

## 汽车用合金化热镀锌 IF 钢表面摩擦系数

张理扬 左良

李俊

(东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004) (宝钢股份冷轧厂, 上海 200941)

俞宁峰 季思凯

(宝钢股份技术中心, 上海 201900)

**摘要** 采用平板滑动实验研究了表面相组成、表面粗糙度、拉速、压力及涂油品种等因素对汽车用合金化热镀锌 IF 钢表面摩擦系数的影响。研究发现对于合金化热镀锌 IF 钢表面存在大量柱状  $\zeta$  相的镀层表面, 其表面摩擦系数通常大于以粒状  $\delta_1$  相为主的镀层表面; 以柱状  $\zeta$  相为主的镀层表面, 当镀层表面存在大量尺寸较大的“火山口”状形貌时, 其表面摩擦系数相对较小。

**关键词** 合金化热镀锌 摩擦系数 IF 钢板

## Friction Coefficient of Galvannealed IF Sheet Steel for Auto

Zhang Liyang and Zuo Liang

(School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004)

Li Jun

(Cold Rolling Mill, Baosteel, Shanghai 200941)

Yu Ningfeng and Ji Sikai

(Technology Center, Baosteel, Shanghai 201900)

**Abstract** The effect of surface phase constitution, surface roughness, sliding speed, press force and anti-rust oil on friction coefficient of galvannealed IF sheet steel has been tested and researched. It was found that while there were a lot of columnar  $\zeta$  phase in surface for the sheet steel, the friction coefficient usually higher than surface coating mainly containing granular  $\delta_1$  phase; as there were a lot of larger scale “crater” morphology in surface coating mainly containing columnar  $\zeta$  phase, the friction coefficient was relatively lower.

**Material Index** Galvannealing, Friction Coefficient, IF Steel Sheet

合金化热镀锌钢板是指把经过热浸镀的纯锌镀层钢板立即在 450 ~ 550 °C 范围内<sup>[1]</sup>进行镀层扩散退火处理得到的锌铁合金镀层钢板。汽车用合金化热镀锌钢板通常要进行较为复杂的冲压变形, 在冲压成型过程中较易出现开裂现象。这除与钢板机械性能这一本质决定因素有关外, 还与钢板表面摩擦系数有关。钢板表面摩擦系数是影响合金化热镀锌钢板冲压成型性能的重要特性之一<sup>[2]</sup>。K. Abotani 等人研究表明<sup>[3]</sup>: 在相同条件下测量合金化热镀锌钢板、电镀锌钢板、冷轧裸板和热镀纯锌钢板的表面摩擦系数, 合金化热镀锌钢板的表面摩擦系数最高。

合金化热镀锌钢板表面摩擦系数的影响因素较多, 钢板表面相组成、镀层厚度、镀层硬度、基板强度、钢板表面粗糙度、变形条件、涂油种类及涂油量等都可能对摩擦系数产生影响。本文采用平

板滑动实验研究镀层表面相组成、镀层表面形貌、表面粗糙度、拉速、压力及涂油种类对汽车用合金化热镀锌 IF 钢表面摩擦系数的影响, 以便为生产控制提供参考。

### 1 实验材料和方法

实验所用的合金化热镀锌钢板都为宝钢 1550 热镀锌机组生产的钛铌复合添加 IF 钢, 钢板经清洗、退火后进行热浸镀和镀层合金化退火处理, 然后经 4 辊平整机平整。取沿轧制方向 25 mm, 沿横向 400 mm 试样, 用酒精清洗试样表面油污, 手工重涂防锈油后, 测量试样的表面摩擦系数  $\mu$ 。本实验用平板滑动实验测量摩擦系数, 如图 1 所示, 上压头底部半径为 5 mm 的半圆柱, 下压头宽度为 8 mm 的平台, 实验所用正压力为  $P$ , 拉力为  $f$ , 测量长度为 120 mm, 实际计算长度为 40 mm,

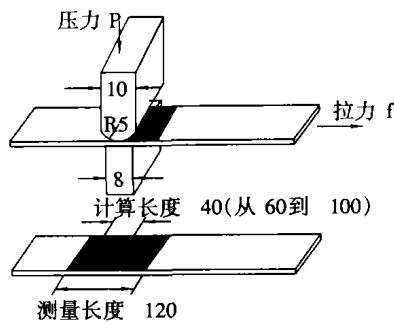


图 1 平板滑动实验摩擦系数测量示意图

Fig.1 Schematic of measurement of friction coefficient by flat sliding test

摩擦系数  $\mu = f/(2P)$ 。取沿轧制方向相同部位的样板,分别制备 8 mm × 20 mm 试样,把试样放在盛有酒精的烧杯中用超声波清洗后热风吹干,用 S-4200 场发射扫描电镜观察镀层的表面形貌。钢板表面粗糙度为取沿轧制方向相同部位的样板用酒精擦洗表面油污后,使用 TOKYO SEIMITSU 台式粗糙度仪,按照 SAE J911 标准,垂直于轧制方向测得,各试样的平均粗糙度  $Ra$  值和峰值数 PPI 值,都是每面连续测量 3 次,由计算机自动取得的平均值。

## 2 实验结果和讨论

### 2.1 表面形貌对摩擦系数的影响

图 2 是合金化热镀锌钢板的两种典型表面相组成的形貌,(a) 钢板表面全是粒状  $\delta_1$  相,其上下表面镀层重量为 50/50  $g/m^2$ ,粗糙度  $Ra$  值为 0.85/0.90  $\mu m$ ,PPI 值为 254/277;而(b)钢板表面仍然存在大量柱状  $\zeta$  相,其上下表面镀层重量为 57/56  $g/m^2$ ,粗糙度  $Ra$  值为 0.85/0.94  $\mu m$ ,PPI 值为 265/235。可以看出,两块钢板镀层重量和表面粗糙度都很接近,只是镀层表面相组成不同。把钢板表面油污用酒精清洗干净后,手工重涂防锈油,采用图 1 所示平板滑动实验装置,在压力  $P$  为 3 000 N,拉速为 1 000 mm/min 的实验条件下测量两者表面摩擦系数。测量结果表明,(b)钢板表面摩擦系数要高于(a)钢板。A. Andoh 等人<sup>[4]</sup>指出,对于合金化热镀锌钢板,在钢板表面柱状  $\zeta$  相多的情况下,冲压成型时会出现材料流入不足导致冲压开裂现象。通过本实验可以看出,当镀层表面存在大量柱状  $\zeta$  相时,钢板表面摩擦系数要大于表面不存在柱状  $\zeta$  相的粒状  $\delta_1$  相的镀层表面。G.M. Michal 等人<sup>[5]</sup>对不同硬度的电镀锌钢板表

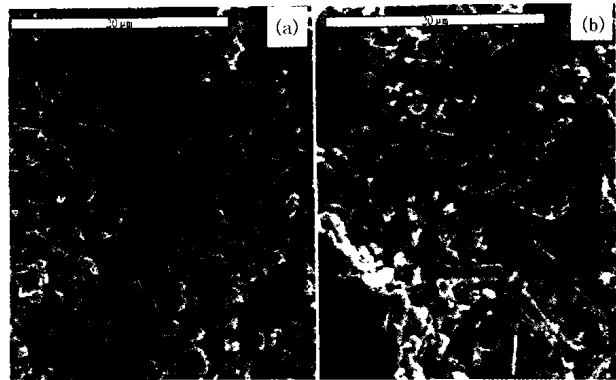


图 2 合金化热镀锌 IF 钢表面相组成(a)  $\mu = 0.138, \delta_1$  相;(b)  $\mu = 0.142, \zeta$  相

Fig.2 Galvannealed IF steel with different surface coating phase constitution: (a)  $\mu = 0.138, \delta_1$  phase; (b)  $\mu = 0.142, \zeta$  phase

面摩擦系数的研究表明,在低速变形条件下,不论基板强度的高低,软镀层表面的摩擦系数都高于硬镀层表面的摩擦系数;而在高速变形条件下,软镀层表面的摩擦系数相差不大,有时还可能低于硬镀层。对于合金化热镀锌钢板在本实验条件下,表面存在大量柱状  $\zeta$  相的镀层其表面摩擦系数大,这可能与柱状  $\zeta$  相的硬度低于粒状  $\delta_1$  相<sup>[6]</sup>有关。由于镀层表面存在大量柱状  $\zeta$  相,镀层的硬度低,在相同压力下,模具与钢板之间接触面积相对较大,试样与模具之间的粘附性强,从而使得表面摩擦系数增大。

图 3 是合金化热镀锌钢板的两种表面形貌,(a)和(b)钢板表面都存在大量是柱状  $\zeta$  相,而且(b)钢板表面柱状  $\zeta$  相略微要多一些,但其表面存在大量尺寸较大的“火山口”状形貌(crater<sup>[7]</sup>)。(a)钢板上下表面镀层重量为 50/50  $g/m^2$ ,粗糙度  $Ra$  值为 0.93/0.91  $\mu m$ ,PPI 值为 265/229;(b)钢板上下表面镀层重量为 50/50  $g/m^2$ ,粗糙度  $Ra$  值为 1.06/1.20  $\mu m$ ,PPI 值为 311/305。采用测量图 2 中钢板相同的实验条件测量图 3 中两块钢板的表面摩擦系数发现,(b)钢板表面摩擦系数略低。在相同条件下对于粒状  $\delta_1$  相的镀层其表面摩擦系数随粗糙度  $Ra$  值和 PPI 值的增加而增加。根据理论分析,对于表面存在大量柱状  $\zeta$  相的镀层也应有此规律。但本实验中,(b)钢板表面粗糙度虽然略高,但其表面摩擦系数反而低,这可能与其镀层表面大量大尺寸的“火山口”状形貌的存在使得钢板表面储油量增多有关。

### 2.2 钢板表面粗糙度对摩擦系数的影响

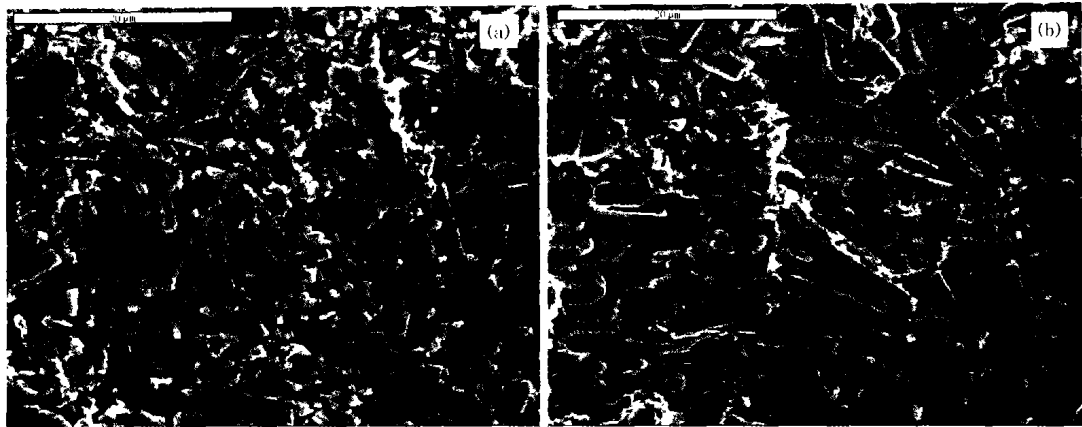


图 3 “火山口”状形貌对 IF 钢摩擦系数的影响:(a)尺寸较小“火山口”形貌;(b)尺寸较大“火山口”形貌  
Fig.3 Effect of crater morphology in coating on friction coefficient of IF steel: (a) crater morphology with small scale; (b) crater morphology with larger scale

上下表面镀层重量为 50/50 g/m<sup>2</sup> 的两块合金化热镀锌钢板, 镀层表面为粒状 δ<sub>1</sub> 相, 其上下表面 PPI 值分别为 392/392 和 370/377, 采用测量图 2 和图 3 中钢板表面摩擦系数相同的实验条件测量它们的表面摩擦系数, 结果发现镀层上下表面粗糙度 Ra 值分别为 0.93/1.05 μm 的钢板其表面摩擦系数为 0.141, 而镀层上下表面粗糙度 Ra 值分别为 1.60/1.68 μm 的钢板其表面摩擦系数为 0.144。K. Abotani 等人<sup>[1]</sup> 对不同表面粗糙度 Ra 值的热镀纯镀锌钢板的表面摩擦系数进行的研究表明, 在压力低时, Ra 值大摩擦系数大, 但随压力的增加 Ra 值对摩擦系数的影响减小, 当压力很大时可以忽略其影响。而对于合金化热镀锌钢板, 本研究表明在所研究的实验条件下, 当镀层表面是粒状的 δ<sub>1</sub> 相时, PPI 值接近时, 摩擦系数随 Ra 值的增大而增大。

上下表面镀层重量为 50/50 g/m<sup>2</sup> 的粒状 δ<sub>1</sub> 相镀层的两块钢板, 上下表面 Ra 值分别为 0.64/0.72 和 0.64/0.70, 采用测量图 2 和图 3 中钢板表面摩擦系数相同的实验条件测量它们的表面摩擦系数, 结果发现镀层上下表面粗糙度 PPI 值分别为 195/157 的钢板, 其表面摩擦系数为 0.136, 而镀层上下表面粗糙度 PPI 值分别为 313/252 的钢板, 其表面摩擦系数为 0.142。可以看出在所研究的实验条件下, 当镀层表面是粒状的 δ<sub>1</sub> 相并且平均粗糙度 Ra 值接近时, 摩擦系数也随粗糙度峰值数的增加而增加。

当镀层表面存在大量 ζ 相时, 对不同粗糙度值所对应的摩擦系数进行大量研究发现, 其粗糙

度与摩擦系数之间并无明显规律, 这可能是由于 ζ 相的存在对摩擦系数有较大的影响, 而其在表层所占的比例不同, 因而使得粗糙度对摩擦系数的影响较难确定。如果要对其进行深入研究, 必须找到 ζ 相在镀层表面所占比例的定量方法, 对相同比例的 ζ 相的表面粗糙度进行研究或者是对相同镀层硬度的 ζ 相镀层表面摩擦系数进行研究才有意义。

### 2.3 拉伸速度对摩擦系数的影响

相同钢板, 沿轧制方向取相同部位试样, 用酒精擦洗表面油污后重涂防锈油, 在压力为 3 000 N 的条件下, 研究拉速对摩擦系数的影响, 其结果如图 4(a)所示, 可以看出随拉速的增加, 摩擦系数明显降低。G. M. Michal 等人<sup>[8]</sup> 采用杯冲实验对不同冲压速度下的合金化钢板的表面摩擦系数进行研究, 发现随冲压速度的增加, 表面摩擦系数也减小。H. C. Shih 等人<sup>[9]</sup> 采用张力弯曲实验 (BUT, bending under tension) 研究不同滑动速度下合金化钢板的表面摩擦系数, 同样发现随滑动速度增

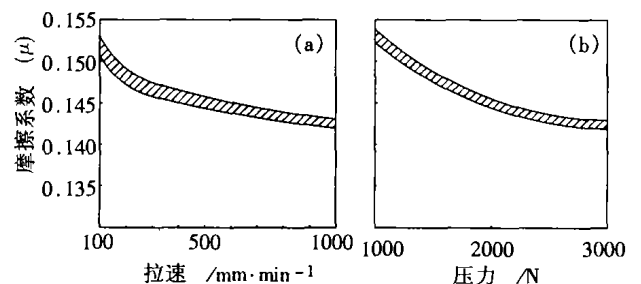


图 4 拉速(a)、压力(b)对 IF 钢摩擦系数的影响  
Fig.4 Effect of sliding speed (a) and press force (b) on friction coefficient of IF steel

加,表面摩擦系数降低。因而,对合金化热镀锌钢板,在零件冲压成型时,随变形速度的增加,表面摩擦系数对冲压的影响会变小。这可能是因为较高的拉速下,局部金属流动所需的时间较少,这样实际的接触面积减少,从而使得摩擦系数降低。另外,拉速高时,接触区域界面力小,在较高的拉速下,合金化热镀锌钢板的表面摩擦系数也可能低于冷轧裸板。

#### 2.4 压力对摩擦系数的影响

相同钢板,沿轧制方向取相同部位试样,用酒精擦洗表面油污后重涂某防锈油,在拉速为1 000 mm/min的条件下,对压力对摩擦系数的影响进行研究,其结果如图 4(b)所示,可以看出随压力的增加,摩擦系数明显降低,但当压力较大时,降幅明显放缓。S. Nakajima 等人<sup>[10]</sup>使用上下压头都为平台的平板滑动实验装置研究合金化热镀锌钢板表面摩擦系数,同样发现随压力的增加,钢板表面摩擦系数降低。随着压力的增加,钢板与模具的实际接触面积必然增加,从实验结果可以看出,在较高的压力下,镀层对摩擦系数的影响已经明显减小了。

#### 2.5 油品对摩擦系数的影响

相同钢板,沿轧制方向取相同部位试样,先用丙酮清洗钢板表面油污,在实验前再用酒精擦洗钢板表面后手工重涂不同防锈油,在压力为3 000 N,拉速为1 000 mm/min的条件下,对油品对摩擦系数的影响进行研究,结果发现不同防锈油的钢板,其表面摩擦系数有较明显的差异。此规律也与 K. Abotani 等人<sup>[3]</sup>对不同油品对热镀纯锌镀层

钢板表面摩擦系数研究得出的结果相同。所以,对于合金化热镀锌钢板,选择合适的防锈油对冲压成型也非常重要。

### 3 结论

(1) 对于合金化热镀锌 IF 钢,表面存在大量柱状  $\zeta$  相的镀层表面,其表面摩擦系数通常大于以粒状  $\delta_1$  相为主的镀层表面。

(2) 以柱状  $\zeta$  相为主的镀层表面,镀层中存在大量尺寸较大的“火山口”状形貌,可使其表面摩擦系数变小。

(3) 以粒状  $\delta_1$  相为主的镀层表面,降低其表面粗糙度  $Ra$  值和 PPI 值,可以降低其表面摩擦系数,有利于提高钢板的成型性能。

(4) 随变形速度增加,表面摩擦系数变小,在高速变形条件下,镀层对钢板表面摩擦系数的影响较小。

(5) 随压力的增加,表面摩擦系数变小,但在很高的压力下,减小幅度明显放缓。

(6) 选择合适的防锈油可以降低钢板表面摩擦系数,有利于提高合金化热镀锌汽车外板的冲压成型性能。

高校优秀青年教师教学科研奖励计划基金资助项目

致谢 本文得到宝钢技术中心表明生、张红、程国平、张仁彪,宝钢股份制造部郑建平、朱敏、赵海亭、张顺才,宝钢股份冷轧厂钱洪卫、刘宝军、彭俭、林传华、金仁忠、周敏等同志的大力支持和帮助,特此致谢。

#### 参考文献

- 1 望月一雄. 表面处理研究 10 年之进展. 鞍钢技术, 2001(2): 22
- 2 Sakurai M, Imokawa T, Yamasaki Y, et al. Effect of Surface Modification on Coefficient of Friction of Galvannealed Steel Sheets. Galvatech' 2001, Brussels, 2001. 65
- 3 Abotani K, Hirohata K and Kiyasu T. Hot-Dip Galvanized Sheet Steel with Excellent Press Formability and Surface Quality for the Automotive Panels. Kawasaki Steel Technical Report, 2003, 48: 17
- 4 Andoh A, Uchida J, Entani H, et al. Recent Advance in Coated Steel Sheets. Tetsu-to-Hagané, 2003, 89(1): 3
- 5 (美) Gray M. Michal. 电镀锌钢板基体和镀层硬度对表面摩擦性能的影响. 世界钢铁, 2002, 2(6): 28
- 6 Sakurai M, Inagaki J and Yamashita M. Effect of Surface Texture of Galvannealed Steel Sheet on Image Clarity After Painting. Tetsu-to-Hagané, 2003, 89(1): 18
- 7 S P O' Dell and Charles J. The Formation of Craters within the Galvanneal Coating and Their Effects on Processing Properties. I & SM, December 2003: 41
- 8 Michal G M and Paik D J. The Effects of Forming Velocity and Strain Path on the Performance of Galvannealed Sheet Steels. Galvatech' 2001, Brussels, 2001. 73
- 9 Shih H C and Belanger P J. Effects of Coating and Forming Condition on Friction. Galvatech' 2004. Chicago, 2004. 299
- 10 Nakajima S, Katagiri T and Kato C. Inorganic Dry Film Lubricant Coated Galvannealed Steel Sheet with Excellent Press Formability and Adhesive Compatibility. Kawasaki Steel Technical Report, 2003, 48: 23

张理扬(1977-),男,博士研究生。从事热镀锌和合金化汽车外板工艺和表面质量研究。

收稿日期: 2005-01-09