

文章编号:1005-0523(2001)04-0001-05

编组站使用绳索牵引推送小车轨道钢轨受力的研究

杜厚智¹, 练松良²

(1. 南昌铁路局 办公室, 江西 南昌 330002; 2. 同济大学 铁道建筑工程系, 上海 200092)

摘要: 徐州北站是目前国内唯一采用液压绳索牵引推送小车调车设备的编组站, 自小车使用以来, 收到了良好的经济效益¹⁹。但是目前国内外还没有文献报道有关绳索牵引推送小车对钢轨受力影响的研究¹⁹。本文从现场试验、实验室静态测试、疲劳试验及理论计算, 对此问题作了详细的研究¹⁹。并得出了在目前的运营条件下, 编组场的轨道结构受力状态是安全的结论¹⁹。

关键词: 编组站; 绳索牵引推送小车; 轨道; 钢轨受力

中图分类号: U 213.2¹¹

文献标识码: A

0 引言

液压绳索牵引推送小车是我国自行研制的编组场连续式调速设备, 它可以提高编组场安全连挂率, 减少机车下峰整场次数, 从而提高了编组站驼峰的列车解体能力¹⁹。此调车设备在徐州北编组站的运营中发挥了重要作用, 取得了显著的经济效益¹⁹。目前世界上只有丹麦、荷兰、德国、日本等国使用类似的小车调速设备, 但小车的使用对轨道结构的受力有何影响尚未见到报道¹⁹。

在徐州北站, 液压绳索牵引推送小车走行在 50 kg/m 再用轨的下翼缘斜坡上, 用铝热焊把钢轨焊接成无缝线路, 并把焊接接头打磨平整, 以利小车行走, 小车的形状及走行部如图 1 所示¹⁹。

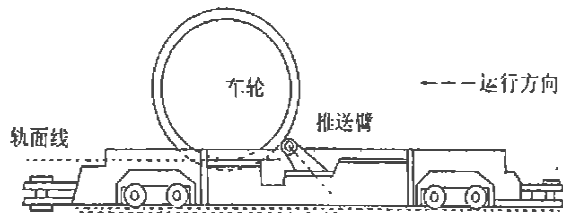


图1 编组站绳索牵引推送小车

由于小车走行在钢轨下翼缘的斜坡上, 钢轨在车辆轮和小车轮的共同作用下可能产生如下两个问题:

1) 当小车推送车辆时, 小车推送臂撞击车辆轮

轮缘, 撞击荷载传递至钢轨下翼缘的斜坡上, 此时钢轨不但要承受轨顶面上车辆轮载的作用, 同时在斜坡上要承受小车轮的撞击荷载¹⁹。

2) 当长时间使用小车后, 在钢轨下翼缘的斜坡上就产生磨损凹槽, 这一凹槽对钢轨的受力及使用寿命产生一定的影响¹⁹。

本文就此两个问题进行探讨¹⁹。

1 小车推送臂撞击车辆轮轮缘时对钢轨受力的影响

在一般情况下, 当小车推送臂撞击车辆轮轮缘后, 车辆就开始行走, 当小车的走行速度小于车辆的运行速度时, 小车推送臂就会脱离车辆轮轮缘¹⁹。但如果小车一次推送的车辆较多时, 则小车推送臂有可能顶着车辆轮轮缘行走¹⁹。如考虑最不利条件下钢轨的受力情况, 即小车推送臂撞击车辆轮轮缘后仍在原位, 则此时产生的冲击荷载最大, 我们在现场测得此条件下的冲击力信号如图 2¹⁹。

1.1 小车轮冲击荷载的近似计算

小车轮冲击荷载的大小与小车推送臂和轮缘撞击时间 τ 的长短有关, 现场实测的撞击时间的平均值 $\bar{X} = 0.034\ 78$ 秒, 均方差 $\sigma = 0.001\ 501$ 秒, 如用 $X_{\min} = \bar{X} - 3\sigma$ 计算可得最小撞击时间为 0.030 277 秒¹⁹。从冲量理论可求出冲击荷载和大小, 小车的冲量为:

收稿日期: 2001-05-28

作者简介: 杜厚智(1957-), 男, 安徽蚌埠人, 南昌铁路局总工程师¹⁹。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

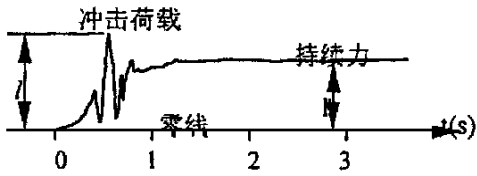


图2 小车撞击车轮时钢轨所受的冲击力信号

$$S = mu - mv \quad (1)$$

式中: m 为小车的质量; u, v 为小车撞击车轮的前后速度, 此时 $v = 0.0 \text{ m/s}$ (13) 根据冲量定理有:

$$S = \int_t^{t+\tau} F(t) dt;$$

式中 τ 为冲击持续时间, F 为冲击力 (13) 考虑两个物体碰撞冲量的近似形状如图 3 所示 (11), 从此图可知, 冲量大小等于图中的阴影线面积, 为:

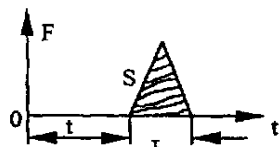


图3 物体碰撞冲量图

$$S = \int_t^{t+\tau} F(t) dt = \frac{\tau}{2} F; \quad (2)$$

式(1)和(2)相等, 即可得:

$$F = 2mu/\tau \quad (3)$$

从小车的设计可知, 小车推送臂与钢轨水平方向的夹角 α 约 56° , 绳索牵引力为 30 kN , 小车撞击前的走行速度为 3 km/h , 小车共有 4 个转向架, 每个转向架下有 2 个小车轮, 故此小车每个转向架作用在钢轨上的垂直力 (冲击荷载加小车自重和绳索牵引力的垂直分力) 的简化算法为:

$$R_a = [G + (P + F) \text{tg} \alpha] / 4 = 34.6 \text{ kN}; \quad (4)$$

式中 G 为小车自重 (10 kN); P 为绳索牵引力; F 为小车推送臂与轮缘的冲击力, 取 $\tau = 0.03 \text{ s}$ 计算所得 (13)

1.2 小车推送臂冲击车辆轮轮缘时小车轮的轮轨接触应力的计算

根据现场测试, 钢轨受到 2 个小车轮的最大冲击力为 34.5 kN , 接近理论计算值 34.6 kN (13) 从 Hertz 接触理论可知, 当圆柱体与一平面接触时, 其接触面为一矩形 (14), 其长为轮宽 b , 宽为 $2a$ (13) 计算式为:

$$a = 1.522 \sqrt{\frac{p r}{E}}, \quad q_0 = 0.418 \sqrt{\frac{p E}{r}} \quad (5)$$

式中材料的弹性模量取 $E = 2.058 \times 10^5 \text{ MPa}$, 泊桑比取 $\nu = 0.3$; $p = R_w/b$, R_w 为一个小车轮荷载 ($R_a = 2R_w$); r 为小车轮半径, 取 4 cm , b 为小车轮宽, 取 1.5 cm (13) 据此可算得最大接触应力 $q_0 = 1.018 \text{ MPa}$ (13) 虽然车辆轮与轨顶面之间的接触应力也在 1

$000 \sim 1500 \text{ MPa}$ 之间, 但由于小车冲击车辆轮的次数有限, 且小车冲击车辆时的位置也经常变化 (13) 当小车非撞击车辆轮运行时, 每个小车轮轮载仅为 1.25 kN , 接触应力要小得多 (13) 所以小车轮的接触应力对钢轨的伤损不起决定性的影响作用 (13)

1.3 钢轨弯曲应力的计算

由于小车的存在, 使得钢轨所受的弯曲应力增加, 从轨道强度理论 (12) (14) 可知, 在小车推送的车辆轮下钢轨的弯矩为:

$$M = \{P_1 [\Psi(\beta_0) + \Psi(\beta_{175})] + P_2 [\Psi(\beta_{16.75}) + \Psi(\beta_{33.25}) + \Psi(\beta_{136.75}) + \Psi(\beta_{153.25})] \} / 4\beta \quad (6)$$

式中 P_1 为车辆轮轮载; 最大为 130 kN ; P_2 为小车轮冲击轮载, 最大为 17.3 kN ; $\Psi(\beta_x) = \exp(-\beta_x) (\cos \beta_x - \sin \beta_x)$; $\beta = [k/4EJ]^{1/4}$; k 为钢轨基础弹性系数; EJ 钢轨截面刚度; x 为轮载与钢轨应力计算点之间的距离 (13) 钢轨的弯矩计算图式如图 4 (13)

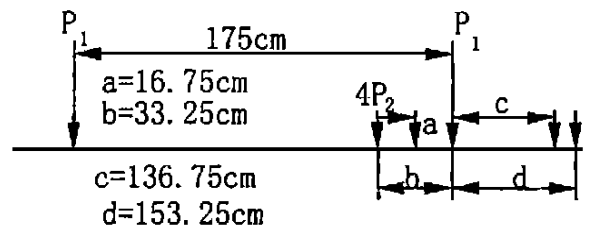


图4 车辆轮和小车轮作用点位置

于是得钢轨的弯曲应力为 $\sigma = M/W$; W 为钢轨截面模量 (13) 此外还要考虑无缝线路的温度力: $\sigma = \Delta E \alpha \Delta t$ 为轨温差; α 为钢的热膨胀系数, 取 $0.0000118 (1/^\circ\text{C})$ (13) 对于徐州地区, 最高轨温为 63.3°C , 最低轨温为 -22.6°C , 取锁定轨温为 26°C , 得 $\Delta_{压} = 37.3^\circ\text{C}$, $\Delta_{拉} = 48.6^\circ\text{C}$ (13) 最后综合考虑钢轨各方面的应力和轨道所受横向力 (取横向力系数 $f = 1.25$), 则得钢轨的综合应力如表 1 所示 (13)

2 钢轨下翼缘边坡产生凹槽后疲劳强度的检算

虽然小车的使用频率较低, 但如果在钢轨下翼缘边坡上出现磨损凹槽 (图 8) 则就会影响钢轨的疲劳寿命 (19) 所以要对钢轨下翼缘边坡的疲劳强度进行检算 (19)

材料的疲劳破坏主要是由于在钢材中的疲劳裂纹引起的, 引起钢材疲劳破坏的因素与所受的应力大小, 钢材表面的粗糙程度, 钢材表面的加工方式, 断面尺寸等有关 (19)

表 1 在不利情况下钢轨所受的最大综合应力 MPa

$k(\text{MN}/\text{m}^2)$		65			35		
钢轨垂磨(mm)		3	6	9	3	6	9
$J(\text{cm}^4)$		1 946	1 827	1 702	1 946	1 827	1 702
W (cm^3)	头	242	230	216	242	230	216
	底	283	275	264	203	275	264
σ	头	83.8	87.3	92.0	92.7	96.5	102.
	底	71.6	73.0	75.2	79.3	80.7	83.1
σ	头	7.48	7.64	7.9	10.1	10.3	10.6
	底	6.39	6.39	6.5	8.6	8.6	8.6
σ	头	92.4	92.4	92.4	92.4	92.4	92.4
	底	120.	120.	120.	120.	120.	120.
σ	头	207.	211.	217.	221.	226.	233.
	底	218.	219.	222.	230.	232.	235.

注:表中的 $\sigma=1.25(\sigma+\sigma)+\sigma$, σ , σ 分别为车辆轮和小车轮引起的弯曲应力^[3]

对于对称疲劳循环(循环应力特征系数 $R=-1$, $\sigma_{\max} = |\sigma_{\min}|$), 钢材的持久极限应力 σ_1 可从屈服极限 σ 和强度极限 σ 得出^[3], 对于结构钢: $\sigma_1 = 0.27(\sigma + \sigma)$; 而脉动循环($R=0$, $\sigma_{\min}=0$) 的持久疲劳极限应力为: $\sigma = 1.33\sigma_1$, 据此可得出荷载的不对称循环度系数 ψ_0 : $\psi_0 = (2\sigma_1 - \sigma) / \sigma$ ^[3]从疲劳强度理论可得出等幅单向变应力情况下钢轨下翼缘边坡的疲劳安全系数为^[3]:

$$n = \sigma_1 / [K_\sigma / \beta \sigma + \psi_0 \sigma_n] \tag{7}$$

式中: K_σ 为应力集中系数, 如果是实测应力, $K_\sigma = 1.0$; β 为材料表面系数, 与构件表面的粗糙度有关; σ 为循环应力半振幅, $\sigma = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2$; σ_n 为循环平均应力, $\sigma_n = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2$ ^[3]

在小车轮走行处钢轨下翼缘边坡厚度为 21 mm, 从图 5^[3] 可查得 $\beta=0.94$ ^[13] 钢轨是表面有腐蚀坑的再用轨, 其极限强度为

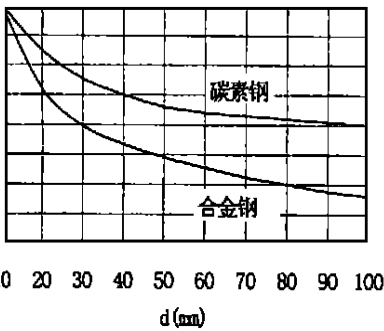


图 5 材料厚度系数图

883 MPa, 所以取图 6^[3] 中的第 6 根 β 曲线查得 $\beta=0.43$, 已知 $\sigma = 883 \text{ MPa}$, $\sigma = 457 \text{ MPa}$, 则可得 $\sigma_1 = 362 \text{ MPa}$, 从钢轨的受力可知, 循环应力特征系数 $R \approx 0$, 所以 $\sigma_n = \sigma$ ^[13] 在疲劳强度计算中允许安全系数一般取 1.25 ~ 1.75 之间, 由于钢轨所受的是随机荷载, 取 $[n] = 1.75$, $\psi_0 = 0.5$, $K_\sigma = 1.0$ 则可得 σ

= 69.6 MPa, 则钢轨下翼缘边坡的允许疲劳持久极限应力为:

$$[\sigma_{\max}] = 2.0 \sigma_n = 139.2 \text{ MPa};$$

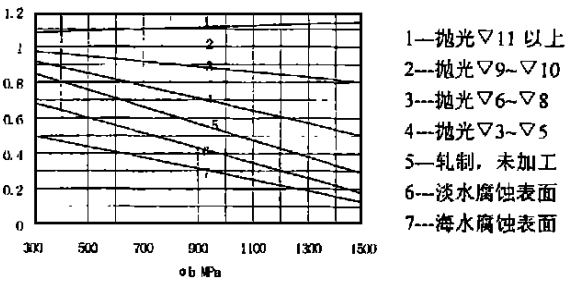


图 6 材料表面系数图

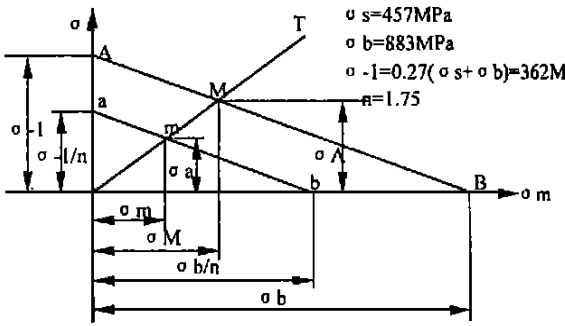


图 7 疲劳强度安全系数图

把以上的计算绘成疲劳强度安全系数图, 如图 7¹⁹ 如果平均应力和应力半振幅不等, 只要(σ , σ) 的座标点落在 ab 线以内, 则疲劳安全系数就大于 1.75, 就可认为此应力水平在允许疲劳强度应力以内¹⁹.

3 钢轨下翼缘边坡处钢轨纵横向应力的测量及计算

钢轨下翼缘边坡处的横向应力直接影响到钢轨

下翼缘的疲劳寿命,故此进行应力实测和理论计算¹⁹。测点的布置及有限元计算的单元划分如图 8¹⁹。现场

测试和实验室测试的贴片方法相同,理论计算是用 20 节点的三维等参数单元,测试及计算结果如表 2¹⁹。

表 2 各种试验及计算所得的最不利应力 MPa

应力点位置		实验室静态测试			现场测试	轨道强度计算	有限单元法计算		
		$\delta=0$	1.5	4.0	0 mm	0 mm	0 mm	2.0 mm	4.0 mm
轨底边坡圆角处应力	纵	42.2	62.5	39.1	40.4	46.9			
	横	-14.	-1.5	-9.7	-4.6		-4.999	-7.867	-7.965
凹槽上边缘处应力	纵	57.1	63.9	57.8					
	横	-0.3	-2.2	-7.5			-38.90	-32.90	-36.47
凹槽下边缘处应力	纵	59.9	66.9	61.1					
	横	-1.9	-0.6	-3.0			-45.15	-46.45	-64.08
凹槽下的轨底应力	纵	109.	112.	91.0			91.10	90.90	89.30
	横	5.10	1.7	1.9	54.4		41.39	36.66	37.63
钢轨中心处轨底应力	纵					79.3	94.10	93.70	93.30
	横								

注:为钢轨下翼缘边坡凹槽深度¹⁹。

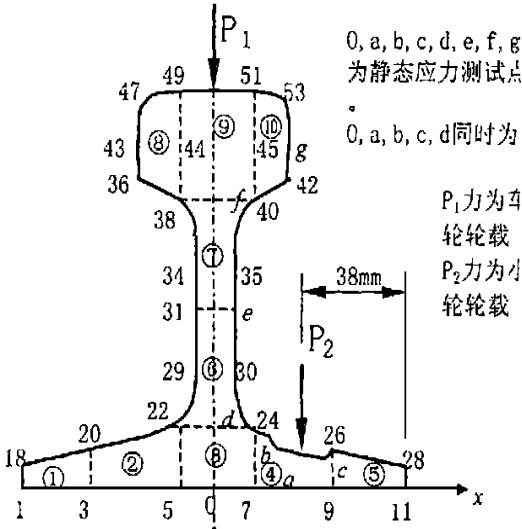


图 8 计算钢轨应力的单元划分

4 钢轨试件的疲劳试验

钢轨疲劳试验和静载应力测试一样,试件来自于徐州北编组站轨道使用的同类型 50 kg/m 再用轨,然后在钢轨下翼缘边坡下车轮行走的位置处刨切如小车轮形状的凹槽,深度分别为 1.5 mm, 3.0 mm, 4.0 mm,先对试件静测试验,然后再做疲劳试验¹⁹。钢轨的支承方式与现场接近,作用的循环载荷最大为 20 吨,最小为 2 吨¹⁹。

首先对凹槽深度 4.0 mm 的 3 根钢轨试件进行疲劳加载试验,当荷载作用次数达到 200 万次后,在钢轨下翼缘斜坡凹槽处没有发生疲劳破坏¹⁹。从表 2 也可看出,现场测试时在钢轨凹槽位置下轨底的横向拉应力最大为 54.5 MPa,用有限单元法计算时,

在斜坡凹槽下边缘处的压应力最大,为 64.08 MPa,两者都远小于钢轨下翼缘斜坡处的允许持久疲劳极限应力 139.2 MPa,故此可以认为钢轨在下翼缘斜坡上存在 4.0 mm 深凹槽的情况下,在此处也不会发生疲劳破坏,实验室的试验也证实了这一点,此外,在钢轨的横截面处也没有发生疲劳断裂¹⁹。由于小车的使用频率每昼夜平均为 2.5 次,所以钢轨下翼缘边坡凹槽深度达到 4.0 mm 的可能性很小,大部分情况是边坡凹槽深度还未达到 4.0 mm,钢轨就可能由于其他原因而更换¹⁹。所以疲劳试验试样只做到钢轨下翼缘边坡凹槽深度为 4.0 mm 已足够¹⁹。

5 结论与建议

- 通过以上分析认为,在目前运营条件下,轨道结构的受力状态是安全的¹⁹。
- 1) 小车对钢轨应力的影响很小,当小车推送臂撞击车辆轮轮缘时,在钢轨中产生的综合应力也不会超过钢轨的允许应力¹⁹。但是如果车辆轮刚好作用在铝热焊钢轨接头处,则在此产生的钢轨弯曲应力就有可能超过钢轨铝热焊的接头强度¹⁹。所以在使用小车时应该引起注意,或者用气压焊代替铝热焊¹⁹。但是车辆轮刚好在铝热焊接头处时小车撞击车辆轮的概率极小¹⁹。
 - 2) 从实测和理论计算都得出钢轨下翼缘边坡处的综合应力和接触应力都很小,对钢轨的疲劳损伤不起决定性作用¹⁹。
 - 3) 对使用小车的编组站轨道应进行特殊的养护,以防止小车撞击钢轨扣件螺栓和钢轨爬行¹⁹。

参考文献:

[1] 华东水利学院工程力学教研组¹⁹理论力学(下册)[M]. 北京:人民教育出版社,1979¹⁹.

[2] 童大坝¹⁹铁路轨道[M]. 北京:中国铁道出版社,1988.

[3] 徐 灏¹⁹疲劳强度设计[M]. 北京:机械工业出版社,1981.

[4] 黄 炎¹⁹工程弹性力学[M]. 北京:清华大学出版社,1982.

Analysis about the Forces acted on the in Classification Yard by the Cable Propelling Trolley

DU Hou-zhi¹, LIAN Song-liang²

(¹.Nanchang Railway Administration, Nanchang 330002; ².Rail Engineering Dept of Tongji University, Shanghai 200092, china)

Abstract:North Xuzhou Classification Yard is only one of using the cable propelling trolley in China. The economic beneficial result has been gotten greatly since the trolley has been used. But until now, there are not any papers in the science journals at both home and abroad to describe the trolley how to affect the forces acted on the rail in the classification yard. According to field test, the static stress and fatigue test in the laboratory and theoretical calculation, this paper analyzes the stress level in the rail in detail. At least, this paper puts forward that the track using the cable propelling trolley in Classification Yard can be serviced in safety.

Key words: classification yard; cable propelling trolley; track;forces acted on rail