

考虑层间作用的冷轧钢卷抗凹性分析

刘海江, 郭瑞玲

(同济大学, 上海 201804)

摘要: 针对冷轧钢卷包装中多层材料的接触变形问题, 对钢卷包装系统的抗凹性进行了分析与研究; 建立了考虑层间作用的钢卷包装系统的力学模型, 计算和分析了钢卷的变形和应力, 应用 HYPERMESH 与 ANSYS/LS-DYNA 对钢卷抗凹性模型进行了有限元仿真; 最后进行了抗凹性模型的冲击试验, 验证了有限元仿真计算结果, 可为钢卷包装工艺设计提供理论依据。

关键词: 钢卷; 层间作用; 抗凹性; 有限元; 冲击试验

中图分类号: TB487; TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)01-0058-04

Dent Resistance Analysis of Cold Rolled Steel Coil Considering Interlayer Effect

LIU Hai-jiang, GUO Rui-ling

(Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: For solving the multi-layer contact deformation problem of cold rolled steel coil, dent resistance of steel coil packaging system was analyzed and studied. Mechanical model of steel coil packaging system considering interlayer effect was established and the strain and stress of the steel coil was calculated and analyzed. FEM simulation of dent resistance of the steel coil was carried out by using HYPERMESH and ANSYS/LS-DYNA. An impact test of the dent resistance model was carried out to verify the FEM simulation. The purpose was to provide theory basis for steel coil packaging process design.

Key words: steel coil; interlayer effect; dent resistance; FEM; impact test

钢材是工业生产中的重要材料, 随着工业化的迅速增长, 企业对钢材的需求量不断增加, 同时对钢材质量的要求也大大提高。钢卷是钢材重要的运输、存储方式。冷轧板、镀锌板等类型的板材均是将成品板材进行卷绕、包装、捆扎, 形成完整的钢卷产品。然而在钢卷的运输、吊运等过程中, 某些人为或意外因素会对钢卷造成损坏。尤其是对卷材表面的碰撞、冲击等往往导致内部被保护的板材多层受损。钢卷是长达几百米乃至上千米的连续板材卷绕而成, 一个小小的凹坑就可能造成数米板材质量不过关, 造成浪费。

钢卷抗凹性分析与传统的抗凹性分析有所不同。在以往的实际工程应用中, 对于板材抗凹性的研究主要集中于单层板材。上海交通大学的张彦等人应用扁壳理论研究了汽车保险杠的抗凹性; 上汽通用五菱

的韦勇等人应用有限元隐式算法分析研究了车门外板的抗凹性。但是这些都只考虑到单层板材在对抗外部载荷时的抗凹性, 而冷轧钢卷是由外部包装板材及内部多层板材贴合而成的, 在受到外部载荷时, 各层板材之间相互作用, 由外到内受到的影响逐渐减弱, 这与单层板材抗凹性分析区别很大。现以某钢材企业的冷轧钢卷为对象, 分析抗凹性及其相关性能。

钢卷承受外部载荷作用时抵抗凹陷弯曲及局部凹痕变形、保持形状的能力称为抗凹性, 它是评价和反映覆盖件表面质量和使用性能的一项重要指标和特性^[1]。钢卷包装由外层包板、内层缓冲平板纸、内层防锈纸、内外护角、捆带等组成。对钢卷抗凹性的分析主要考虑在有包装防护的情况下内层被保护的产品板材对抗外部载荷的能力。

收稿日期: 2011-10-08

作者简介: 刘海江(1967—), 男, 江苏人, 博士, 同济大学教授、博士生导师, 主要从事数字化制造技术及应用、知识工程应用的教学与研究。

1 钢卷板材抗凹性力学模型

钢卷受外部载荷作用,发生的变形表现为弹性和塑性 2 类。当外部载荷达到一定程度时,钢卷表面及内部板材发生凹陷。这种凹陷是塑性的,在载荷消失后,钢卷局部表面会残留永久凹痕,这种抵抗局部凹痕变形的能力称为局部凹痕抗力(DR)^[1]。

钢卷包板表面的凹坑是由于冲击载荷作用使局部应变过大,超过弹性变形范围而造成的。冲击过程中接触作用面积小,载荷的作用时间很短,作用影响的只是钢卷的很小一个范围,属于局部受力。因此可以取钢卷的一部分作为研究对象,其受力模型见图 1。

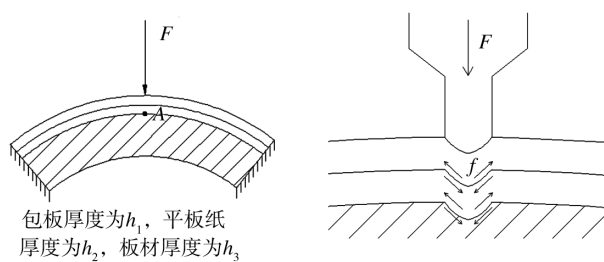


图 1 钢卷局部受力

Fig. 1 Local force diagram of steel coil

在载荷 F 的作用下,包板局部发生凹陷,在多层板材间的摩擦力及接触力作用下,平板纸与内部板材表面发生凹陷变形。接触面上摩擦力的存在,导致两弹性体中的接触应力显著地大于法向力单独作用时所产生的应力。此外,摩擦力与法向力的同时存在,导致应力的性质发生某些变化。例如,当法向力单独作用时,物体中接触附近各点的 3 个主应力均为压力,而当摩擦力介入时,在紧接摩擦力后的区域内,3 个主应力中的 2 个变拉应力,这些拉应力有助于说明裂纹会在接触表面形成并逐渐扩展的原因。接触表面上的法向力加上摩擦力后,也会导致接触表面区域内的切应力发生变化。最大切应力所在点的位置,从接触表面下移向接触区,当摩擦系数为 1/10 或较大时,此点位于接触表面上。若 A 点的应力值超过板材的屈服强度则会造成塑性变形,出现凹坑损伤。

考虑凹坑面积为 S ,力 F 在冲击作用时均匀分布在凹坑上,则可近似地将作用载荷简化为 $q = F/S$ 。

根据接触力学理论^[3],其接触应力为:

$$\alpha = \sqrt{\frac{3q}{4} \times \frac{\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}} \quad (1)$$

其中: μ_1, μ_2 为冲头及包板的摩擦系数; E_1, E_2 为冲头及包板的弹性模量; R_1, R_2 为 A 点处冲头及包板的曲率半径。

根据畸变能密度理论,在任意应力状态下,点 A 的应力为:

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2)$$

$$\sigma_1 = \sigma_{\max} = \tau, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = \sigma_{\min} = -\tau \quad (3)$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为 A 点的主应力,应力状态分析中,3 个方向的主应力分别对应主应力的最大值和最小值:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{\max} \\ \sigma_{\min} \end{array} \right\} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2} = \pm \tau \quad (4)$$

$$\text{其中: } \sigma_x = 0, \sigma_y = \sigma_A, \tau_{xy} = \tau_A \quad (5)$$

求出 A 点所处的截面上的弯矩 M 和剪力 F_s :

$$F_s = \frac{F}{2}, M = \frac{FR_A \sin \frac{\alpha}{2}}{2} \quad (6)$$

其中: R_A 为钢卷圆心到 A 点处的距离; α 为圆弧模型对应的圆心角。则有 A 处弯曲正应力 σ 与切应力 τ 分别为:

$$\sigma = \frac{My_A}{I} = \frac{My}{\frac{bh^3}{12}} \quad (7)$$

$$\tau = \frac{F_s S}{Ib} = \frac{F_s \frac{b}{2} \left(\frac{h^2}{4} - y \right)}{\frac{b^2 h^3}{12}} \quad (8)$$

$$\text{其中: } h = \frac{h_1 + h_2 + h_3}{2}, y = h_3 - \frac{h_1 + h_2 + h_3}{2}。$$

当 α 角很小时,钢卷的弧面可以近似简化为平面,则可进一步将受力模型简化为平板模型,见图 2,此时在相同力 F 作用下, A 点处弯矩和剪力为:

$$F_s' = \frac{F}{2}, M' = \frac{F \frac{l}{2}}{2}, \text{其中 } l \text{ 为试样的长度, } l =$$

$R_A \alpha$, 故:

$$M' = \frac{FR_A \frac{\alpha}{2}}{2} \quad (9)$$

因为恒有 $\frac{\alpha}{2} > \sin \frac{\alpha}{2}$, 可得 $M' > M, M \propto \sigma \propto \sigma_A, \sigma_A$

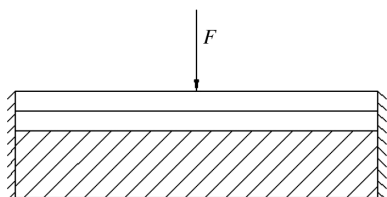


图2 钢卷抗凹性等效力学模型

Fig. 2 Equivalent mechanical model
of steel coil dent resistance

$>\sigma_A'$, 平面模型A点在力F作用应力值大于其在弧形模型中的数值, 因此可以说平面模型的安全系数要低于弧面模型, 对平面模型进行试验得出的临界载荷和破坏载荷对弧面模型以及真实的钢卷来说是更加安全的。同时, 平面模型在冲击试验和建模仿真中也更易操作, 得出的结果更加可靠。

2 钢卷包装板材抗凹性有限元仿真

使用 Hypermesh+Ls-dyna 联合对平板模型建立的有限元模型进行仿真计算, Hypermesh 进行网格划分与边界条件、载荷设置, 前处理完成后导出 k 文件提交 Ls-dyna 进行计算。仿真分析 2 磅冲头从 80 英寸高处冲击对钢卷的作用, 并提出合理的改进意见。

200 mm×200 mm 的方形板材, 厚度仅为 1~2 mm, 因此选择划分二维壳单元, 在 Hypermesh 中设置单元属性为 *SECTION_SHELL。材料模型 *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY。建立一个 loadcollector(constraints), 在其中设置钢板、平板纸、镀锡板垛的 2 条对边上的所有节点为全约束。

对冲头进行三维网格划分, 单元属性设置为 *SECTION_SOLID, 然后设置冲头初速度, 建立一个 Loadcollector(velocity), CONTROL CARD 选择 *INITIAL_VELOCITY_GENERATION, 试验冲头重 2 磅, 下落高度为 80 英寸, 等效的设置接触速度为 1 m/s。有限元模型数据见表 1。

表1 有限元模型数据

Tab.1 Data of finite element model

部件	节点数	单元数
冲头	2 616	2 268
PE 板	3 362	1 600
平板纸	3 362	1 600
板材	11 767	9 600

设置接触面, 跌落过程中接触关系复杂, 各个部件中可能都存在着接触, 因此建立一个自动面接触 (*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE), 设置所有部件为 slave set, 在选项卡中设置接触面 FD, FS 和 VDC 等参数, 接触算法选择默认算法。

计算结果见图 3, 在冲击作用下, 钢板中间产生

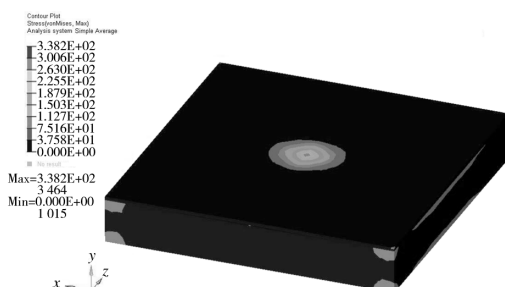


图3 钢卷有限元模型应力云图

Fig. 3 Stress nephogram of steel coil FEM model

了深度 0.562 mm 的明显凹坑, 单元应力最大达到 340 MPa, 但底部板材未产生明显损伤。

3 钢卷包装板材抗凹性试验

目前, 国内板材抗凹性试验还没有统一的试验标准, 如压子直径、试件尺寸、压边力大小、试验速度等都没有形成规范^[4]。尤其是钢卷包装内外板材层间作用、模拟工况的不同、内层平板纸的非线性属性等等, 这些因素都将影响到试验的可靠性。基于这些考虑, 对钢板抗凹性只能采用比较的评估办法, 即在相同的试验条件下, 根据试验结果, 认为某种板材比另一种板材具有更好的抗凹性^[5]。

试验对象一组为 0.8 mm 钢板+平板纸+防锈纸+60 张镀锡板, 尺寸均为 200 mm×200 mm, 试验参考 GB-T 13448-2006 的相关要求进行。将试样固定在夹具上, 冲头拉至一定高度后放松, 冲头下落对板材试样造成冲击, 见图 4。将冲头拉至不同高度进行试验, 观察并测量板材形成的凹坑的直径与深度, 见图 5。

从图 5 中可以看出, 2 磅冲头从 80 英寸高冲击造成的凹坑直径为 5.84 mm, 凹坑深度为 0.557 mm, 与有限元计算结果是相符合的, 这也验证了冷轧钢卷抗凹性力学模型及有限元计算的正确性。

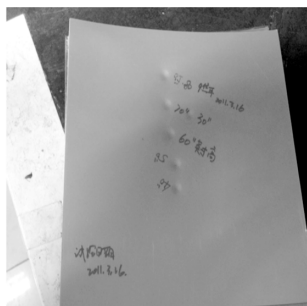


图 4 冲击试验实物

Fig. 4 Impact test photo

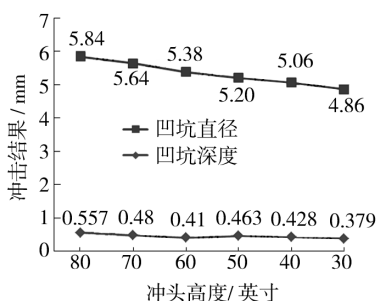


图 5 抗凹性试验测量数据

Fig. 5 Measurement data of dent resistance test

4 结论

通过对多层钢卷板材模型进行抗凹性分析,提出了考虑层间作用的钢卷抗凹性力学模型,并进行了试验与有限元仿真分析,为钢卷包装的设计和材料的选取提供理论指导和数据依据。提高钢卷包装板材抗凹性能的方式可以是多样化的,如改变材料、增加厚度或用缓冲材料等,最好的方法是通过实验室研究与工厂经验相结合的方法,提出合理的钢卷包装方案。

参考文献:

- [1] 李东升,周贤宾. 关于覆盖件抗凹性指标的理论分析[J]. 塑性工程学报,1995,2(1):43—48.
LI Dong-sheng, ZHOU Xian-bin. The Theoretical Analysis on a Coefficient for Evaluating Denting Resistance of Auto-body Panel[J]. Journal of Plasticity Engineering, 1995, 2(1): 43—48.
- [2] 胡名玺,陈煜,杜振杰,等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的包装件跌落仿真分析[J]. 包装工程,2006,27(11):53—54.
HU Ming-xi, CHEN Yu, DU Zhen-jie, et al. Simulate of Packaging Drop Based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(11): 53—54.
- [3] JOHNSON K L. 接触力学[M]. 北京:高等教育出版社,1992.
JOHNSON K L. Contact Mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1992.
- [4] 邵建华,顾强,申永康. 多层钢板剪力墙水平荷载作用下结构性能的有限元分析[J]. 工程力学,2008,25:140—145.
SHAO Jian-hua, GU Qiang, SHEN Yong-kang. Finite Element Analysis for Performance of Multi-storey Steel Plate Shear Walls Subjected to Horizontal Load[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25: 140—145.
- [5] 韦勇,裴磊,成艾国. 基于 ABAQUS 的汽车覆盖件抗凹性分析[J]. 机电产品开发与创新,2010,23(1):80—82.
WEI Yong, PEI Lei, CHENG Ai-guo. Analysis for Dent Resistance of Automotive Panel Based on ABAQUS[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2010, 23(1): 80—82.
- [6] 张彦,来新民,朱平,等. 基于抗凹性的轿车零件的轻量化设计及耐撞性分析[J]. 机械设计与研究,2004,20(5):74—76.
ZHANG Yan, LAI Xin-min, Zhu Ping, et al. Lightweight Design and Crashworthiness Analysis of Automobile Component Using High Strength Steel Based on Dent-resistance[J]. Machine Design and Research, 2004, 20(5): 74—76.
- [7] 路元宁. 钢卷提升机系统设计及接触有限元强度分析研究[D]. 重庆:重庆大学,2008.
LU Yuan-ning. Design and Strength Research by Contact FEM of the Elevating Conveyor System[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [8] 胥国祥,张以都. 基于 LS_DYNA 的正交面齿轮动态接触分析[J]. 装备制造技术,2010(2):56—59.
XU Guo-xiang, ZHANG Yi-du. Dynamic Contact Analysis of Orthogonal-shaft Face Gear with LS-DYNA[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2010(2): 56—59.
- [9] 王群,周廷美,莫易敏. 钢板包装捆扎的力学性能分析[J]. 武汉理工大学学报,2010,32(23):111—115.
WANG Qun, ZHOU Yan-mei, MO Yi-min. Mechanical Property Analysis of Steel Plate Bundled Packaging[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(23): 111—115.
- [10] 李楚琳,张胜兰,冯樱,等. Hyperworks 分析应用实例[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
LI Chu-lin, ZHANG Sheng-lan, FENG Ying, et al. Hyperworks Analysis Application And Examples[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.