

基于能量吸收控制的工程车辆倾翻 保护结构设计方法

葛树文¹, 崔国华^{1,3}, 马若丁²

(1. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025; 2. 吉林大学 汽车工程学院, 吉林 长春 130025; 3. 河北工程大学 机电学院, 河北 邯郸 056038)

摘 要: 基于能量吸收最大化的思想, 研究了大型矿用工程车辆倾翻保护结构的设计方法, 即在强度和刚度满足要求的前提下, 在立柱上增开塑性铰孔, 对局部结构进行弱化处理使其能够在预定的变形范围内达到吸能要求. 进行了计算机仿真和性能试验, 运用有限元方法对不同塑性铰孔开孔方案进行了仿真分析, 得出了最优塑性铰孔开孔方案; 通过侧向加载性能试验对仿真结果进行了验证. 研究表明, 在立柱上增开塑性铰孔可以实现对能量吸收的有效控制, 避免脆性破坏发生, 满足设计及相关标准要求.

关键词: 能量吸收; 工程车辆; 倾翻保护机构; 塑性铰; 侧向加载

中图分类号: TH243

文献标识码: A

Design method for roll-over protective structure of engineering vehicle based on energy absorption

GE Shu-wen¹, CUI Guo-hua^{1,3}, MA Ruo-ding²

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China; 2. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China; 3. Institute of Mechanical Engineering, Hebei Engineering University, Handan 056038, China)

Abstract: A safety-cab type roll-over protective structure's design method was developed for engineering vehicle based on the idea of the most energy absorption. The method is to design plastic hinge hole which can protect the welding line, control the energy absorption and position or time of plastic hinge's development. Computer simulation and test methods of the behavior analysis of the whole loader class roll-over protective structure with the lateral loading were carried. By contrasting the result of test with that of simulation analysis, proved the rationality and feasibility of design of plastic hinge hole, so achieved the new method of roll-over protective structure in accordance of energy absorption.

Key words: energy absorption; engineering vehicle; roll-over protective structure; plastic hinge; lateral loading

倾翻保护结构 (Roll-Over Protective Structure, 简称 ROPS) 是工程车辆上被动安全装置的主要保护结构, 其主要功能是当车辆倾翻时, 能刺入未冻土壤, 阻止车辆的进一步翻滚, 同时产生一定永久性塑性变形吸收车辆的冲击能量, 避免过度振动对人体造成伤害或导致 ROPS 从车架上脱开. 根据 ISO3471《土方机械-翻车保护结构试验室试验和性能要求》, 倾翻保护结构的设计包括刚度设计、强度设计和能量设

计. 刚度设计的目标是控制车辆在倾翻后倾翻保护结构的变形量, 避免倾翻保护结构构件或者侧向模拟地平面、垂直模拟地平面侵入 DLV; 强度设计要保证倾翻保护结构在车辆滚翻过程中不产生脆性破坏, 避免传递到倾翻保护结构与车架连接处的冲击力使倾翻保护结构从车架上脱开, 或者使倾翻保护结构本身垮塌; 而能量设计是当车辆在硬地面环境中滚翻时, 保证倾翻保护结构能够最大限度地吸收翻车冲击能量, 避免进一步翻车和倾翻保护结构从车架上脱开, 同时减小对司机的冲击伤害.

本文从能量吸收角度进行倾翻保护结构设计, 通过对倾翻保护结构局部改进, 通过增开塑性铰孔对局部结构进行弱化处理, 使其能够在预定的变形范围内达到吸能要求, 从而满足设计要求^[1].

1 基于能量吸收控制的倾翻保护结构设计方案

1.1 设计方案的比较

大型工程车辆驾驶室的空间较大, 允许倾翻保护结构产生较大的侧向变形^[2]. 即当侧向承载能力达到要求时, 倾翻保护结构的某些部位可以产生塑性铰从而形成机构, 迅速吸收翻车的冲击能量, 但是普通的倾翻保护结构钢构件很难达到上述要求. 为了有效地控制塑性铰产生条件、倾翻保护结构承载能力和能量吸收能力, 有 2 种方案可供选择.

(1) 选择屈服强度比较高 (屈服强度比接近于 1) 的钢材制造倾翻保护结构构件. 目前制造倾翻保护结构的钢材分为 Q235A, Q290, Q345C, Q395 和 20 号钢等. 选用具有较高屈服极限的材料虽然可以降低倾翻保护结构的重量, 但材料价格昂贵, 企业难以承受, 对于成批生产的倾翻保护结构并不适合. 通过大量的试验观测发现, 虽然钢是具有较好延性的材料, 但由于制造工艺的缺陷, 以及焊接、螺纹联接、焊缝等薄弱环节的存在, 倾翻保护结构在受到侧向载荷时, 并不一定总是先发生延性破坏, 往往会首先发生脆性断裂破坏. 因此, 单纯从改进材料的角度来控制吸能仍然存在许多问题, 并非最优方案.

(2) 为避免倾翻保护结构构件的脆性破坏, 有效地防止倾翻保护结构的整体脆性垮塌, 本文提出了在倾翻保护结构横梁或立柱内壁表面增开塑性铰孔的设计方案, 一方面, 这些孔可以作为手孔、电缆孔等, 为一些外部设备的连接提供通道; 另一方面, 所开的塑性铰孔可以通过改变其尺寸的大小与位置的不同重新分布立柱上的应力区域, 使开孔处在预定时刻最先达到全塑性弯矩, 成为塑性铰, 使倾翻保护结构的塑性极限承载能力得到准确控制^[3]; 再者, 塑性铰孔处首先出现塑性铰, 有利于吸收车辆倾翻时的冲击能量, 保护了焊缝, 避免了倾翻保护结构梁柱连接处发生脆性断裂. 这种设计技术充分利用了低碳钢的塑性变形能力, 并从“数量”的角度控制倾翻保护结构的设计.

通过比较分析, 笔者认为方案 (2) 将是首选方案, 即改进现有倾翻保护结构, 又对倾翻保护结构的局部结构进行弱化处理, 控制塑性铰出现的位置与时间, 从而达到倾翻保护结构吸能标准.

1.2 局部弱化处理位置的选择

对于倾翻保护结构的局部弱化可在横梁上进行, 也可以在立柱上进行. 试验验证表明, 倾翻保护结构梁弱柱强, 因此塑性铰首先在梁的表面靠近刚性接头处产生. 假若在梁的表面增开塑性铰孔, 将进一步降低梁的刚度与强度, 梁的变形将进一步提前, 对于承载力与能量吸收均较为不利. 若在立柱上开孔, 由于立柱刚度、强度比梁都高, 因此可以通过对开孔方案的选择, 实现对塑性铰的有效控制, 使承载力与能量吸收更容易达到标准要求.

由于倾翻保护结构安装在车架上, 若横梁发生较大塑性变形, 将使车架同时发生较大变形, 这部分变形有可能进入车架的塑性变形区域, 则车架在倾翻保护结构破坏后也无法继续使用. 倾翻保护结构的使用是一次性的, 当发生车辆滚翻而使倾翻保护结构出现塑性铰时, 倾翻保护结构可以拆卸进行更换, 但如果车架由于变形过大也需要更换时, 将极大地提高维修成本, 因此, 使塑性铰出现在立柱上, 能够有效保护横梁发生大变形, 从而起到保护车架的作用. 因此, 本文选择在倾翻保护结构立柱内壁靠近刚性接头处增开塑性铰孔, 使塑性铰发生在立柱上, 对焊缝进行有效保护, 同时使能量吸收便于控制.

1.3 塑性铰孔开孔方式的确定

开孔的形状多种多样, 孔的尺寸和位置也有多种方案. 孔的形式可分为圆孔、方孔、椭圆孔等规则孔, 以及不规则孔 (开孔形式如图1所示). 考虑到制造工艺及应力集中的影响, 不考虑不规则孔. 通过试验分析与有限元仿真研究, 各个形式塑性铰孔对倾翻保护结构性能的影响不同, 增开圆孔或者短轴垂直于受力方向的椭圆孔是较好的设计方案, 但由于开设椭圆孔的模具较难设计, 且应力大小与长短轴均有联系, 较难控制. 因此, 开设圆孔为首选方式.

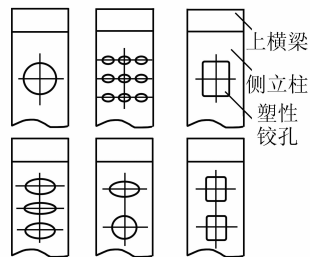


图1 倾翻保护结构开孔形式

Fig. 1 The hole types of ROPS

2 基于能量吸收最大化的样机侧向加载数值模拟

2.1 非线性有限元模型的建立

工程车辆滚翻后, 倾翻保护结构必须通过较大的塑性变形来吸收一定的翻滚冲击动能, 此时结构局部已经进入弹塑性变形阶段甚至塑性机构变形阶段, 存在材料非线性问题, 同时结构的大变形也造成了几何非线性, 因此倾翻保护结构的有限元分析必须采用非线性模型^[4].

忽略驾驶室的覆盖板、底板和顶板, 以及支架和车架上的小孔、圆角等细节结构. 主要构件用有限元应变梁单元建模, 支架和车架也简化成壳单元, 而联接螺栓和橡胶垫分别用梁单元和弹簧模拟, 在塑性孔和接头附件严格控制网格的质量和分布^[5]. 简化后的倾翻保护结构有限元模型如图2所示, 钢构件由792个有限应变梁单元构成, 橡胶减震装置由92个非线性弹簧单元组成, 支架和车架由5 955个实体单元组成. 根据正交试验得到的最优试验设计方案, 在前后立柱上下两侧靠近与梁连接的刚性接头外侧开孔, 开孔后的有限元模型如图3所示.

2.2 样机数值模拟结果及分析

开孔并划分网格后, 对倾翻保护结构侧向加载, 并进行求解. 图4为开口部位有限元仿真结果. 从图4看出, 当开3个孔时, 屈服应力首先从最下侧的塑性铰孔两端出现. 显然, 通过对塑性铰孔处立柱截面的局部削弱可使原发生的最大应力外移, 而焊缝处应力水平降低, 减少了焊接处节点脆性破坏的可能性.

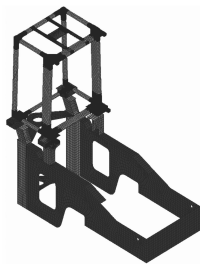


图2 倾翻保护结构与车架模型

Fig. 2 Structure of ROPS and finite element model of framework



图3 开孔之后的倾翻保护结构骨架模型

Fig. 3 Finite element model for framework

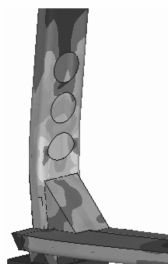


图4 应力分布

Fig. 4 The stress distribution

图5(a)为仅开1个孔, 且孔下沿距离焊缝的位置为20 mm时, 随开孔的大小不同得到的承载力-变形曲线. 从图中曲线可以看出, 当孔的尺寸变大时, 大孔处更趋于先达到屈服极限而进入塑性流动, 从曲线下面的面积来看, 显然大孔的吸能能力优于小孔, 是其承载能力较弱, 但可以实现控制. 图5(b)同样是仅开1个孔, 且孔的直径大小为90 mm时, 随开孔距离焊缝位置的不同得到的承载力-变形曲线, 从图中曲线可以看出, 孔距离焊缝越近, 塑性铰孔的吸能能力越显著. 可见, 对于大孔距离焊缝较近的孔可以满足能量吸收要求, 但与此同时, 控制好孔的尺寸与位置, 使极限承载能力不低于要求值, 是制造塑性铰孔的基本原则.

从其它仿真结果来看, 同样具有以上规律. 因此, 通过有限元数值模拟可以得到结论: 通过在立柱上

增开塑性铰孔,可以有效地提高结构的吸能能力,同时,通过控制开孔的尺寸与位置,可以控制承载能力满足要求,即在保证倾翻保护结构结构强度的前提下,增开塑性铰孔可以实现能量吸收的最大化。

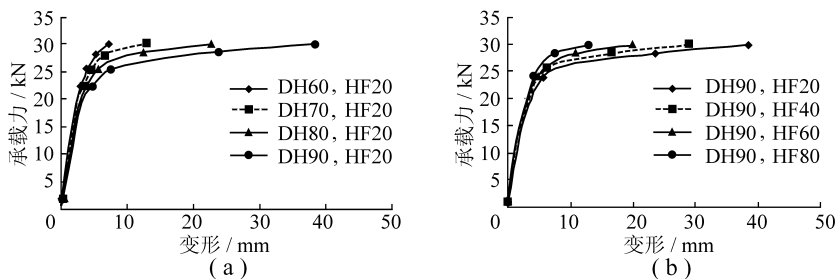


图 5 开单孔、因素不同时的承载力-位移曲线

Fig. 5 Force-displacement curves of single hole and different factors

(a) 孔的尺寸发生变化; (b) 距离焊缝位置不同

3 样机侧向加载的性能试验

根据有限元仿真得到的开孔方案进行样机试验验证. 试验在具有高强度、高刚度的试验台架上进行, 试验台架的横梁、立柱用于固定千斤顶, 实现对倾翻保护结构的侧向加载、纵向加载和垂直加载. 为了避免当倾翻保护结构大变形时, 千斤顶前部出现较大的折角而导致千斤顶损坏, 在千斤顶头部与载荷分配器之间设置球铰^[6]. 倾翻保护结构和车架整体试件的固定利用高强螺栓与试验台联接. 在倾翻保护结构上开孔, 开孔后模型如图 6 所示. 图 7 为不同试验阶段倾翻保护结构的变形情况.

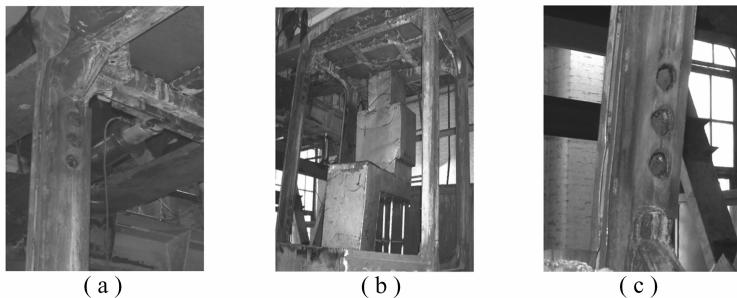


图 6 倾翻保护结构开孔后的物理模型

Fig. 6 Physical model of ROPS with hole

(a) 立柱内表面上侧塑性铰孔; (b) 实物模型; (c) 立柱内表面下侧塑性铰孔

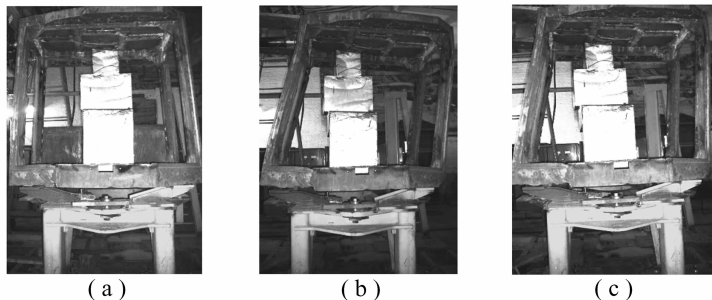


图 7 试件加载不同时刻的形态

Fig. 7 Different shape of test model at different time

(a) 加载前; (b) 加载结束时; (c) 卸载后的残余变形

4 数值模拟与性能试验结果的对比与分析

侧向加载结束时的试验变形与有限元仿真对比如图8所示。经分析,侧向加载试验前倾翻保护结构立柱内侧面与DLV间的距离为413 mm,侧向加载结束后为120 mm,侧向模拟地平面与挠曲极限量DLV间的距离为192 mm,但都未侵入DLV。

侧向载荷与加载点挠度的特性曲线如图9所示。可以看出,试验结果曲线与仿真曲线总体近似,但测试曲线在倾翻保护结构局部进入塑性变形时具有一定的波动,尤其是侧向载荷达到240 kN时,侧向承载力有所下降。这是由于变形较大以后,驾驶室底板和顶板与倾翻保护结构骨架间的局部焊点开裂,或者覆盖板等局部焊缝开裂(局部焊点工艺性较差,焊接质量未达到要求)所导致的载荷波动(不是主要焊缝开裂)。但由于塑性铰孔通过塑性变形有效地吸收了能量,使焊缝承受弯矩大为减轻,结构的总体承载能力仍旧继续上升。

由该曲线对比来看,塑性铰孔有效地吸收了能量,使焊缝尽可能多地得到了保护。因此,在确保强度、刚度均满足要求的条件下,开孔方案使能量吸收最大化,同时使焊缝得到有效保护。

5 结 论

(1) 基于能量吸收最大化的思想,研究了大型矿用工程车辆倾翻保护结构的设计方法。即在强度和刚度满足要求的前提下,在立柱上增开塑性铰孔,使局部弱化,实现对塑性铰出现位置与时间的有效控制,利用塑性铰的延性进行能量吸收,满足设计及标准要求。

(2) 数值模拟与性能试验对比与分析结果表明,在确保强度、刚度均满足要求的条件下,增开塑性铰孔可以实现能量吸收的最大化,塑性铰孔有效地吸收了能量,同时使焊缝得到有效保护。

参考文献:

- [1] ISO3471: Earth-moving machinery-roll-over protective structures-laboratory tests and performance requirements [S]. 1994.
- [2] 王国强,林建荣. 国际工程机械技术法规和标准发展报告 [J]. 中国工程机械, 2005 (12): 60~66.
- [3] 贡凯军,诸文农,杨庆佛,等. 滚翻保护装置性能试验和侧向加载时挠度的塑性计算方法 [J]. 机械工程学报, 1996, 32 (3): 47~50.
- [4] 王继新,王国强,刘小光,等. 装载机安全驾驶室 ROPS 性能非线性有限元分析 [J]. 吉林大学学报工学版, 2005, 35 (增刊): 82~86.
- [5] GB17922-1999: 土方机械——翻车保护结构实验室试验和性能要求 [S].
- [6] 冯素丽,王国强,李 春,等. 土方机械落物保护结构动态仿真及试验 [J]. 农业机械学报, 2006, 37 (7): 142~145.

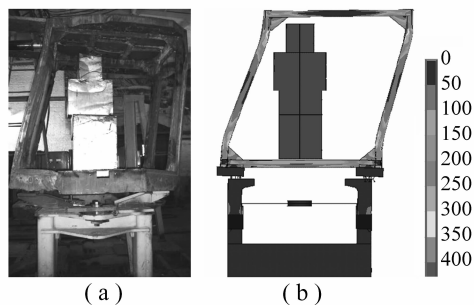


图8 侧向加载结束时倾翻保护结构变形对比

Fig. 8 Contrasting with lateral loading

(a) 试验变形; (b) 仿真变形

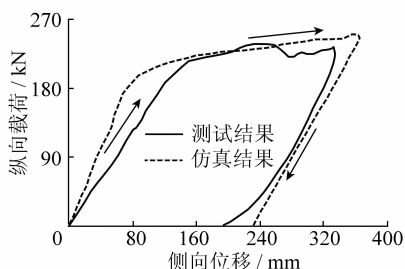


图9 侧向保护特性曲线

Fig. 9 Lateral protect performance curves