

多式联运罐式集装箱疲劳分析载荷综述

郑静, 于艳丽, 宋世安, 张少飞

(中国船级社质量认证公司, 北京 100006)

摘要: 本文阐述了疲劳分析是保障罐箱这一多式联运“标准化设备”运营耐久性及可靠性的关键一环。针对罐箱疲劳分析的必备输入项(疲劳载荷)展开论述, 分析了罐箱运营各常规工况(运输工况、装卸工况、检修工况)及各工况载荷构成, 并对罐箱营运过程疲劳载荷进行了归纳汇总。列举了关键的疲劳载荷(随机惯性力外载荷)典型载荷谱, 介绍了载荷谱分析方法。最后对罐箱疲劳分析后续相关研究工作做了说明。

关键词: 多式联运; 罐式集装箱; 疲劳; 载荷谱

中图分类号: U169.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2021) 11—0065—03

集装箱运输, 方便不同运输模式的无缝切换, 可以实现“门到门”运输, 是“多式联运”实现的基础。《交通强国建设纲要》明确提出“优化运输结构, 推动铁水、公铁、公水、空陆等联运发展, 推广跨方式快速换装转运标准化设备, 形成统一的多式联运标准和规则。”。

罐式集装箱(下文简称“罐箱”)就是这样一个多式联运的“标准化设备”。罐箱本身的结构安全至关重要, 疲劳分析是保障罐箱运营耐久性的关键一环。当前相关公约、标准对疲劳分析提出要求, 例如:《国际海运危险货物规则》6.7.2.2.9 条款规定“可移动罐柜的设计须能显示出已考虑了在使用期间由于重复荷载而产生的材料疲劳作用。”。

疲劳载荷是进行罐箱疲劳分析与评估的必备输入项, 本文将对罐箱运营生命周期内的疲劳载荷进行识别及论述。

1 罐箱运营工况及疲劳载荷识别

进行罐箱疲劳分析前, 首先明确罐箱运营中的各类工况并对各工况载荷构成进行分析、识别及外载荷边界判断。

1.1 运输工况

罐箱主要有公路、铁路、船舶 3 种运输模式, 对各运输模式下载荷构成及外载荷边界分析如下。

1.1.1 公路运输

罐箱承受运输车辆车架传递的复杂随机道路外载荷。不同的运输路线、路面构成会对应不同的道路载荷谱。

当车架角件承载面高于纵梁顶面时, 由角件支撑, 随机道路外载荷通过角件传递给罐箱。当半挂车架纵梁

顶面高于角件支撑面时, 由载荷传递区承载, 随机道路外载荷通过载荷传递区传递给罐箱, 如图 1 所示。

长距离、跨地形运输时还涉及环境温度变化, 罐箱将承受相应的热负荷。同时罐箱会承受内容物的静载荷以及由车架传递的随机路谱外载荷作用下造成的内容物对罐体的冲击载荷。承压罐箱还会承受对应的内压力。

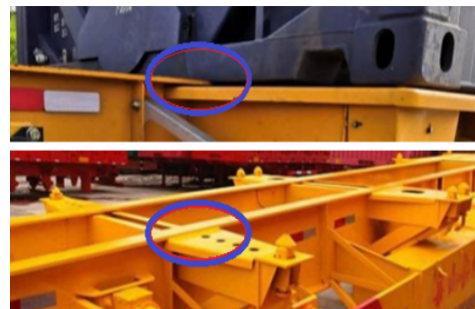


图 1 公路运输载荷传递区支撑工况图示

1.1.2 铁路运输

铁路运输时, 罐箱承受车体传递的复杂的随机外载荷。平车运输时, 外载荷通过角件传递给罐箱。敞车运输时, 当敞车底部平整无凹陷时, 垂向外载荷通过角件传递, 当敞车底部与角件相对位置发生凹陷时, 罐箱与敞车纵梁相对应处的端梁承载(图 2 右图显示了该工况罐箱端下梁及罐体中间的磨损情况), 称该种承载模式为“敞车工况”。



图 2 罐箱敞车运输工况图示

1.1.3 船舶运输

罐箱放置在集装箱船舱内或者甲板上进行运输。罐箱所受外力来自波浪和风力所造成的船舶的运动。罐箱装载时进行必要的栓固。通常集装箱船舱内设置了栅格导柱,对竖直堆码在舱内的罐箱起到定位和支撑的作用。舱内无栅格和甲板上的集装箱可通过栓固装置固定,例如支撑壁柱、绳索、转锁等。罐箱在船运过程中将随着船舶的运动承受相应的各方向惯性载荷以及对应的系固载荷,堆垛时还将承载堆码载荷。

1.2 装卸工况

装卸工况包含罐箱内容物(货物)的装卸以及罐箱本身的装卸。

罐箱在进行货物的充装时,经历从空罐到满罐的变化,承受内容物静压力随装载过程的波动,对于承压罐箱还承受相应的气相波动压力,对于沥青等高于常温的介质或LNG等冷冻液化介质,还会承受温度变化的热应力。进行货物卸载时罐箱承受的载荷模式与充装时相同,载荷变化趋势相反或略有差异。罐箱本身进行装卸车操作时,通常采用专用吊具或者叉车将罐箱从初始位置转移到目标位置,在一次操作过程中,罐箱会承受起吊惯性力,同时承受内容物的静压力以及气相空间内压力。

1.3 检修工况

罐箱投入运营后每5年需要进行定期检验;对于运输危险品的罐箱每2.5年还需要进行中间检验;必要时还需进行特殊检验。进行所述的检验时,需要进行必要的检查和试验,通常定期检验需要进行内外部检查、压力试验和防渗漏试验;中间检验需要进行内外部检查及防渗漏试验;特殊检验根据罐箱实际情况一般至少包含中间检验的内容。

2 疲劳载荷

2.1 疲劳载荷构成

通过对各工况下载荷的识别及外载荷边界的分析,得出罐箱运营中的疲劳载荷构成如表1所示。

表1中列明的静载荷及交变载荷,其构成简单,可直接由罐箱设计给定或根据实际运营参数确定。运输工况的随机惯性力外载荷较复杂,是造成罐箱构件疲劳损伤的主要原因。获取方式通常有两种,一种是采集专用运输路线/航线实际时域载荷信息,编制时域载荷谱;

另一种是选用相关的道路/铁路/波浪频域载荷谱,并转化为时域样本数据。

表1 罐箱运营载荷汇总表

载荷 工况		外载荷边界	外载荷		内载荷	
			载荷名称	载荷属性	载荷名称	载荷属性
运输工况 (重载)	公路	角件	惯性力外载荷 (不同路线/ 航线)	随机载荷	货物自重 内压	静载荷
		载荷传递区				
	铁路	角件(平车)				
		端梁(敞车)				
船运	角件					
运输工况 (空载)	公路	角件	惯性力外载荷 (不同路线/ 航线)	随机载荷	—	—
		载荷传递区				
	铁路	角件(平车)				
		端梁(敞车)				
船运	角件					
货物装卸工况		—	—	—	货物自重	交变载荷
					内压	交变载荷
罐箱装卸工况		角件/叉槽	起吊惯性力	交变载荷	货物自重	交变载荷
					内压	静载荷
检修工况		角件/叉槽	起吊惯性力	交变载荷	压力试验	交变载荷
					防渗漏试验	交变载荷

注:1)在随机/交变惯性力外载荷作用下,罐体内容物会对罐体造成相应的冲击作用;
2)运输工况当涉及长距离/时间、跨地形运输时还可能涉及环境温度交变载荷。

2.2 频域载荷谱

载荷谱是疲劳设计的重要基础,英国铁路于1964年就开始了这项研究工作,是世界上开展这一研究最早的国家之一。随后日、美、前苏联、东德等国都发表了各自测定分析得出的轨道不平顺功率谱。

我国对轨道不平顺功率谱密度的应用较晚,但是研究工作起步较早,20世纪60~70年代长沙铁道学院、中国铁道科学研究院就已用地面检测等方法获得数百米和数十公里高低、水平、轨向不平顺的轨道谱。80~90年代铁道科学研究院持续对路谱检测手段、模拟方法、系统测量数据等方面开展研究工作,提出了我国主要干线轨道谱,但至今我国仍未形成轨道谱标准。以下例举出美国轨道谱^[1-3]。

美国联邦铁路管理局(FRA)主持的通过不断的实际测量线路情况而得到的谱密度表达式如下:

轨道高低不平顺:

$$S_v(\Omega) = \frac{kA_v \Omega_c^2}{\Omega^2(\Omega^2 + \Omega_c^2)} \quad (1)$$

轨道方向不平顺:

$$S_a(\Omega) = \frac{kA_a \Omega_c^2}{\Omega^2(\Omega^2 + \Omega_c^2)} \quad (2)$$

轨道水平及规矩不平顺:

$$S_c(\Omega) = S_g(\Omega) = \frac{4kA_s\Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_c^2)(\Omega^2 + \Omega_s^2)} \quad (3)$$

式中 $S(\Omega)$ 为轨道不平顺功率谱密度, 单位为 $[\text{cm}^2/(\text{rad}/\text{m})]$; Ω 为轨道不平顺的空间频率, 单位为 (rad/m) ; A_v 、 A_a 为粗糙度常数; Ω_c 、 Ω_s 为截断频率; k 为安全系数, 一般取 0.25。表 2 为不同等级线路对应的各参数取值, 以及各等级线路下车辆安全行驶的最高速度。

表 2 美国轨道谱参数表

参数	线路等级					
	一级	二级	三级	四级	五级	六级
$A_v/(\text{cm}^2 \cdot \text{rad}/\text{m})$	1.2107	1.0181	0.6816	0.5376	0.2095	0.0339
$A_a/(\text{cm}^2 \cdot \text{rad}/\text{m})$	3.3634	3.3634	0.4128	0.3027	0.0762	0.0339
$\Omega_c(\text{rad}/\text{m})$	0.6046	0.9308	0.8520	1.1312	0.8209	0.4380
$\Omega_s(\text{rad}/\text{m})$	0.8245	0.8245	0.8245	0.8245	0.8245	0.8245
货车允许最高速度	16	40	64	96	128	176

3 载荷谱分析

3.1 时域载荷谱分析

从获取实测时程数据到载荷谱编制, 期间需要经过一系列的数据处理过程, 包括去除零点漂移、滤波、无效循环处理、载荷幅值循环计数、统计等多个环节, 具体过程可参见本文参考文献^[4]。需要指出的是由于导致载荷结构疲劳损伤的主要原因是载荷峰谷值及其循环次数, 因而载荷幅值循环计数是载荷谱编制的重要一环, 计数的过程通过计数法来实现, 计数法的种类很多, 例如穿级计数、雨流计数法等。当前有很多工程软件可以进行数据处理, 例如 MATLAB、Ncode 等, 处理后的时域载荷谱可用于疲劳分析。

3.2 频域载荷谱分析

频域载荷谱, 可以作为系统的随机激励, 但是只有在进行线性随机振动频域分析时才能直接输入, 对于非线性随机振动分析, 例如当前所要进行的罐箱疲劳分析, 最有效的方法是获取随机激励的时域样本, 并将其作为输入载荷, 因此需要对轨道不平顺随机过程进行数值模拟分析。现在采用较多的模拟分析方法是基于频域功率谱等效法, 该方法的具体公式及推导过程可以参见本文参考文献^[1], 它是将功率谱在频域内离散采样, 转化为频谱再通过傅里叶逆变换 (IFFT), 最后得到平稳的各相位时域样本后用于疲劳分析。

4 结语

笔者从事罐箱等产品的设计审查及校核评估工作, 在工作中经常遇到设计单位对罐箱缺乏疲劳分析或者疲

劳分析时对实际运营工况 (尤其是公路“载荷传递区工况”、铁路“敞车工况”) 及载荷构成识别不完备的情况。本文针对罐箱疲劳分析的必备输入项 (疲劳载荷) 展开论述, 分析和识别了罐箱运营常规工况及各工况载荷构成; 列举了关键的疲劳载荷 (随机惯性力外载荷) 典型载荷谱; 介绍了载荷谱分析方法。为罐箱产品设计、制造及使用单位提供参考。

罐箱的疲劳分析除本文涉及的载荷外, 还包含分析边界界定、分析模型的处理 (尤其热点应力区域网格的划分)、疲劳分析方法及材料疲劳寿命曲线选择等其他关键方面, 笔者将持续进行所述各方面的研究工作, 为推动建立行业内罐箱疲劳分析标准, 保障罐箱本质安全服务。

参考文献:

- [1] 刘晓敏. 典型轨道谱的仿真分析研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2009. 13-18.
- [2] 张梅. 车载式轨道动态故障诊断方法的研究 [D]. 山西: 中北大学, 2014. 12-16.
- [3] 陈士军, 凌贤长, 朱占元, 等. 轨道高低不平顺谱分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(5): 33-38.
- [4] 王春山, 王曦, 杨广雪, 等. 铁路货车载荷谱及其应用 [M]. 第 1 版. 北京: 中国铁道出版社, 2018. 36-53.

