

## 塑性变形导致的镀锌板基体表面粗糙化现象\*

(1. 中国科学院 力学研究所, 北京 100080) 张 凯<sup>1,2</sup> 陈光南<sup>1</sup> 张 坤<sup>1</sup> 李怀学<sup>1,2</sup>  
(2. 中国科学院 研究生院, 北京 100080)

**摘 要:** 以热镀锌板单向拉伸试验为基础, 运用化学退镀以及随后的基体表面粗糙度测量和横截面标记观测等试验手段, 比较了塑性变形前后基体表面及界面的形貌, 得出, 塑性变形过程中, 基体表面作为界面的一部分会产生粗糙化现象, 但这种粗糙化会受到镀锌层的抑制, 因此界面并不会出现明显的形貌变化, 然而这种基体表面粗糙化所产生的应力, 可能导致界面失效。

**关键词:** 表面粗糙化; 退镀; 界面; 涂层; 镀锌板

**中图分类号:** TG335. 81 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012 (2008) 06-0001-03

### Surface roughening of substrate of galvanized sheet induced by plastic deformation

ZHANG Kai<sup>1,2</sup> CHEN Guang-nan<sup>1</sup> ZHANG Kun<sup>1</sup> LI Huai-xue<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Mechanics, China Academy of Sciences, Beijing 100080 China)

(2. Graduate School of China Academy of Sciences, Beijing 100080 China)

**Abstract:** Based on tensile tests for hot-dipped galvanized sheets, stripping which before the measurement of surface roughness and investigation on marked location of cross sections were used to compare the topography of the substrate surfaces or the coating interfaces before and after plastic deformation. It is found that the substrate surfaces have a trend of roughening during plastic deformation, but the trend is restrained by the zinc coating, and there is no obvious change in interface topography. However, the stress induced by the roughening on substrate surface would effect on interface damage.

**Key words:** surface roughening; stripping; interface; coating; galvanized sheet

## 引 言

板料在塑性变形过程中会出现表面粗糙化现象, 将影响板料冲压过程中的摩擦性能和板料自身或其表面镀层的失效行为。近几十年, 有关学者对板料表面粗糙化问题进行了大量研究。研究表明, 无涂层板料在塑性变形过程中, 其表面不断粗糙化<sup>[1-4]</sup>。表面粗糙化是对表面形貌变化的一种描述, 其产生机制是, 由表面夹杂物和初始孔洞形成表面缺陷; 由晶面滑移在表面形成台阶; 由晶粒转动在表面形

成凹凸。以无涂层板料作为基体, 在其表面镀覆上相应的涂镀层后就成为涂(镀)层板料(如镀锌板), 该板料在塑性变形过程中涂镀层表面也会粗糙化<sup>[5-6]</sup>。

针对涂(镀)层板料存在界面这一特殊结构, 本文探讨了基体表面作为界面的组成部分在塑性变形过程中是否也会产生粗糙化, 这种表面粗糙化是否会受到涂镀层的抑制, 基体表面粗糙化对界面的影响等问题。

为进一步研究镀锌层界面的失效机制, 需要揭示基体表面粗糙化问题。本文采用化学退镀、粗糙度测量和横截面标记观测等试验手段, 对原始镀锌板和单向拉伸试验后的镀锌板进行比较分析, 研究了基体表面粗糙化现象及其相关问题。

## 1 实验方法

### 1.1 试验材料

试验用热镀锌板的平行轧制方向的力学性能见

\*国家自然科学基金资助项目 (10672162)。

张 凯 E-mail: kaizhang@imech.ac.cn

作者简介: 张 凯, 男, 1982 年生, 中国科学院力学研究所, 博士生, 主要研究方向为塑性变形条件下涂镀层失效行为及质量评价等

收稿日期: 2008-01-02

表 1。板厚度为 0.8mm，锌层厚度约 20 $\mu$ m。

表 1 镀锌板平行轧制方向力学性能

Tab. 1 Mechanical performance of the galvanized steel sheets in the direction of parallel roll

$\sigma_s$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta_5$ /%	$n$ /%
155	280	44	0.22

### 1.2 单向拉伸试验后基体表面粗糙度的测量与比较

采用 3 组单向拉伸带肩镀锌板试件 (GB228-76)，每组 5 件，共 15 件。拉伸方向平行轧制方向，在 0.5mm/min 加载速度下，将 2、3 组试件分别拉伸至 10%、20%应变，拉伸试验后，测量 3 组试件的表面粗糙度，并在退镀后再次测量表面粗糙度，以获取镀锌板镀层表面和基体表面粗糙度随应变的变化。

为了解镀层对基体表面粗糙度变化的影响，另外采用 2 组裸板试件 (退镀后的无镀层钢板)，每组 5 件，共 10 件。拉伸方向也平行轧制方向，在 0.5mm/min 加载速度下，把 2 组试件分别拉伸至 10%、20%应变，拉伸试验后，测量 2 组试件表面粗糙度，未经拉伸的裸板表面粗糙度数据采用上述试验第 1 组试件退镀后数据，以此获取不受镀层约束条件下钢基体表面粗糙度的变化，并与此前 3 组试件的试验结果比较，分析镀层对钢表面粗糙度变化的影响。

试验中，退镀溶液由乌洛托品 5g 溶于 1L 盐酸溶液中制成。乌洛托品遇酸生成甲醛，甲醛的分子中因含有电负性极强的氧原子极性基，吸附在钢铁表面，防止退镀过程中钢基体的溶解。

粗糙度测量采用三维表面形貌仪进行测量，每件试件采样长度 2.5mm，采样间隔 1 $\mu$ m，采样段数 3 段。为了能够反映热镀锌板基体表面在平行轧制方向和垂直轧制方向的粗糙度变化，采样方向与轧制方向呈 45°。

### 1.3 横截面标记观测

用硬度计的压痕对热镀锌板的横截面进行标记，通过单向拉伸，前后观测同一位置横截面，比较热镀锌板界面区域的变化，研究基体表面是否产生粗糙化现象。为便于对横截面进行金相处理，该部分单向拉伸试验采用一组矩形试件 (GB228-76)，共 5 件，在拉伸试验前对平行于拉伸方向的横截面进行抛光，用显微硬度计在横截面基体材料上压痕进行标记，并用扫描电镜记录拉伸前横截面形貌。为了精确比较同一区域，每次记录图像时，均把压痕置

于图像左下角，如图 1 所示。

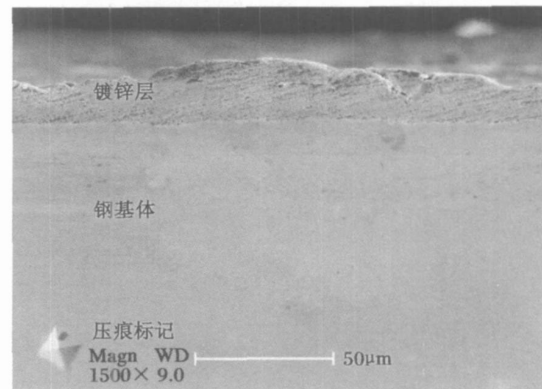


图 1 镀锌板横截面

Fig. 1 The cross section of galvanized steel sheet

试件在 0.5mm/min 速度下加载，单向拉伸至 20%应变。并在试验后用扫描电镜观察原压痕标记处的横截面形貌，与拉伸前横截面形貌进行对比，比较基体表面是否发生变形。

## 2 试验结果与讨论

镀锌板镀层表面粗糙度、基体表面粗糙度以及裸板表面粗糙度随单向拉伸应变的变化结果见表 2。

表 2 3 种表面粗糙度/Ra

Tab. 2 The surface roughness of zinc coating and steel substrate of the coated sheets, and the surface roughness of the uncoated sheets

应变/ %	0	10	20
镀层表面粗糙度/ Ra/ $\mu$ m	0.6520	0.9269	1.2309
镀锌板基体表面粗糙度/ Ra/ $\mu$ m	0.9657	1.0460	1.3154
无镀层板表面粗糙度/ Ra/ $\mu$ m	0.9657	1.2375	1.6889

由表 2 可以看出，镀锌板的镀层表面粗糙度随应变增加而增加，与文献 [5] 的结论一致。而且基体表面随着应变增加也出现了表面粗糙化现象。通过比较镀锌板基体表面和裸板表面的粗糙度变化，还发现了这种基体表面粗糙化受到镀层的约束。

图 2 对拉伸前后横截面标记处的界面进行了比较，其他试件均与图 2 所示的试验结果一致，即基体表面作为基体和镀层之间界面区域的一部分并未出现明显的粗糙化。也与本文试验得出的结论，即基体表面的粗糙化受到了镀层的约束相符。但要系统了解基体表面粗糙化对界面结构所产生影响，一般的金相研究方法很难满足需求。

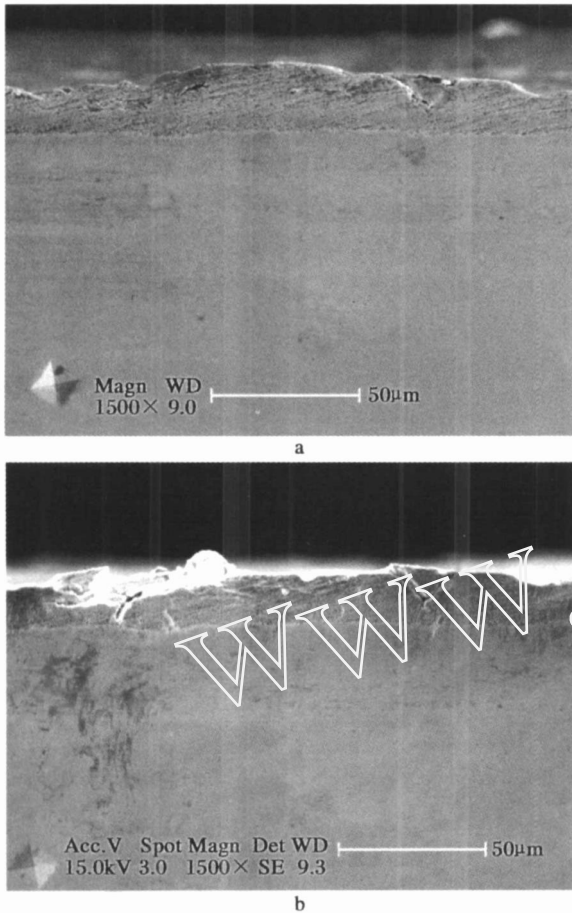


图2 拉伸截面图

a) 拉伸前; b) 拉伸后

Fig. 2 The cross section tensile test

由于基体表面的粗糙化受到了镀层的约束,势必在基体和镀层之间的界面产生应力。以晶粒转动所造成的基体表面粗糙化为例,在塑性变形过程中界面处基体晶粒转动造成界面变形,在剖面处观察则可以看到界面产生凹凸形态的皱褶,如图3中A、B两处应变最为显著,A处界面产生压应力,B处界面产生拉应力,由于镀层和基体在力学性能、材料结构上的差异,随着界面变形过程的加剧,在B处涂层和基体的变形很难协调一致,当达到某一临界值时,由于涂层和基体变形失配,将在此处产生微裂纹或孔洞等界面损伤,从而引发镀层脱落。这种失配是界面形貌的变化所造成的,与板料整体塑性变形所产生的失配有所不同。在针对热障涂层循环受热的研究中,也发现了类似的“ridge”现象<sup>[7]</sup>,该现象发生在热障涂层和连接涂层之间的界面,这种界面起皱也会导致界面裂纹成核并且扩展,这与上述界面形貌变化的作用类似。

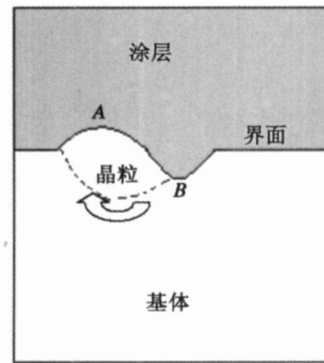


图3 基体表面粗糙化示意图

Fig. 3 Schematic diagram of surface roughening on substrate

### 3 结论

试验揭示了镀锌板基体表面的粗糙化现象,而该粗糙化却在一定程度上受到镀层的约束。基体表面的粗糙化可能导致界面结构损伤,从而引发镀层脱落,对此需要进一步寻找直接的试验证据,以证明这种损伤机制的存在。

### 参考文献

- [1] H A Al-Qureshi, A N Klein, M C Fredel. Grain size and surface roughness effect on the instability strains in sheet metal stretching [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005. 170(1-2): 204
- [2] P D Wu, D J Lloyd. Analysis of surface roughening in AA6111 automotive sheet [J]. Acta Materialia, 2004. 52(7): 1785
- [3] Y Z Dai, F P Chiang. On the mechanism of plastic deformation induced surface roughness [J]. Trans. ASME, 1992. 114(4): 432
- [4] G N Chen, H Shen. Roughening of metallic sheets during stretch forming [J]. Mater. Sci. Eng. A. 1990. A128(1): 33
- [5] C M Wichern, B C De Cooman, C J Van Tyne. Surface roughness changes on a hot-dipped galvanized sheet steel during deformation at low strain levels [J]. Acta Materialia, 2004. 52(5): 1211
- [6] M Sachtleber, D Raabe, H Weiland. Surface roughening and color changes of coated aluminum sheets during plastic straining [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004. 148(1): 68
- [7] I T Spitsberg, D R Mumm, A G Evans. On the failure mechanisms of thermal barrier coatings with diffusion aluminate bond coatings [J]. Materials Science and Engineering A, 2005. 394(1-2): 176