

⑥

起重机 钢结构 梁 支座 疲劳性能

第16卷 第3期
1994年9月

重庆建筑工程学院学报
J. Chongqing Inst. of Archit & Engin.

Vol. 16 No. 3
Sept. 1994

3p-48

钢吊车梁直角式突变支座 疲劳性能试验研究

卢铁鹰 赵清[✓] 卢平
(建筑工程学院)

TH 2103

摘要 通过对钢吊车梁直角式突变支座双向荷载的静力和疲劳试验,研究了突变支座各板件的应力状态;讨论了荷载循环次数对突变点附近腹板应力的影响;对这种吊车梁的疲劳破坏特征也作了较详细的描述,提出了设计施工中应当采取的技术措施。

关键词 钢吊车梁, 直角式突变支座, 疲劳试验

中图分类号 TU317.3

由于工艺和构造要求,吊车梁在靠近支座处常作成变截面形式。直角式突变支座就是近年来才在国内设计中采用的一种变截面形式。这种变截面梁,制造方便,适于自动焊接。但截面突变处,势必存在严重的局部高峰应力,其疲劳性能到底怎样?经有关科技成果查新中心对全国报刊索引及国际联机终端的检索,至今尚未见到有关这种形式的吊车梁疲劳性能的研究报导。在我国钢结构设计规范中也找不到与之相适应的疲劳计算的构件和连接分类。只有通过符合吊车梁实际受力情况的试验研究,才能得出正确的结论。

1 静力试验

静力试验分为实验室缩尺试验和现场实测两部分。

1.1 实验室缩尺试验

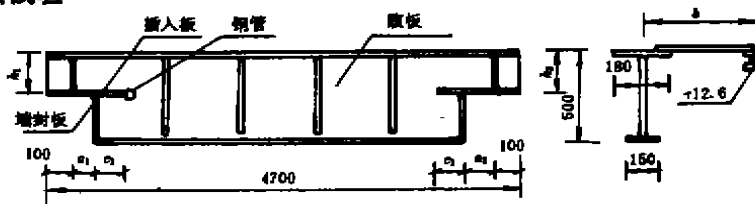


图1 缩尺试验试件简图

实验室缩尺试验的试件是根据起重量为100/20t的重级工作制吊车梁,并按1:5.3进行缩尺设计,试件数为7件。

* 收稿日期:1993-12-11

卢铁鹰,男,1938年生,教授,重庆建筑大学建筑工程学院(630045)。

为了摸清吊车梁突变支座的实际工作状况,探索支座各板件尺寸变化对变截面处局部高峰应力的影响,每根试验梁分别采用两种支座尺寸,故 7 根试验梁共 14 个支座尺寸。各试验梁的几何参数详见图 1 和表 1。

为了比较插入板端部圆管对钢吊车梁直角式突变支座工作性能的影响,每根试验梁的插入板一端设有直径为 30 mm 的钢管,而另一端插入板则未设有钢管。

表 1 缩尺试验试件尺寸表

编号	h(mm)		a(mm)		h(mm)		c(mm)	
	h ₁	h ₂	a ₁	a ₂	h ₁	h ₂	c ₁	c ₂
SL-1	h ₁	240	a ₁	100	400	c ₁	60	
	h ₂	240	a ₂	120		c ₂	60	
SL-2	h ₁	240	a ₁	150	350	c ₁	60	
	h ₂	300	a ₂	250		c ₂	60	
SL-3	h ₁	300	a ₁	100	300	c ₁	60	
	h ₂	300	a ₂	170		c ₂	60	
SL-4	h ₁	300	a ₁	240	400	c ₁	60	
	h ₂	300	a ₂	100		c ₂	60	
SL-5	h ₁	360	a ₁	360	350	c ₁	60	
	h ₂	360	a ₂	270		c ₂	60	
SL-6	h ₁	360	a ₁	100	300	c ₁	60	
	h ₂	360	a ₂	180		c ₂	160	
SL-7	h ₁	360	a ₁	360	350	c ₁	180	
	h ₂	360	a ₂	270		c ₂	150	

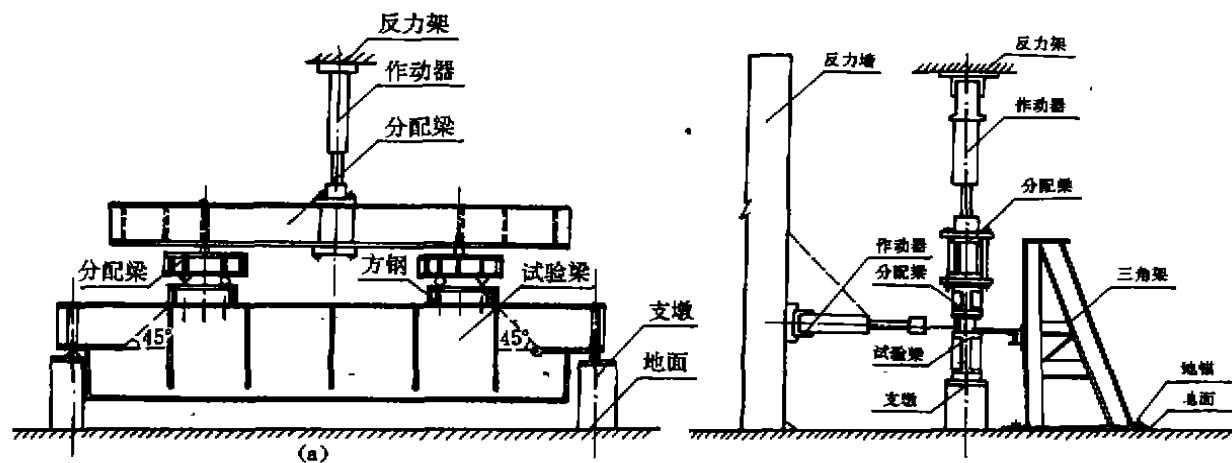


图 2 试验装置图

吊车梁变截面处插入板与端封板的连接,除 SL-7 的一端为对接焊缝以外,其余均为角焊缝连接。SL-6 和 SL-7 的一端,在端封板与插入板连接处,除采用角焊缝外,还增设了 L75×6 的短角钢,以加强此处的连接。

受试吊车梁钢材为 Q235C,制动梁为 Q235B·F,焊条为 E4315,全部焊缝均采用手工焊

接。

为了更好地模拟吊车梁的实际受力情况,采用了双向加载方案,即在各试验梁的加载点上同时施加竖向和水平荷载。竖向荷载模拟吊车的垂直轮压,水平荷载模拟与吊车垂直轮压相应的横向水平力(图2)。试验荷载由美国MTS公司制造的电液伺服结构试验系统施加。

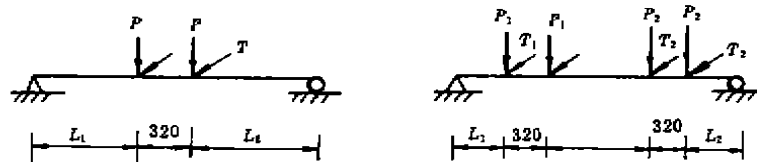


图3 各梁荷载作用位置图

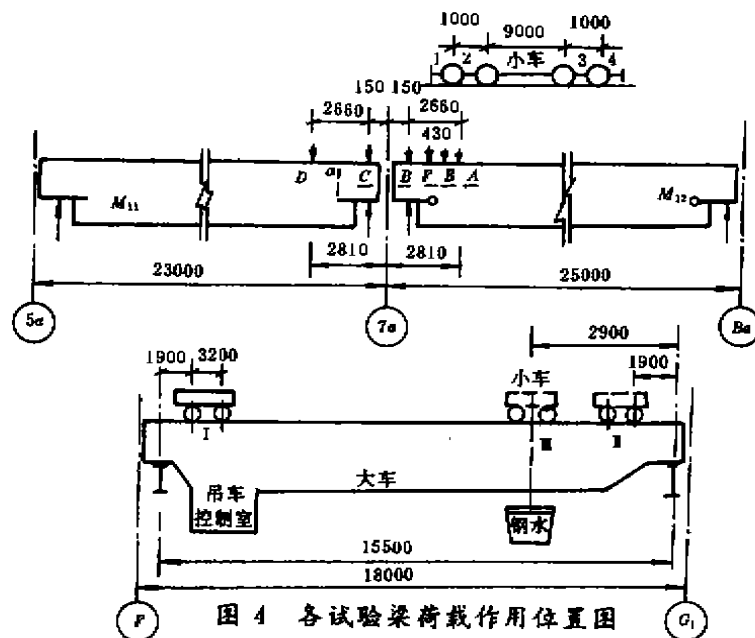


图4 各试验梁荷载作用位置图

表2 各试验梁荷载作用位置

位置	SL-1	SL-2	SL-3	SL-4	SL-5	SL-6	SL-7
L1(mm)	100	500	2060	2090	710	480	900
L2(mm)	120	620	2120	2090	630	540	750

除SL-3及SL-4号梁为跨中两点加载外,其余各梁均为四点加载。其中SL-1号梁上距支座最近的一个荷载作用点位于端封板的竖直面内。SL-2,SL-3,SL-6及SL-7号梁上距支座最近的一个荷载作用点,位于以插入板端点所作45°线与上翼缘的交点上。各试验梁上荷载作用位置如图3及表2所示。

1.2 现场实测

为了进一步了解钢吊车梁突变点附近的实际应力状态,对成都无缝钢管厂圆坯连铸车间主厂房钢水接受跨的钢吊车梁在实际工况荷载作用下的应力状态进行了测试。

该厂房为全钢结构,钢水接受跨内设有两台 125/30 t 吊车。此次实测时仅安装了一台吊车。受试的两个吊车梁, M_{11} 梁的跨度为 23 m; M_{12} 梁的跨度为 25 m。 M_{11} 及 M_{12} 吊车梁均为焊接工字形截面,其中部高度为 3200 mm,端部高度为 1700 mm,梁腹板厚度为 20 mm。翼缘板厚度为 32 mm,支座加劲肋至直角突变点的距离为 460 mm。插入板的插入长度为 533 mm,其厚度为 32 mm。端封板与插入板连接处增设了短角钢。 M_{12} 梁的两端插入板的端部设有圆钢管。

根据现场实际情况,由于厂方难于筹集到测试所需的荷载,故只能利用行车的小车,空钢水包以及盛满钢水的钢包作为吊车梁上的荷载。整个加载方案包括四种工况,三种小车位置和四种加载轮位(图 4)。四种工况为:吊车为空载时,吊车吊空钢包时;小车紧急刹车时;吊车吊有钢水时。三种小车位置为:小车位于距受试梁最远距离处(即小车位于使受试梁产生最小轮压的位置);小车位于距受试梁最近距离处(即小车位于使受试梁产生最大轮压的位置);吊车在吊有钢水的实际工况作用下,小车位于距受试梁的特定距离处。四种加载轮位为:a)以插入板端向上作 $\alpha=45^\circ$ 线,该线与上翼缘的交点,即为四个吊车轮中距支座最近的一个加载轮位,如图 4 所示的 A 点(M_{12} 梁)及 D 点(M_{11} 梁)。其余轮位依次向跨中排列;b)以梁支座加劲肋作为距支座最近的一个加载轮位,即图 4 中的 B 点(M_{12} 梁)及 C 点(M_{11} 梁);c)自突变点向上作 $\alpha=45^\circ$ 线,该线与上翼缘交点即为距支座最近的一个加载轮位,即 F 点(M_{12} 梁);d)吊车置于 M_{11} 及 M_{12} 梁上,最外轮(4 号轮)位于 E 点上,E 点与 A 点相距 430 mm。

2 吊车梁突变点附近板件的应力分析

2.1 吊车梁突变点附近板件的应力状态

为了探索吊车梁突变点附近板件(腹板,插入板及端封板)的应力状态,重点对缩尺梁 SL-1,SL-2 及足尺梁 M_{11} , M_{12} 进行了应力测试。

2.1.1 突变点腹板的应力状态

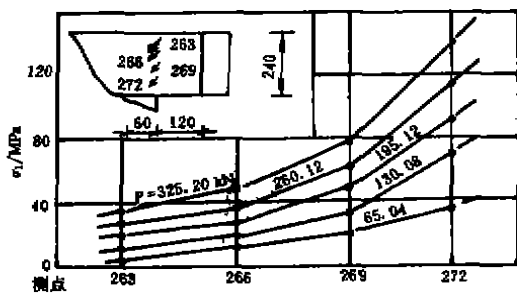
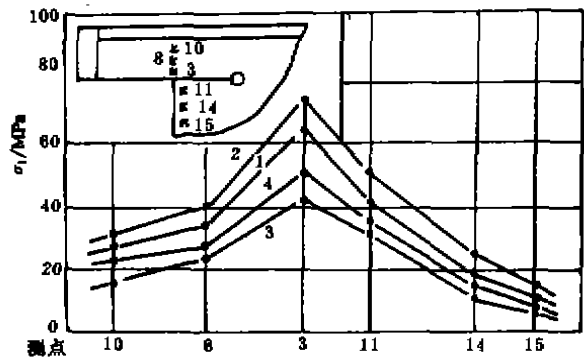


图 5 SL-1 梁腹板竖向截面各测点主应力图



1. 吊车 A 点空载作用,小车停置在 I 区
2. 吊车 A 点吊空钢包,小车停置在 I 区
3. 吊车 B 点空载作用,小车停置在 I 区
4. 吊车 B 点吊空钢包,小车停置在 I 区

图 6 M_{12} 梁腹板竖向截面各测点主应力图

由图5,图6可见,正对突变点及插入板端部附近腹板的竖向截面上,均出现局部高峰应力,偏离此点应力则急剧下降,说明应力梯度大。

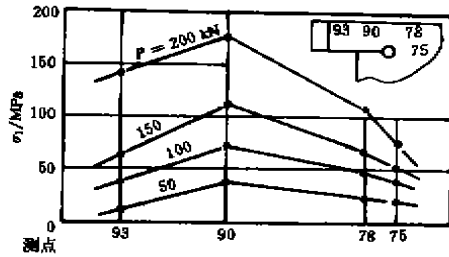
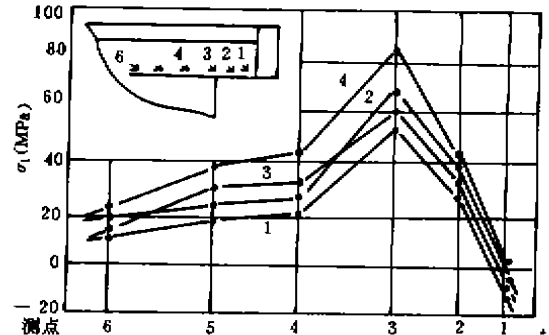


图7 SL-3梁腹板水平截面各测点主应力图



1. 吊车C点空载作用,小车停置在I区
 2. 吊车C点吊空钢包,小车停置在I区
 3. 吊车D点空载作用,小车停置在I区
 4. 吊车D点吊空钢包,小车停置在I区

图8 M₁₁梁腹板水平截面各测点主应力图

由图7与图8可知,在靠近插入板的腹板水平截面上,局部高峰应力发生在突变点附近的腹板上。虽然由图9发现插入板端部腹板沿竖向截面存在着高峰应力,但与突变点附近腹板的高峰应力相比仍然较小。当插入板的插入长度超过某一值时,插入板附近腹板应力已趋于某一定值。

经过缩尺试验和实际吊车梁的现场实测发现,突变点处腹板高峰应力的量值大小主要与突变点附近板件刚度比和吊车梁端部高度与支座加劲肋至突变点距离的比值有关。对于钢吊车梁直角式突变支座突变点的应力集中系数为:当以突变点偏向支座一侧的截面按材料力学计算的应力作为基本应力时,突变点的应力集中系数为1.5~7。

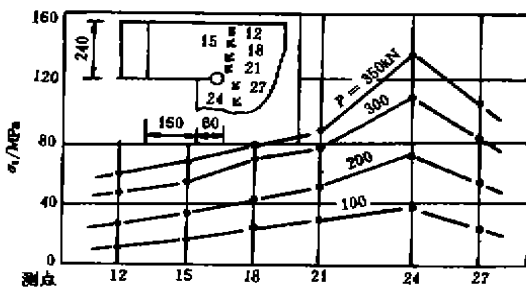


图9 SL-2梁腹板竖向截面各测点主应力图

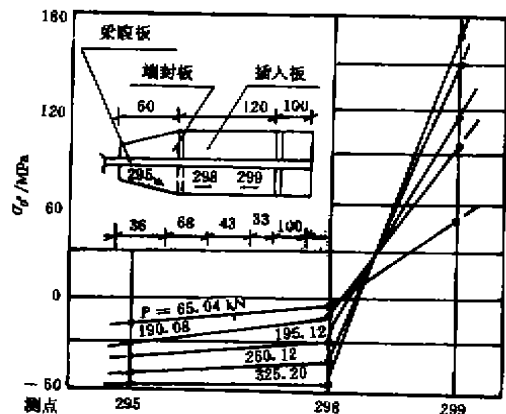


图10 SL-1梁插入板各测点纵向应力分布图

2.1.2 插入板的应力状态

插入板上的纵向应力分布极不均匀。应力分布状态与板间之间的刚度比、变载面处的外形尺寸以及支座约束程度等因素有关。插入板作为梁端部下翼缘部分,各点应力的量值由梁

横向弯曲产生的弯曲拉应力和由于支座对梁的纵向约束而产生的纵向压应力决定。当纵向压应力大于梁横向弯曲而产生的拉应力时,此部分将出现压应力。

插入板在插入腹板部分的应力均较小(图 10)。同时,足尺梁的测试结果也表明,插入板插入部分在相邻腹板上的应力随插入深度下降很快(图 8)。

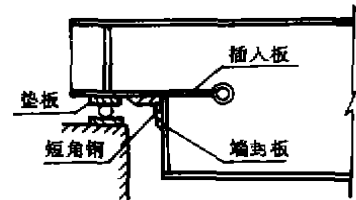
从 SL-5 和 SL-7 的测试结果发现,这两根梁的外形尺寸及板件厚度完全相同,仅插入板的插入腹板长度 C 不同。对于 SL-5, $C_1=60$ mm; 而 SL-7 的 $C_1=180$ mm。当梁上外加总荷载 $P=200$ kN 时, SL-5 的插入板插入端腹板实测主拉应力 $\sigma_1=144$ N/mm², 剪应力 $\tau=57.3$ N/mm²; 而 SL-7 在相同部位的主拉应力 $\sigma_1=124$ N/mm², 剪应力 $\tau=67.7$ N/mm²。两者的插入板长度比为 3:1, 而主拉应力比为 1:1.6, 剪应力比为 1.18:1。由此可知, 插入板插入腹板长度过长是没有多大意义的。插入板插入腹板长度可由插入板与腹板连接所需焊缝长度决定。此连接焊缝可按等强连接进行计算。

2.2 插入板端圆管对板端应力的影响

前面已经提到, 插入板端部附近腹板存在高峰应力, 设计上常将插入板端部与穿过腹板的圆管焊接, 企图以此措施来减小插入板端的高峰应力。现用 SL-3 和 SL-4 梁的应力状况来研究插入板端圆管对板端应力的影响。由表 1 知, 两梁的 $h_1=h_2=300$ mm。SL-3 的 a_1 端插入板端部设有圆管, 而 SL-4 的 a_2 端插入板端部未设圆管。测试结果表明, 当梁上外加总荷载 $P=200$ kN 时, 圆管附近腹板实测主应力 $\sigma_1=170.7$ N/mm², 剪应力 $\tau=90.9$ N/mm²; 无圆管的插入板端部的腹板主应力 $\sigma_1=118.6$ N/mm², 剪应力 $\tau=45.1$ N/mm²。显然, 在梁的各种尺寸均相同的情况下, 无圆管的插入板端部的腹板主应力及剪应力均较有圆管者为小, 两者相差 44%(主应力)及 101%(剪应力)。两者的差异主要是圆管与腹板焊接, 由于焊缝收缩而在腹板上残存有焊接应力的结果。因此, 从受力角度讲, 在插入板端焊接圆管并不能降低插入板端部的高峰应力。同时, 插入板端的高峰应力也不是吊车梁疲劳计算的控制应力, 而最大高峰应力应在突变点腹板处。因此, 不论从受力角度, 经济角度, 还是从简化制作工序角度讲, 在插入板端部设置圆管都是不必要的。

2.3 在突变点加焊角钢对高峰应力的影响

为了降低突变点附近腹板的高峰应力, 部分试验梁在插入板与端封板连接的阴角处加焊了与梁宽相同的短角钢(图 11)。经测试表明, 这一措施可降低突变点的高峰应力, 是一种值得推广运用的作法。



这种吊车梁的有限元分析结果也证明, 在梁腹板厚度一定的情况下, 增加插入板和端封板的厚度可降低突变点的高峰应力。在吊车梁直角式突变支座的阴角处加焊短角钢后, 相当于在突变点附近增加了插入板和端封板的厚度, 故可降低突变点的高峰应力。

在直角突变点的阴角处加焊短角钢, 除可降低突变点的高峰应力外, 还可增加插入板与端封板连接处的刚度; 改善了插入板与端封板连接焊缝的受力状态, 故可提高吊车梁直角式突变支座的疲劳强度。

3 疲劳试验

3.1 试验方案

疲劳试验是在各缩尺试件静力试验的基础上,按照静力试验的加载位置进行荷载循环。根据各试验梁在静力试验时实测突变点附近腹板的最大应力,参照钢结构设计规范(GBJ17-88)关于疲劳计算的构件与连接分类,试验控制应力幅 $\Delta\sigma_1 = \sigma_{1max} - \sigma_{1min}$ 按 2~5 类取值。 $\sigma_1 = \sigma_{1max}$ 为静力试验实测最大主应力, σ_{1min} 为作动器预压 3×10^4 N 至 5×10^4 N 时,在最大主应力测点上实测的主应力值。各受试梁的控制应力幅详见表 3。由于静力试验时系采用一个作动器经分配梁按两点或四点将荷载加至受试梁上,并在施加预压荷载后,重新调零。故各受试梁疲劳试验的竖向最大总荷载就等于与试验控制应力幅相应的作动器的出力。水平最大总荷载按总竖向最大总荷载的 1/30 取值。竖向荷载采用半正弦波加载,加载频率为 4~6 Hz;水平荷载按完全对称循环的正弦波加载,加载频率为 2~3 Hz。

表 3 各荷载梁的控制应力幅 (N/mm²)

SL-1	SL-2	SL-3	SL-4	SL-5	SL-6	SL-7
110.0	124.0	166.1	144.9	146.6	90.6	165.8

3.2 荷载循环次数对突变点附近腹板应力的影响

为了分析荷载循环次数对突变点附近腹板应力的影响,在疲劳试验中荷载每循环 20 万次,在保持最大荷载不变的情况下,实测了突变点附近腹板各测点的应力变化。

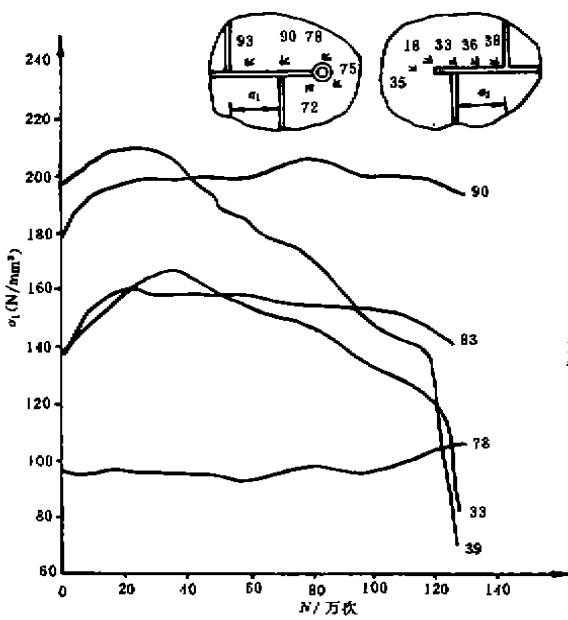


图 12 SL-3 梁控制应力与循环次数关系曲线

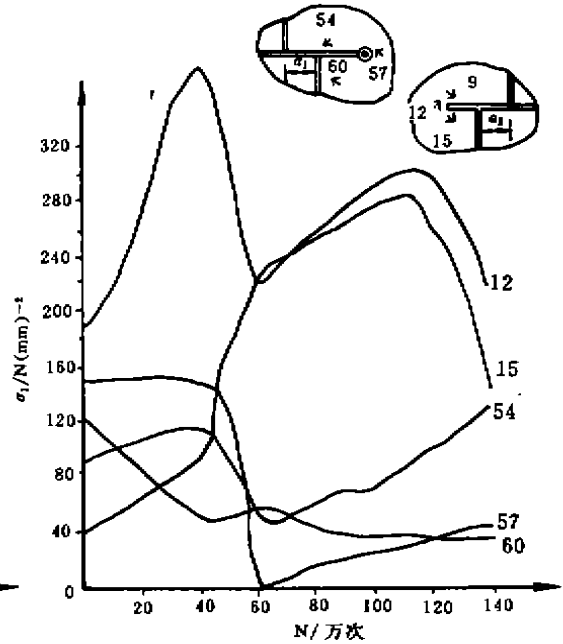


图 13 SL-5 梁控制应力与循环次数关系曲线

图 12 为 SL-3 梁在试验时所选定的循环荷载作用下梁左端各测点的主应力 σ_{1max} 与循环次数 N 的关系曲线。在荷载循环为 20 万次时,即发生了突变,说明此时已有微裂纹发生。但

由于此端的 a_1 较小, $h_1/a_1 \geq 2$, 故在荷载循环大于 20 万次以后, 裂纹扩展速率缓慢, 各测点应力基本趋于稳定, 梁左端未见疲劳破坏。梁右端各测点的 σ_{1max} 与 N 关系曲线表明, 在 $N=40$ 万次时, 曲线出现陡降, 说明腹板已有微裂纹发生。由于 a_2 较大, $h_2/a_2 < 2$, 且计算主应力较大, 裂纹扩展速率较快, 故在 80 万次时 σ_{1max} 与 N 关系曲线出现第二拐点, 同时在插入板与端封板连接角焊缝上发现了裂纹。到 $N \geq 120$ 万次以后, 曲线呈直线下降, 梁右端发生疲劳破坏。

图 13 为 SL-5 梁 σ_{1max} 与 N 的关系曲线。此梁的 $a_1=360$ mm, $a_2=270$ mm, 且 $h/a < 2$ 。梁右端各点曲线在 $N=40$ 万次时即出现明显转折。虽然计算主应力 σ_1 并不算大, 但由于突变点附近板件几何尺寸不太合理, 裂纹扩展速率较快。当 $N=120$ 万次时, 裂纹已发展到相当程度, 到 141.2 万次时, 测试人员发现裂纹。

SL-6 梁的试验结果表明, 由于此梁的计算主应力较小, 突变点附近几何形状较佳。虽然 σ_{1max} 与 N 的关系曲线(图 14)在 $N=20 \sim 40$ 万次时出现了转折, 但裂纹扩展速率较慢, 实测主应力趋于稳定状态, 故该梁在荷载循环 210 万次后, 仍未见疲劳裂纹发生。

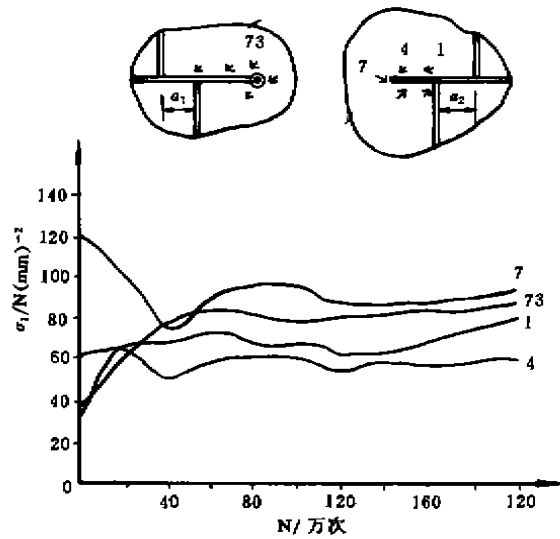


图 14 SL-6 梁控制应力与循环次数关系曲线

3.3 钢吊车梁直角式突变支座的疲劳破坏

疲劳试验结果表明, 除 SL-1 及 SL-6 梁由于控制应力幅较小, 且 SL-1 梁的加载点太靠近支座, 荷载循环超过 2×10^6 次未破坏外, 其余五根梁均由于控制应力较高和其它因素的影响而未达到 2×10^6 次荷载循环就发生疲劳破坏。这些梁的疲劳破坏特征为:

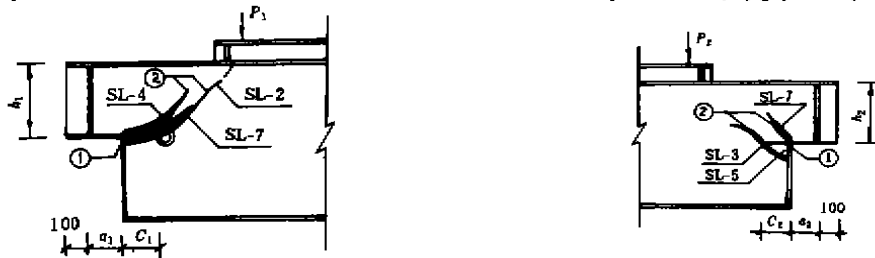


图 15 SL-2, SL-4, SL-7 梁疲劳裂纹示意图 图 16 SL-3, SL-5, SL-7 梁疲劳裂纹示意图

3.3.1 SL-2 梁: 当荷载循环次数达 40 万次时, 听见试验区有如金属块落地时撞击声, 但仔细检查试验梁未见裂纹。荷载循环次数为 80 万次时, 梁的一端端封板与插入板连接焊缝首先开裂, 并迅速向腹板扩展, 致使插入板端的钢管破裂(图 15)。经检查发现, 这主要是端封板与插入板连接角焊缝的质量过差, 焊脚尺寸偏小且基本没有熔深, 端封板与插入板接触的中部存在固有缝隙, 一旦角焊缝开裂, 将加速裂纹扩展, 同时使突变点附近腹板的应力集中加剧, 第二防线崩溃, 插入板端钢管也被撕坏。

3.3.2 SL-3 梁: 鉴于 SL-2 梁的破坏情况, 以下各梁的端封板与插入板连接焊缝均进行了

补焊。当荷载循环达 80 万次时,在 $a_2=170$ mm 端的插入板与端封板连接焊缝处发现裂纹(图 16 中裂纹①)。补焊此处焊缝后继续疲劳试验。达 120 万次循环时,发现 a_2 端的插入板与端封板交界的下部腹板主体金属开裂(图 16 中的裂纹②)。在荷载循环次数为 130 万次时,此裂纹长达 50 mm,宽度为 1 mm。到 130.09 万次时,腹板与端封板结合部的裂纹向上发展,使裂纹①与裂纹②贯通,试验终止。

3.3.3 SL-4 梁:当荷载循环次数为 150.38 万次时,在插入板与端封板连接角焊缝处沿长度方向 75 mm 范围内出现裂纹①(图 15)。当荷载循环次数为 155.30 万次时,在紧贴直角突变点的腹板主体金属开裂,并向与插入板平行的方向延伸,形成裂纹②。当荷载循环次数达 169.9931 万次时,裂纹②继续发展,其裂纹长度达 175 mm 时,则停止试验。

3.3.4 SL-5 梁:当荷载循环次数为 40 万次时,在梁两端的插入板与端封板连接焊缝均出现裂纹,即图 16 中的裂纹①。补焊加固后,在荷载循环次数为 107.9 万次时,补焊后的焊缝又开裂。当荷载循环次数为 141.42 万次时,在直角突变点以下腹板上出现裂纹③,裂纹与插入板夹角约 45° ,并向突变点上部腹板延伸,裂纹长度达 160 mm。

3.3.5 SL-7 梁:该梁的几何尺寸与 SL-5 相同,但作了如下变动:

- a) 插入板的插入腹板长度 $c_2=150$ mm, $C_1=180$ mm;
- b) 插入板与端封板的连接焊缝为坡口焊缝并要求焊透。
- c) 在 C_2 端的插入板与端封板连接处,加焊了 L75×6 的短角钢。

当荷载循环次数达 43.2 万次时,发现梁的 a_1 端紧靠插入板与端封板的坡口焊缝的主体金属(热影响区)断裂(即图 15 中的裂纹①),同时在腹板上形成从断裂处向上部腹板延伸的裂纹②。当荷载循环次数为 43.5 万次时,在梁的 a_2 端也是在紧靠插入板与端封板坡口焊缝的主体金属(热影响区)断裂(图 16 中的裂纹①)。同样在腹板上形成裂纹②,整个裂纹扩展过程约数秒钟。

4 结 语

1) 由于各受试梁两端的直角突变点附近的尺度存在差异,梁的两端并不同时发生疲劳破坏。当梁的端部高度 h 与梁支点至突变点的距离 a 的比值 $h/a \geq 2$ 时,均未见疲劳破坏。

2) 疲劳破坏时荷载循环次数与按初等材料力学理论计算的主应力或折算应力能建立良好的对应关系。主应力 σ_1 或折算应力 σ_e 愈小,荷载循环次数愈多。但 SL-1 梁的荷载作用点靠近受试梁的支座,虽然试验控制应力幅较大(也即主应力 σ_1 或折算应力 σ_e 较大),由于支座对梁的纵向约束和局部效应的影响,插入板在梁支座处为下翼缘段及插入板与端封板连接处可能受压,故有较高的疲劳强度。

3) SL-7 梁的端封板与插入板采用坡口焊缝连接,且要求焊透,由于此种作法局部加热严重,使插入板主体金属在焊缝附近过烧,材质变脆,虽然突变点处主应 σ_1 或折算应力 σ_e 并不算高,但在较低的循环次数(43.2 万次)时就发生了疲劳破坏。这种破坏应引起设计和施工人员的高度重视。

4) 由于在吊车梁直角突变点存在着严重的应力集中,故疲劳破坏的起始点一般都是在端封板与插入板连接焊缝及其附近主体金属上,再经过一定荷载循环后,才出现端封板附近腹板或插入板与腹板连接焊缝附近腹板主体金属开裂。

5) 突变点附近腹板的疲劳强度不仅与试验控制应力幅的大小有关,也和突变点附近几何尺寸及各板件的相对刚度有关。只有在支座的几何参数满足某一相关关系时,此类吊车梁才能具有较高的疲劳强度。关于钢吊车梁直角式突变支座的合理几何参数将在另外的文章中专题讨论。

参 考 文 献

- 1 T. R. 格尔内. 焊接结构的疲劳. 机械工业出版社
- 2 重庆建筑工程学院. 重庆钢铁设计研究院. 钢吊车梁直角式突变支座疲劳性能试验研究报告. 1992
- 3 John W. Fisher Fatigue. and Fracture in Steel Bridges. John Wiley & Sons, Inc, 1984

(编辑: 徐维森)

EXPERIMENTAL RESEARCH ON FATIGUE BEHAVIOR FOR THE RIGHT-ANGLE TYPE SUDDEN CHANGE SUPPORTING OF STEEL CRANE BEAM

Lu Tieying Zhao Qing Lu Ping

(Faculty of Civil Engineering)

ABSTRACT Based on the static and fatigue test by two-way loads for the right-angle type sudden change supporting of steel crane beam, the stress of the plates for the sudden change supporting and influence of the load circulative rate on the stress of web around the sudden change points are studied. The characteristics of the fatigue failure of this crane beam are given a minute description. Some technical measures are put forward in design and construction.

KEY WORDS steel crane beam, sudden change supporting, fatigue test