

摘 要

近年来,随着我国经济的快速发展,对自然资源的开发利用更加合理化、规范化,大型矿用自卸车作为矿山机械的一种特种车辆,其近年来的发展趋势更加偏向于操作系统智能化、载重能力大型化。驾驶室作为驾驶员安全保护机构对矿用自卸车的人机安全至关重要,通过文献分析可知,基于 ROPS&FOPS 标准要求的驾驶室安全方面的研究大多局限于驾驶室本体机构,而矿用自卸车的安全保护结构实验要求不仅有驾驶室本体,还应包含底架部分,驾驶室与底架之间的承载连接机构性能不可忽略,也承担一定的结构承载和吸能作用,所以对驾驶室与底架承载连接机构受力分析的研究,可以评估驾驶室底座对其 ROPS 侧向、纵向加载时的影响程度,进而对其承载连接机构中的结构件进行优化,提高矿用自卸车的产品设计合理性。

本文结合 200 吨级大型矿用自卸车翻车保护结构,对其驾驶室承载连接部分的高强度螺栓连接机构和焊接机构进行分析,并对螺栓连接机构进行选型优化,以及对螺栓连接机构和焊接机构力学耦合性能进行分析。主要内容如下:

1.介绍矿用自卸车技术及应用现状,综述国内外矿用自卸车 ROPS&FOPS 保护结构、自卸车仿真分析的主要研究方向及其相关研究理论;由此得出,现阶段矿用自卸车结构的研究大多针对于保护结构的本体模型或自卸车的车架的优化研究,对驾驶室与底架之间的承载连接机构的研究较少,而驾驶室与底架之间的承载连接机构主要是通过高强度螺栓配合焊接连接进行固联,所以本文着重研究 200 吨级矿用自卸车基于 ROPS 加载工况下高强度螺栓的力学性能。

2.基于 200 吨级矿用自卸车翻车保护结构标准进行分析;阐述高强度螺栓的分类,分析矿用自卸车摩擦型高强度螺栓受力变形机理,以及基于 ROPS 的矿用自卸车驾驶室和螺栓受力、变形的非线性理论分析。

3.依据校验标准和矿用自卸车的研发现状,计算并设定了 200 吨级矿用自卸车 ROPS 结构的最小侧向加载、最小侧向吸能、最小纵向加载力;对矿用自卸车 ROPS 结构进行侧向加载、侧向吸能、纵向加载仿真分析,并进行相关的力学性能分析,得出后续分析所需的最小侧向加载力值;利用所得最小侧向载荷和最小纵向载荷,分析矿用自卸车在水平路面工况下侧向和纵向加载时,驾驶室与底架

承载连接螺栓的理论受力；分析矿用自卸车在极限上、下坡与极限侧坡工况下的承载连接螺栓理论受力。

4.利用有限元分析软件 ANSYS Workbench，对矿用自卸车驾驶室进行最小侧向载荷、最小纵向载荷仿真力学分析，进而分析驾驶室与底架间的螺栓连接机构对 ROPS 机构的力学性能影响；对螺栓受力分析的仿真结果与前述理论分析值进行对比研究，验证仿真分析的合理性，并依据分析结果，对后续螺栓选型优化提供研究依据。此外通过分析满足最小侧向吸能与最小纵向载荷条件下的两种焊接连接方案可知，在焊接连接仿真分析中，有焊缝实体模型与无焊缝实体模型对 ROPS 侧向与纵向位移误差率均在 5%以内，故对焊接连接的模拟可采用无焊缝实体以节约计算资源。

5.针对前述分析所得的螺栓选型优化问题，在原螺栓型号 M30 的基础上，理论计算分析 M27 及 M24 型螺栓在模型中的受力；选用优化的螺栓型号，在侧向和纵向加载工况下，进行仿真验证力学分析；经过理论与仿真分析，验证选定螺栓选型的合理性；最后通过对螺栓进行模态分析，分析其固有频率，将其与自卸车作业频率进行比较，验证螺栓的可靠性。

关键词：大型矿用自卸车；ROPS；高强度螺栓连接；焊接连接；选型优化

Abstract

In recent years, with the rapid development of economy in our country, the development and use of natural resources is more rationalized and standardized. As a kind of special vehicle of mining machinery, the development trend of large mining dump truck in recent years is more biased to the intelligent operation system and large load capacity. As a driver's safety protection mechanism, the cab is very important for the man-machine safety of mining dump truck. Through literature analysis, it can be seen that researches on cab safety based on the ROPS&FOPS standard are mostly limited to the cab body mechanism, while the safety protection structure experiment of mining dump truck requires not only the cab body, but also the bottom frame. The performance of the bearing connection mechanism between the cab and the chassis cannot be ignored, and it also assumes a certain structural bearing and energy absorption role. Therefore, the research on the force analysis of the bearing connection mechanism between the cab and the chassis can evaluate the influence degree of the cab base on the lateral and longitudinal loading of its ROPS, and then optimize the structural parts in the bearing connection mechanism. Improve the product design rationality of mining dump truck.

In this paper, combined with the rollover protection structure of 200t large mining dump truck, the high-strength bolt connection mechanism and welding mechanism of the cab bearing connection part were analyzed, and the selection optimization of the bolt connection mechanism, as well as the mechanical coupling performance of the bolt connection mechanism and welding mechanism were analyzed. The main contents are as follows:

1. Introduce the technology and application status of mining dump truck, and summarize the main research directions and related research theories of mining dump truck ROPS&FOPS protection structure and simulation analysis at home and abroad; It can be concluded that most researches on mining dump truck structure at the present stage are focused on the body model of protection structure or the optimization of dump truck frame, and there are few researches on the bearing connection mechanism

between cab and bottom frame, and the bearing connection mechanism between cab and bottom frame is mainly fixed through high-strength bolt and welding connection. Therefore, this paper focuses on the mechanical properties of high-strength bolts of 200t mining dump truck under ROPS loading conditions.

2. Analysis based on the rollover protection structure standard of 200t mining dump truck; this paper expounds the classification of high-strength bolts, analyzes the stress and deformation mechanism of friction type high-strength bolts of mining dump truck, and analyzes the nonlinear theory of stress and deformation of cab and bolts of mining dump truck based on ROPS.

3. The minimum lateral loading, minimum lateral energy absorption and minimum longitudinal loading force of the ROPS structure of 200-ton mining dump truck are calculated and set according to the calibration standard and the research and development status of the truck. The lateral loading, lateral energy absorption and longitudinal loading simulation analysis were carried out on the ROPS structure of mining dump truck, and the related mechanical properties were analyzed, and the minimum lateral loading force required for subsequent analysis was obtained. Based on the minimum lateral load and minimum longitudinal load obtained, the theoretical forces of connecting bolts between cab and bottom frame under lateral and longitudinal loading of mining dump truck on horizontal road surface were analyzed. The theoretical force of bearing connection bolt of mining dump truck under the limit, downhill and limit side slope conditions is analyzed.

4. Using the finite element analysis software ANSYS Workbench, the minimum lateral load and minimum longitudinal load simulation mechanical analysis were carried out on the cab of mining dump truck, and then the influence of the bolted connection mechanism between cab and chassis on the mechanical properties of the ROPS mechanism was analyzed. The simulation results of bolt stress analysis are compared with the theoretical analysis values mentioned above to verify the rationality of the simulation analysis, and according to the analysis results, the research basis for the subsequent bolt selection optimization is provided. In addition, through the analysis of the two welding connection schemes under the conditions of minimum lateral energy

absorption and minimum longitudinal load, it can be seen that in the simulation analysis of welding connection, the error rates of the ROPS lateral and longitudinal displacement of the solid model with weld and the solid model without weld are within 5%, so the simulation of welding connection can use the solid without weld to save computing resources.

5. In view of the optimization problem of bolt selection obtained from the above analysis, based on the original bolt type M30, the forces of M27 and M24 bolts in the model were calculated and analyzed theoretically. The optimal bolt type was selected, and the mechanical analysis was verified by simulation under lateral and longitudinal loading conditions. Through theoretical and simulation analysis, the rationality of bolt selection was verified. Finally, through the modal analysis of the bolt, analyze its natural frequency, and compare it with the operating frequency of the dump truck, verify the reliability of the bolt.

Key words: large mining dump truck; ROPS; high strength bolt connection; welding connection; selection optimization

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景	1
1.2 相关国内外研究状况及存在的问题	2
1.2.1 自卸车 FOPS&ROPS 研究状况.....	2
1.2.2 高强度螺栓国内外研究现状	4
1.3 研究内容及意义	7
第 2 章 矿用自卸车翻车保护标准及螺栓受力分析理论	9
2.1 自卸车驾驶室翻滚保护结构（ROPS）理论分析	9
2.1.1 翻滚保护结构相关定义	9
2.1.2 翻滚保护结构性能要求	10
2.1.3 翻滚保护结构试验方法	10
2.2 连接机构中高强度螺栓受力分析	12
2.2.1 高强度螺栓受力过程分析	12
2.2.2 高强度螺栓预紧力计算理论	14
2.2.3 高强度螺栓预紧力施加方法	15
2.2.4 摩擦型高强度螺栓的抗剪切力计算	15
2.2.5 高强度螺栓连接许用承载力分析	16
2.2.6 高强度螺栓连接的强度校核	18
2.3 非线性问题介绍	20
2.3.1 材料非线性问题	20
2.3.2 几何非线性问题	21

2.3.3 状态非线性问题	22
2.4 本章小结	22
第 3 章 基于自卸车作业环境的承载连接机构受力分析	23
3.1 自卸车驾驶室与底架承载连接机构介绍和模型简化	23
3.2 基于 ROPS 试验的承载连接机构力学分析	24
3.2.1 驾驶室 ROPS 试验性能要求和挠曲极限量确定	24
3.2.2 ROPS 仿真分析	25
3.2.3 基于 ROPS 试验下的螺栓受力计算	29
3.3 基于自卸车典型作业工况的承载连接机构受力分析	35
3.3.1 矿用自卸车纵向极限上坡时螺栓受力分析	36
3.3.2 矿用自卸车在极限侧坡行驶时螺栓受力分析	37
3.4 本章小结	38
第 4 章 承载连接机构仿真分析	39
4.1 承载机构的连接方法研究	39
4.1.1 螺栓连接仿真分析	39
4.1.2 焊接连接分析	41
4.2 承载连接机构有限元仿真	41
4.2.1 仿真模型处理和材料的添加	42
4.2.2 接触类型选择和网格划分	43
4.2.3 螺栓预紧力和边界条件添加	45
4.3 基于各向加载力的承载连接机构仿真受力分析	47
4.3.1 基于满足最小侧向吸能的侧向加载仿真力学分析	47

4.3.2	基于最小纵向加载的仿真力学分析	50
4.4	本章小结	53
第 5 章	高强度螺栓选型优化研究	55
5.1	高强度螺栓连接尺寸优化	55
5.1.1	M24 和 M27 型高强度螺栓受力分析	55
5.1.2	ROPS 受侧向加载试验时 M24 型螺栓受力分析	56
5.1.3	M27 型螺栓受力校核	56
5.2	基于 M27 高强度螺栓的承载连接机构仿真分析	58
5.3	螺栓模态分析	61
5.3.1	模态分析理论介绍	61
5.3.2	螺栓模态分析	63
5.4	本章小结	64
第 6 章	总结与展望	67
6.1	总结	67
6.2	展望	68
参考文献		69
作者简介及研究成果		75
致 谢		77

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

工程机械作为国家实体经济发展的主要支撑引擎，涉及交通运输、航空航天、矿山能源开采、国防工程建设、水利水电建设、农业发展等诸多领域，在各领域内均有相应的特种机种来辅助工程建设，这些特种设备的应用极大的提高了人们对于自然资源的开发效率，而且大多数特种设备可代替人在较为恶劣的工况环境下进行较长时间的作业，为人类提供了更好的人机工作环境^[1, 2]。

矿用自卸车作为矿山能源开采的一种特种车辆，承担着较大比例的矿山能源运输任务，早在上世纪中叶就有一些国家对矿用自卸车进行了研究设计，近年来矿用自卸车在承载能力、智能化水平、人机交互功能上都取得了长足的进步。随着我国西部开发、东北振兴、中部崛起等国家发展战略的提出，对于能源的需求量越发巨大，随之对于矿用自卸车需求量也与日俱增^[3]，但是由于其特殊而复杂的外部工作环境，以及长时间的超负荷作业，易对自卸车经济性和驾驶人员的安全造成严重影响^[4-6]。国内外因矿用自卸车翻车而出现的事故很多，如图 1.1 所示，2014 年内蒙古某露天煤矿开采公司的矿用自卸车在倾倒煤料途中发生倾翻，造成驾驶员一人死亡，直接经济损失 140 万元；2019 年俄罗斯某大型煤矿矿用自卸车在装载物料过程中司机室被大块煤块砸中导致司机室发生严重变形；2023 年内蒙古阿拉善煤矿大型坍塌事故，落物坠落导致自卸车驾驶室发生扭曲破坏，致使司机受伤等。



图 1.1 自卸车倾翻事故

造成这些重大事故的原因有很多种：（1）由于现行矿用自卸车载重量大，当运载物料重量超过自卸车额定量时，自卸车翻斗下方的支撑液压缸发生断裂引起车辆倾翻^[7]。（2）当载有大吨位物料的自卸车上、下坡时，因整车质心因物料的存在而偏高导致整车失稳而发生倾翻。（3）当自卸车装在物料时，装在铲斗中的大型物块跌落击中驾驶室而导致司机受伤甚至丧命。（4）当自卸车通过崎岖山路时，矿山坍塌而跌落的大型物块砸中司机室侵入司机工作空间等。当驾驶室受到撞击时，驾驶室损坏原因有多种，可能因驾驶室的结构强度不足而发生破坏，也可能因驾驶室与车架中间的承载连接机构中的螺栓连接或者焊接连接强度不足，致使落物侵入到驾驶员安全区域等，所以，针对矿用自卸车的驾驶室与车架之间的承载连接机构的研究对于矿用自卸车的安全设计具有重要意义。

1.2 相关国内外研究状况及存在的问题

1.2.1 自卸车 FOPS&ROPS 研究状况

驾驶室作为保护驾驶员结构件，对驾驶员的安全有着直接的关系，驾驶室的设计应以发生事故时驾驶员有足够的安全空间为设计标准。国内多个企业、高校、科研院所等对矿用自卸车 FOPS&ROPS 均有相关研究。

我国对于车辆驾驶室 FOPS&ROPS 的研究始于上世纪 70 年代中期，因初期技术与经验的缺乏，对于其研究仅限于参考国外的研究经验，设计出的驾驶室保护结构质量较低，后经过与欧美国家合作交流，根据国际标准《ISO 3449-2005 (FOPS)》^[8]与《ISO 3471-2008(ROPS)》^[9]制定出了符合我国实际发展要求的标准《GB-T 17771-2010 (FOPS 落物保护 ISO3449)》^[10]与《GB-T 17922-2014 土方机械 滚翻保护结构实验室试验和性能要求》^[11]。

王国强、赵登峰等学者基于某压路机的 ROPS 结构建立有限元模型并对其进行仿真分析，通过对比实验所得 ROPS 在三种载荷工况下的载荷变形曲线，得出了仿真分析值与实验结果一致性，证明了仿真分析结果的有效性^[12]。王继新博士结合国家级 863 项目，对工程车辆翻车保护结构的实验方法进行了研究，根据连续介质力学理论结合修正拉格朗日与大变形有限元方法，提出了针对翻车保护

结构的计算仿真方法,并利用此方法准确预估了结构性能;还提出了侧向吸量的控制方法,解决了翻车保护结构中最小侧向吸能的问题,为工程车辆安全性能研究设计提供了依据^[13]。冯素丽博士通过多组对多种落物翻车保护结构的试验分析,结合相应的计算机仿真分析,对比得出计算机仿真结构的真实性与合理性,此外还提出了基于神经网络遗传算法的落物结构优化方法,并以实际模型验证了此优化方法的合理性,为后学者工程车辆结构优化研究提供了指导性意见^[14]。翟洪岩通过 320 型推土机进行落物撞击与侧向加载物理试验与仿真分析相结合的方法,验证了在误差范围内有限元仿真分析的合理性^[15]。

梁小波、唐春喜等通过对 220t 矿用自卸车在满载静止与极限载荷两种工况环境下整车受力的分析,得出车架较大应力点位于车桥 A 形架与后桥壳位置,并对其结构尺寸进行了优化,为整车结构应力仿真分析优化提供了参考^[16]。司俊德、王国强等利用有限元方法,对某型号装载机在坡度角为 30° 与 45° 的两种工况进行了动态仿真实验,试验结果表明当装载机在斜坡上发生倾翻时,静态加载中 ROPS 试验与同工况环境下的动态实验有差别,同时还验证了对于 ROPS 保护结构,在一定刚度范围内,ROPS 刚度越小对驾驶员的侵害越小^[17]。康晋在分析矿用自卸车 FOPS&ROPS 试验时,考虑了自卸车驾驶室受外力作用时存在材料非线性和几何非线性的影响,在此基础上利用样条插值法构建设计变量与目标函数之间的关系,对驾驶室结构进行了多目标优化,提高了驾驶室的力学性能^[18]。朱海平针对四种矿用自卸车的典型工况,对矿用自卸车进行了静强度分析,找出了车架破坏的最危险部位,并利用雨流算法对车架进行了疲劳分析,得出实际疲劳数据与仿真数据之间的高度相符性^[19]。关丽坤、邓明胜等针对矿用自卸车焊缝破坏问题,利用电镜扫描焊缝,同时结合结合疲劳实验,表明了自卸车在焊接过程存在问题,并提出了改进意见^[20]。肖扬国、张召春等利用 CAE 软件对宽体矿用自卸车进行仿真优化,找出了自卸车薄弱之处并对其进行了优化,并通过物理实验验证了 CAE 仿真的合理性^[21]。

国外对于 ROPS 保护结构的研究源于上世纪 50 年代^[22]。上世纪 70 年代,美国卡特彼勒公司和德国奥加凯公司等正式要求在工程车辆上安装不同类型的 FOPS & ROPS 安全保护结构装置^[23]。1985 年,美国汽车工程师学会 (SAE) 正

式提出：当工程车辆工作在环境恶劣和存在危险的情形下，工程车辆驾驶室上必须安装符合标准规范要求的 FOPS & ROPS 安全保护结构装置，从而提高保护人身安全[24]。卡特彼勒公司建造了能够对矿用车整备质量 500t 的检测加载试验台，是目前国际上对驾驶室安全保护结构 FOPS & ROPS 试验能力最大的检测系统。

Yeh R E、Haung Y 等开发了一套分析程序，该程序通过直接刚度法对空间框架进行了弹塑性非线性分析，通过实例说明了该程序在农用和土方车辆 ROPS 设计中可有效应用[25]。A. Fabbri、S. Ward 基于经合组织与欧共体组织标准，针对农用机械驾驶室有限元仿真模型提出了一种新型的计算模型，该模型可赋予多种材料，计算精度较高[26]。Jacek Karliński、Eugeniusz Rusiński 等介绍了关于矿山机械操作人员被动安全的相关问题，并对保护结构进行了详细描述和分类，此外还对保护结构试验的要求和方法做出了规定，提出了利用有限元法建立数值，用以模拟仿真模型的分析基理，给出了保护结构有限元试验的详细实例[27]。Kokot, G.、Ogierman, W.利用 LS-DYNA 仿真软件，对落物和翻车保护结构进行了仿真分析，验证了其计算机模拟方法可显著减少实验成本[28]。

1.2.2 高强度螺栓国内外研究现状

螺栓连接具有连接便捷、拆卸方便可靠等优点，可适应各种复杂作业工况，大到国防建设小到手表等精密仪器均离不开螺栓的使用。螺栓连接分为普通螺栓连接和高强度螺栓连接，其中高强度螺栓连接分为承压型高强度螺栓和摩擦型高强度螺栓。随着科技的快速进步，高强度螺栓从以往的单一型号衍生出了适用于多种工况环境的螺栓型号，其中包括 12.9 级的各类高强度螺栓等，对螺栓的设计研究也涉及了疲劳破坏、组织结构、预紧力大小的施加等诸多领域，国内外研究发展状况不一[29, 30]。

为了适应工业的快速发展，我国高强度螺栓的研究始于上世纪 50 年代，并在短时间内实现了批量投产，上世纪 70 年代末已具有了成熟的螺栓设计加工工艺，并应用于生产实践指导，1988 年我国首次将高强度螺栓连接设计的规范写入《钢结构设计规范》[31]，随着理论与实践技术的进一步成熟，1992 年我

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/638025117072006046>