

# 横铲垫砂作业时无缝线路稳定性试验分析

北京铁路局丰台工务段

北方交大线路教研室

## 一、前 言

随着我国“四化”建设和人民生活水平的提高,铁路运输日渐繁忙,行车密度日益加大,给线路维修工作带来不少困难。如在丰台工务段管内的京山线,年货运量近一亿吨,每昼夜约有100对列车通过,致使工区工人每天真正上道作业的工作时间只有170分钟左右。在这种情况下如何提高工效,保证线路质量,使列车安全、正点地运行,是一个急待解决的问题。丰台工务段在总结过去垫砂起道作业方法并参照外国经验的基础上,提出“横铲垫砂起道”的维修作业方法,经过几年的试行,初步证明它具有提高工效、节省劳力、线路质量也能保证等优点。为了使横铲垫砂起道法在更加科学的基础上逐步得到完善,丰台工务段与北方交大线路教研室,于1984年10月9日~1984年10月20日在京山线K36+800处,测试了“横铲垫砂起道”时线路道床纵、横向阻力,并按数理统计方法对测试资料进行了整理、分析。现将研究结果报告如下。

## 二、试 验 情 况

测试道床阻力的试验地段铺有60公斤钢轨的无缝线路,轨枕为钢筋混凝土轨枕,1,840根/公里。碎石道床,在测试时道床肩宽一律作成400毫米的宽度。用作垫砂材料的砂粒径为5~15毫米,均为坚硬石灰石。

用装有油压表的千斤顶、百分表及一些附属部件进行道床阻力的测试。在测试前后,均在实验室的万能机上对千斤顶的压力表读数进行了标定。

在试验段分别对未垫砂时、刚垫完砂、垫砂后约五小时(通过运量约5万吨)、垫砂后一天(通过运量约25万吨)、垫砂后二天(通过运量约50万吨)及垫砂后四天的道床横向阻力进行了测试,并测试了未垫砂时、刚垫完砂及垫砂后四天的道床纵向阻力。每种情况都测试了10根以上的轨枕。剔除个别不正常的数据后,对每根轨枕的数据都进行了绘图整理,然后按照数理统计的方法用电子计算机对原始测试资料进行分析、整理,求得各种情况下、不同位移值的平均值及最小可能值。为了得到阻力与位移的关系曲线及计算公式,我们还按回归分析的方法,用电子计算机求得各种情况下道床阻力的回归方程。

### 三、试验结果分析

#### (一) 道床阻力与位移关系曲线

通过试验数据的整理发现, 由于垫砂时起道高度、碴量的多少、散碴是否均匀等都会影响道床阻力的数值, 因而每种情况各个轨枕的试验曲线离散程度较大, 若取其平均值则不能完全反映道床阻力的实际情况, 且用它进行分析、计算, 其结果也不偏于安全。根据过去的大量实验数据, 道床阻力是按正态曲线分布的, 因此可按下式算出最小可能值来进行分析计算:

$$P_{\min} = \bar{P} - 2S \quad (1)$$

式中

$P_{\min}$ ——道床阻力的最小可能值 (kg/根);

$\bar{P}$ ——道床阻力的实测平均值 (kg/根)

$S$ ——道床阻力实测值的均方根差。

采用  $P_{\min}$  值可以保证实测值的 95.4% 都高于此值, 用  $P_{\min}$  进行分析计算显然偏于安全。因此在以后的分析计算中我们一般采用  $P_{\min}$  值来代表道床纵、横向阻力的实测值。

经过多次试算, 我们选取了如下的关系式作为道床阻力一位移关系曲线:

$$P = P_0 - b_1 y' + b_2 y'^{2/3} \quad (2)$$

式中  $P$ ——每根轨枕的道床阻力值 (kg/根);

$P_0$ ——位移为零时的道床阻力值 (kg/根);

$y$ ——轨枕位移 (mm);

$b_1, b_2$ ——系数。

为了便于代入有关公式进行无缝线路稳定性分析, 可把 (2) 式经过适当变换得到道床单位阻力与位移的关系式:

$$q = q_0 - C_1 y + C_2 y^{2/3} \quad (3)$$

式中  $q$ ——道床单位横向阻力 (kg/cm);

$q_0$ ——位移为零时的道床单位横向阻力 (kg/cm);

$y$ ——横向位移量 (cm);

$C_1, C_2$ ——系数。

根据实测值算得的不同道床状态下的阻力——位移关系式如下:

#### 1. 未进行垫砂作业时的道床纵向阻力

$$P = 57 - 602y' + 1339y'^{2/3} \quad (\text{kg/根})$$

#### 2. 刚垫砂时的道床纵向阻力

$$P = 44 - 199y' + 448y'^{2/3} \quad (\text{kg/根})$$

#### 3. 垫砂四天后的道床纵向阻力

$$P = 60 - 460y' + 849y'^{2/3} \quad (\text{kg/根})$$

#### 4. 未垫砂时的道床横向阻力

$$P = 50 - 235y' + 657y'^{2/3} \quad (\text{kg/根})$$

$$q = 0.91 - 42.7y + 55.5y^{2/3} \quad (\text{kg/cm})$$

## 5. 刚垫完砂时的道床横向阻力

$$P = 50 - 249y' + 566y'^{2/3} \text{ (kg/根)}$$

$$q = 0.91 - 45.3y + 48.8y^{2/3} \text{ (kg/cm)}$$

## 6. 垫砂五小时后的道床横向阻力

$$P = 48 - 251y' + 568y'^{2/3} \text{ (kg/根)}$$

$$q = 0.87 - 45.6y + 47.9y^{2/3} \text{ (kg/cm)}$$

## 7. 垫砂一天后的道床横向阻力

$$P = 45 - 308y' + 652y'^{2/3} \text{ (kg/根)}$$

$$q = 0.82 - 56y + 55y^{2/3} \text{ (kg/cm)}$$

## 8. 垫砂二天后的道床横向阻力

$$P = 50 - 283y' + 643y'^{2/3} \text{ (kg/根)}$$

$$q = 0.91 - 51.5y + 54.3y^{2/3} \text{ (kg/cm)}$$

## 9. 垫砂四天后的道床横向阻力

$$P = 50 - 238y' + 622y'^{2/3} \text{ (kg/根)}$$

$$q = 0.91 - 43.3y + 52.5y^{2/3} \text{ (kg/cm)}$$

部分位移—阻力曲线如图 1 与图 2 所示。

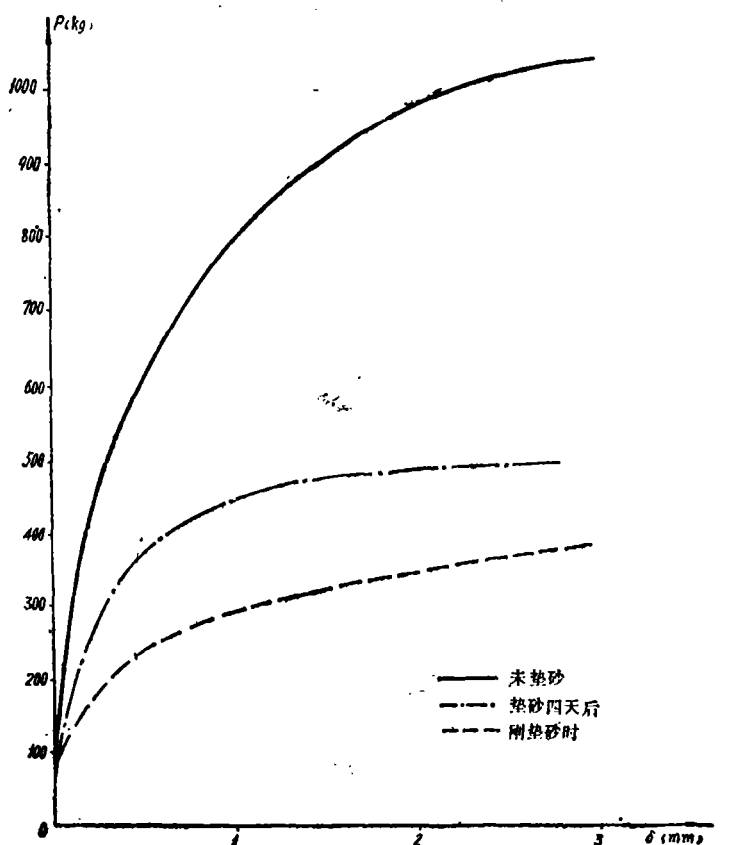


图 1 道床纵向阻力

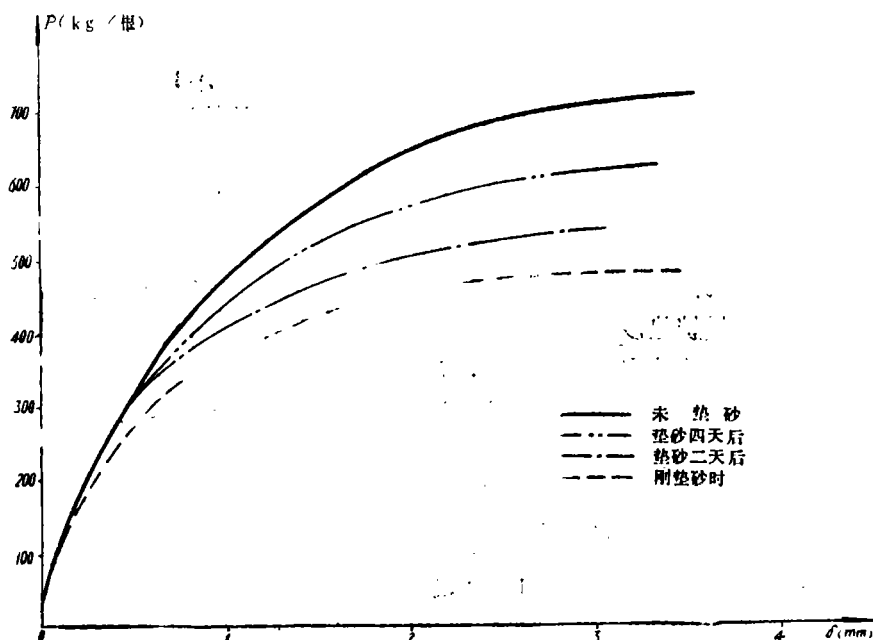


图2 道床横向阻力

## (二) 道床阻力值

根据实测资料算得了道床阻力平均值与最小可能值。表1和表2分别列出位移1mm和2mm时道床纵、横阻力的平均值、最小可能值与百分比。对这些阻力值初步分析后可得到以下一些结论。

道床横向阻力

表1

道床状态	平均值				最小可能值			
	阻力值 (kg/根)		百分比 (%)		阻力值 (kg/根)		百分比 (%)	
	位移1mm	2mm	1mm	2mm	1mm	2mm	1mm	2mm
未作业	708	883	100	100	475	650	100	100
刚垫完砂	437	517	61.7	58.6	368	452	77.5	69.5
垫砂五小时	473	580	66.8	65.7	371	440	78.1	67.7
垫砂一天后	558	657	78.8	74.4	384	454	80.8	69.8
垫砂二天后	519	646	73.3	73.2	409	505	86.1	77.7
垫砂四天后	628	754	88.7	85.4	422	570	88.8	87.7

道床纵向阻力

表2

道床状态	平均值				最小可能值			
	阻力值 (kg/根)		百分比 (%)		阻力值 (kg/根)		百分比 (%)	
	位移1mm	2mm	1mm	2mm	1mm	2mm	1mm	2mm
未作业	1151	1309	100	100	790	980	100	100
刚垫完砂	555	631	48.2	48.2	290	344	36.7	35.1
垫砂四天后	696	728	60.5	55.6	446	485	56.5	49.5

### 1. 横铲垫砂起道时道床横向阻力下降不大

由表 1 可以看到, 刚垫完砂的道床横向阻力的平均值与最小可能值分别为未作业线路的 58.6% 和 69.5%。与 1972 年保定工务段与北方交大共同测试的捣固作业时钢筋混凝土轨枕线路道床阻力相比, 相差不是很大。表 3 和表 4 列出采用横铲垫砂起道法和机械化与手工捣固作业法进行作业时的道床平均阻力情况。从对比材料来看, 采用横铲垫砂起道作业其横向阻力值虽然略低于其他作业方式, 但相差不是很大, 位移为 1mm 时横铲垫砂时刚作完作业的道床横向阻力只比手工捣固和机械化捣固低 10% 和 13%, 位移 2mm 时分别低 5% 和 14%, 阻力下降不多。这可能与横铲垫砂时不破坏道床肩部石碴棱体有关。由于肩部石碴基本未被扰动, 就保持了碴肩原有的状态与阻力数值, 从而提高了垫砂后的道床横向阻力值, 保证了线路的稳定性。由此也可以看到, “横铲垫砂法” 确比过去的一般垫砂法有不少改进。

不同作业方式道床横向阻力比较表

表 3

维 修 方 式	位 移 为 1mm				位 移 为 2mm			
	作 业 前		刚 作 业 完		作 业 前		刚 作 业 完	
	阻力值 (kg/根)	百分比 (%)	阻力值 (kg/根)	百分比 (%)	阻力值 (kg/根)	百分比 (%)	阻力值 (kg/根)	百分比 (%)
垫 砂	708	100	437	71.7	883	100	517	58.6
手 工 捣 固	688	100	488	70.9	848	100	544	64.1
机 械 捣 固	688	100	504	73.3	848	100	600	70.8

不同作业方式道床纵向阻力比较表

表 4

维 修 方 式	位 移 为 1mm				位 移 为 2mm			
	作 业 前		刚 作 业 完		作 业 前		刚 作 业 完	
	阻力值 (kg/根)	百分比 (%)	阻力值 (kg/根)	百分比 (%)	阻力值 (kg/根)	百分比 (%)	阻力值 (kg/根)	百分比 (%)
垫 砂	1151	100	555	48.2	1309	100	631	48.2
机 械 捣 固	804	100	516	64.2	1068	100	636	59.6

然而垫砂起道时的道床纵向阻力却下降很多, 还不到原来阻力的 50%, 而用机械捣固时, 纵向阻力却为原阻力的 60% 左右。这意味着用横铲垫砂作业时, 线路的爬行将比捣固作业时严重。

### 2. 横铲垫砂作业时道床阻力恢复较慢

由表 1 和表 2 可以看到, 垫砂后四天, 即已通过约 100 万吨运量后, 位移 2mm 时的道床横向与纵向阻力平均值只恢复到原来的 85.4% 和 55.6%。据 1972 年在京广线的测试资料, 捣固作业后仅七天道床阻力就基本恢复, 而当年京广线的运量只有现今京山线运量的一半。相比之下, 采用垫砂起道作业时的道床阻力显然恢复较慢, 这对高温季节无缝线路的稳定性和防止线路爬行是不大有利的。尤其是反复进行垫砂的地段更应注意夯实, 加强防护。

### 3. 道床阻力对作业轨温的影响

为了衡量横铲垫砂时道床阻力降低后对无缝线路稳定性的影响, 采用下述简化公式来计算各种道床状态下无缝线路稳定临界压力与允许的临界轨温差:

$$P_{\text{临}} = \frac{2Q}{\frac{1}{R'} + \sqrt{\left(\frac{1}{R'}\right)^2 + \frac{\pi}{4\beta EJ}(f + f_{0e})Q}} \quad (4)$$

$$[P] = \frac{P_{\text{临}}}{K} \quad (5)$$

$$\Delta T_{\text{允}} = \frac{[P]}{50F} \quad (6)$$

式中  $P_{\text{临}}$ ——无缝线路临界温度压力 (kg) ;

$[P]$ ——允许的临界温度压力 (kg) ;

$K$ ——安全系数,  $K=1.25$ ;

$\Delta T_{\text{允}}$ ——允许的临界轨温差 ( $^{\circ}\text{C}$ ) ;

$F$ ——钢轨断面积 ( $\text{cm}^2$ ) ;

$EJ$ ——无缝线路框架刚度;

$\beta$ ——框架刚度换算系数, 通常  $\beta=1$  ;

$f_{0e}$ ——线路原始弹性弯曲矢度  $f_{0e}=0.3\text{cm}$ ;

$f$ ——线路横向变形, 按“工务规则”的规定换算, 采用  $f=0.1\text{cm}$ ;

$\frac{1}{R'}$ ——具有塑性原始弯曲的圆曲线曲率:  $\frac{1}{R'} = \frac{1}{R} + 1.5 \times 10^{-6} (\text{cm}^{-1})$ ,  $R$  为曲线半径;

$Q$ ——等效道床阻力,  $Q = q_0 - \frac{\pi + C_2}{4} + \frac{\pi C_2}{2} \times 0.535 f^2 / s$ .

由式 (4) ~ (6), 并采用实测的道床横向阻力最小可能值的回归方程, 算得的不同道床状态下直线和半径为 800m 的曲线无缝线路临界温度压力  $P_{\text{临}}$ , 允许的轨温变化幅度  $\Delta T_{\text{允}}$  列于表 4 和表 5。

直线无缝线路的临界压力及  $\Delta T_{\text{允}}$

表 4

道 床 状 态	临界温度压力 $P_{\text{临}}$ (kg)	允许轨温变化幅度 $\Delta T_{\text{允}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	百 分 比 (%)
未 作 业	296918	61.3°	100
刚 垫 完 砂	256636	53°	86.5
垫 砂 后 五 小 时	250594	51.8	84.5
垫 砂 后 一 天	262601	54.3	88.6
垫 砂 后 两 天	271410	56.1	91.5
垫 砂 后 四 天	280060	57.9	94.5

800m 半径曲线无缝线路的  $P_{\text{临}}$  和  $\Delta T_{\text{允}}$

表 5

道 床 状 态	临界温度压力 $P_{\text{临}}$ (kg)	允许轨温变化幅度 $\Delta T_{\text{允}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	百 分 比 (%)
未 作 业	215883	44.6	100
刚 垫 完 砂	182318	37.7	84.5
垫 砂 后 五 小 时	177360	36.6	82.1
垫 砂 后 一 天	187234	38.7	86.8
垫 砂 后 二 天	194529	40.2	90.1
垫 砂 后 四 天	201733	41.7	93.4

由表4和表5可以明显看到,采用横铲垫砂法进行作业时,一般在直线线路上还是可以保证无缝线路具有足够的稳定性的。然而在半径800m及以下的曲线无缝线路上,则需格外小心。根据北京局规定,在无缝线路地段允许100m范围内有10mm的不均匀爬行,这相当于锁定轨温可变化 $8.4^{\circ}\text{C}$ 。同时北京地区无缝线路锁定轨温普遍高于平均轨温,若锁定轨温为 $29^{\circ}\text{C}$ 比平均轨温 $20^{\circ}\text{C}$ 高出 $9^{\circ}\text{C}$ ,则在固定区与伸缩区交界处会有 $9^{\circ}\text{C}$ 的温度压力峰值高于固定区的最高压力值。若轨温不是最高时,由计算可知,压力峰值还要高些。若在 $\Delta T_{\text{允}}$ 中扣除爬行与应力峰值的影响,则刚垫完砂后的允许轨温变化幅度为:

$$\Delta T = \Delta T_{\text{允}} - 8.4 - 9 = 37.7 - 8.4 - 9 = 20.3^{\circ}\text{C}$$

考虑一定的安全储备量,则在曲线无缝线路进行横铲垫砂起道作业时,其作业轨温一定要控制在 $t_{\text{锁}} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 的范围内进行,否则对线路的稳定性是极其不利的。

### (三) 道床横向阻力的恢复对线路维修的影响

由表1和表2可知,横铲垫砂起道以后的道床阻力恢复是比较缓慢的,它将给线路维修工作带来不利的影响:

1. 线路爬行可能加大。根据道床纵向阻力降低与恢复情况来看,垫砂起道时道床纵向阻力降低较多且恢复较慢,这会使轨道框架沿着道床爬行,而这种爬行是不能用增加防爬器来防止的,需要对道床加强夯拍或用其他方法来密实道床。据在京广线的试验资料,道床夯拍后道床阻力约增加5%左右。

#### 2. 高温季节危及无缝线路稳定性。

由于道床横向阻力恢复较慢,垫砂后五个小时道床横向阻力平均值增加不多,因为离散较大,其最小可能值还略有降低。如在半径为800m的曲线无缝线路上,其允许轨温变化幅度为 $36.6^{\circ}\text{C}$ (表5),考虑到不均匀爬行的影响,允许的轨温变化幅度为:

$$36.6 - 8.4 = 28.2^{\circ}\text{C}$$

根据无缝线路温度应力峰理论,在伸缩区距接头 $l_{\text{峰}}$ 处有压力峰值 $P_{\text{峰}}$ :

$$l_{\text{峰}} = \frac{25F(\Delta T_{\text{min}} + \Delta t) - 2P_H}{2p} \quad (7)$$

$$P_{\text{峰}} = 25F(\Delta T_{\text{min}} + \Delta t)/2 \quad (8)$$

压力峰值比固定区相应压力高出的压力换算轨温为 $\Delta t_{\text{峰}}$

$$\Delta t_{\text{峰}} = t_{\text{锁}} - \left( \frac{t_{\text{min}} + t}{2} \right) \quad (9)$$

式中  $P_H$ ——接头阻力,二级螺栓 $P_H = 40T$ ;

$p$ ——一股钢轨单位纵向阻力,实测的 $p = 5.8\text{kg/cm}$ ;

$\Delta T_{\text{min}}$ ——锁定轨温与当地最低轨温差,

$$\Delta T_{\text{min}} = t_{\text{锁}} - t_{\text{min}}$$

$t_{\text{min}}$ ——当地最低轨温;

$t_{\text{锁}}$ ——锁定轨温;

$t$ ——压力峰值相应的轨温。

例如北京地区,最低轨温 $t_{\text{min}} = -22.8^{\circ}\text{C}$ ,最高轨温 $t_{\text{max}} = 62.6^{\circ}\text{C}$ ,无缝线路锁定轨温 $t_{\text{锁}} = 25^{\circ}\text{C}$ ,则当轨温为 $40^{\circ}\text{C}$ 温时,其相应的 $l_{\text{峰}}$ 、 $P_{\text{峰}}$ 、 $\Delta t_{\text{峰}}$ 为

$$l_{\text{峰}} = 35.86\text{m}$$

$$P_{\text{峰}} = 60.798T$$

$$\Delta t_{\text{峰}} = 16.4^{\circ}\text{C}$$

如果该无缝线路正好是800m半径的曲线,在五月下旬对该线路进行垫砂起道维修,调正作业时间后在晨7时维修时,轨温只有 $15\sim 20^{\circ}\text{C}$ ,完全符合“工务规则”规定。然而回填收工后到中午时,道床横向阻力增长甚微,而轨温已达 $40^{\circ}\text{C}$ ,根据实测阻力值算得允许轨温变化幅度并考虑钢轨不均匀爬行和压力峰的影响,则到中午时,曲线无缝线路稳定性储备尚有

$$\Delta T_{\text{允}} = 36.6 - 8.4 - 16.4 = 11.8^{\circ}\text{C}$$

这时的储备显然太小了,若这时线路有较大的线路变形或道床阻力进一步遭到破坏,就很难保证无缝线路的稳定性,因此,在高温季节,特别是在曲线无缝线路的伸缩区进行垫砂起道时,应格外小心。为安全计,在安排维修计划时,最好把这些区段的维修工作安排在低温季节进行,若有困难,则这些地段维修工作在高温季节应改用捣固方法进行。

## 四、结 论

(一) 采用“横铲垫砂法”维修线路,具有省工省力、工效高、速度快等优点。根据本次试验的测试资料来看,用“横铲垫砂法”维修后的线路道床阻力,虽比捣固维修后的略低一些,但仍能基本上保证无缝线路具有较高的稳定性。由于京山线行车密度较大,维修上道的时间较少,为保证线路具有良好的质量,采用这种工效高又能保证无缝线路具有一定稳定性的“横铲垫砂法”,具有一定的现实意义。

(二) 根据试验资料,用“横铲垫砂法”维修线路后的道床纵向阻力恢复较慢,因而会使线路爬行严重或轨缝出现异常。为防止这种不利现象发生,可采取如下一些措施:

1. 垫砂后应立即回填石碴,并及时对轨枕盒与碴肩石碴进行夯拍。
2. 垫砂高度应控制在20mm以下。

(三) 由于垫砂后道床横向阻力降低且恢复较慢,对较高温季节(5、9月)维修后轨温迅速升高的无缝线路是不利的,尤其对半径小于800m的曲线无缝线路的伸缩区,由于爬行不均匀和应力峰的影响,情况可能更为严重。为了保证这些区段无缝线路的稳定性,除加强维修后的夯拍工作外,还应采取下列一些措施:

1. 垫砂时线路起道量应不大于50mm。
2. 由于垫砂后道床阻力恢复较慢,在无缝线路区段不宜反复进行垫砂作业。我们曾对维修不久又进行垫砂作业的线路道床阻力进行了测定,发现阻力比其他地段的数值小不少。因此在安排作业时垫砂起道应与垫板作业配合进行,务待线路道床密实后再进行第二次垫砂作业。
3. 对半径小于800m的曲线无缝线路的伸缩区应予以特殊注意。这些地段在较高温季节不宜采用“横铲垫砂法”进行线路维修,而应采用捣固的方法维修线路。同时,在安排维修计划时应尽量把小半径无缝线路伸缩区的维修工作安排在轨温不太高的季节进行。
4. 为增加线路框架刚度,增大线路防止无缝线路产生不正常收缩而改变原锁定轨温,不应随意宁松钢轨扣件,特别在伸缩区,一定要按规定轨温松解扣件。



(四) 长期进行垫砂作业可能会使线路弹性受到影响。对此问题除需继续进行试验研究外, 采取垫砂几年后就进行一次中修清筛道床作业的办法, 既可发挥横铲垫砂作业的优点, 又可弥补其不足, 可能是一项切实可行的措施。

综上所述, “横铲垫砂作业法”不但具有省工省时、工效高等优点, 维修后的道床阻力也能够满足无缝线路稳定性的要求。针对其道床阻力恢复较慢等问题采取上述措施后, 会进一步弥补其不足, 增强无缝线路的稳定性。因此, 只要采取相应措施, 为适应行车密度大、上道作业时间较少的线路情况采用横铲垫砂起道作业是可行的, 是能够保证无缝线路具有足够的稳定性的。