

# 基于数字散斑相关方法的VCM深冲 钢板力学性能评价

张志城<sup>1</sup>, 从一博<sup>2</sup>, 郭照灿<sup>3</sup>, 张德海<sup>3</sup>

(1. 江苏师范大学中俄学院, 江苏 徐州 221116;

2. 河南大学民生学院, 河南 开封 475001;

3. 郑州轻工业大学 机电工程学院, 郑州 450002)

**摘要:** 目的 针对VCM深冲钢板各组分材料在变形过程中很难达到屈服和破坏的同步, 材料很容易在附加应力的作用下沿薄弱方向产生失效乃至断裂的问题, 研究在外加及内在因素影响下材料的变形机理和变形过程。方法 采用数字散斑相关方法对VCM深冲钢板及其组分材料的力学性能进行研究。引入偏离系数、影响系数、梯度系数来计算VCM深冲钢板及其组分材料之间的关系, 获取试样拉伸过程中三维变形的几何数据。结果 得到了VCM深冲钢板及其组分材料的抗拉强度、弹性模量、上屈服强度、最大力下总伸长率和断后伸长率, 其中, 深冲基板影响系数达到2.582, 影响最小的是最大力下总伸长率, 影响系数为0.806。通过XJTUDIC系统检测并分析获得了 $x$ 和 $y$ 方向的位移值、应变值和最大主应变值。结论 增加VCM薄膜后, VCM深冲钢板的应力应变能力有所提高, VCM薄膜最大应变值为91.632%, 深冲基板最大应变值为40.068%, VCM深冲钢板的最大应变值为41.632%, 其力学性能介于深冲基板和VCM薄膜力学性能之间。

**关键词:** VCM深冲钢板; 数字散斑相关方法; 力学性能; 变形

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2020.02.006

中图分类号: TP391; TG806 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2020)02-0037-06

## Mechanical Performance Evaluation of VCM Deep-impact Steel Plate Based on Digital Speckle Correlation Method

ZHANG Zhi-cheng<sup>1</sup>, CONG Yi-bo<sup>2</sup>, GUO Zhao-can<sup>3</sup>, ZHANG De-hai<sup>3</sup>

(1. Sino-Russian Institute, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China;

2. Henan University Minsheng College, Kaifeng 475001, China;

3. Mechanical and Electrical Engineering Institute, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

**ABSTRACT:** Because it is difficult for the components of VCM deep-impact steel plate to achieve the same yield and failure in the process of deformation, the material is likely to suffer from failure and even fracture along the weak direction under the effect of additional stress. The paper aims to study the deformation mechanism and process under the influence of external and internal factors. The mechanical properties of VCM deep-impact steel plate and its constituent materials were studied by means of digital speckle correlation method. The deviation coefficient, influence coefficient, gradient coefficient were introduced to calculate the relationship between VCM deep-impact steel plate and its constituent materials, the three dimensional deformation in the process of tensile sample geometry data were obtained. The tensile strength, elastic modulus, upper yield strength and the

收稿日期: 2020-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(11602229); 河南省科技攻关项目(202102210087)

作者简介: 张志城(1999—), 男, 轨道交通信号与控制专业本科生。

通讯作者: 张德海(1973—), 男, 工学博士, 教授, 主要研究方向为三维检测和先进材料成形过程控制。

most vigorously under the total elongation and break elongation of the VCM deep-impact steel sheet and its constituent materials were obtained. The influence coefficient of the deep-drawing substrate was 2.582, the influence coefficient of the total elongation was 0.806, which was the minimum. Through the detection and analysis of the XJTUDIC system, the displacement value, strain value and maximum principal strain value in the  $x$  and  $y$  directions were obtained. It was concluded that the stress and strain capacity of VCM deep-impact steel plate is improved after increasing the VCM film. The maximum strain value of VCM film is 91.632%; the maximum strain value of deep-impact substrate is 40.068%; and the maximum strain value of VCM deep impact steel plate is 41.632%. Its mechanical properties are between deep impact substrate and VCM thin film.

**KEY WORDS:** VCM deep-impact steel plate; digital speckle correlation method; mechanical property; deformation

我国的材料制备及性能评价技术与发达国家存在一定的差距,其评价技术手段直接影响了我国先进材料的研究、开发、应用和产业化进程,并影响到传统材料产业和高新技术材料产业的技术进步和机械科学的发展,因此,发展具有自主知识产权的材料性能评价技术是我国工程领域亟待解决的问题。VCM 深冲钢板属于双金属复层板,是将钢材进行表面处理后,涂敷(辊涂)或粘结有机薄膜并加热烘烤而成的产品,广泛应用在白色家电尤其是冰箱门体的外观面板上。

由于 VCM 深冲钢板各组分材料在变形过程中很难达到屈服和破坏的同步,材料很容易在附加应力的作用下沿薄弱方向产生失效乃至断裂。如何判断在外加及内在因素影响下材料的变形机理和变形过程显得尤为迫切和重要<sup>[1-4]</sup>。国内外学者对 VCM 深冲钢板的研究较少涉足,而应变模型的计算和检测是影响其性能的关键因素之一。现有的单层材料线弹性和弹塑性理论模型并不能很好地解释复层材料工程应用中的问题,限制了复层材料的进一步应用,因此,采用新的应变评价方法势在必行<sup>[5-9]</sup>。

数字散斑相关方法(Digital Speckle Correlation Method, DSCM)属于非接触的光测力学实验方法,具有试验准备简单、可测试件尺寸范围大、环境适应性强、全场非接触测量等优点,因而被引入材料、机械、电子等各行业用于工件的变形测量,并快速发展成为实验力学领域的一种主要的光学检测方法。何向前等<sup>[10]</sup>通过散斑测量方法对试样的初始应力进行了测量,实现了无接触测量。李耿等<sup>[11]</sup>通过三维摄影技术测量了铝合金的焊接变形。张德海等<sup>[12]</sup>进一步对数字图像相关法在跨学科的力学、材料、机械、机器视觉等方面进行了进展研究,并提出了下一步的研究热点。王怀文等<sup>[13]</sup>应用数字散斑相关技术研究薄膜材料

断裂问题,张喆<sup>[14]</sup>采用 DSCM 技术研究木材断裂问题,王晓光等<sup>[15]</sup>采用 DSCM 技术用来测量地震振动台实验过程中的位移变化,上述研究均未涉及 VCM 深冲钢板的应变检测研究,因此采用非接触光学测量方法来获取 VCM 深冲钢板的应变几何信息并进行评价将是一种新的积极的研究方法。

## 1 VCM 钢板力学性能评价

VCM 深冲钢板来自于河南新飞电器有限公司的冰箱门外壳,其结构组成见图 1,基板为 SPCE 深冲钢板,来自于韩国浦项公司,VCM 覆膜生产厂商是深圳市美达思装饰材料有限公司。VCM 是一种氯乙烯薄膜聚合物。

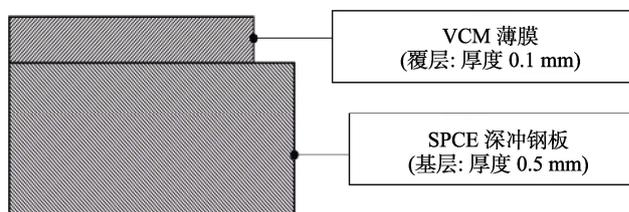


图 1 VCM 深冲钢板的组成

Fig.1 Composition of VCM deep-impact steel plate

选择 5 个力学参数(抗拉强度、弹性模量、上屈服强度、最大力下总伸长率和断后伸长率)进行测量并评价。材料分别为 VCM 深冲(SPCE)钢板、SPCE 深冲基板和 VCM 薄膜,在轧制方向  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  位置方向各选择 5 个试样作为一组。利用数字相关方法对其进行测量。两相机拍摄中心区域的中线相交于测量区域的中部,投影形成  $360\text{ mm} \times 270\text{ mm}$  的重叠视场,拉伸过程总时间为 150 s,取样频率为 2 帧/s。其力学参数取加权平均值,见表 1。

表 1 3 种材料的主要力学参数

Tab.1 The main mechanical parameters of three materials

材料	抗拉强度 $\sigma_b/\text{MPa}$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	上屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	最大力下总伸长率 $\delta_{gt}/\%$	断后伸长率 $\delta/\%$
VCM 薄膜	42.081	1394.696	35.840	40.889	48.056
VCM 深冲钢板	235.855	6959.149	127.550	35.828	50.389
深冲基板	353.487	17 969	284.164	28.889	43.27

基于复合材料混合定律,测定 VCM 薄膜和 SPCE 深冲钢板基板的数值并计算,从而获得 VCM 深冲钢板的主要力学参数,VCM 深冲钢板的计算得到的抗拉强度、弹性模量、上屈服强度、最大力下总伸长率、断后伸长率分别为 301.586 MPa, 15 206.845 MPa, 242.777 MPa, 30.889%, 44.074%。

### 1.1 偏离系数

用  $J_{ce}^{pl}$  表示出深冲 VCM 钢板的偏离系数,计算见式(1):

$$J_{ce}^{pl} = \left| \frac{V_{ce}^{exp} - V_{ce}^{cal}}{V_{ce}^{exp}} \right| \quad (1)$$

式中:  $V_{ce}^{cal}$  为深冲 VCM 钢板的计算值;  $V_{ce}^{exp}$  为深冲 VCM 钢板的实验值;  $J_{ce}^{pl}$  为深冲 VCM 钢板的偏离系数。偏离系数表示的是 SPCE 深冲基板理论值以及对 VCM 深冲钢板实验值的偏离程度大小以及影响大小,该数值的大小在一定程度上反映了复合材料混合定律的科学性。结合 VCM 深冲钢板的实验值及计算值,得出深冲 VCM 钢板抗拉强度、弹性模量、上屈服强度、最大力下总伸长率、断后伸长率的偏离系数  $J_{ce}^{pl}$  分别为 0.279, 1.185, 0.903, 0.138, 0.125, 趋势曲线见图 2。从图 2 可知,VCM 深冲钢板的最大力下总伸长率和断后伸长率对于复合材料混合定律的符合程度较好,其主要偏离系数都比 0.138 小,抗拉强度基本符合复合材料混合定律,但是上屈服强度和弹性模量不符合混合定律,尤其以弹性模量表现最明显,其偏离系数最大,为 1.185。

综上所述,最大力下总伸长率和断后伸长率较好的吻合复合材料混合定律,抗拉强度基本吻合复合材料混合定律,但是弹性模量和上屈服强度不符合复合材料混合定律。

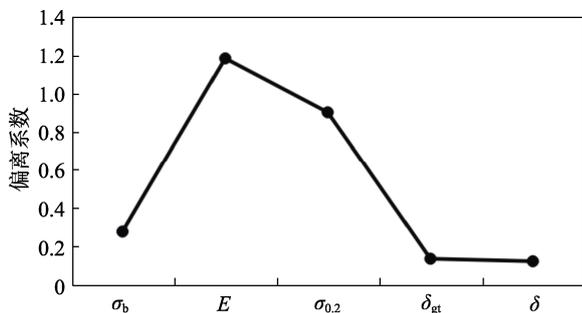


图 2 VCM 深冲钢板的偏离系数  
Fig.2 The deviation coefficient of VCM deep-impact steel plate

### 1.2 影响系数

为计算深冲钢板基板和 VCM 覆膜对 VCM 深冲钢板性能的影响大小,引入两个影响系数,  $P_{jb}$  为深冲钢板基板影响系数,  $P_{bm}$  为 VCM 薄膜影响系数。

$$P_{jb} = \frac{I_{jb}}{I_{com}} \quad (2)$$

式中:  $I_{jb}$  为深冲钢板基板的力学参数;  $I_{com}$  为 VCM 钢板的力学参数。

$$P_{bm} = \frac{I_{bm}}{I_{com}} \quad (3)$$

式中:  $I_{bm}$  为 VCM 薄膜的力学参数。

深冲钢板基板影响系数以及 VCM 薄膜影响系数可以用于评价钢板的力学性能,并且能够显示深冲钢板基板和 VCM 薄膜在复层板中各自的决定作用以及影响程度,这两种影响系数数值越大,表示该组分对于复合钢板的总体影响程度越大,反之则影响程度越小。

### 1.3 梯度系数

由于组成 VCM 复合钢板的深冲基板和 VCM 覆膜的力学性能数值两者相差较大,为了更好地进行比较,进一步引入梯度影响系数 进行研究,计算见式(4)。

$$\Delta = \left| \frac{I_{com} - I_{jb}}{I_{com}} \right| \quad (4)$$

进一步推导,得出:

$$\left. \begin{aligned} P_{jb} - \Delta &= 1 & I_{jb} &\geq I_{com} \\ P_{jb} + \Delta &= 1 & I_{jb} &< I_{com} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

深冲基板的影响程度中,弹性模量、抗拉强度、上屈服强度、梯度系数这些值和基板的影响程度呈正比关系。对于 VCM 薄膜,其中断后伸长率和最大力下总伸长率,梯度系数和薄膜的影响呈反比关系。综合式(3—5)和深冲 VCM 钢板的各项偏离系数,得到表 2。

表 2 深冲 VCM 钢板的影响系数和梯度系数  
Tab.2 The influence coefficient and gradient coefficient of deep-impact VCM steel plate

系数	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	弹性模量 $E$ /MPa	上屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	最大力下 总伸长率 $\delta_{gt}/\%$	断后伸长 率 $\delta/\%$
$P_{jb}$	1.499	2.582	2.228	0.806	0.859
$P_{bm}$	0.178	0.000	0.281	1.141	0.954
	0.499	1.582	1.228	0.194	0.141

由表 2 可以看出,影响系数中深冲基板对 VCM 钢板影响最大的是弹性模量,其值可达到 2.582;影响最小的是最大力下总伸长率,其值为 0.806;影响再大一些的是断后伸长率,影响系数为 0.859。仅有这两个参数值小于 1,也说明深冲钢板基板对 VCM 深冲钢板力学性能的影响参数中,弹性模量、抗拉强度、上屈服强度的影响远远大于断后伸长率和最大力下总伸长率的影响;VCM 薄膜对 VCM 钢板的影响中,影响系数最小的是弹性模量,为 0,所以不需要考虑复层材料中 VCM 薄膜对其弹性模量的影响;影

响系数中最大的是最大力下总伸长率为 1.141，其次是断后伸长率为 0.954，说明在烘烤覆膜 VCM 薄膜之后，在延伸性能方面，VCM 复层板得到一定的加强，并且对于抗拉强度和上屈服强度方面有一定影响，但其影响系数都小于 0.3，说明影响程度较小。通过梯度系数的分析，发现抗拉强度小于上屈服强度，上屈服强度小于弹性模量，这样更加说明了对 VCM 复层板力学性能的影响中，对于深冲基板，影响数值大小主要贡献来自弹性模量、上屈服强度和抗拉强度；对于 VCM 薄膜的梯度影响系数上，最大力下总伸长率大于断裂强度，说明薄膜对于 VCM 深冲钢板的最大力下总伸长率的影响大于断后伸长率的影响。

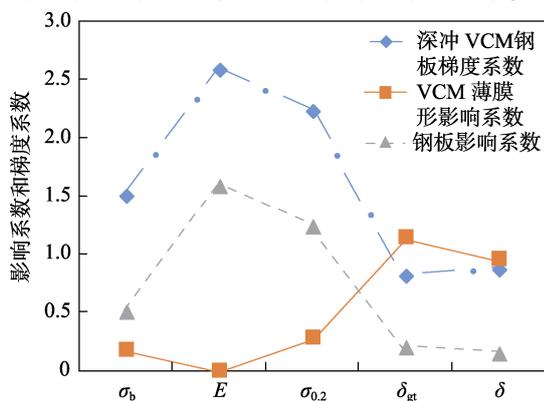


图 3 深冲 VCM 深冲钢板的影响系数和梯度系数  
Fig.3 The influence coefficient and gradient coefficient of deep-impact VCM deep-impact steel plate

## 2 基于数字散斑相关方法的 VCM 钢板力学性能评价

采用了 XJTUDIC 系统用于数字散斑相关方法的计算处理，该系统能够很好地探测出试样的三维轮廓，并且能够直观地展示出工件的应力场、应变场和成形极限图 (FLD)，并且，对于需要重点测量的位置可以定点测量追踪，以便于能够重点地在动态测量中测量出任意时刻、任意位移的应变状态，并且该系统还可以应用到各种不同条件下的力学测量情况。

选取深冲基板、深冲 VCM 钢板、VCM 薄膜 3 种材料，并取其 45° 方向的试样进行实验对比分析，运用 XJTUDIC 系统，在试样的 x 轴和 y 轴方向上各取一对种子点，在试样拉伸过程中对变形前后的散斑图像进行对比分析，获得试件表面上种子点的运动，以及 XJTUDIC 系统中的散斑计算，再经过三维重建，计算得到种子点所在区域的三维位移场，并在此基础上得到物体的三维应变场，以及各种变形场的所有数据。

如图 4 为数字散斑测量系统对 VCM 薄膜 45° 方向试样在三维方向位移的变化情况，本次实验只选用拉伸试验中最终将要拉断时刻的应变云图，并以此来评定材料的力学性能，从该实验中获得 3 种材料的 x 轴和 y 轴方向的应变和最大主应变。

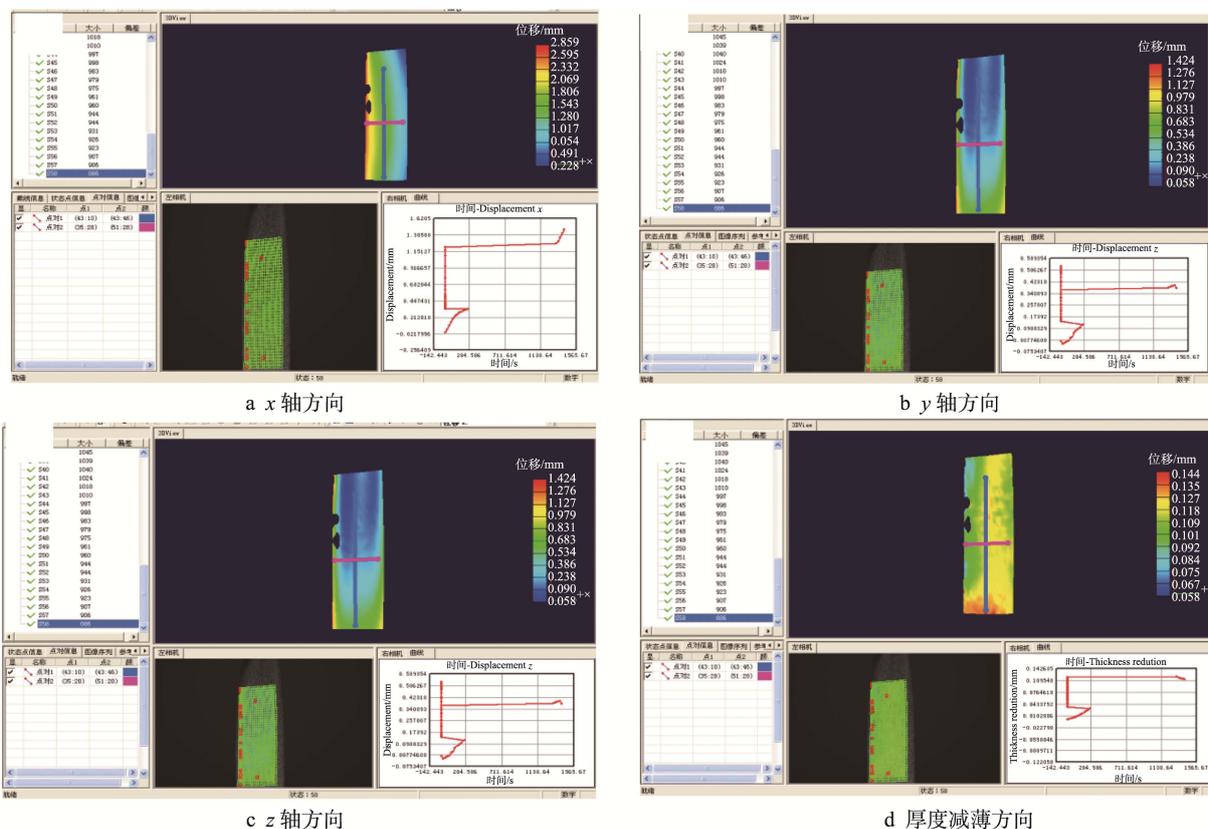


图 4 45° 方向的 VCM 薄膜的最大位移云图及散斑处理图像

Fig.4 The maximum displacement cloud graph and speckle treatment image of VCM film along the 45° direction

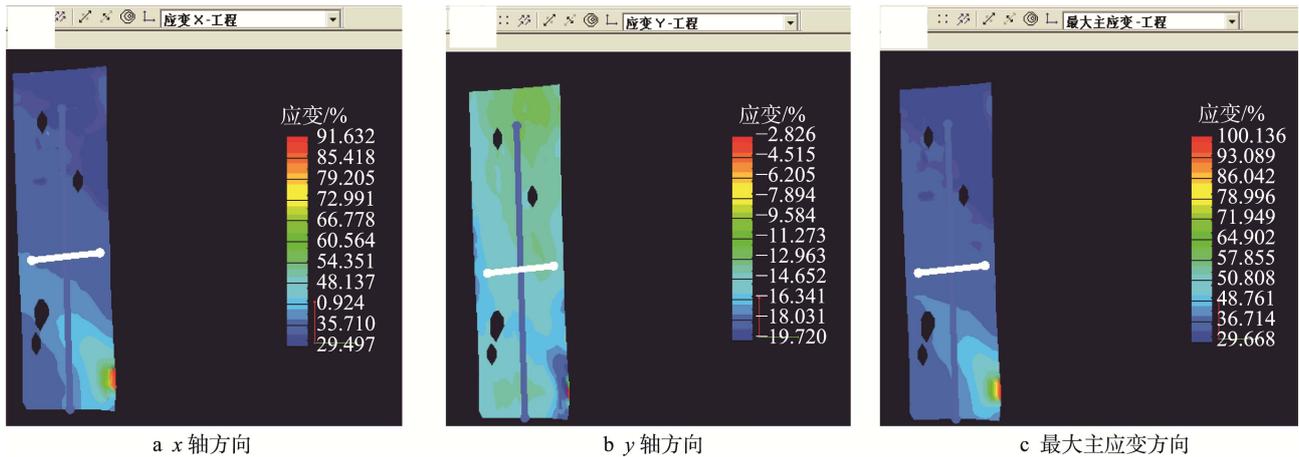


图 5 VCM 薄膜试样 45° 方向的 x 轴方向检测获得的应变

Fig.5 The strain measured along the x axis direction of VCM film sample along the 45° direction

以 VCM 薄膜为例，测得在 x 轴方向的应变上，深冲 VCM 钢板大于对应的深冲基板，由于材料的拉伸方向是 x 轴方向，这就说明了在增加 VCM 薄膜材料之后，对于 VCM 深冲钢板的最大应变值提高了，其中 VCM 薄膜最大应变值为 91.632%，而深冲基板最大应变值为 40.068%，对于复合材料的 VCM 深冲钢板最大应变值为 41.632%，这些数据说明在 x 轴方向上 VCM 深冲钢板的力学性能有所提高，处于深冲基板和 VCM 薄膜的力学性能之间。对于 y 轴方向和最大主应变获得的数值如表 3 所示。

表 3 3 种材料采用数字散斑方法测得的应变数值  
Tab.3 Strain values of three materials measured by digital speckle method

材料	x 方向最大主应变	y 方向最大主应变	最大主应变
深冲 VCM 钢板基板	0.400 68	-0.153 81	0.400 63
深冲 VCM 钢板	0.416 32	-0.077 83	0.468 51
VCM 薄膜	0.916 32	-0.028 26	1.001 36

由表 3 可推出图 6，可得，在 VCM 深冲钢板的 x 方向和 y 方向上的应变值均大于其相同方向深冲基板的应变值，说明在深冲基板上耦合 VCM 薄膜之后，

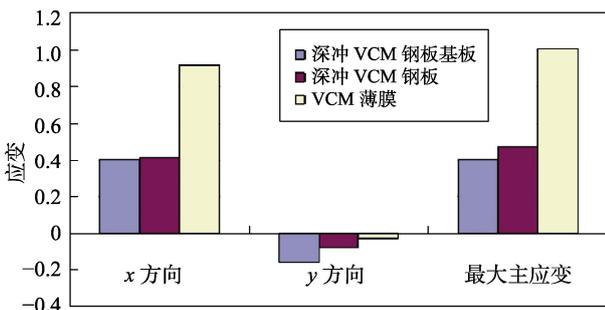


图 6 3 种材料应变数值对比

Fig.6 The comparison of strain values of the three materials

整体提高了深冲基板的应变能力，VCM 深冲钢板的综合性能相较于深冲基板有了一定的提升，其力学性能介于深冲基板和 VCM 薄膜之间。

### 3 结论

1) 综合考虑 VCM 钢板以及各种组分材料的影响系数和梯度系数，发现对于 VCM 薄膜的影响系数中，断后伸长率和最大力下总伸长率影响最大，但是对于材料的上屈服强度和抗拉强度影响较小，影响最小的是弹性模量，说明 VCM 薄膜对 VCM 深冲钢板的塑性和延展性的影响较大，但是对强度和刚度方面的影响较小。对于深冲基板的影响系数，发现其中弹性模量影响系数最大，其次为上屈服强度和抗拉强度，对断后伸长率和最大力下总伸长率影响较大，说明深冲基板是决定 VCM 钢板强度和刚度方面性能的主要因素，相反深冲钢板基板对 VCM 深冲钢板塑性性能的影响较小。对于梯度系数而言，对深冲基板弹性模量的影响最大的是深冲钢板基板，其次为上屈服强度和抗拉强度，而 VCM 薄膜覆板对断后伸长率的影响大于对最大力下总伸长率的影响。

2) 在 VCM 深冲钢板的 x 方向和 y 方向上的应变值都大于其相同方向的深冲基板的应变值，这也说明了在深冲基板上覆膜 VCM 薄膜之后，提高了深冲基板的应变能力，也说明了相应的力学性能方面，VCM 深冲钢板相较于深冲基板有一定的提升，这些力学性能的提升正好也处于深冲基板以及 VCM 薄膜两者的力学性能之间。

#### 参考文献：

[1] 周亚军, 桂赢, 张德海, 等. 基于数字散斑方法的深冲 VCM 钢板应变检测研究[J]. 锻压技术, 2018, 43(9): 47—54.

ZHOU Ya-jun, GUI Ying, ZHANG De-hai, et al. Strain

- Measurement of Deep Drawing Steel Plate VCM Based on DIC Method[J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43(9): 47—54.
- [2] 王春阳, 姜雁斌, 谢建新, 等. 嵌入式铝/钢冷轧复合带材铝层的厚度波动形成机理与控制[J]. 中国有色金属学报: 英文版, 2017, 27(5): 1011—1018.  
WANG Chun-yang, JIANG Yan-bin, XIE Jian-xin, et al. Formation Mechanism and Control of Aluminum Layer Thickness Fluctuation in Embedded Aluminum Steel Composite Sheet Produced by Cold Roll Bonding Process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(5): 1011—1018.
- [3] ZHANG De-hai, XIE Gui-zhong, LI Yan-qin, et al. Strain and Mechanical Properties of VCM Multi-Layer Sheet and their Composites Using Digital Speckle Correlation Method[J]. Applied Optical, 2015, 54(25): 7534—7541.
- [4] 詹梅, 李锐, 郑泽邦, 等. 旋压成形损伤断裂缺陷预测研究进展[J]. 精密成形工程, 2019, 11(5): 13—20.  
ZHAN Mei, LI Rui, ZHENG Ze-bang, et al. Research Progress on Fracture Prediction in Spin-forming[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(5): 13—20.
- [5] ZHANG De-hai, LI Yan-qin, XIE Gui-zhong, et al. Digital Image Correlation Method for Measuring Deformations of Vinyl Chloride-Coated Metal Multilayer Sheets[J]. Modern Physics Letters B, 2019, 33(5): 1—18.
- [6] 万敏, 程诚, 孟宝, 等. 金属板材屈服行为与塑性失稳力学模型在微尺度下的应用[J]. 精密成形工程, 2019, 11(3): 1—13.  
WAN Min, CHENG Cheng, MENG Bao, et al. Micro-Feeding Characteristics of Chromium Powder With Irregular Micron-Size Particles Actuated by Acoustic Radiation Force[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(3): 1—13.
- [7] SHENG L Y, YANG F, XI T F, et al. Influence of Heat Treatment on Interface of Cu/Al Bimetal Composite Fabricated[J]. Composites: Part B, 2011, 42: 1468—1473.
- [8] 卓柏呈, 李培杰, 宋立博. 基于高通量计算的成形过程分析[J]. 精密成形工程, 2019, 11(2): 1—8.  
CHO Po-chen, LI Pei-jie, SONG Li-bo. Forming Process Based on High Throughput Calculation[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(2): 1—8.
- [9] 张大伟, 赵升吨, 王利民. 复杂型面滚轧成形设备现状分析[J]. 精密成形工程, 2019, 11(1): 1—10.  
ZHANG Da-wei, ZHAO Sheng-dun, WANG Li-min. Current Status of Rolling Forming Machine for Complex Profile[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(1): 1—10.
- [10] 何向前, 殷咸青, 牛靖, 等. 初始应力对三维光学轮廓法测试焊接接头残余应力的影响[J]. 精密成形工程, 2020, 12(1): 75—79.  
HE Xiang-qian, YIN Xian-qing, NIU Jing, et al. Effects of Initial Stress on Residual Stress of Welded Joints Tested by Three-Dimensional Optical Contour Method[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(1): 75—79.
- [11] 李耿, 殷咸青, 牛靖, 等. 采用光学测量技术研究铝合金焊接变形[J]. 精密成形工程, 2020, 12(1): 92—97.  
LI Geng, YIN Xian-qing, NIU Jing, et al. Welding Deformation of Aluminum Alloy by Optical Measurement Technology[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(1): 92—97.
- [12] 张德海, 李艳芹, 刘建秀, 等. 基于数字散斑相关法的双金属复层板应变光学检测问题研究[J]. 应用光学, 2018, 39(6): 873—879.  
ZHANG De-hai, LI Yan-qin, LIU Jian-xiu, et al. Strain Optical Detection Technology Applied for Bi-Metal Clad Plate Using Digital Speckle Correlation Method[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 40(7): 120—126.
- [13] 王怀文, 亢一澜, 富东慧. 应用数字散斑相关技术进行薄膜材料断裂问题研究[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2001, 14(2): 100—104.  
WANG Huai-wen, KANG Yi-lan, FU Dong-hui. Application of Digital Speckle Correlation Technique to Study Thin Film Fracture Problem[J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 2001, 14(2): 100—104.
- [14] 张喆. 数字散斑相关法测量木材断裂韧性的应用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.  
ZHANG Zhe. Application Research of Measuring Wood Fracture Toughness Using Digital Speckle Correlation Method[D]. Beijing: Beijing Forest University, 2013.
- [15] 王晓光, 梁晋, 尤威, 等. 地震振动台实验三维全场位移测量的研究[J]. 应用光学, 2016, 37(4): 567—572.  
WANG Xiao-guang, LIANG Jin, YOU Wei, et al. 3D Full Field Displacement Measurement of Seismic Shaking Table Experiment[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(4): 567—572.