

汽车覆盖件用金属板材的抗凹性能

张钧萍, 方刚, 周佳, 周湛淞, 牛力强
(中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401122)

摘要: 以 3 种常用的汽车外覆盖件用钢板和铝合金板材为研究对象, 根据实际服役工况特点采用一次加载方法评估材料的抗凹性能。研究表明, 一次加载条件下材料的变形呈现线性弹性变形、失稳凹陷和非线性变形 3 个典型阶段, 厚度、材料性能、预变形和热处理均影响材料的抗凹性能。增加厚度、选用弹性模量更高的钢板并控制变形量有利于提高初始刚度; 增加厚度、选用屈服强度较高且具有明显烘烤硬化性能的材料可以提升失稳凹陷载荷。获得了材料力学特性、板料厚度、变形程度和热处理状态 4 个关键因素对抗凹性能的影响规律, 为材料选择及抗凹性能控制提供参考。

关键词: 抗凹性; 一次加载; 初始刚度; 失稳凹陷载荷; 金属板材

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.11.004

中图分类号: TG386.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 11-0023-07

Dent resistance of sheet metal for automobile panel

Zhang Junping, Fang Gang, Zhou Jia, Zhou Zhansong, Niu Liqiang
(China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

Abstract: For three commonly used steel sheets and aluminium alloy sheets for automobile panels, according to the characteristics of actual service conditions, the dent resistances of materials were evaluated by one-time loading method. The research results indicate that the deformation of material under one-time loading condition exhibits three typical stages, such as linear elastic deformation, unstable dent and non-linearity deformation, and the thickness, material properties, pre-deformation and heat treatment all affect the dent resistance of material. It is beneficial for the initial stiffness improvement to increase the thickness, use steel sheet with higher elastic modulus and control the deformation amount, and the unstable dent load can be enhanced by increasing the thickness and selecting materials with higher yield strength and significant baking hardening properties. The influence laws of four key factors, namely, mechanical properties of material, sheet thickness, deformation degree and heat treatment state, on the dent resistance are obtained, which provides the reference for material selection and dent resistance control.

Key words: dent resistance; one-time loading; initial stiffness; unstable dent load; sheet metal

作为汽车的“门面”, 车身外覆盖件的质量和

性能十分重要, 主要涉及表面状态、抗腐蚀性、强度寿命、减振性能和抗凹性能等, 其中, 抗凹性能是衡量其表面质量和服役性能的一项重要指标。抗凹性能是指试样在外载荷作用下抵抗凹陷挠曲或者局部凹陷变形, 并保持其形状的能力^[1-7]。实际服

收稿日期: 2024-02-21; 修订日期: 2024-05-26

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2016YFB0300805)

作者简介: 张钧萍 (1988-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: zhangjunping@caeri.com.cn

[9] 刘静, 张明, 陈浩. 基于响应面法的台阶式凸模冲裁工艺参数优化 [J]. 塑性工程学报, 2016, 23 (3): 52-57, 67.

Liu J, Zhang M, Chen H. Optimization of blanking process parameters of stepped punch based on response surface method [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2016, 23 (3): 52-57, 67.

[10] 赵艳梅. 基于 ANSYS Workbench 的某车架有限元分析及轻量化研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2018.

Zhao Y M. Finite Element Analysis and Lightweight Research of A Frame Based on ANSYS Workbench [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.

[11] 李莉, 张赛, 何强, 等. 响应面法在试验设计与优化中的应用 [J]. 实验室研究与探索, 2015, 34 (8): 41-45.

Li L, Zhang S, He Q, et al. Application of response surface methodology in experimental design and optimization [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015, 34 (8): 41-45.

[12] Marretta L, Ingarao G, Di Lorenzo R. Design of sheet stamping operations to control springback and thinning: A multi-objective stochastic optimization approach [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2010, 52 (7): 914-927.

[13] Ifiti T, Aydin L, Erten R. Optimization of stamping process parameters [J]. International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering, 2021, 7 (2): 50-56.

役工况条件下,人为的手掌及肘部按压、偶然的石子冲击均可能导致汽车覆盖件局部位置凹陷,从而影响汽车外观质量。汽车工业的发展使轻量化技术迅速普及,汽车制造商及其上游企业为实现轻量化,采用轻质合金或高强材料替代传统的软钢,或通过结构优化的方式降低零件局部的厚度。这些轻量化手段能够有效降低质量,但却可能降低覆盖件局部的抗凹性能^[6-7]。为解决轻量化导致抗凹性能不足的问题,需在汽车设计和制造阶段对材料和零件进行抗凹性能评估,优化结构设计并选用合适的材料,使外覆盖件的抗凹性能达到要求^[8-12]。

汽车行业及学界十分重视覆盖件的抗凹性能研究,早在 20 世纪 70 年代,DiCello J A 等^[13]通过将多种金属材料制成矩形双曲试样并进行抗凹试验,获得了抗凹性能与材料力学性能、厚度等方面的关系,并总结了凹痕深度和相关参数的经验计算公式。Daniel D 等^[5]对直径为 $\Phi 300$ mm 的筒形单曲面扁壳进行了抗凹性试验,研究了钢板厚度、屈服强度和扁壳曲率对静态抗凹性能的影响,提出静态凹痕抗力与材料屈服强度、厚度间的经验计算公式。早期抗凹性能研究无统一的试样和试验方法,学者常根据覆盖件的实际形状进行探索研究,导致试验结果不具备可比性。1987 年,北美 12 家汽车材料生产商与福特、通用、克莱斯勒 3 家汽车制造商共同成立 A/SP 组织;1990 年,A/SP 组织成立抗凹测试标准化特别组,致力于抗凹测试的规范化。在该小组的努力下,SAE J2575—2004^[14]成为抗凹性能测试的标准方法。该标准的测试对象涵盖了板材、覆盖件零件和覆盖件总成,对静态抗凹性能测试和动态抗凹性能测试流程及相关设备和试验要求做了详细说明,针对抗凹性能测试提出了一次加载和循环增量加载两种方法。

循环增量加载法通过逐级加载和卸载回零的方式获得试样在不同载荷条件下的凹痕深度,以规定凹痕深度对应的载荷作为评估材料或试样的抗凹性能指标,更倾向于表征材料的“塑性”抗凹性,在多次加载卸载过程中,材料的包辛格效应、试验扰动等因素可能对结果产生影响^[15]。与之相对,一次加载法通过固定位移或载荷加载后获得材料的载荷-位移数据,可同时获得材料“弹性”和“塑性”方面的抗凹性能特征,并规避包辛格效应和试验扰动的影响,更贴近于实际工况场景。当前,已有大量文献^[1-3,4-10]对循环增量加载法的抗凹性能进行了系统研究,部分学者^[4,11,15]采用仿真的方

式研究了零件的抗凹性能,但仍缺乏针对材料在一次加载条件下的抗凹性能的系统研究。基于此,本文选择了两种典型的汽车覆盖件用钢板和一种汽车覆盖件用铝板,采用 SAE J2575—2015^[16]的标准试样通过一次加载获得各试样的一次加载载荷-位移响应曲线,全方面分析材料性能、厚度、预变形、热处理等因素对抗凹性能的影响规律,对基于轻量化的覆盖件材料选择以及零件的抗凹性能改进具有一定参考价值。

1 材料及试验方法

1.1 试验材料

试验采用 3 种典型的汽车覆盖件用金属板材,分别为 HC180BD+Z 钢板、DX53D+Z 钢板和 6016 铝合金板。其中,两种钢板包括 0.60、0.65 和 0.70 mm 3 种常用厚度规格,铝合金板材的厚度为 0.95 mm。

参考 GB/T 228.1—2021^[17],沿垂直于板材轧制方向从 3 种材料取样制为 A50 拉伸试样,采用 MTS E45.305 电子万能拉伸试验机获得的屈服强度如表 1 所示。HC180BD+Z 钢板材的强度比另外两种材料的强度高 50~60 MPa 左右,DX53D+Z 钢板的屈服强度略高于 6016 铝合金板材的屈服强度。

表 1 材料的厚度与屈服强度

Table 1 Yield strengths and thickness of materials

材料	厚度/mm	屈服强度/MPa
HC180BD+Z 钢板	0.60	214
	0.65	195
	0.70	215
DX53D+Z 钢板	0.60	156
	0.65	165
	0.70	156
6016 铝合金板材	0.95	141

1.2 试验试样

根据 SAE J2575—2015^[16],将长度为 305 mm、宽度为 127 mm 的板材冲制为图 1 所示的试样,试样的中间部分凸起,凸起高度由冲压变形量决定。为研究不同应变变量对抗凹性能的影响,通过控制冲压行程获得预变形量为 2.0%、3.5%和 5.0%这 3 种面内应变状态的试样。

1.3 热处理工艺

为研究热处理工艺对材料抗凹性能的影响规律,选取部分试样在电热鼓风干燥箱中进行模拟烘烤处



图 1 一次加载抗凹试样

Fig. 1 Dent resistance specimen by one-time loading

理, 烘烤制度为 $170\text{ }^{\circ}\text{C}\times 20\text{ min}$ 。同时将部分 A50 拉伸试样进行模拟烤漆, 研究材料经过预变形及模拟烤漆后的力学性能变化规律。3 种材料经加工硬化和模拟烤漆后的强度如表 2 所示。经 2.0% 预变形后, 3 种材料均发生了明显的加工硬化, DX53D+Z 钢板和 6016 铝合金板材表现出更加显著的形变强化能力。经过 $170\text{ }^{\circ}\text{C}\times 20\text{ min}$ 烘烤后, HC180BD+Z 钢板和 6016 铝合金板材的强度显著提升, 而 DX53D+Z 钢板未表现出明显的烘烤硬化现象。

表 2 预变形和烘烤后 3 种板材的力学性能

Table 2 Mechanical properties of three kinds of sheets after pre-deformation and baking

材料	厚度/ mm	预变形后		烘烤后	
		屈服强度/ MPa	烘烤硬化值/ MPa	屈服强度/ MPa	烘烤硬化 值/MPa
HC180BD+Z 钢板	0.60	231	17	279	48
	0.65	218	23	251	33
	0.70	226	11	273	47
DX53D+Z 钢板	0.60	191	35	192	1
	0.65	199	34	200	1
	0.70	190	34	190	0
6016 铝合金 板材	0.95	171	30	224	53

1.4 抗凹性能试验

抗凹试验固定装置及加载压头参照 SAE J2575—2015^[16]中关于模具及压头的要求进行设计加工, 压头采用直径为 $\Phi 50.4\text{ mm}$ 的半球形压头。试验时将试样固定在装置上后, 半球形压头以 $10\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的恒定速度作用在抗凹试样的中心, 加载最大载荷为 200 N。

2 结果分析与讨论

2.1 一次加载曲线

通过一次加载获得的试验曲线如图 2 所示, 3

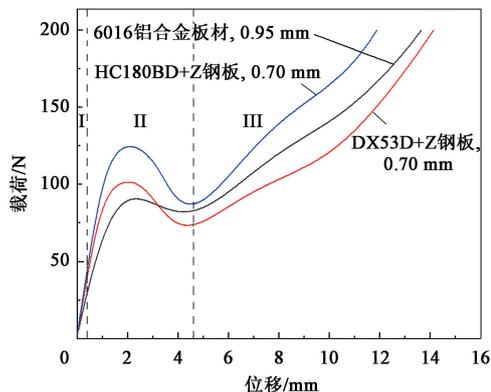


图 2 3 种金属薄板的一次加载曲线

Fig. 2 One-time loading curves of three metal sheets

种材料的加载曲线可分为 3 个阶段。

第 I 阶段, 载荷与位移呈线性关系变化, 试样在外载荷下向下发生小范围凹陷, 加载位置的变形类型为弹性变形, 试样的整体结构未发生明显变化。在该阶段, 对线性段进行拟合获得初始刚度值, SAE J2575—2015^[16]中通常推荐的拟合区间为 10~25 N。对比 3 种材料试验曲线, 厚度为 0.70 mm 的 DX53D+Z 钢板和 HC180BD+Z 钢板在相同位移条件下, 变形抗力高于厚度为 0.95 mm 的 6016 铝合金板材, 这是由于相较于厚度的差异性, 两种材料的弹性模量差异性更加显著, 前者的比值为 1.36 左右, 而后的比值为 2.5~3.0。

在第 II 阶段中加载曲线发生显著变化, 载荷随位移变化呈现出先增加后减小的趋势。在该阶段的前半段, 随着载荷的增加, 压头作用的局部区域产生了极小的塑性变形, 在曲线上表现出相同厚度和弹性模量、不同屈服强度的材料在相同载荷条件下的下压行程不同, 即 HC180BD+Z 钢板和 DX53D+Z 钢板两种材料的载荷-位移曲线逐渐分离。当下压量达到一定程度后, 随着位移的增加, 载荷不再增加, 甚至发生降低, 此即为 SAE J2575—2015^[16]中所定义的失稳凹陷, 失稳凹陷发生时的载荷定义为失稳凹陷载荷, 此时可以观测到试样整体曲率发生明显改变。

当下压量持续增加到一定程度时, 由于更大区域参与弹性变形以及局部区域变形硬化, 试样的“失稳”得到改善, 载荷再次随着位移的增加而增加, 即试样进入变形的第 III 阶段。在该阶段, 随着载荷的增加, 由于试样的结构变化、局部材料性能变化及第 II 阶段变形的累计效应, 载荷与位移呈现非线性的变化关系。

整体来看,虽然3种金属薄板试样在加载过程中的载荷-位移曲线存在差异,但其变形特征一致,加载过程均包含了线性弹性变形阶段、失稳凹陷阶段和非线性变形阶段3个阶段。

2.2 厚度对抗凹性能的影响

不同厚度规格的 HC180BD+Z 钢板和 DX53D+Z 钢板经过 2.0% 预应变+175 °C×20 min 烘烤后,抗

凹试验的曲线如图 3 所示,厚度对加载曲线有显著的影响。随着厚度的增加,在相同下压位移条件下,试样表现出更大的变形抗力。从整个加载曲线特征来看,不同厚度试样的变形特征一致,线性弹性变形阶段、失稳凹陷阶段和非线性变形阶段 3 个阶段内,载荷存在明显差异,但位移范围基本一致。

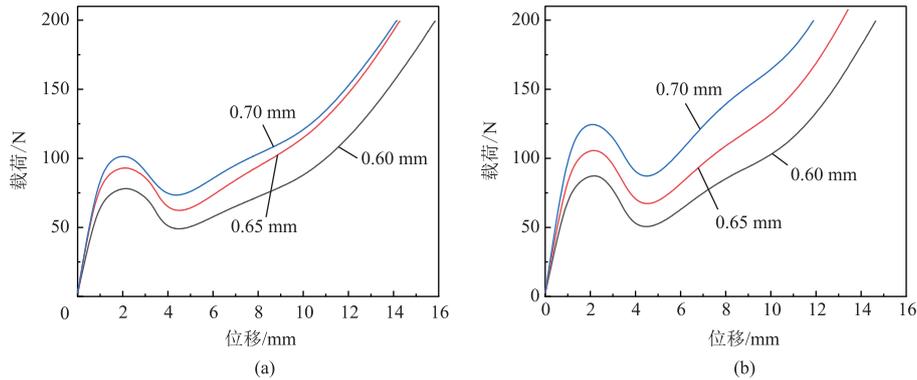


图 3 两种钢板在不同厚度下的抗凹试验曲线

(a) DX53D+Z 钢板 (b) HC180BD+Z 钢板

Fig. 3 Dent resistance test curves of two steel sheets with different thicknesses

(a) DX53D+Z steel plate (b) HC180BD+Z steel plate

DX53D+Z 钢板和 HC180BD+Z 钢板在不同厚度条件下的初始刚度和失稳凹陷载荷如图 4 所示。初始刚度主要表征试样抵抗弹性变形的能力,受材料弹性模量和板材厚度的影响,由于

DX53D+Z 钢板和 HC180BD+Z 钢板的弹性模量基本一致,在相同厚度条件下,两种试样的初始刚度基本一致,随着厚度的增加,初始刚度随之增大。

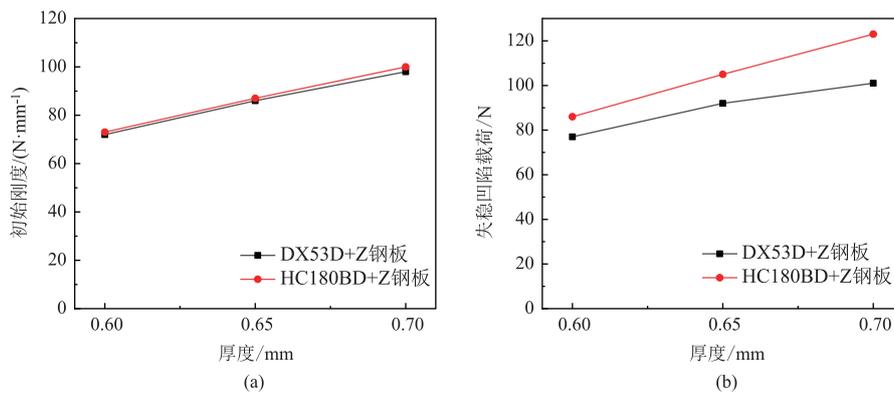


图 4 厚度对两种钢板抗凹性能的影响

(a) 初始刚度 (b) 失稳凹陷载荷

Fig. 4 Effect of thickness on dent resistance for two steel sheets

(a) Initial stiffness (b) Oil canning load

在相同厚度条件下 DX53D+Z 钢板和 HC180BD+Z 钢板的失稳凹陷载荷的差异明显,不同厚度的 HC180BD+Z 钢板的失稳凹陷载荷均显著高于同等厚度的 DX53D+Z 钢板。表 2 表明 HC180BD+Z 钢板烘烤后的强度比 DX53D+Z 钢板烘烤后的强度高

50 MPa 以上,由此说明在失稳凹陷发生时,局部区域发生了塑性变形,从而使 HC180BD+Z 钢板的失稳凹陷载荷高于 DX53D+Z 钢板。

2.3 预变形量对抗凹性能的影响

3 种材料经 2.0%、3.5% 和 5.0% 预变形 +

175 °C × 20 min 烘烤后进行一次加载的试验结果如图 5 所示，预变形对加载曲线有一定作用。一方面，随着预变形量的增加，在相位移移条件下，在线性弹性变化阶段和失稳凹陷阶段试样的变形抗力降低；另一方

面，在非线性变形阶段，预变形对变形抗力的影响分为两部分，在非线性变形阶段的初始部分，预变形对变形抗力的影响规律不明显，在非线性变形阶段的后续阶段，预变形量较小的试样表现出更大的变形抗力。

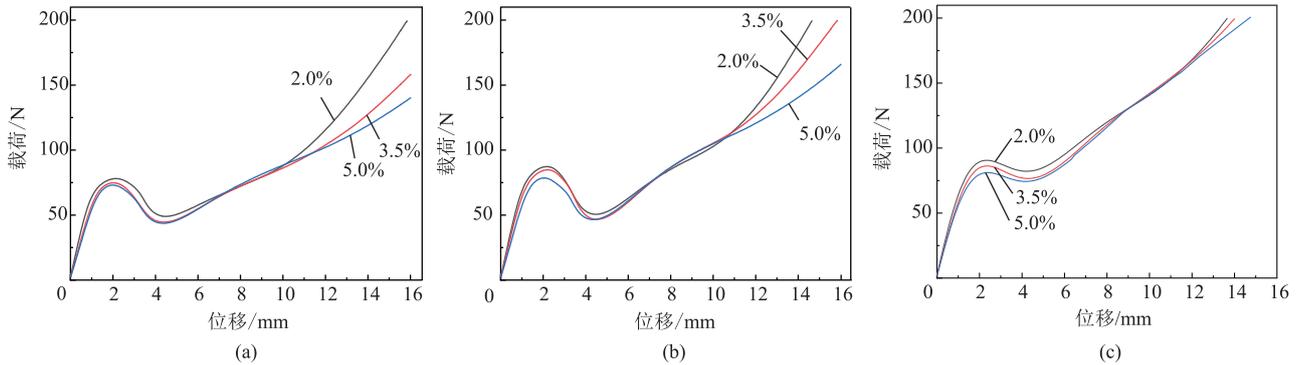


图 5 3 种材料在不同预变形条件下的抗凹试验曲线

(a) DX53D+Z 钢板 (b) HC180BD+Z 钢板 (c) 6016 铝合金板材

Fig. 5 Dent resistance test curves of three kinds of materials under different pre-deformation conditions

(a) DX53D+Z steel sheet (b) HC180BD+Z steel sheet (c) 6016 aluminum alloy sheet

对比 3 种材料在不同预变形条件下的初始刚度 (图 6a) 可知，随着预变形量的增加，初始刚度降低。DX53D+Z 钢板和 HC180BD+Z 钢板的弹性模量和厚度一致，因此，在不同预变形条件下其初始刚度基本一致，

对比表 2 中两种钢板的屈服强度差异可知，在加载的初始阶段，试样处于弹性变形状态，材料的强度不影响试样的初始刚度。6016 铝合金板材由于材料厚度大、弹性模量小，因此，其初始刚度与两种钢板存在一定差异。

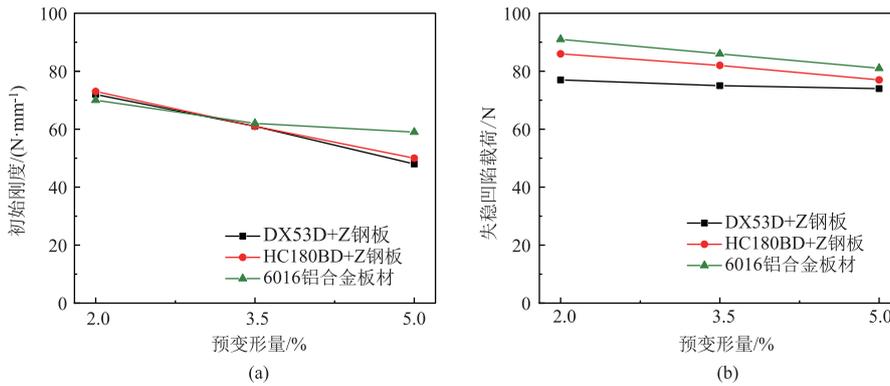


图 6 预变形对抗凹性能的影响

(a) 初始刚度 (b) 失稳凹陷载荷

Fig. 6 Effect of pre-deformation on dent resistance

(a) Initial stiffness (b) Unstable dent load

预变形也显著影响失稳凹陷载荷的大小，随着预变形量的增加，失稳凹陷载荷降低。由于预变形量增加，试样的厚度减小，同时材料发生加工硬化，失稳凹陷载荷的变化是由这两个矛盾因素相互作用决定的。从结果看，预变形导致的厚度降低是更大的影响因素。

2.4 热处理状态对抗凹性能的影响

采用未热处理和经 175 °C × 20 min 烘烤的试样

进行抗凹试验，研究热处理对抗凹性能的影响，两种状态试样的抗凹试验结果如图 7 所示。由于 DX53D+Z 钢板无明显的烤漆硬化效应，其未烘烤试样和烘烤试样的抗凹试验曲线一致；HC180BD+Z 钢板和 6016 铝合金板材具有明显的烤漆硬化效果，在试验曲线的失稳凹陷阶段和非线性变形阶段，相位移移条件下烘烤试样的变形抗力高于未烘烤试样的变形抗力。

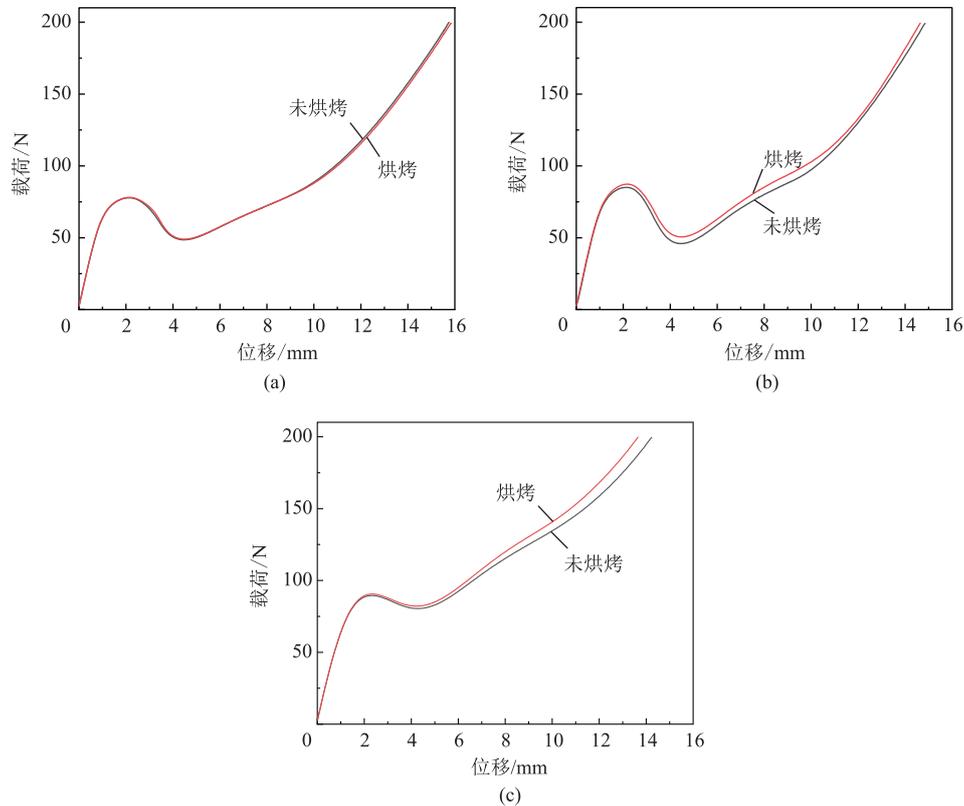


图 7 3 种材料在不同热处理状态下的抗凹试验曲线

(a) DX53D+Z 钢板 (b) HC180BD+Z 钢板 (c) 6016 铝合金板材

Fig. 7 Dent resistance test curves of three kinds of materials under different heat treatment states

(a) DX53D+Z steel sheet (b) HC180BD+Z steel sheet (c) 6016 aluminum alloy sheet

两种热处理状态试样的初始刚度和失稳凹陷载荷如表 3 所示, 3 种材料在未烘烤和烘烤状态下的初始刚度一致, 说明烘烤过程不改变材料的初始刚度。分材料看, DX53D+Z 钢板在两种热处理状态下的失稳凹陷载荷相同, 而 HC180BD+Z 钢板和 6016 铝合金板材经热处理后失稳凹陷载荷略有增加, 表明具有烘烤硬化性的材料经过烘烤硬化后, 可以在一定程度上提升抗凹性能。

表 3 热处理状态对板材抗凹性能的影响

Table 3 Effect of heat treatment state on dent resistance for sheets

材料	热处理状态	初始刚度/ ($N \cdot mm^{-1}$)	失稳凹陷载荷/ N
DX53D+Z 钢板	烘烤	72	77
	未烘烤	72	77
HC180BD+Z 钢板	烘烤	73	86
	未烘烤	73	84
6016 铝合金板材	烘烤	70	91
	未烘烤	70	89

2.5 分析与讨论

材料的抗凹性能受材料和工艺的影响, 主要包括材料厚度、材料性能、应变状态及热处理状态等。厚度是影响材料一次加载抗凹性能的决定性因素, 材料厚度的变化将显著改变初始刚度和失稳凹陷载荷。因此, 进行覆盖件轻量化设计或选材时, 必须考察覆盖件的抗凹性能。

材料性能对抗凹性能的影响主要源自于弹性模量和屈服强度两个因素。弹性模量影响材料的刚性变形, 是影响初始刚度的决定性因素之一。因此, 在以铝代钢进行轻量化选材时, 由于弹性模量的大幅降低, 增加厚度并不能保证试样的刚度同步提升。屈服强度对抗凹性能的影响主要作用在失稳凹陷阶段和非线性变形阶段, 由于加载过程中试样的塑性变形量小、变形范围有限, 所以强度对上述两个阶段的变形抗力的影响程度没有厚度显著。

应变状态对抗凹性能的影响主要通过厚度改变其和加工硬化交互作用。随着预变形量的增加, 一方面加工硬化作用使材料的变形抗力增加, 另一方面材料厚度减小导致材料的变形抗力降低。相较于

言, 抗凹性能对厚度变化更加敏感, 从而促使在应变增加条件下, 材料的抗凹性能略有降低。因此, 在覆盖件设计过程中, 要综合考虑零件的内部支撑结构和变形程度, 对于较大变形位置或减薄率较大的位置, 为保证其抗凹性能, 需通过结构优化设计减小变形量或增加局部刚性。

烤漆是实际覆盖件零件制备的必然工艺, 具有烘烤硬化效果的材料经过烘烤后, 其抗凹性能可以进一步提升。因此, 在实际过程中, 若存在抗凹性能不合格的情况时, 也可考虑替换为具有烘烤硬化的材料进行改善。

3 结论

(1) 一次加载抗凹试验包括 3 个阶段: 线性弹性变形阶段、失稳凹陷阶段和非线性变形阶段, 试样的大变形主要发生在失稳凹陷阶段和非线性变形阶段。

(2) 厚度是抗凹性能的主要影响因素, 可同时改变试样的失稳凹陷载荷和初始刚度。减小材料厚度后, 失稳凹陷载荷和初始刚度随之降低, 材料的抗凹性能随之变差。

(3) 弹性模量和屈服强度是影响抗凹性的主要材料参数。前者影响材料的刚性变形, 是影响初始刚度的决定性因素之一, 后者主要作用在失稳凹陷阶段和非线性变形阶段, 增加强度可以提升失稳凹陷载荷和变形抗力。

(4) 预变形和烘烤硬化通过改变材料厚度或强度间接影响抗凹性能。预变形增加导致材料厚度降低和强度增加, 但总体上将导致抗凹性能降低; 通过烘烤可以提升具有烘烤硬化性能材料的抗失稳凹陷载荷和变形抗力, 但无烘烤硬化性能材料在烘烤后期的抗凹性能无变化。

参考文献:

- [1] Sriram S, Speer J G, Matlock D K. Material and Design Factors Influencing the Quasi-static Dent Resistance of Steel Body Panels [R]. Detroit, Michigan: SAE Technical Paper, 1999.
- [2] Ekstrand G, Asnafi N. On testing of the stiffness and the dent resistance of autobody panels [J]. *Materials & Design*, 1998, 19 (4): 145-156.
- [3] Holmberg S, Thilderkvist P. Influence of material properties and stamping conditions on the stiffness and static dent resistance of automotive panels [J]. *Materials & Design*, 2002, 23 (8): 681-691.
- [4] Thomas D. Numerical Prediction of Panel Dent Resistance Incorporating Panel Forming Strains [D]. Canada: University of Waterloo, 2001.

- [5] Daniel D, Hoffmann J L, Plassart G, et al. Optimization of 6016 Aluminum Alloy Selection for Outer Panels [R]. Paris, France: SAE Technical Paper, 2002.
- [6] 张龙柱, 王连轩, 李晓广, 等. 汽车覆盖件用钢板的抗凹性能研究 [J]. *热加工工艺*, 2022, 51 (7): 40-43, 47. Zhang L Z, Wang L X, Li X G, et al. Research on dent resistance of steel sheets for automotive outer panel [J]. *Hot Working Technology*, 2022, 51 (7): 40-43, 47.
- [7] 张钧萍, 马鸣图, 方刚, 等. 铝合金板材抗凹性能研究 [J]. *中国工程科学*, 2014, 16 (1): 108-112. Zhang J P, Ma M T, Fang G, et al. Research on dent resistance property of aluminum alloy sheets [J]. *Strategic Study of CAE*, 2014, 16 (1): 108-112.
- [8] 李东升, 周贤宾, 吕晓东, 等. 汽车板抗凹性评价体系及试验机系统 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2003 (5): 467-470. Li D S, Zhou X B, Lyu X D, et al. Evaluation system and testing machine system for automotive panel dent resistance [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003 (5): 467-470.
- [9] Shih H C, Horvath C D. Effects of material bending and hardening on static dent resistance [A]. SAE 2003 World Congress & Exhibition [C]. Detroit, Michigan, 2003.
- [10] Holmberg S, Nejabat B. Numerical assessment of stiffness and dent properties of automotive exterior panels [J]. *Materials & Design*, 2004, 25 (5): 361-368.
- [11] 姚贵升. 采用烘烤硬化钢板 (BH 钢) 改善汽车车身外表零件的抗凹性能 [J]. *宝钢技术*, 2000 (4): 1-7, 19. Yao G S. Improvement in the dent-resistance of autobody panel by using BH steel sheet [J]. *Baosteel Technology*, 2000 (4): 1-7, 19.
- [12] 朱晓东, 程国平, 俞宁峰. 各向同性钢与烘烤硬化钢的烘烤硬化性和抗凹性能 [J]. *钢铁研究学报*, 2006, 18 (11): 43-46. Zhu X D, Cheng G P, Yu N F. Bake hardenability and dent resistance of isotropic steel and BH steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2006, 18 (11): 43-46.
- [13] DiCello J A, George R A. Design criteria for the dent resistance of auto body panels [J]. *SAE Transactions*, 1974: 389-397.
- [14] SAE J2575—2004, Performance based standard for accelerated exposure of automotive exterior materials using a controlled irradiance xenon-arc apparatus [S].
- [15] Shen H Q, Chen G L. Numerical analysis of panels' dent resistance considering the Bauschinger effect [J]. *Materials & Design*, 2010, 31 (2): 870-876.
- [16] SAE J2575—2015, Standardized dent resistance test procedure [S].
- [17] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S]. GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].