

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.11.015

基于 LS-DYNA 的某新型叉车护顶架 安全性能仿真与试验研究^{*}

董晃晃¹, 葛伟伟¹, 帅向辉¹, 郭浩杰¹, 相曙锋¹, 李丕帅¹, 宁晓斌^{2*}

(1. 杭叉集团股份有限公司, 浙江 杭州 311305; 2. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对叉车正常作业时驾驶员遭受意外跌落物体威胁的问题,对某新型电叉配套的护顶架安全性能进行了研究。按照国标关于护顶架动载试验的要求,提出了一种利用 LS-DYNA 完全重启方式,实现试验载荷多次冲击护顶架的方法,基于此建立了动载试验仿真的显式动力学计算模型,同时开展了该型护顶架的动载试验;对护顶架动载试验 18 个测点处模拟和试验结果获取的永久变形进行了对比,同时还研究了模拟和试验两种方法得到的护顶架构件最大永久变形,并与标准进行了校核。研究结果表明:该新型护顶架安全性能达不到测试标准要求,需更改;但建立的有限元仿真模型具有较高的可信度,为进一步改进和完善护顶架的结构提供了依据和参考。

关键词:护顶架;动载试验;显示动力学

中图分类号:TH24;TH114

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2019)11-1203-05

Experiment and simulation on safe capability of new type forklift overhead guard based on LS-DYNA

DONG Huang-huang¹, GE Wei-wei¹, SHUAI Xiang-hui¹, GUO Hao-jie¹,
XIANG Shu-feng¹, LI Pi-shuai¹, NING Xiao-bin²

(1. Hangcha Group Co., Ltd., Hangzhou 311305, China; 2. School of Mechanical Engineering,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the problem that the driver is threatened by accidental falling objects during normal operation of forklift truck, the safety capability of a new type of roof bracket matched with forklift truck was studied. According to the requirement of national standard for dynamic loading test of roof bracket, a method used LS-DYNA full restart analysis realized multiple impact test load of roof bracket was proposed. Based on above method, the explicit dynamic simulation model of dynamic load test simulation was established and dynamic load test was carried out meanwhile. The permanent deformation obtained from simulation and test results at 18 test points of dynamic load test of the roof protector were compared. The maximum permanent deformation of the roof protector obtained by simulation and test methods was also studied and checked with the standard. The results indicate that the safety performance of the new roof bracket can not satisfy the requirements of the test standard and needs to be changed. However, the research shows that the established finite element simulation dynamic model with high reliability, which provides a basis and reference for further improving and perfecting the structure of the roof bracket.

Key words: overhead guard; dynamic loading test; explicit dynamics

收稿日期:2019-04-25

基金项目:国家自然科学基金地区科学基金资助项目(11862005)

作者简介:董晃晃(1992-),男,安徽宿州人,硕士研究生,主要从事工程机械 CAE 方面的研究。E-mail:wj7431570@163.com

通信联系人:宁晓斌,男,副教授,硕士生导师。E-mail:nxb@zjut.edu.cn

0 引 言

叉车作为一种用途广泛的工程机械,在铁路、公路、港口、仓库等物料集中堆垛场合发挥着重要作用。叉车正常作业时经常会遭受物体意外跌落,对驾驶员造成威胁。因此,对叉车安全性能的研究很有必要,很多学者也进行了探索^[1-4]。

护顶架是保护叉车驾驶员安全的重要结构,能在一定程度上减小驾驶员因操作不当引起货物跌落,造成伤害。为了保护驾驶员,国标 GB/T 5143-2008/ISO6055:2004《工业车辆护顶架的技术要求和试验方法》明确规定了叉车护顶架安全性能试验的技术要求及试验方法^[5]。

标准规定叉车护顶架安全性能试验包括动载试验和冲击下落试验。动载试验是为了度量驾驶员正上方护顶架抗永久变形能力;冲击下落试验是为了得到整批板材、纸卷等大载荷冲击护顶架时的永久变形量。二者均属于破坏性试验,重复性试验不仅耗时,且成本较高。因此,采用仿真分析方式对叉车护顶架安全性能开展研究,是一种经济有效的途径。国内外学者如 TODOROV G^[6]、贾亚萍^[7]和刘显贵^[8]等也都采用显式有限元分析方法,开展了叉车护顶架安全性能的模拟研究,并且依据分析结果改进了结构。

本文将依据国标 ISO6055:2004 中叉车护顶架安全性能试验技术要求和试验方法,基于 LS-DYNA 建立试验物体冲击某型电动叉车护顶架的显示动力学计算模型,对护顶架动载试验过程进行数值仿真,同时依照标准要求对护顶架动载实车试验。

1 标准规定与结果评估

1.1 动载试验技术要求

试验物体冲击护顶架动载试验中:试验物体应具有边长 300 mm 的正方形冲击面,棱角和棱边应包括 10₀⁺⁵ mm 的圆角,其质量为 45 kg;冲击面应由橡木或相同密度的材料制成,厚度不应小于 50 mm;试验物体应置于能自由下落位置,冲击面基本平行于护顶架顶部,尽量避免试验物体的角或棱边撞击护顶架,但允许试验物体的一部分在某些位置与护顶架的棱边重叠。将护顶架顶部上方 1.5 m 处设为试验物体初始下落位置,共需下落 10 次。其中,第 1 次落点应使试验物体中心位于驾驶员座椅(调至中间位置)标定点垂直上方,或驾驶员站立位置正上方,其他 9 个落点需沿顺时

针方向由试验物体中心点平均地分布在直径 600 mm 的圆内,该圆中心应位于驾驶员座椅(调至中间位置)标定点或者驾驶员站立位置正上方。应注意 9 个落点中的第 1 个点位于护顶架前方。

护顶架应安装在其设计所对应的车型和额定起重量的车辆上,并进行动载试验。另外,如果护顶架在一测试底盘上的安装方式与其所在设计配套叉车上的安装方式相同时,也可将护顶架安装在测试底盘上进行动载试验。

1.2 动载试验结果评估

护顶架动载试验完成后,如护顶架的构件及其配件没出现裂纹、构件分离,且其垂直方向的永久变形不超过 20 mm,视为合格。测量时,应在以驾驶员座椅(调节至中间位置)标定点或驾驶员站立位置中心点的铅垂线为中心,护顶架下侧直径为 600 mm 的圆内进行。

2 数值仿真模型及结果

2.1 本构模型

试验物体下落冲击护顶架过程中,塑性变形是护顶架的主要吸能方式,且应变率效应较为明显,因此,本研究选用多段线性弹塑性模型来定义护顶架材料的本构关系。

根据以往动载试验经验,试验物体几乎无变形,为节约计算时间,本研究视试验物体为刚体,取 20 号材料 * MAT_RIGID;护顶架材料均为 Q235-A,采用 24 号材料 * MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY,该模型采用 Cowper-Symonds 方式来处理应变率过大对材料特性(材料硬化)的影响,适用于根据塑性应变定义失效准则,其屈服应力可表示为:

$$\sigma = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}_{\text{eff}}^p}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] (\sigma_0 + f_n(\epsilon_{\text{eff}}^p)) \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}_{\text{eff}}^p$ —有效应变率; C, p —应变率参数; σ_0 —常应变率处的屈服应力; $f_n(\epsilon_{\text{eff}}^p)$ —基于有效塑性应变的硬化函数。

模拟用到的试验物体材料参数如表 1 所示。

表 1 试验物体材料参数

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	ν	E/GPa
2 369	0.29	210

模拟用到的护顶架材料参数如表 2 所示。

表 2 护顶架材料参数

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	ν	E/GPa	σ_0/MPa	C	p	失效应变
7 830	0.29	210	235	40	5	0.27

2.2 试验物体冲击护顶架计算模型

基于 LS-DYNA,本文建立了试验物体冲击护顶架的显示动力学计算模型,如图 1 所示。

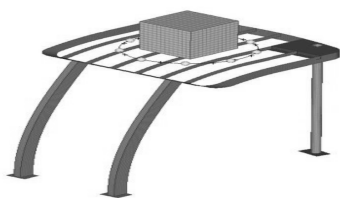


图 1 试验物体冲击护顶架计算模型

图 1 中,圆周上节点即为后续的 9 次冲击试验物体中心落点。根据试验标准要求,本文对整个动载试验过程进行建模模拟。

由于试验物体未与护顶架顶梁接触之前作自由落体运动,这一过程对护顶架没有任何影响,但这一过程会浪费大量的计算成本,笔者跳过试验物体自由落体阶段,从试验物体和护顶架顶梁接触的那一时刻开始建模。计算得到此时试验物体瞬时下落速度为 5.42 m/s。

为避免初始穿透导致不切实际的接触行为,本文需调整试验载荷同护顶架顶梁间距离稍大于接触厚度。由于护顶架结构以薄壁钢管和薄板为主,抽取中面后采用壳单元建模较为方便。通过 *SECTION_SHELL 定义 Belytschko-Tsay 壳单元。由于该单元使用面内单点高斯积分,计算速度快,对于大变形问题较稳定有效,厚度方向取积分点数为 3。LS-DYNA 时间步长取决于单元最小尺寸,因此须严格控制网格尺寸。

该模型单元尺寸设定 8 mm,避免划分过小的单元,共划分单元数目 20 520,节点数目 21 566;试验物体采用 8 节点常应力单元建模,赋予刚体材料,所以象征性地粗糙划分网格即可。试验物体冲击下落过程存在护顶架结构的自接触以及试验物体与护顶架的相互接触,采用关键字 *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE,即单面接触来定义。考虑摩擦力的影响,试验物体与护顶架间的动、静摩擦系数分别取 0.37 和 0.53。由于 Belytschko-Tsay 壳单元是单点积分,可能会出现沙漏问题,使计算结果无效,本文采用基于粘性的 Flanagan-Belytschko 公式进行沙漏控制。

由于护顶架动载试验属于动点间歇性冲击,顺次冲击之间存在一定的加载间隔。现场实车试验中,这取决于试验物体高度的调整、落点对准等人为因素的影响,每次冲击间隔约 7 min。模拟计算时,单次冲击计算时间应取护顶架受单次冲击后达到稳态所用的时间,但过大的加载间隔将会导致计算成本的成倍增加,使计算时间过长。

护顶架动载试验共计 10 次冲击,每次冲击的落点均不同,每一次冲击均建立在前一次冲击的塑性变形、残余应力等基础上。本文采用 LS-DYNA 完全重启动分析来实现上述连续的冲击过程。一个新的完全重启动分析需要继承原来分析中结束时刻已有 Part 的变形和应力情况,并将其作为完全重启动分析的初始状态。变形和应力的继承通过关键字 *STRESS_INITIALIZATION 实现。试验物体冲击护顶架计算模型从第 2 次冲击开始,每次冲击均需对护顶架各个 Part 进行初始化操作,试验物体无需进行初始化操作。

2.3 计算结果分析

试验物体第 1 次冲击护顶架的能量曲线如图 2 所示。

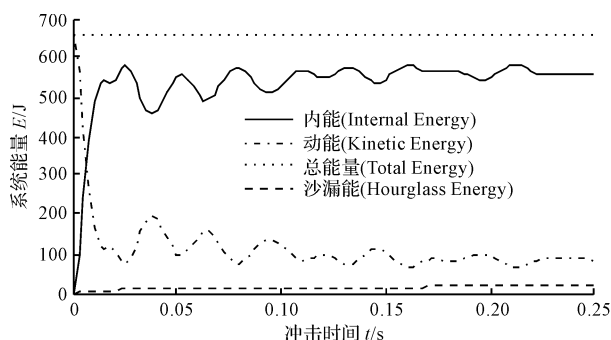


图 2 试验物体第 1 次冲击护顶架能量曲线

从图 2 可知:

在 25 ms 左右内能和动能曲线分别出现了波谷和波峰,此时刻试验物体和护顶架发生最大接触,护顶架产生最大弹塑性变形。

撞击主要发生在初始 25 ms 内,试验物体动能转化为护顶架的内能。能量总体变化趋势符合能量守恒,计算得到沙漏能占比内能的比例不足 3%,因此,计算结果是可靠的。

护顶架某点受试验物体冲击 10 次的竖直方向 (Y) 位移曲线如图 3 所示。

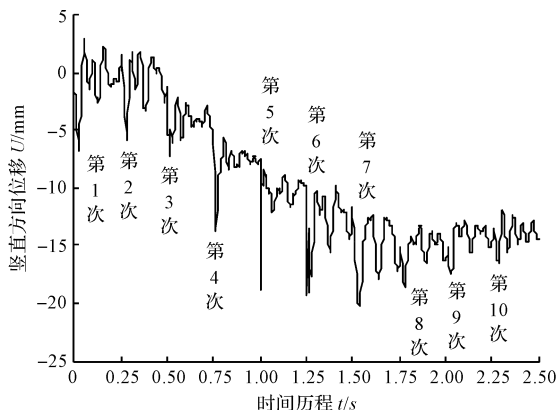


图 3 护顶架某点位移曲线

从图 3 可以看出：

(1)第 10 次冲击完成后护顶架一点位移曲线随着时间的推移而周期性衰减,但趋势趋于一值,而 2.5 s 时刻位移可看做衰减幅值逼近均值,近似为护顶架位移曲线极限值。因此,综合考虑计算时间、效率、精确度等因素,本文取单次冲击计算时长 $t=0.25\text{ s}$ 是合理的。在 E5-2620 平台上采用 12 核计算,单次冲击时间历程完成耗时 46 min,动载试验完成计算共计耗时约 8 h;

(2)护顶架的永久变形随着试验物体的连续冲击而持续增加,最后一次冲击完成,护顶架达到稳态时的 Y 向位移即为护顶架实际的永久变形量。本次仿真取结束时刻即 $t=2.5\text{ s}$ 竖直方向位移为护顶架永久变形。

仿真得到的护顶架永久变形量如图 4 所示。

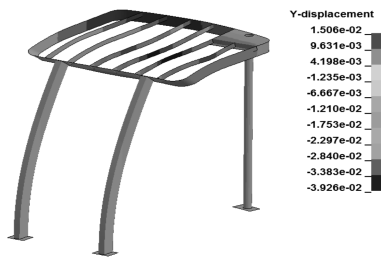


图 4 护顶架动载试验仿真的永久变形

从图 4 可得：

护顶架最大永久变形 39.26 mm,大致位置为顶梁中间处。国标要求动载试验护顶架竖直方向永久变形不得超过 20 mm,因此,该护顶架安全性能达不到标准,需进一步改进。

3 护顶架动载试验

开展的动载试验及试验结果如图 5 所示。



图 5 护顶架动载试验

按照标准要求,本次试验将护顶架安装在与其配套电叉安装方式相同的测试底盘上进行试验。

为了方便定位和测量,实验中落点标记在预先铺设在护顶架下方的橡胶板上表面,测点标记在护顶架顶梁下表面。

试验中落点、测点位置如图 6 所示。

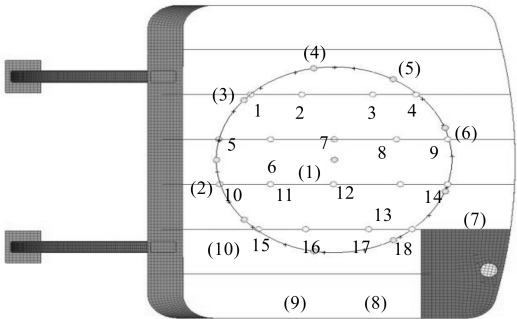


图 6 落点、测点位置

编号 1~10—试验物体下表面中心落点;编号 1~18—待测量测点

试验准备期间,笔者采用 DLE70 型激光测距仪测量 18 个测点到橡胶板上表面间垂直距离,并记录,然后将激光测距仪放置在橡胶板落点上,待光点与试验物体下表面标记好的中心对准后,遥控释放悬挂试验物体的挂钩,待冲击后再次测量各测点到橡胶板上表面间垂直距离,二者差值即为测点竖直方向永久变形。

动载试验完成后观察到护顶架构件及其配件未出现裂纹以及构件分离现象,动载试验结果可信。

汇总测点 1~18 的竖直方向变形量,同时与对应位置处临近节点有限元模拟结果[9-10]进行对比,如图 7 所示。

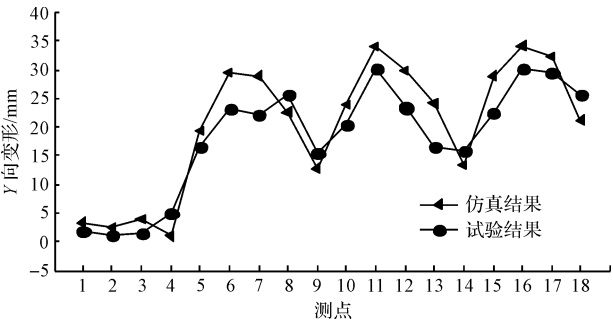


图 7 护顶架动载试验结果与模拟结果对比

根据图 7 可以看到：

对于护顶架的变形情况,仿真结果同试验结果趋势一致,且绝大部分测点变形量大于相应的试验结果,这是由于模型的简化以及冲击效应的影响。

从定量的角度分析:仿真结果同动载试验结果最大相对误差为 12.3%,最小误差仅 3.1%,因此,本文仿真结果具有较高的可信度。

由于落点、测点标定在前,动载试验在后,但现场试验完成后观察到中间顶梁处永久变形最大。测量其与橡胶板上表面距离为 1 091.60 mm,其位置不处于任何一个测点附近,大致位于测点 11 和 12 中间。取测点 11 和 12 试验准备期间到橡胶板上表面间距离均值,计算得到 1 134.27 mm,则该护顶架动载试验竖直方向最大变形量为 42.67 mm,同仿真分析得到的 39.26 mm 较为接近,误差为 7.9%。

由此可知,动载试验确认该型护顶架安全性能达不到国标要求,需加强。仿真和试验结果都表明中间顶梁处支撑能力较弱,因此,需要增设垂直的顶梁,来抑制其变形过大。

4 结束语

本文基于国标 ISO6055:2004 建立了试验物体冲击护顶架的有限元模型,对动载试验过程进行了模拟,同时严格按照标准进行了现场试验。得到了如下结论:

(1)建立的显示动力学计算模型同试验符合较好,二者获得的护顶架永久变形误差为 7.9%;

(2)该护顶架竖直方向永久变形较大,不符合国标要求。对于较大变形的顶梁中间处,可以增设与其垂直的顶梁,抑制其变形量过大;

(3)将仿真分析方法应用于动载试验,利用计算机软件进行试验过程的模拟与安全性能分析,在保证可信度的情况下,可节省大量的人力、物力和财力。

参考文献(References):

- [1] 刘佰昂,徐俊,张召春,等.平衡重式叉车驾驶室护顶架性能测试[J].设备制造技术,2011,12(7):14-18.
- [2] 余晓贤.叉车护顶架结构设计及安全性能研究分析[D].杭州:浙江工业大学机械工程学院,2016.
- [3] 倪景忠.叉车护顶架顶部结构的改进[J].工程机械与维修,2014(5):155.
- [4] 兰翼,韩兴昌,杨自栋,等.一种新型的工业车辆护顶架动载试验载荷[J].拖拉机与农用运输车,2016(4):18-19.
- [5] GB/T 5143-2008.工业车辆护顶架的技术要求和试验方法[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [6] TODOROV G, KAMBEROV K, ROMANOV B, et al. Safety and reliability assesment of forklift truck cabine based on virtual prototype[C]. Proceedings of the International Conference on Manufacturing Systems, Romania: University Politehnica of Bucharest, 2009.
- [7] 贾亚萍.基于显式动力学有限元分析的叉车护顶架安全性能研究[D].杭州:浙江大学机械工程学院,2016.
- [8] 刘显贵,刘诗彬,李颖新,等.基于 ISO6055 的叉车护顶架动载安全性能的仿真及试验研究[J].机械强度,2014,21(5):757-761.
- [9] 袁志林,高翠芝,江海蛟,等.基于 ABAQUS 的 PET 切片包装机钢结构有限元分析[J].包装与食品机械,2018(6):51-55.
- [10] 陆佳铭,李仲.基于有限元法的超超临界机组球阀密封设计及研究[J].液压气动与密封,2018(12):28-31.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

董晃晃,葛伟伟,帅向辉,等.基于 LS-DYNA 的某新型叉车护顶架安全性能仿真与试验研究[J].机电工程,2019,36(11):1203-1207.

DONG Huang-huang, GE Wei-wei, SHUAI Xiang-hui, et al. Experiment and simulation on safe capability of new type forklift overhead guard based on LS-DYNA[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(11):1203-1207.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>