

数字化应变分析技术在汽车零部件冲压成形性能评价中的应用

郝志强^{1,2}, 刘文博^{1,2}, 徐鑫^{1,2}, 梁笑^{1,2}, 李春林^{1,2}

(1.海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室, 辽宁 鞍山 114009;

2. 鞍钢集团钢铁研究院, 辽宁 鞍山 114009)

摘 要: 以 210P1 冲压汽车零部件左/右 C 柱内板为例, 利用数字化应变分析技术, 结合金属塑性成形体积不变原理与 210P1 的成形极限曲线, 获得了重点关注区域内钢板的应变分布云图与最大厚度减薄率值云图。结果表明, 重点关注区域内钢板的最大厚度减薄率值为 20.67%, 小于 25% 的厚度减薄安全裕度值; 最小成形极限值为 21.8%, 大于 10% 的成形安全裕度值, 钢板成形性能优良, 且具有较高的使用安全性。

关键词: 数字化应变分析; 成形极限; 厚度减薄率; 安全裕度

Application of Digital Strain Analysis Technology in Evaluation of Stamping Forming Performance of Automotive Parts

HAO Zhiqiang^{1,2}, LIU Wengbo^{1,2}, XU Xin^{1,2}, LIANG Xiao^{1,2}, LI Chunlin^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Metal Material for Marine Equipment and Application, Anshan 114009, Liaoning, China; 2. Ansteel Iron & Steel Research Institutes, Anshan 114009, Liaoning, China)

Abstract: Taking the left/right C-pillar inner plate of 210P1 stamping automotive components as an example, using digital strain analysis technology, combined with the principle of volume invariance in metal plastic forming and the forming limit curve of 210P1. Obtained the strain distribution contour map and maximum thickness reduction rate contour map of the steel plate in the key focus area. The results show that the maximum thickness reduction rate of steel plates in the key focus area is 20.67%, which is less than the safety margin value of 25% thickness reduction; The minimum forming limit value is 21.8%, which is greater than the forming safety margin value of 10%. The steel plate has excellent forming performance and high usage safety.

Key words: digital strain analysis; forming limit; thickness reduction rate; safety margin

目前, 随着社会的高速发展, 汽车已成为生活中不可或缺的工具, 汽车工业已成为许多发达国家的支柱产业。汽车零部件的冲压过程是汽车制造的一个重要组成部分, 由于汽车零部件大部分是空间曲面结构且形状非常复杂, 从而决定了其在成形过程中的变形复杂性, 易于出现开裂、缩颈、起皱等冲压缺陷^[1-2]。针对此类缺陷往往通过调整模具参数、提高材料性能, 并结合冲压工程师经验等手段来解决。但是改进方式受冲压工程师经验的限制, 并且缺少可量化的数据支持。数字化应变分析技术的出现, 能够快速、准确的反映冲压成形过程中的应变特点; 通过比较钢板实际冲压过程中的应变值与钢板自身成形极限曲线(FLC曲线)^[3-4]的相对位置关系, 评价钢板的冲压成形性能。

本文以鞍钢集团生产的含磷钢 210P1 冲压国内某车型典型零部件左/右 C 柱内板为例, 利用数字化应变分析技术对冲压成形后的汽车零部件进行应变分析, 测量其不同位置的主次应变值以及厚度减薄率值, 并结合 210P1 的成形极限曲线, 获得零部件冲压成形的安全裕度值, 进而对 210P1 冲压左/右 C 柱内板的成形性能进行评价。

1 试验材料

试验材料为鞍钢集团生产的含磷钢 210P1-0.70mm, 其通过在全间隙原子钢中加入少量磷元素, 起到了

一定的强化作用，使其不但拥有良好的成形性能，并且具有一定的强度，被广泛应用于汽车零部件的生产。含磷钢 210P1-0.70mm 的力学性能如表 1 所示；并参照“GB/T 15825.8-2008 金属薄板成形性能与试验方法，第 8 部分：成形极限图(FLD)测定指南”，测定磷钢 210P1-0.70mm 的成形极限曲线（FLC 曲线），如图 1 所示。

表 1 210P1-0.70mm 单向拉伸力学性能指标
 Table 1 Mechanical properties of 210P1-0.70mm

屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	延伸率 /%	r ₀ 值	r ₄₅ 值	r ₉₀ 值	n 值
222	401	33.3	1.45	1.49	2.03	0.23

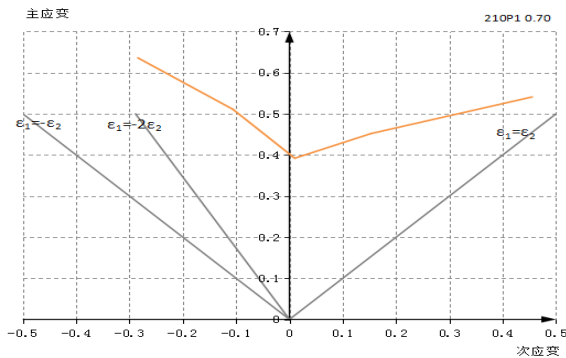


图 1 210P1-0.70mm 成形极限曲线
 Fig.1 Forming Limit Curve of 210P1-0.70mm

2 数字化应变分析原理及优缺点

数字化应变分析技术是将钢板的成形极限曲线（FLC 曲线）与计算机视觉系统的强大图像处理能力相结合的自动应变测量技术。汽车零部件冲压成形之前，在钢板表面印制所需尺寸的方形或圆形网格；待汽车零部件冲压成形之后，对发生变形的方形或圆形网格进行测量，再结合金属塑性成形体积不变原理，对钢板冲压成形之后表面的应变分布、厚度减薄率值进行分析比较，最终对钢板冲压汽车零部件的成形性能进行评价^[5-7]。

数字化应变分析技术有如下优点。第一，印制方形或圆形网格区域内的主/次应力、主/次应变等都可以获得，便于后续计算；并且所测结果可以彩色云雾图或柱状图效果显示，可以方便地与商业 CAE 冲压模拟软件的仿真结果对比分析。第二，可以进行大面积的应变分析，测量范围大；可以对变形复杂区域（如变形大于 90 度）进行测量，测量角度广。并且应变分析由计算机完成，误差小，结果精度高。

同时，数字化应变分析技术缺点主要在于汽车零部件冲压成形过程中，由于钢板与冲压模具发生接触，导致部分区域所印网格被刮花，致使出现无法进行应变分析的结果。

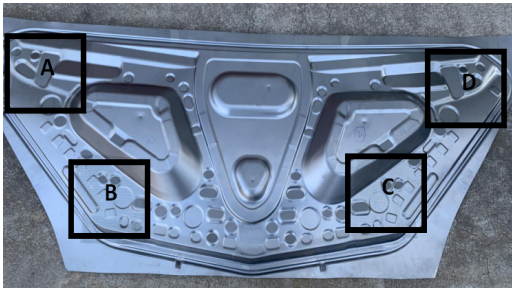


图 2 零件外观及重点关注区域
 Fig.2 Appearance of Parts and Key Areas of Concern

3 左/右 C 柱内板数字化应变分析

汽车零部件左/右 C 柱内板为提高材料利用率及降低冲压成形成本，采用一模两件的方式，所用初始钢板尺寸为 0.70mm*1920mm*775mm。在钢板表面采用电化学腐蚀的方式，印制 2.5mm*2.5mm 的方形网格，印制网格的尺寸和区域可以根据实际情况进行调整，本文针对汽车零部件左/右 C 柱内板将印制网格

区域定义为 A、B、C、D 四个区域。

将印制好网格的钢板进行冲压成形，为了最大程度的保留网格区域的应变情况以及网格的清晰度，只对钢板进行冲压第一序深拉伸工序。图 2 为深拉伸后钢板及表面重点关注区域。对深拉伸成形之后钢板表面的变形网格进行测量，本文采用德国 VIALUX 公司的 AutoGrid 应变测量系统，AutoGrid 应变测量系统由四镜头投影仪组成，从四个不同方向来同时确认测量点，能够更稳定、准确地测量钢板冲压成形后的表面网格变化^[8-9]，进而获得钢板冲压成形过程中的主/次应变；再结合金属塑性成形体积不变原理，得出厚度减薄率值。图 3 为 A、B、C、D 四个区域的厚度减薄率值云图。图 4 为 A、B、C、D 四个区域的应变分布云图。

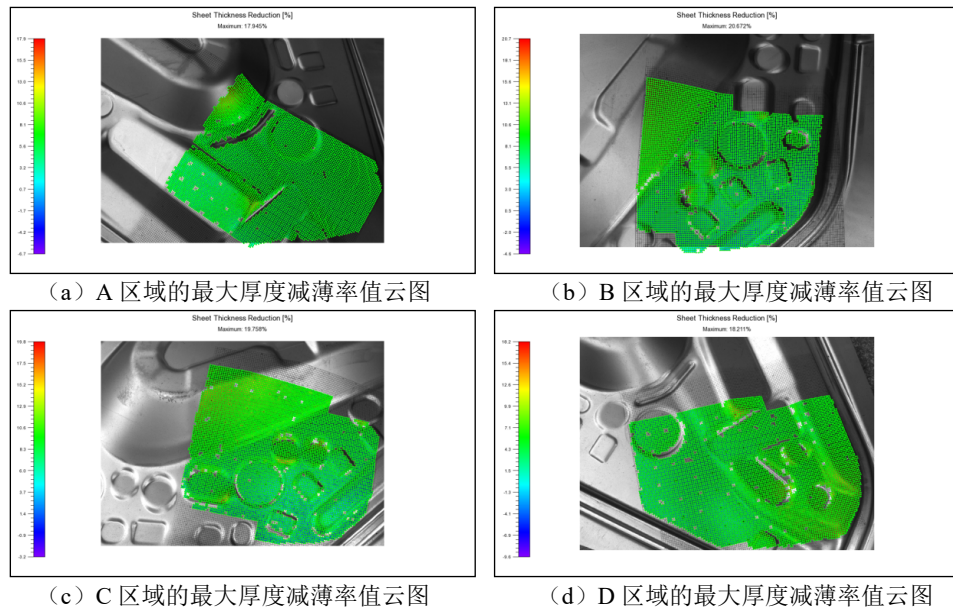


图 3 网格区域的最大厚度减薄率值云图

Fig.3 Contour Map of Maximum Thickness Reduction Rate in Mesh Area

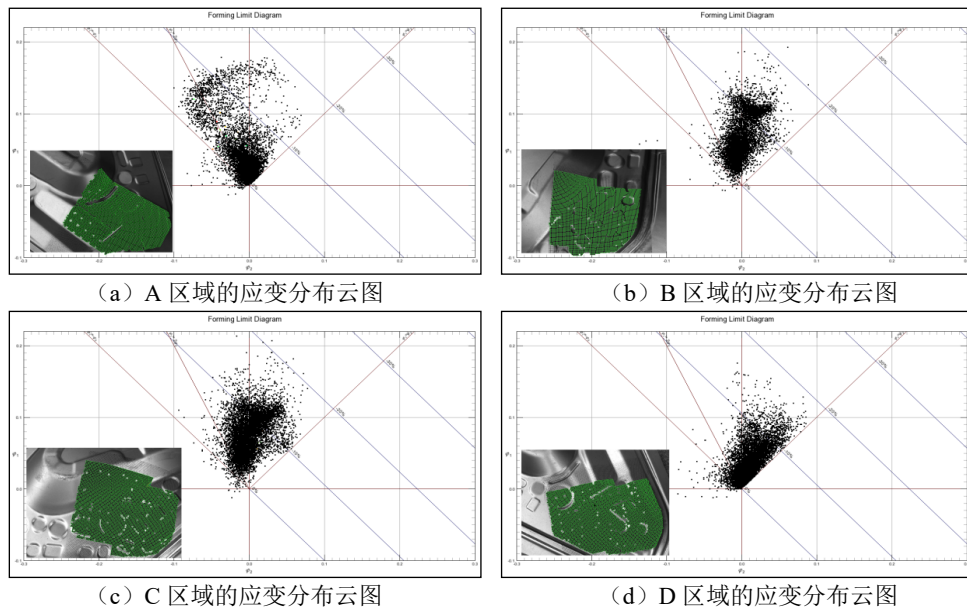


图 4 网格区域的应变分布云图

Fig.4 Contour Map of Strain Distribution in Mesh Area

4 数字化应变分析结果及讨论

从图 3 中可以看出，A、B、C、D 四个区域钢板冲压成形后厚度减薄率最大值分别为 17.95%、20.67%、19.76%、18.21%；针对钢板冲压成形后厚度减薄率最大值，汽车企业需要将其控制在 25% 的厚度减薄安全裕度之内，视为安全的冲压成形。因此，从冲压成形后厚度减薄率最大值这一角度出发，使用 0.7mm 的

210P1 冲压左/右 C 柱内板汽车零部件, 冲压成形安全。

从图 4 中可以看出, A、B、C、D 四个区域钢板冲压成形后的应变分布, 涵盖了汽车零部件冲压成形过程的拉-压变形、平面变形、拉-拉变形三种变形特点。在这里, 需要将钢板的成形极限曲线与应变云图结合在一起, 获得钢板在冲压成形过程中的最小成形极限值。以 A 区域为例, 将 210P1-0.70mm 的成形极限曲线与应变分布云图结合在一起, 如图 5 所示, 其中曲线 1 为 210P1-0.70mm 的成形极限曲线, 钢板冲压成形后的应变值需要在曲线 1 的下方, 以确保不发生冲压开裂, 将应变值的最大值与所对应成形极限曲线差值的最小值, 称为钢板在冲压成形过程中的最小成形极限值, 因此最小成形极限值应大于 0。然而, 成形极限曲线是基于 GB/T 15825.8-2008《金属薄板成形性能与试验方法 第 8 部分: 成形极限图 (FLD) 测定指南》中变形部位产生颈缩或破裂时计算极限应变获得; 然而钢板实际冲压成形过程中, 不允许出现颈缩或破裂现象。因此, 汽车企业设定一个应变安全裕度值 10%, 即钢板在冲压成形过程中, 最小成形应变值应该大于 10%, 才视为冲压成形安全。为直观显示出安全裕度值, 在应变分布云图中成形极限曲线 (曲线 1) 向下移动 10% 获得曲线 2, 确保冲压成形后的应变分布均在曲线 2 之下, 视为冲压成形安全。则 A、B、C、D 四个区域钢板冲压成形后的最小成形极限值为 24.7%、23.8%、21.8%、26.3%, 均大于 10% 的安全裕度值, 从冲压成形后最小成形极限值这一角度出发, 使用 0.7mm 的 210P1 冲压左/右 C 柱内板汽车零部件, 冲压成形安全。

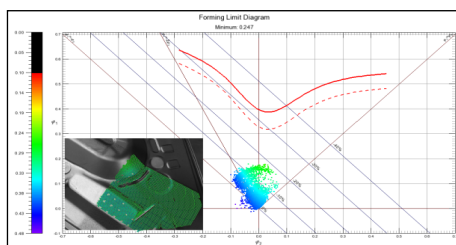


图 5 A 区域成形极限曲线与应变分布云图结合在一起
Fig.5 Combining the Forming Limit Curve and Strain Distribution Contour Map in Region A

5 结论

利用数字化应变分析技术获得了鞍钢集团 210P1-0.70mm 冲压汽车零部件左/右 C 柱内板的应变分布云图和厚度减薄率值云图。结合应变分布云图与 210P1-0.70mm 的成形极限曲线, 得出应变分布完全在成形极限曲线之下, 且冲压成形的最小成形极限值为 21.8%, 大于 10% 的安全裕度值, 汽车零部件安全裕度高, 使用安全性满足要求。汽车零部件冲压成形最大厚度减薄率值为 20.67%, 小于 25%, 汽车零部件无开裂、颈缩现象。该数字化应变分析法对于评价钢板的冲压成形性能给出了理论支撑以及量化的数据支持, 对零件试冲、模具调试等阶段也具有较为精确、实用地指导意义, 同时对于汽车零部件的选材有实际的应用价值。

参考文献:

- [1] 马鸣图, 柏建仁. 汽车轻量化材料及相关技术的研究进展[J]. 新材料产业, 2006(6):37-42.
- [2] 崔令江. 汽车覆盖件冲压成形技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [3] 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.
- [4] 祝洪川, 李荣锋. 成形极限曲线测定 GB/T 24171-2009 国家标准简介及应用建议[J]. 物理测试, 2010(6):42-46.
- [5] 郝志强, 徐鑫, 丁庶炜, 等. 基于网格应变分析技术的车身零部件选材研究[J]. 鞍钢技术, 2023(02):28-30.
- [6] 郝志强, 刘仁东, 徐鑫, 等. 基于数字化网格应变法在汽车用钢冲压成形中的探索与应用[J]. 鞍钢技术, 2022(06):39-44.
- [7] 项辉宇, 钟约先, 吴伯杰. 基于网格试验法的汽车覆盖件冲压成形分析[J]. 清华大学学报, 2004, 44(5): 601-604.
- [8] 曲新军, 吴涤, 缪心雷. 成形应变分析介绍及应用[J]. 生产现场, 2015(2):47-49.
- [9] 詹俊杰. 网格应变分析试验的应用[J]. 本钢技术, 2014(1):23-26.