

研
究
开
发基于 FKM 标准的转向架构架
疲劳损伤研究

孟金凤, 陆正刚, 章焕章

(同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)



作者简介: 孟金凤 (1986-), 女, 硕士, 主要从事数字化虚拟平台开发。

摘要: 以转向架构架为研究对象, 分别使用 FKM 标准^[1]和商业软件 MSC.Fatigue 对其进行疲劳损伤计算, 并将 2 种计算结果进行对比。对于焊接结构, 基于 FKM 标准的焊接件损伤值比使用 MSC.Fatigue 计算出的损伤值大; 对于非焊接结构则得到相反的结果。通过分析 FKM 标准的评价参数得出基于 FKM 标准评价转向架构架疲劳寿命具有一定的使用价值。

关键词: FKM 标准; 转向架构架; 疲劳损伤

中图分类号: U260.331+.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2011)01-0028-04

The Fatigue Damage Research of Bogie Frame Based on the FKM-Guideline

MENG Jin-feng, LU Zheng-gang, ZHANG Huan-zhang

(Institute of Railway & Urban Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The fatigue damage of a freight car bogie frame was calculated according to the FKM-Guideline and the commercial software MSC.Fatigue respectively. From the comparison, it could be concluded that the result of FKM-Guideline was bigger than that of MSC.Fatigue for welded components, while for non-welded components, the result was opposite. By analyzing the parameters of the FKM-Guideline, the fatigue life assessment of bogie frames based on the FKM-Guideline has certain practical value.

Key words: FKM-Guideline; bogie frame; fatigue damage

0 引言

疲劳破坏是承载动态载荷结构的主要失效形式之一。结构疲劳的产生机理很复杂, 尤其是对焊接结构。为此, 车辆新产品的疲劳强度设计和寿命评估是我国铁路高速、重载型车辆设计制造中的重要环节, 车辆各焊接承载部件的疲劳寿命问题得到了广泛关注。由于现行行业标准对结构疲劳评定基本采用疲劳极限法, 仅提供了以 Goodman 疲劳极限线图表征的许用疲劳强度数据, 对疲劳寿命预测应用的累积损伤法所必须的 $S-N$ 曲线数据未作出规定。因此, 当前对铁道车辆焊接结构的疲劳寿命预测研究, 主要是在分析和参考其他行业特别是国外各相关设计规范基础上, 借鉴应用其提供的标准化疲劳设计 $S-N$ 曲线数据于实际工程分析之中。本文基于德国 FKM 标准对转向架焊接构架进行疲劳损伤计算, 分析了主要因素对构架疲劳寿命

的影响, 然后用商业软件 MSC.Fatigue 对同一构架进行疲劳损伤计算, 并对 2 种计算结果进行了对比。

1 基于 FKM 标准的疲劳寿命分析方法

1.1 FKM 标准简介

FKM 标准是由德国机械工程研究委员会 (FKM) 编制的《Analytical Strength Assessment of Components in Mechanical Engineering》, 用于评估钢和铝材料的焊接和非焊接构件的疲劳问题, 其同时考虑了大多数对构件强度 (静态和动态) 产生影响的因素。FKM 标准中分焊接和非焊接结构疲劳评价 2 种类型, 每一种类型可以分别使用名义应力方法和局部应力方法进行评价。

对于非焊接结构, FKM 标准考虑了构件材料、表面粗糙度、表面处理情况、残余应力情况、载荷情况等影响因素。图 1 为粗糙度因子与材料抗拉强度的关系。从图 1 中可以看出, 粗糙度因子受材料强度和构件表面粗糙度的影响, 对于表面质量较高的构件, 粗糙度因子受材料强度影响不大; 对于粗糙的表面, 材料强度

收稿日期: 2010-08-09

对粗糙度因子影响较大。所以, 对于高强度材料, 需要尽量提高表面质量, 以获得较高的疲劳寿命; 普通中等强度材料对于表面粗糙度并不敏感。

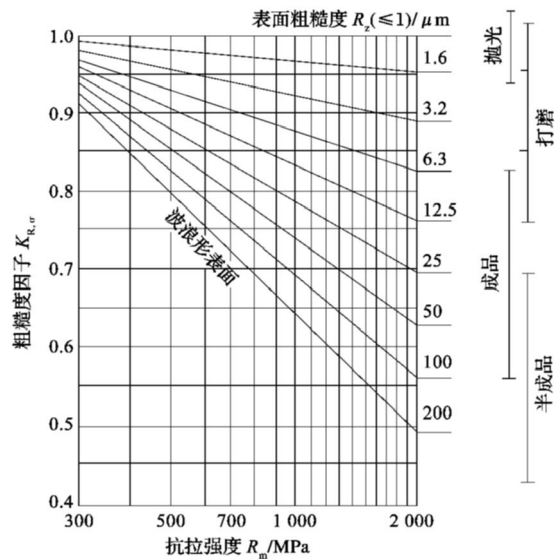
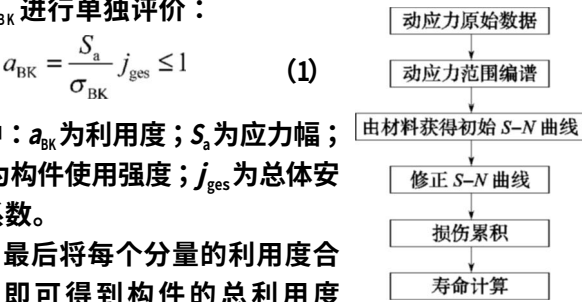


图 1 粗糙度因子与材料抗拉强度的关系

对于焊接结构, FKM 标准考虑了构件材料、焊接接头细分类别 (FAT 值)、表面处理情况、残余应力情况、载荷情况等影响因素, 其中焊接接头疲劳等级 (FAT) 和板厚因子与国际焊接协会 IIW 标准^[2]提供的参数类似: 焊接接头疲劳等级, 即 FAT 值, 根据不同的焊接接头结构形式和疲劳裂纹出现的位置 (焊趾或焊跟) 选择; 板厚因子根据焊接接头类型和焊接件厚度确定; FKM 标准提供了常见的表面处理办法, 并针对这些方法给出了表面处理因子的上、下限, 用户可以在给定的范围内选取合适的值。

1.2 基于 FKM 标准的疲劳寿命评价过程

依照 FKM 标准进行疲劳寿命分析, 首先要基于焊接接头的初始信息, 定义并确定在疲劳评估中适用的应力类别, 并计算或测量出有关应力范围, 确定应力类型, 即名义应力和局部应力; 然后根据评价对象 (焊接件或非焊接件) 构件材料、焊接接头细分类别 (FAT 值)、表面处理情况、残余应力情况、载荷情况、表面粗糙度、缺口情况修正 S-N 曲线; 再给定期望寿命, 并针对每个应力分量 (对于平面应力为 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$) 通过利用度 a_{BK} 进行单独评价:



准的疲劳分析过程, 图 3 为以非焊接件为例的 S-N 曲线修正过程。



图 3 非焊接件修正 S-N 曲线过程

2 构架疲劳寿命分析实例

2.1 有限元分析

以设计的高速货车转向架构架为例, 转向架构架焊接结构侧梁、横梁及制动吊座由各种不等厚度的钢板或钢管焊接而成, 为此, 采用四边形及少量三角形壳单元进行离散。有限元离散模型如图 4 所示, 整个模型共有结点 123 307 个, 单元 124 174 个, 采用弹性约束元作为约束条件。图 5 为某种垂直运用载荷作用时构架 Von-Mises 应力分布情况。

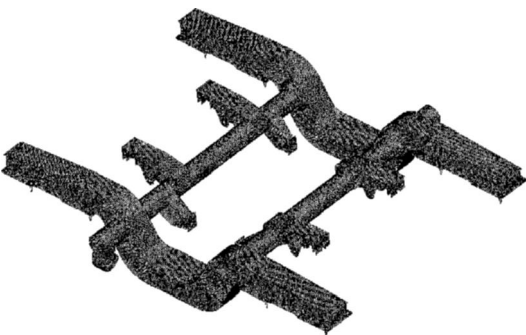


图 4 构架有限元模型

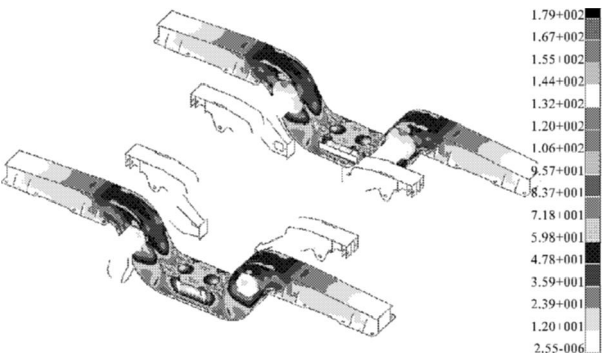


图 5 Von-Mises 应力云图

2.2 疲劳寿命分析

由有限元计算结果可以看出最大应力出现在侧梁中部拐角上盖板处。取节点 119 671、118 301、92 689、62 135、33 989、34 451 进行评价, 其中节点 119 671、118 301 和 33 989 位于焊缝位置, 其余节点为非焊接部分。

表 1 为危险节点在上文所提及的垂直运用载荷作用下应力情况。假设在构架上作用一个标准正弦载荷, 应力比为 -1, 应力分量的大小即为正弦载荷的幅值, 循环 1 次, 并期望构件能在此条件下循环工作 10^4 次。由于

焊接部分通常较非焊接部分危险, 构架危险点利用度如表2所示。

表1 危险节点应力 (负号表示应力分量反相变化)

节点	应力分量 / MPa		
	σ_x	σ_y	τ_{xy}
119 671	80	113	-7.93
118 301	80.2	-109	4.97
33 989	5.7	84	1.28
34 381	11.3	110	1.71
34 407	-1.72	78.9	2.655
92 689	101	5.28	-0.037

表2 危险节点疲劳寿命利用度 (焊接部分)

节点	残余应力	利用度			
		a_{BKx}	a_{BKy}	a_{BKt}	a_{BKv}
119 671 高残余应力	0.451 35	0.637 53	0.026 411	0.641 21	
119 671 中残余应力	0.358 21	0.505 98	0.022 966	0.509 46	
119 671 低残余应力	0.293 08	0.413 98	0.020 316	0.417 3	
118 301 高残余应力	0.452 48	0.614 96	0.016 553	0.616 63	
118 301 中残余应力	0.359 11	0.488 07	0.014 394	0.489 65	
118 301 低残余应力	0.293 82	0.399 33	0.012 733	0.400 84	
33 989 高残余应力	0.032 159	0.473 92	0.004 263 1	0.473 96	
33 989 中残余应力	0.025 523	0.376 12	0.003 707 1	0.376 16	
33 989 低残余应力	0.020 882	0.307 74	0.003 279 3	0.307 78	

由于FKM标准使用利用度作为评价构件疲劳寿命的指标, 而商用软件MSC. Fatigue使用Miner累积损伤评价疲劳寿命, 为了使两者具有可比性, 根据FKM标准, 将其中的利用度稍做修改即可得到损伤值公式:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} = \sum \left(\frac{S_a j_{ges}}{\sigma_{AK}} \right)^m \frac{n_i}{N} = \sum a_{BK_i}^m \quad (2)$$

式中: n_i 为实际循环次数; N_i 为达到疲劳极限时的循环次数; N 为 $S-N$ 曲线拐点处的循环次数; S_a 为应力幅; σ_{AK} 为疲劳强度极限; m 为 $S-N$ 曲线指数。

表3为基于FKM标准计算得到的焊接节点损伤情况。构件材料为抗拉强度490 MPa, 弹性模量210 GPa。由于FKM标准评价焊接件和非焊接件时使用的 $S-N$ 曲线分别在 $N=5 \times 10^6$ 和 $N=10^6$ 处出现拐点, 致使焊接和非焊接件的损伤值 D 分别取最小值 2×10^{-7} 和 10^{-6} , 所以当损伤值 D 小于对应的最小值时, 构件为无限寿命。非焊接节点的应力分量很小, 处于无限寿命区域。

表3 构架损伤情况 (焊接部分)

节点	残余应力	损伤			
		D_x	D_y	D_t	合成
119 671 高残余应力	9.194 7e-6	2.591 2e-5	0	2.636 3e-5	
119 671 中残余应力	4.596 5e-6	1.295 4e-5	0	1.322 3e-5	
119 671 低残余应力	2.517 5e-6	7.094 8e-6	0	7.267e-6	
118 301 高残余应力	9.263 9e-6	2.325 7e-5	0	2.328 6e-5	
118 301 中残余应力	4.631 1e-6	1.162 6e-5	0	1.164 4e-5	
118 301 低残余应力	2.536 5e-6	6.367 8e-6	0	6.378 9e-6	
33 989 高残余应力	0	1.064 4e-5	0	1.064 7e-5	
33 989 中残余应力	0	5.321e-6	0	5.322 7e-6	
33 989 低残余应力	0	2.914 4e-6	0	2.915 4e-6	

2.3 影响因素

FKM标准中, 对于焊接结构和非焊接结构的疲劳评价考虑了各种影响因素, 并且这些因素对于焊接和非焊接结构各不相同。

2.3.1 焊接结构

以钢为例, 焊接件主要考虑焊接接头疲劳等级 (FAT)、板厚因子、表面处理因子、残余应力因子、温度因子、载荷情况等。FKM标准提供了常见的表面处理方法, 及这些方法所对应的表面处理因子的上、下限, 用户可以在给定的范围内选取合适的值。以喷丸处理为例, 其表面处理因子取值范围为1.1~1.2, 此时焊接节点119 671的合成损伤变化范围为 $9.934 9 \times 10^{-6} \sim 7.652 4 \times 10^{-6}$, 且随表面处理因子的增大而减小。此外, 焊接结构中不可避免地存在有残余应力的影响, 其对结构的疲劳寿命影响比较明显。表3列出了节点119 671、118 301、33 989在其他影响因素都相同而残余应力取不同情况时的损伤值。由表3可以非常直观地看出焊接结构中残余应力对疲劳寿命的影响比较大。所以, 为了提高构件的疲劳寿命, 可以采用合理的焊接结构, 提高表面质量并设法减小或消除残余应力。

2.3.2 非焊接结构

非焊接结构受到表面粗糙度、表面处理、应力集中情况、温度等因素的影响。由图1可看出粗糙度因子与材料抗拉强度的关系。图6为节点34 381用不同抗拉强度的材料时疲劳损伤值随表面粗糙度值变化而变化的情况。

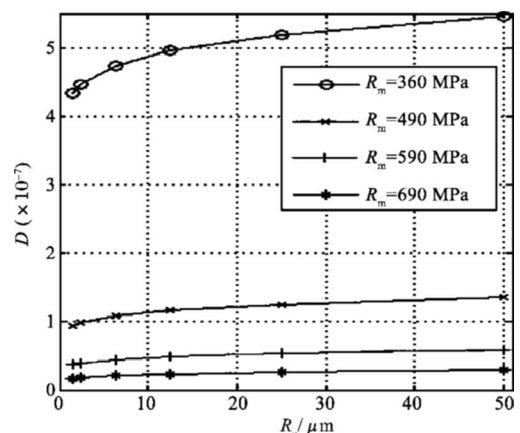


图6 表面粗糙度对构件损伤的影响

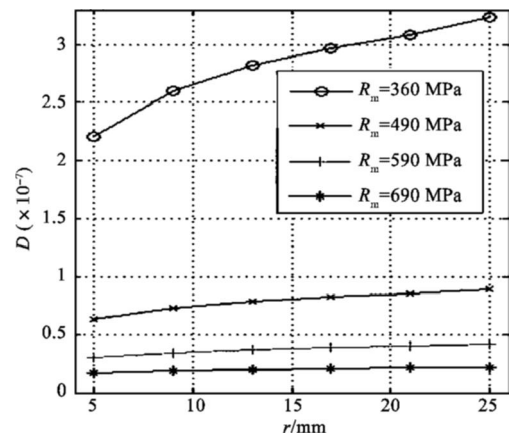


图7 损伤与缺口半径的关系

若构件上存在缺口,则需要考虑应力集中因子。应力集中因子由材料抗拉强度和缺口处应力梯度计算得到。图7为位于缺口处的节点92 689损伤与缺口半径的关系。可见,缺口半径越大,构件的疲劳寿命越长,这与缺口附近应力集中系数随缺口半径增大而下降有关。

2.4 结果对比

将基于FKM标准的疲劳损伤计算结果(焊接节点为中等残余应力情况)与商业软件MSC.Fatigue的计算结果进行对比(图8),可以看出:使用FKM标准计算的焊接件损伤值比用MSC.Fatigue计算出的损伤值大,即FKM标准评价焊件疲劳寿命时比MSC.Fatigue保守,焊接结构中残余应力对疲劳寿命的影响较大(表3)。

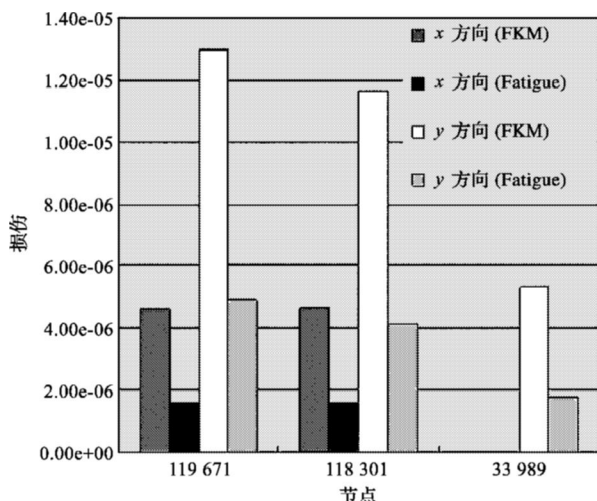


图8 基于FKM标准及运用MSC.Fatigue计算的构件损伤情况

由于节点34 381、33 407和92 689在运用载荷作用下处于无限寿命阶段,所以使用MSC.Fatigue的计算结果为0。为了便于2种评价方法的对比,采用超常动载荷作用下的损伤。图9为超常载荷作用下的损伤情况,从中可以得到以下结论:使用FKM标准计算非焊接结构疲劳损伤时其结果较MSC.Fatigue的计算结果小,即FKM标准评价非焊件疲劳寿命时比MSC.Fatigue开放。由于FKM标准在评价非焊接件疲劳寿命时考虑了表面粗糙度、涂层情况、表面处理、应力集中、载荷情况、温

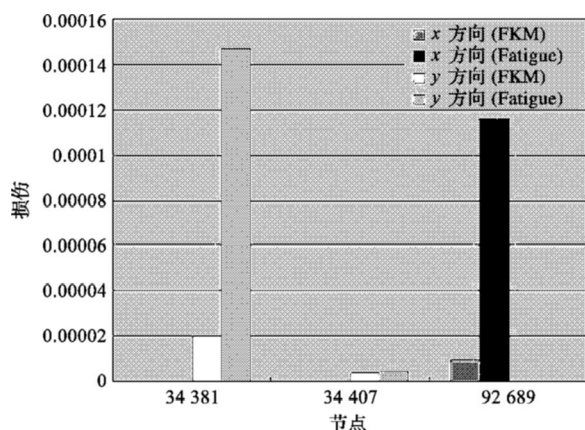


图9 非焊接节点损伤情况(超常载荷)

度等很多因素的影响,其结果与MSC.Fatigue相比更加接近实际情况,这需要试验进一步证明。

3 结语

FKM标准考虑了大多数对构件强度(静态和动态)产生影响的因素(表面状况、残余应力、结构细节等),使用利用度对焊接和非焊接构件的疲劳问题进行评估,对于有限和无限寿命阶段都可以获得相应的数值。

本文基于FKM标准,分别采用利用度和累积损伤对高速货车转向架构架的疲劳寿命进行分析,并将结果进行比较,得到如下结论:

- ①在正弦交变载荷作用下,达到期望循环次数为 10^4 次时的最大利用度为64%,位于节点119 671;
- ②在高残余应力情况下的最大损伤为 2.6×10^{-5} ,位于节点119 671;

③焊接构件的疲劳寿命受到残余应力的影响较大,低残余应力情况下的疲劳寿命是高残余应力的1.6倍(表2);

④非焊接构件的疲劳寿命受到表面质量的影响较大,且与材料抗拉强度有关。低强度材料对表面质量较高强度材料敏感(图6、图7)。

通过将基于FKM标准的结果与软件MSC.Fatigue计算结果进行对比可以看出:使用FKM标准计算所得的焊接结构疲劳损伤比MSC.Fatigue计算结果大;使用FKM标准计算所得的非焊接结构疲劳损伤比用MSC.Fatigue计算的结果小。这是因为FKM标准考虑了大量与疲劳寿命密切相关的影响因素,且使用Haigh图进行平均应力修正,较使用Goodman曲线能更好地消除平均应力的影响,其评价结果将与现实情况更加接近。

综上,为了提高焊接件的疲劳寿命,可以改善表面质量,采取适当的焊接工艺,降低焊接结构中的残余应力;对于非焊接件则可在采取合理的表面处理情况下,适当降低表面粗糙度,并尽可能避免应力集中。

参考文献:

- [1] Erwin Haibach. Analytical Strength Assessment of Components in Mechanical Engineering (5th edition) [S]. Frankfurt:FKM Guideline,2003.
- [2] Hobbacher A. Recommendations for fatigue design of welded joints and components[S]. England:IIW Doc-XIII-1965-03/XV-1127-03, 2003.
- [3] 周传月, 郑红霞, 罗慧强. MSC.Fatigue疲劳分析应用与实例[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [4] 徐 颢. 疲劳强度[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988.
- [5] 拉达伊. 焊接结构疲劳强度[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [6] 格尔内. 焊接结构的疲劳[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [7] 张彦华. 焊接结构设计与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [8] 王元良. 焊接及焊接结构[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1986.