steelmaking Conference Proceedings, 75: 119~ 204
- 4 Kevin, C. Ahlborn, et al, 1992 Steelmaking Conference Proceedings, 75: 469~ 473
- 5 J. Van, R. Room, Brahma Deo, 1993 Steelmaking Conference Proceedings, 76: 503~ 516  
(收稿日期 1997—03—16)

硬化区在拉伸过程中具有均分应变、稳定变形、抑制空洞增长速率的作用,是有效延缓薄板变形局部化过程的重要角色。

### 参 考 文 献

- 1 陈光南 应用激光 1996, 16(4): 155~ 158
- 2 Makoto Inanaka, Teruo Fujiwara, Tadashi Furubayashi, et al Proceedings of 15th Biennial Congress of DDRG, May, 1988: 109~ 116
- 3 Ujihara, S., et al, Iron and Steel Engineer, Aug., 1991: 52~ 56
- 4 陈光南,胡世光 塑性工程学报 1994, 1(1): 31~ 36
- 5 Guo-Chen Li and Chen Zhu, Int. J. of Plasticity, 1995, 11(5): 605~ 622  
(收稿日期 1996- 12- 23)