

基板强度对汽车用合金化热镀锌板摩擦因数的影响

Effects of Substrate Strength on Friction Coefficient of Galvannealed Auto Steel Sheets

李 波¹, 康永林¹, 朱国明¹, 高永坚²

(1 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083;

2 广州 JFE 钢板有限公司, 广州 511464)

LI Bo¹, KANG Yong-lin¹, ZHU Guo-ming¹, GAO Yong-jian²

(1 School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2 Guangzhou JFE Steel Sheet Co., Ltd., Guangzhou 511464, China)

摘要: 采用平板滑动摩擦实验研究不同接触压力下合金化热镀锌钢板的摩擦因数。结果表明:在相同的变形条件下,低强度基板加工硬化较强烈;在相同接触压力下,镀锌板基板强度越高,摩擦因数越低;随着接触压力增大,低强度镀锌板摩擦因数由 0.154 降为 0.136,高强度镀锌板摩擦因数由 0.140 降至 0.135;随着接触压力的进一步增加,摩擦因数降低的趋势变缓。基于黏着理论深入分析了基板强度影响摩擦因数的原因,得出如下结论:摩擦因数主要由 α 值(总的实际接触面积中模具和镀层直接接触部分百分比)和基板表面显微硬度决定;基板强度是决定基板表面显微硬度和 α 值的主要因素;随着接触压力增大,不同的加工硬化率会使不同强度基板的表面显微硬度逐渐接近,致使 α 差异减小,最终使基板强度对镀锌板摩擦因数影响减弱。

关键词: 摩擦因数;接触压力;基板强度;加工硬化;黏着理论

中图分类号: TG356.16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2012)08-0014-05

Abstract: Friction coefficient of galvannealed steel sheets under different contact pressure was studied by sliding test. The results show that, at the same deformation, the work-hardening of the low-strength substrate is stronger than that of high-strength substrate; the friction coefficient of the high-strength substrate galvannealed steel sheets is lower at the same contact pressure. Moreover, the friction coefficient of low-strength substrate galvanized steel sheets decreases from 0.154 to 0.136, and the friction coefficient of high-strength substrate galvanized steel sheets decreases from 0.140 to 0.135, when the contact pressure increases, but at the higher contact pressure, the decrease extent of friction coefficient is slow down. Furthermore, the effect of substrate strength on the friction coefficient using adhesion theory was investigated. The conclusions are as followings: friction coefficient is decided by α (mold and coating direct contact percentage of the total actual contact area) and substrate surface micro-hardness; α and substrate surface micro-hardness are mainly determined by substrate strength; the different substrate surface micro-hardness moves close to each other because of different work-hardening as the contact pressure increases, contributing to α equality, and finally the effect of substrate strength on friction coefficient of galvannealed steel sheets would be low.

Key words: friction coefficient; contact pressure; substrate strength; work hardening; adhesion theory

中国迅猛发展的汽车工业需要大量性能优秀的冷轧系列镀锌板。但在镀锌板各种冲压成形过程中,由于承受接触压力、摩擦力以及较大塑性变形的作用,镀层通常会发生开裂、剥落和粉化、划伤和黏锌等现象,以及摩擦因数明显增加导致成形开裂等问题,并且这

些问题会随着成形温度、速率、润滑条件和变形条件的变化而变化^[1]。

在过去的 10 年,许多学者对影响摩擦因数的因素进行了研究。Nakajima S.^[2], Szakaly E. D.^[3] 等使用平板滑动实验装置发现合金化热镀锌板(简称 GA 板)

和热镀锌板表面摩擦因数随着压力的增加而降低。Michal G. M. [4]等采用杯冲实验发现合金化热镀锌钢板的表面摩擦因数随着冲压速率的增加而降低。Abotani K. [5], Lee B. H. [6], GONG H. Y. [7], Andrzej Matuszak [8]等发现随着润滑剂黏度的增加热镀锌钢板表面摩擦因数逐渐下降。Yanagida A [9]等采用热冲压实验发现,随着温度的增加,镀锌板摩擦因数上升。Lee B. H. [6]等发现镀锌板摩擦因数在镀层表面粗糙度为 0.5~1μm 时最小,过大或过小的表面粗糙度都会使摩擦因数升高。Garza L. G. [10], 张理扬 [11]等发现合金化热镀锌 IF 钢摩擦因数会随着镀层表面 ξ 相的增多而升高。Michal G. M. [4]等采用杯冲实验发现电镀锌钢板镀层较软的表面摩擦因数较高,基板强度对电镀锌钢板表面摩擦基本没有影响。

目前摩擦过程机理还有很多不明之处,摩擦对薄板成形过程的影响很少。大多数研究者研究了外部因素(如压力、速率、润滑油、温度等)或镀层本身的性质(如表面粗糙度、表面形貌、表面显微硬度等)对摩擦因数的影响,但很少有人研究镀锌板基板对摩擦因数的影响。本工作采用平板滑动摩擦测量装置研究了不同接触压力下基板强度对合金化热镀锌钢板摩擦因数的影响,利用黏着理论深入分析了基板影响摩擦因数的原因,为制定汽车板的冲压工艺提供了理论依据。

1 实验

选用 4 种基板材料,分别是两种屈服强度为 150MPa 左右的 IF 钢和两种屈服强度超过 300MPa 的微合金高强度钢。根据 GB/T 3822—1999,利用 Leica VMHT 30M 显微硬度计(载荷为 25g,加载时间为 15s)测量不同摩擦条件下镀层表面显微硬度和不同变形情况下裸板的表面显微硬度,根据 GB/T 2523—

2008,利用表面粗糙度仪 TR200 测量镀层表面粗糙度。

采用平板滑动摩擦测量装置(样品在上下加压力 P 的平面模具之间,对样品加拉力 F 使之在模具间滑动,从而测定摩擦因数,示意图如图 1 所示,因模具接触面积恒定,可将压力化为单位面积接触压力)。

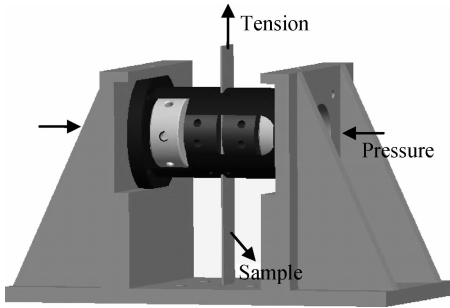


图 1 摩擦因数测量装置示意图

Fig. 1 Schematic of friction coefficient measurement device

测量不同接触压力下合金化热镀锌钢板的摩擦因数 μ,计算式如式(1)所示:

$$\mu = \frac{F}{2P}$$
 (1)

2 实验结果

表 1 是所选基板制备合金化热镀锌板的力学性能。表 2 是镀锌板的镀层特性,图 2 是两种典型基板强度镀锌板的表面形貌。从表 1 可以看出,IF 钢试样 270E 和 270F 强度与微合金高强度钢试样 440W 和 590R 强度相差一倍左右(本文中钢种级别和牌号来源于日本钢铁联盟标准)。从表 2 和图 2 可以看出:4 种试样镀层厚度、镀层质量和镀层表面粗糙度相差不超过 5%;镀层表面显微硬度相差不超过 10%;两种典型基板强度镀锌板镀层表面形貌差异不大。

表 1 合金化热镀锌板力学性能

Table 1 Mechanical properties of galvanized steel sheets

Steel grade	Steel	Lower yield strength/MPa	Tensile strength/MPa	Elongation	Strain hardening index	Plastic strain ratio
				after fracture(original gauge length:50mm)/%		
270E-GA	DDQ grade IF steel	155	284	49	0.29	1.88
270F-GA	EDDQ grade IF steel	153	278	49	0.29	2.09
440W-GA	Universal grade HSLA steel	302	469	35	0.20	1.15
590R-GA	High yield ratio grade HSLA steel	375	630	26	0.20	0.60

图 3 是不同拉伸变形下各试样裸板表面显微硬度的变化情况,可以看出屈服强度较低的 IF 钢板表面显微硬度值也较低;但随着变形量的增加,IF 钢板的表

面显微硬度迅速升高,幅度超过 100%;微合金高强钢板表面初始硬度较高,但表面显微硬度随变形量增加变化不大(升高幅度不超过 15%)。可以得出:IF 钢板

表 2 合金化热镀锌板镀层特性

Table 2 Coating properties of galvanized steel sheets

Steel grade	Thickness/ μm	Mass/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$	Micro- hardness	Roughness/ μm
270E-GA	7.8	46	301.4	0.713
270F-GA	8.1	49.5	302.1	0.710
440W-GA	7.6	45	295.3	0.706
590R-GA	7.9	48	325.3	0.667

的加工硬化作用要比微合金高强钢板强烈。图 4 是不同接触压力下各试样镀层表面显微硬度的变化,可以看出,虽然各试样镀层表面显微硬度随着接触压力的变化而变化,但和原始镀层表面显微硬度相比波动不大,不超过 10%,因此可以忽略摩擦条件对各试样镀层表面显微硬度的影响。

在滑动速率为 200mm/min,温度为室温 20℃,使

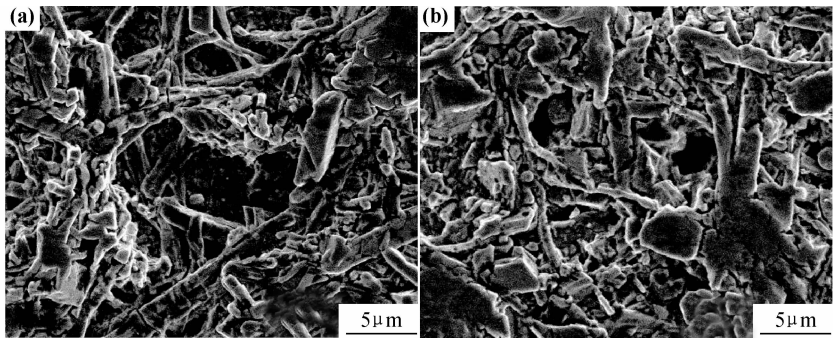


图 2 两种典型基板强度 GA 板表面形貌 (a)270E-GA;(b)440W-GA

Fig. 2 Surface morphologies of different typical substrate strength of galvanized steel sheets
(a)270E-GA;(b)440W-GA

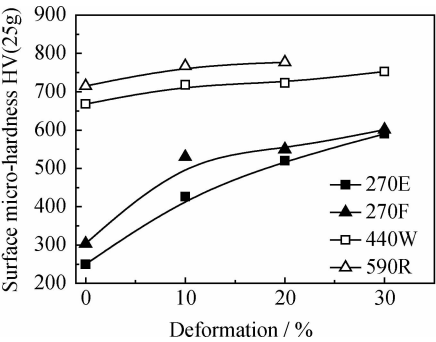


图 3 变形对基板表面显微硬度的影响
Fig. 3 The effect of deformation on surface micro-hardness of substrate

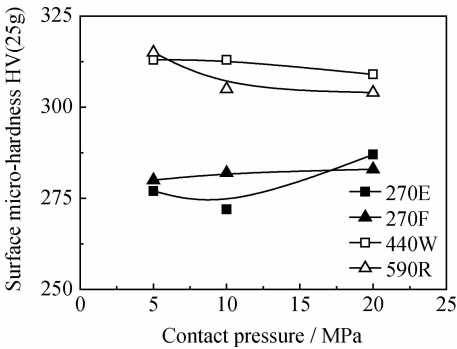


图 4 接触压力对 GA 板镀层表面显微硬度的影响
Fig. 4 The effect of contact pressure on surface micro-hardness of coating of galvanized steel sheets

用 NR550HN 润滑油 (40℃, 运动黏度为 19.72 mm²/s)的条件下,分别采用 5,10,20MPa 三种接触压力,对 4 种合金化热镀锌板材摩擦因数的实验结果如图 5 所示。可以看出:随着接触压力的增大,低强度镀锌板摩擦因数由 0.154 降为 0.136,高强度镀锌板摩擦因数由 0.140 降至 0.135,但接触压力较大时,摩擦因数降低的趋势变缓;低强度的 IF 钢 GA 板摩擦因数受接触压力的影响较大;在较低的接触压力下,高强度的微合金高强钢 GA 板摩擦因数明显比低强度的 IF 钢 GA 板低,但随着接触压力的进一步增加,基板强度对镀锌板摩擦因数的影响减弱。

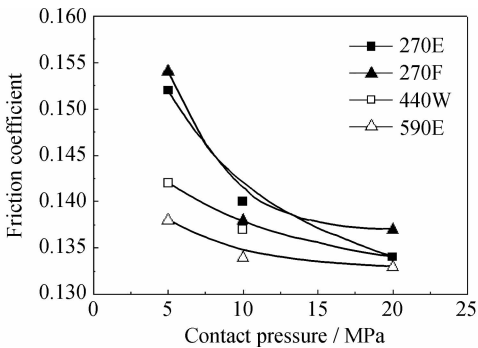


图 5 不同接触压力下基板强度对 GA 板摩擦因数的影响

Fig. 5 The effect of substrate strength on friction coefficient of galvanized steel sheets under different contact pressure

3 分析与讨论

从实验结果可以看出,各试样 GA 板镀层厚度、镀层质量、镀层表面显微硬度、镀层表面粗糙度相差较小,两种典型基板强度镀锌板镀层表面形貌差异不大,因此,各试样 GA 板镀层特性对摩擦因数的影响很小,在其他外部实验条件一致的情况下,基板强度是影响 GA 板摩擦因数的主要因素。

本实验润滑为边界润滑,根据黏着理论^[12],实验中的摩擦力可以看做是剪断表面黏着部分的剪切力和剪断边界润滑膜的剪切力之和,即

$$F = \alpha A \tau_b + (1 - \alpha) A \tau_f = A [\alpha \tau_b + (1 - \alpha) \tau_f] \quad (2)$$

式中: A 为总的实际接触面积; α 为总的实际接触面积中模具和镀层直接接触部分百分比; τ_b 为镀层表面的抗剪强度; τ_f 为边界润滑膜的抗剪强度。

对于镀锌板,当镀层厚度为微米数量级时,模具和镀层实际接触面积取决于基体硬金属,抗剪强度则取决于表面镀层^[12]。而压力 N 由微凸体的接触和边界润滑膜的接触来承担,故

$$P = \alpha A \sigma_s + (1 - \alpha) A \sigma_{sf} = A [\alpha \sigma_s + (1 - \alpha) \sigma_{sf}] \quad (3)$$

式中: σ_s 为基体钢板的塑性流动压力,约等于基板表面显微硬度; σ_{sf} 为边界润滑膜的屈服强度。

由此可得边界润滑时的摩擦因数为:

$$\mu = \frac{F}{P} = \frac{A [\alpha \tau_b + (1 - \alpha) \tau_f]}{A [\alpha \sigma_s + (1 - \alpha) \sigma_{sf}]} = \frac{\alpha \tau_b + (1 - \alpha) \tau_f}{\alpha \sigma_s + (1 - \alpha) \sigma_{sf}} \quad (4)$$

假设 μ_1 是低强度的 IF 钢 GA 板摩擦因数, σ_{s1} , α_1 , A_1 分别是低强度 IF 钢 GA 板的基板塑性流动压力、总的实际接触面积中模具和镀层直接接触部分百分比和总的实际接触面积;而 μ_2 是高强度 HSLA 钢 GA 板摩擦因数, σ_{s2} , α_2 , A_2 分别是高强度的 HSLA 钢 GA 板的基板塑性流动压力、总的实际接触面积中模具和镀层直接接触部分百分比和总的实际接触面积。在摩擦过程中,这两种镀锌板镀层特性相差不大, τ_b 可以视为常数,在相同摩擦条件下 τ_f 也相同。因此:

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{\frac{\alpha_1 \tau_b + (1 - \alpha_1) \tau_f}{\alpha_1 \sigma_{s1} + (1 - \alpha_1) \sigma_{sf}}}{\frac{\alpha_2 \tau_b + (1 - \alpha_2) \tau_f}{\alpha_2 \sigma_{s2} + (1 - \alpha_2) \sigma_{sf}}} = \frac{\alpha_1 \tau_b + (1 - \alpha_1) \tau_f}{\alpha_2 \tau_b + (1 - \alpha_2) \tau_f} \cdot \frac{\alpha_2 \sigma_{s2} + (1 - \alpha_2) \sigma_{sf}}{\alpha_1 \sigma_{s1} + (1 - \alpha_1) \sigma_{sf}} \quad (5)$$

显然,镀层表面的抗剪强度 τ_b 远大于边界润滑膜的抗剪强度 τ_f 。在相同的压力下,由图 3 可知,低强度的 IF 钢 GA 板基板的表面显微硬度较低,故 σ_{s1} 低、 α_1 值大、 A_1 值高,而基板强度高的镀锌板 σ_{s2} 高、 α_2 值小、

A_2 值低。由于 $\alpha_1 > \alpha_2$, 所以 $\frac{\alpha_1 \tau_b + (1 - \alpha_1) \tau_f}{\alpha_2 \tau_b + (1 - \alpha_2) \tau_f} > 1$; 由于摩擦条件相同,所以 $P_1 = P_2$, 而 $A_1 > A_2$, 根据公式 (3), $\frac{\alpha_2 \sigma_{s2} + (1 - \alpha_2) \sigma_{sf}}{\alpha_1 \sigma_{s1} + (1 - \alpha_1) \sigma_{sf}} > 1$, 因此 $\frac{\mu_1}{\mu_2} > 1$, 即 $\mu_1 > \mu_2$ 。

显然 σ_{s1} 与 σ_{s2} , α_1 与 α_2 相差越大, μ_1 , μ_2 相差越大。而基板强度是决定基板表面显微硬度 σ_s 、总的实际接触面积中模具和镀层直接接触部分百分比 α 的主要因素,因此基板强度越高,摩擦因数越低,这也被实验结果所证实(图 5)。图 6(a), (b) 是接触压力较小时 (5MPa) 两种典型基板强度 GA 板表面镀层损伤情况,从图 6(a), (b) 可以看出:高强度镀锌板 440W 表面损伤较轻,即实际接触面积中模具和镀层直接接触部分低,所以 440W-GA 板 α 值比 270E-GA 板低;而由图 3 可知 440W-GA 板基板表面显微硬度 σ_s 比 270E-GA 板基高。因此,440W-GA 板摩擦因数较 270E-GA 板低,这也进一步验证了基板强度高的 GA 板摩擦因数较小。

在摩擦过程中,接触压力由基体钢板和润滑油膜承担,试样基板表面也会经历加工硬化,由图 2 可知,低强度的 IF 钢加工硬化要比高强度的 HSLA 钢强烈,可以认为,在受压的情况下,IF 钢的加工硬化同样要比 HSLA 钢强烈。随着接触压力的增加,高强度 GA 板基板表面显微硬度与低强度 GA 板基板表面显微硬度差异逐渐缩小。因此,在较高的接触压力下, HSLA 钢 GA 板与 IF 钢 GA 板 σ_s 和 α 值相差减小,导致高强度 GA 板与低强度 GA 板摩擦因数相差不大(图 5)。图 6(c), (d) 是接触压力较大时 (20MPa) 两种典型基板强度 GA 板表面镀层损伤情况,可以看出,低强度 270E-GA 板与高强度 440W-GA 板镀层损伤情况接近,两种不同基板强度 GA 板模具和镀层直接接触部分百分比 α 基本相等;而由图 3 可知,在较高接触压力下 440W-GA 板和 270E-GA 板基板表面显微硬度 σ_s 相差较小。因此,440W-GA 板和 270E-GA 板摩擦因数相差不大。这也进一步验证了在较高的接触压力下,由于基板加工硬化率的不同而导致两种基板强度的 GA 板摩擦因数相差不大。

4 结论

(1) 屈服强度较低的 IF 钢板表面显微硬度值较低,但随着变形量的增加,IF 钢板的表面显微硬度迅速升高,幅度超过 100%;微合金高强钢板表面初始硬度较高,但表面显微硬度随变形量增加变化不大(升高幅度不超过 15%)。在相同的变形情况下,低强度基板加工硬化要比高强度基板强烈。

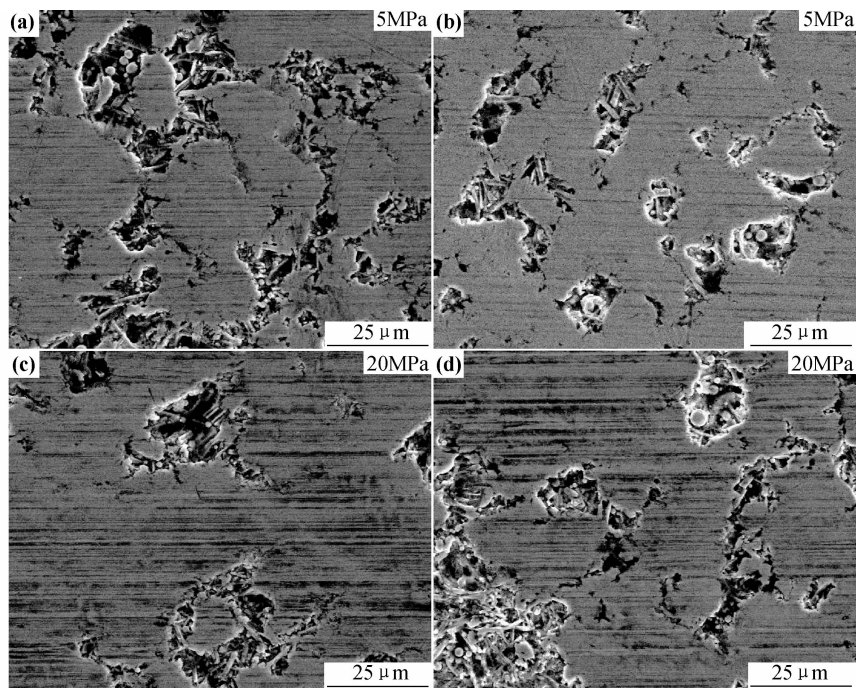


图 6 不同接触压力不同基板强度 GA 板摩擦后表面磨损形貌 (a),(c)270E-GA;(b),(d)440W-GA

Fig. 6 Surface wear morphology of different substrate strength of galvanized steel sheets under different contact pressure
(a),(c)270E-GA;(b),(d)440W-GA

(2)相同接触压力下,基板强度越高,摩擦因数越低;随着接触压力的增大,低强度镀锌板摩擦因数由 0.154 降为 0.136,高强度镀锌板摩擦因数由 0.140 降至 0.135;随着压力的进一步增加,降低的趋势变缓。

(3)摩擦因数的大小主要由模具与镀层直接接触部分占总接触面积百分比 α 和基板表面显微硬度决定;基板强度是决定基板表面显微硬度和 α 的主要因素;随着接触压力增大,不同强度基板的加工硬化率会使基板表面显微硬度逐渐接近,致使 α 差异减小,最终使基板强度对镀锌板摩擦因数影响减弱。

参考文献

- [1] 康永林. 现代汽车板工艺及成形理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009. 342—346.
- [2] NAKAJIMA S, KATAGIRI T, KATO C. Inorganic dry film lubricant coated galvanized steel sheet with excellent press formability and adhesive compatibility[R]. Kawasaki: Steel Technical Report, 2003.
- [3] ERIK D S, JOHN G L. The effect of process and material parameters on the coefficient of friction in the flat-die test[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(6—7): 868—876.
- [4] MICHAL G M, PAIK D J. The effects of forming velocity and strain path on the performance of galvanized sheet steels[A]. Galvatech 5th International Conference on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet [C]. Brussels: Centre de Recherches Métallurgiques, 2001. 73—80.
- [5] ABOTANI K, HIROHATA K, KIYASU T. Hot-dip galvanized sheet

steel with excellent press formability and surface quality for the automotive panels[R]. Kawasaki: Steel Technical Report, 2003.

- [6] LEE B H, KEUM Y T, WAGONER R H. Modeling of the friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130—131: 60—63.
- [7] GONG H Y, LOU Z L, ZHANG Z L. Studies on the friction and lubrication characteristics in the sheet steel drawing process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151(1—3): 328—333.
- [8] ANDRZEJ M. Factors influencing friction in steel sheet forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 106(1—3): 250—253.
- [9] YANAGIDA A, AZUSHIMA A. Evaluation of coefficients of friction in hot stamping by hot flat drawing test[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2009, 58(1): 247—250.
- [10] GARZA L G, VAN TYNE C J. Friction and formability of galvanized interstitial free sheet steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187—188: 164—168.
- [11] 张理扬, 左良, 李俊, 等. 汽车用合金化热镀锌 IF 钢表面摩擦系数[J]. 特殊钢, 2005, 26(4): 9—12.
- [12] 刘正林. 摩擦学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009. 158—160.

收稿日期: 2011-10-27; 修订日期: 2012-04-14

作者简介: 李波(1986—), 男, 博士研究生, 从事汽车用薄钢板研究, 联系地址: 北京科技大学材料科学与工程学院(100083), E-mail: libo_ustb@126.com

通讯作者: 康永林(1954—), 男, 博士, 教授, 从事汽车板研究, 联系地址: 北京科技大学材料科学与工程学院(100083), E-mail: kangylin@mater.ustb.edu.cn