

## 工字形钢吊车梁上部区域疲劳性能与加固研究

李佳 皮少博 李韞鑫

中冶京诚工程技术有限公司, 北京 100176

**[摘要]**在冶金工业厂房中重级制吊车的运行区域, 工字形钢吊车梁腹板与上翼缘连接处经常出现疲劳损伤, 对生产安全带来了极大的威胁, 所以确认钢吊车梁该处发生疲劳损伤的原因并进行加固具有重要意义。本篇文章以某实际项目为例, 建立全尺寸全系统的有限元计算模型, 分析吊车梁腹板与上翼缘连接处出现损伤的原因, 并且确定加固方案后, 对比加固前后以及不同加固方案下的腹板抗疲劳性能, 为吊车梁的抗疲劳设计提供有效的指导。

**[关键词]**冶金工业厂房; 工字形吊车梁; 疲劳损伤; 疲劳加固

DOI: 10.33142/sca.v6i12.10620

中图分类号: TU391

文献标识码: A

### Research on Fatigue Performance and Reinforcement of the Upper Area of I-shaped Steel Crane Beam

LI Jia, PI Shaobo, LI Yunxin

MCC Jingcheng Engineering Technology Co., Ltd., Beijing, 100176, China

**Abstract:** In the operating area of heavy-duty cranes in metallurgical industrial plants, fatigue damage often occurs at the connection between the web plate and upper flange of the I-shaped steel crane beam, posing a great threat to production safety. Therefore, it is of great significance to confirm the cause of fatigue damage in the steel crane beam and carry out reinforcement. This article takes a practical project as an example, establishes a full size and full system finite element calculation model, analyzes the causes of damage at the connection between the web plate and the upper flange of the crane beam, and determines the reinforcement scheme. After comparing the fatigue resistance performance of the web plate before and after reinforcement and under different reinforcement schemes, it provides effective guidance for the fatigue resistance design of the crane beam.

**Keywords:** metallurgical industry plant; I-shaped crane beam; fatigue damage; fatigue reinforcement

#### 引言

在冶金工业厂房中, 工字形钢吊车梁由于其承载性能良好、工作可靠、施工简便, 且易于截面的优化, 在实际项目中得到及其广泛的应用。但是通过对大量冶金工业厂房吊车梁的检测后发现, 80%~90%的吊车梁在承当重级或特重级工作制吊车作用时, 钢吊车梁经常出现不同程度的疲劳破坏, 由于此类问题的普遍性, 且具有突然发生的特性, 使得其对冶金工业厂房的安全威胁很大<sup>[1-2]</sup>。所以针对钢吊车梁颈部出现的疲劳问题, 国内外学者及工程师进行了大量的研究, 基本上形成了共识: 认为造成腹板与上翼缘出现疲劳损伤的原因是, 频繁循环作用的轮压动荷载、超额的卡轨力、吊车轨道的偏心、轮压作用处腹板产生的集中挤压应力及吊车梁的焊接与钢板的初始构造缺陷等, 其中轨道偏心引起的梁颈部焊缝区附加扭转印象最为严重<sup>[3-5]</sup>。

国内标准《钢结构设计标准》中, 只是对腹板与下翼缘连接处, 对应不同的连接方式, 规定了正应力幅和剪应力幅的限值。对腹板与上翼缘连接处、横向加劲肋与是上翼缘处的疲劳计算并未做出规定, 需要做出进一步的研究分析<sup>[6]</sup>。本文在以前对吊车梁上部区域疲劳研究的基础上, 以出现疲劳损伤的某个实际项目为例, 建立有限元模型计算并分析, 确定重级制吊车腹板出现疲劳损伤的具体原因;

以及根据以前项目可靠的加固方案为指导, 确定本次腹板的加固方案, 并建模分析不同的加固方案的对吊车梁腹板抗疲劳性能的效果。

#### 1 有限元模型

120t 转炉在国内转炉炼钢项目中非常普遍, 该炉型主厂房通常采用 24m 柱距, 吊车梁全部采用焊接工字形的截面形式, 各跨中加料跨和精炼跨负责转运铁水至转炉或精炼炉, 是炼钢车间吊车吊重最大、运行频率最高的区域。针对这一特点, 本文的研究对象选用国内某钢铁有限公司 120t 转炉炼钢主厂房精炼跨 24m 跨度吊车梁: 该项目投产至今已有 15 年, 加料跨设有 2 台 200/75t 的 A7 级别的桥式起重机, 轨道类型采用 QU120, 最大轮压为 570kN, 每侧轮子个数为 8 个, 宽度为 16300mm, 轮压分布为:

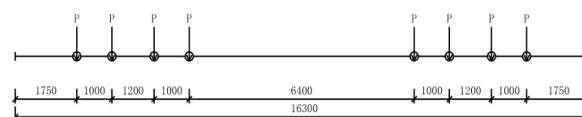


图 1 吊车 1 几何尺寸示意图 (mm)

根据现场实测发现, 在精炼跨吊车的两个轴线 C 轴和 D 轴之中的 13~14 线、7~9 线的吊车梁, 跨度为 24m, 吊车梁上翼缘与加劲肋、吊车梁上翼缘与腹板连接处出现

了不同长度的裂纹，最大的裂缝长度长达 1200mm:



图 2 13-14 线/C 轴吊车梁上翼缘与加劲肋连接焊缝开裂

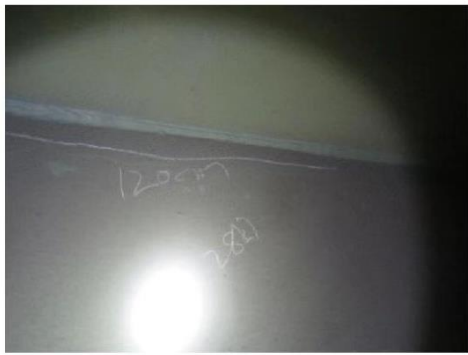


图 3 13-14 线/C 轴吊车梁上翼缘与腹板连接焊缝开裂，长度为 1200mm



图 4 8-9 线/D 轴吊车梁上翼缘与腹板、加劲肋连接焊缝开裂，长度 520mm



图 5 3-4 线/D 轴吊车梁上翼缘与腹板、加劲肋连接焊缝开裂，延伸至腹板母材

对加料跨 24m 跨度吊车梁采用 ANSYS 软件进行有限元分析，钢材的各项实常数：弹性模量为 206GPa，泊松比为 0.3，密度为  $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，吊车梁、辅助桁架和制动板都采用 Solid185 实体单元；为了更准确地模拟吊车梁应力部分情况，对照施工图的节点确定吊车梁与辅助桁架的支座类型：与对吊车梁左右支座处一端限制 Z 向（沿吊车梁长度方向）和 Y 向（竖直方向）的位移，另外一端只限制 Y 向位移；辅助桁架上下弦都限制 Y 向和 Z 向的位移；制动板处限制其 X 向（吊车梁的宽度方向）和 Z 向的位移。按照 50mm 的精度来划分网格。

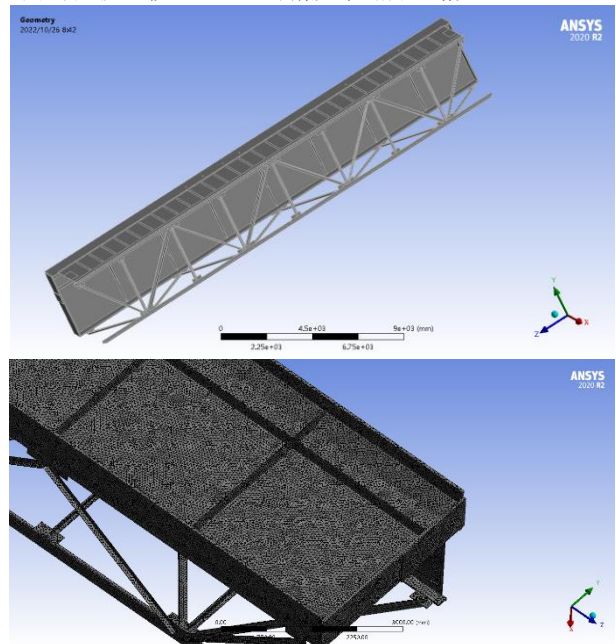


图 6 24m 跨度吊车梁系统有限元模型

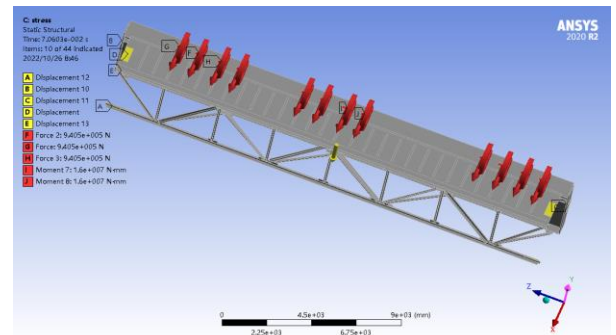


图 7 24m 跨度吊车梁系统有限元模型约束条件

建模过程中，考虑到实际中轨道与吊车梁上翼缘是采用压轨器连接，无法准确模拟这种连接形式；同时为了简化模型和计算，将轨道轮压转化为成为作用于上翼缘表面的均布荷载，宽度为轨道的宽度，长度按照《钢结构设计标准》取值  $l_z = a + 2h_R$ ， $a$  为集中荷载沿梁跨度方向的支撑长度，对钢轨上的轮压可取 50mm， $h_R$  为轨道的高度；作用在轨道上顶面的水平制动力，通过增加上翼缘的扭矩来体现，大小按照《钢结构设计手册》关于重级工作制吊车

梁腹板上边缘处抗扭强度的补充验算公式确定： $T=T_1+h_R$ ， $T_1$ 为吊车摇摆横向力设计值， $h_R$ 为吊车轨道高度；轨道偏心通过调整竖向荷载在翼缘宽度上的定位来实现。

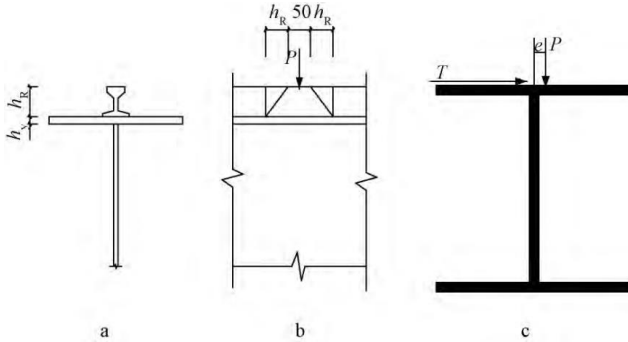


图8 荷载作用下的吊车梁传力路线

## 2 应力状态分析

根据移动荷载最不利内力确定原则，确定吊车梁出现最大弯矩时的两台吊车最不利的分布情况。在两台吊车最不利的轮压布置下，可以计算出吊车梁上下翼缘的最大正应力值，以及x方向和y方向上的变形：

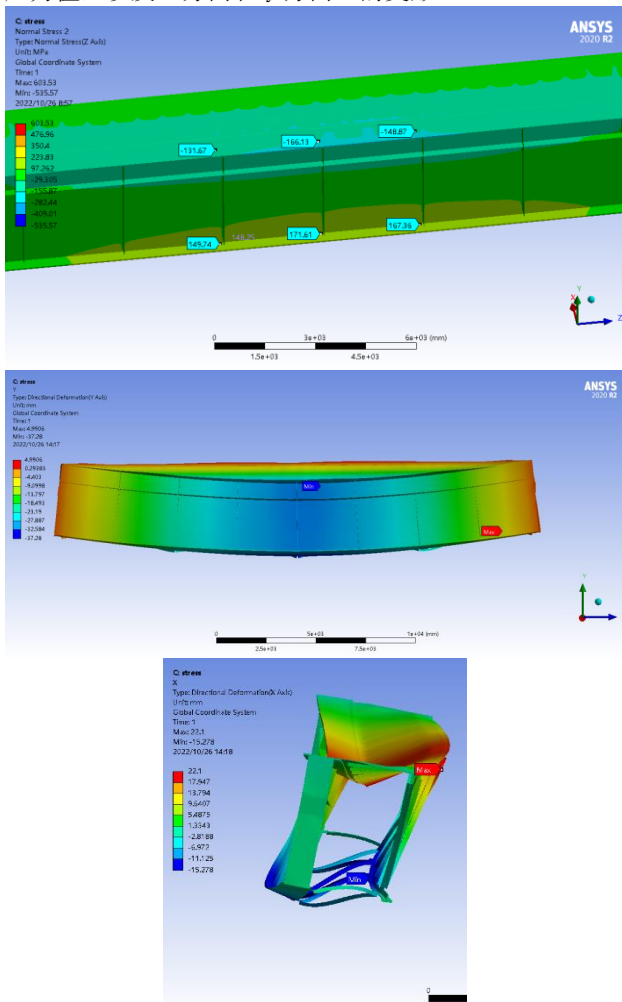


图9 两台吊车最不利轮压分布下的正应力分布及变形图

从变形图可以看出，整个吊车梁系统两个方向的变形是符合实际情况的，分析得到的应力值也与PKPM模型中吊车梁计算模块计算得到的数值比较接近，说明了通过建立加料跨24m跨度吊车梁、辅助桁架、制动板的整个系统的有限元计算模型，进行分析计算的结果是可靠的。通过结果可以看出，在两台吊车最不利的轮压布置下，吊车梁上下翼缘的正应力并没有超过容许应力值。并且腹板处的应力水平处于比较低的水平，远低于钢材的抗剪切强度和抗拉抗压强度，这足以说明造成吊车梁出现焊缝开裂不是由于强度不够，而是由于吊车往复运行作用的动荷载产生的疲劳损伤；

根据调查所知，吊车轨道由于初期安装时的误差，以及后期吊车运行时卡规力反复作用、压轨器出现松动等不利因素的影响，轨道偏心最大达到50mm。为了判断在轨道偏心50mm的极端情况下，吊车梁上下翼缘正应力的变化情况，发现与《钢结构设计手册》中重级工作制吊车梁腹板上边缘处抗扭强度的补充验算公式相比，应力稍有增大，但变化值有限。分析原因是《钢结构设计手册中》将吊车梁作为一个独立的受弯构件，没有将整个制动系统准确地考虑进去；但是本次有限元模拟中，为了分析制动板、辅助桁架以及下弦支撑的整体作用，建立了整体的吊车梁系统的模型，通过应力结果可知，由于整个吊车梁系统中的制动结构的存在，比单个吊车梁的抗扭刚度增大许多，所以最后出现了整体上正应力变化不大的结果。

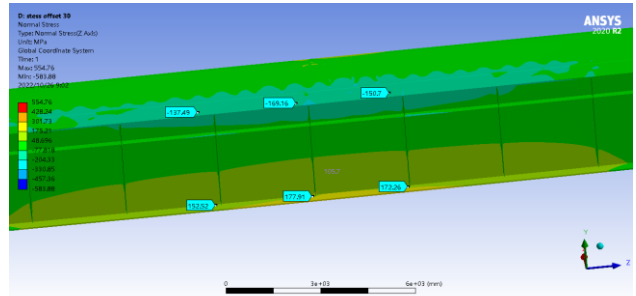


图10 两台吊车最不利轮压分布下，偏心50mm的正应力分布

## 3 疲劳性能分析

根据国内外学者和相关从业人员的研究，一致认为在冶金工业厂房中，重级制吊车频繁循环工作、超额的卡轨力、轨道偏心、应力集中及梁的焊接与构造缺陷是造成焊接型工字型吊车梁颈部疲劳损伤的主要原因，其中轨道偏心造成的不利影响是最大的。

对于钢吊车梁颈部的疲劳性能分析，根据国内外学者的研究，通常认为腹板处剪应力的变化是造成疲劳损伤的最大原因。为此将该处复杂的剪应力分解成三部分：吊车轮压作用下对应处吊车梁腹板的局部挤压应力、吊车水平制动力形成的弯曲应力、由于吊车轨道偏心形成的扭转应力，分别对应之前提到的竖向轮压值和轮压分布长度、最大轮压分布、横向水平制动力和轨道偏心等因素。所以这

三种剪应力都会根据吊车的运行规律呈周期性变化规律,后两者的数值与正应力的大小成正比关系;同时根据国外规范及相关文献的介绍,当最大轮压作用在加劲肋附近  $1.3Z_w$  (局部挤压应力在腹板上的分布长度为  $2.6Z_w$ ) 时,吊车梁腹板所受的平面内剪应力是最大的。

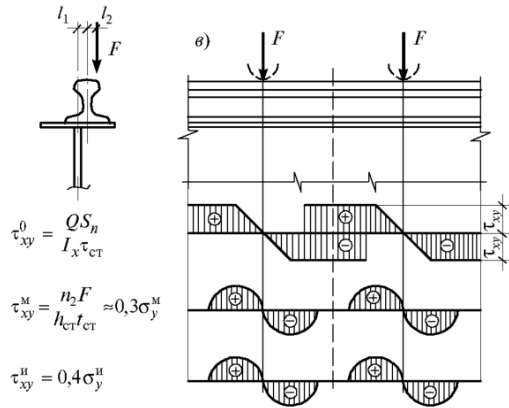


图 11 吊车梁腹板剪切应力构成和变化规律

根据这一研究理论,以及德国规范中的允许应力法评定颈部是否出现疲劳损伤的规定(按连接处焊缝或铆钉、螺栓连接形式的不同、应力集中程度及应力幅循环次数等评定其疲劳强度):本文中结合有限元分析,确定此种允许应力法在工程设计中的可行性,进一步对吊车梁进行疲劳性能分析。根据《钢结构设计标准》规定,计算疲劳应力时,应按一台吊车的最大不利轮压分布进行计算;将单台吊车的最大轮压按照离加劲肋  $1.3Z_w$  进行分布,分别考虑无偏心和  $50\text{mm}$  偏心距离的情况,查看腹板平面内的剪应力分布:

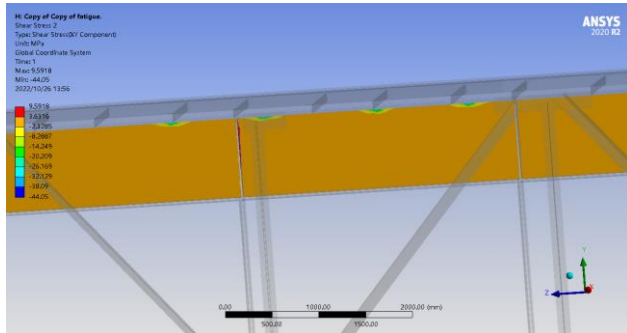


图 12 无轨道偏心时腹板剪应力分布图

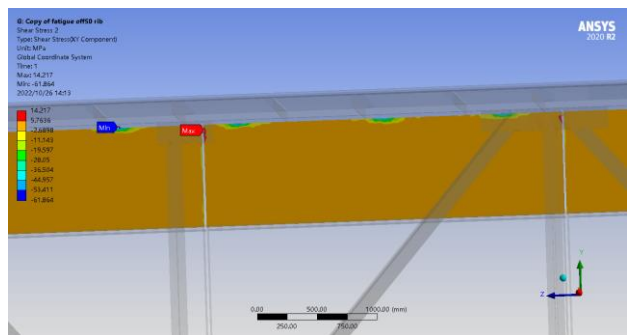


图 13 轨道偏心 50mm 时腹板剪应力分布图

通过两种工况下的有限元计算结果对比可以发现,腹板处最大的剪应力由  $44\text{N/mm}^2$  提高到了  $61\text{N/mm}^2$ ,说明在腹板在偏心轮压的作用下,除了有局部挤压应力带来的腹板剪应力以外,偏心带来的额外附加剪应力占比也很大。同时,根据德国规范《起重机走道钢结构计算、设计与制造原则》及《起重机钢结构验证和分析》针对钢吊车梁上翼缘与腹板连接处在轮压下的复杂应力状态,给出了实腹式吊车梁上翼缘与腹板连接处强度评定的允许应力法,计算轨道偏心值为  $50\text{mm}$  的工况下,腹板的剪应力水平很接近腹板疲劳损伤的剪应力容许值。在部分吊车梁中有钢板内有初始缺陷的地方,极易发生裂纹,并向水平方向发展。

这就说明焊接型吊车梁腹板处的剪应力的应力幅值,是造成颈部出现疲劳损伤的重要原因。面对国内规范的这一空白,可以在设计过程中,参照德国规范的允许应力值进行吊车梁颈部的疲劳性能分析。

#### 4 加固措施分析

为了针对冶金工业厂房中经常出现因轨道偏心问题带来的吊车梁腹板疲劳损伤问题,加强其“颈部”的抗扭性能,国内外做了很多方面的研究:国内某船厂曾采用了跨度  $24\text{m}$ ,吊车为起重量  $75/20\text{t}$  中级制吊车的受压区加强的 Y 型梁,也有通过横加劲两侧增加 T 型加劲、Y 型加劲、腹板上部局部加厚、横加劲之间设置通长纵向加劲等方式,来对吊车梁“颈部”进行加强;国外苏联在吊车梁设计资料中分别介绍了几种加固方式,其中包括采用 Y 型加劲板加固设计。

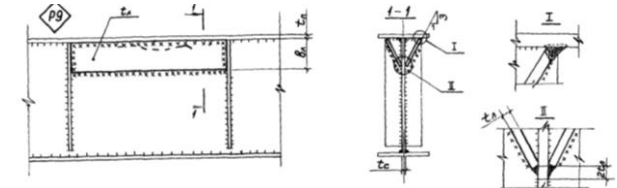
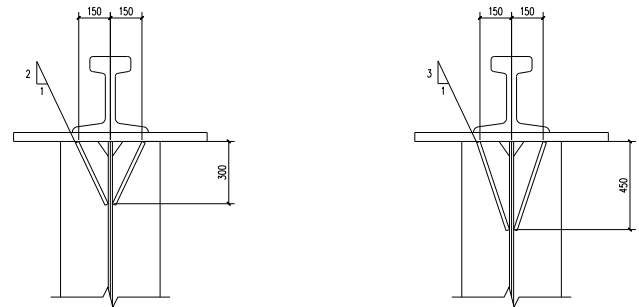


图 14 苏联吊车梁设计手册“颈部”加强做法示意图

为了对比研究 Y 型加劲的角度对吊车梁颈部抗疲劳性能的影响,分别建立了角度为  $1:2$  和  $1:3$  的 Y 型加劲肋模型(Y 型加劲肋在相邻横向加劲肋之间通长,侧面与横向加劲肋焊接),上顶面宽度需考虑偏心值以及施工难度,尺寸如下:



(a)  $1:2$  角度 Y 型加劲肋 (b)  $1:3$  角度 Y 型加劲肋

图 15 两种角度的 Y 型加劲肋加固做法示意图

同样的采用之前进行疲劳分析的最不利轮压分布,可以看出采用 1:2 角度的 Y 型加劲板加固之后,最大剪应力降低至  $53\text{N}/\text{mm}^2$ ,采用 1:3 角度的 Y 型加劲板加固之后,最大剪应力降低至  $51\text{N}/\text{mm}^2$ 。通过这一数据可以看出,采用 Y 型板之后,能有效降低由于轨道偏心造成的额外剪应力,从而提高腹板与上翼缘连接处的疲劳性能;同时,在保证 Y 型加劲肋上表面的宽度之后,不同的 Y 型加劲角度对疲劳性能的影响不大。

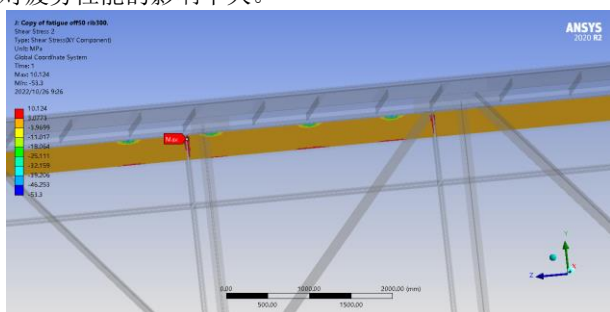


图 16 1:2 角度 Y 型加劲肋腹板剪应力分布图

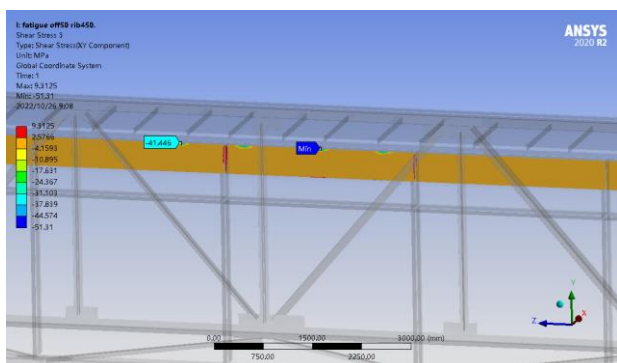


图 17 1:3 角度 Y 型加劲肋腹板剪应力分布图

## 5 结束语

本文通过对冶金工业厂房吊车梁损伤情况的调研分析,总结了吊车梁腹板与上翼缘连接处出现疲劳损伤的原因,并且以某转炉炼钢车间 24m 跨度吊车梁(腹板与上翼缘连接处出现开裂)作为研究对象,建立全跨度、全系统的吊车梁系统有限元模型,分别进行了两台吊车最不利轮压分布下的强度计算和一台吊车最不利轮压分布下的疲劳计算,验证吊车梁颈部出现疲劳损伤的主要原因,并提出一种结合国外规范进行颈部疲劳性能分析的方法;同时

根据国内外对腹板加固的实践和方案研究,制定了两种角度 Y 型加劲肋的加固方案,并对这两种方案进行了建模分析。可以看出:

根据建模计算分析结果,虽然许多研究中提及需要额外考虑吊车水平制动力以及轨道偏心产生的扭矩,但是模型计算可知该扭矩对上下翼缘的正应力影响并不大。计算分析最大轮压作用下的剪应力,并对比德国规范的腹板允许应力法,验证了上翼缘焊缝及其附近腹板中产生的各种剪应力循环作用产生的最大剪应力幅,是导致其出现疲劳损伤的主要原因;

吊车梁腹板中剪应力由局部挤压剪应力、水平制动力扭矩产生的剪应力和轨道偏心产生的弯曲剪应力组成,但是对于轮压较大的重级制吊车而言,由局部挤压形成的剪应力占比较大,在吊车运行过程中,其循环变号是造成腹板与上翼缘出现疲劳损伤的主要原因;

结合文献中提到的腹板加固形式,以及实际加固项目中的措施,采用 Y 型加劲肋对腹板进行加固,对颈部的抗疲劳性能提升是非常有效的。分析可知,在腹板处增加 Y 型加劲肋,对提高颈部处的抗扭刚度,减小水平制动力扭矩产生的剪应力以及轨道偏心产生的弯曲剪应力非常有效,但是在保证横向加劲肋上部宽度大于轨道偏心的范围后,横向加劲肋的角度对腹板顶部的剪应力影响就不大了。

## [参考文献]

- [1] 幸坤涛. 在役钢结构吊车梁疲劳可靠性与安全控制研究[D]. 大连:大连理工大学,2014.
  - [2] 卢晖麓. 首钢均热炉车间钢吊车梁使用调查分析[J]. 钢结构,1992(2):38-49.
  - [3] 林醒山. 钢吊车梁上部区域疲劳破坏机理分析及试验研究[J]. 南京工学院学报,1983(4):105-115.
  - [4] 马永欣. 钢吊车梁的开裂原因分析与设计探讨[J]. 西安建筑科技大学学报,1997(5):12.
  - [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准:GB50017-2017[S]. 北京:中国计划出版社,2017.
- 作者简介:李佳(1981.5—),女,毕业于哈尔滨工业大学结构工程专业。工作单位中冶京诚工程技术有限公司。高级工程师。