

# 确定和优化轮胎硫化时间的方法

姚钟尧

(华南理工大学 材料学院 高分子系, 广州 510640)

**摘要** 热电偶轮胎硫化测温法(简称测温法)是目前最通行的确定和优化轮胎硫化时间的方法。全面、完整和系统地介绍和讨论了热电偶测温原理和热电偶的选择、硫化程度计算的阿累尼乌斯公式、表观硫化反应活化能的测定原理、方法和注意事项、热电偶测温轮胎和其他测温准备及现代化的轮胎硫化测温仪的特征和功能。

**关键词** 轮胎 橡胶厚制品 硫化 测温法 热电偶 测温仪

中图分类号: TQ336.1<sup>+</sup>1 文献标识码: B 文章编号: 1005-4030(2005)03-0032-10

轮胎是一种典型的橡胶厚制品,其构成材料多样(橡胶、纤维、钢铁和它们之间的复合物)形状复杂。橡胶是热的不良导体。轮胎硫化是一个非稳态的传热过程,热边界也非单一,轮胎内部存在温度变化和分布,同样,硫化程度也存在变化和分布。因此,组成轮胎的各部件胶料的硫化仪曲线特性时间,诸如  $t_{90}$  等,不能直接作为轮胎的硫化时间。确定轮胎合适的硫化条件(硫化温度与硫化时间,特别是后者),是轮胎工艺技术人员必须面对和解决的问题。

确定轮胎硫化时间的方法,除了未公开披露的高新技术以外,国内外常用热电偶轮胎硫化测温法(简称测温法)<sup>[6]</sup>、气泡点法<sup>[1]</sup>(Blow point)和这 2 种方法的结合<sup>[2]</sup>。

无论用哪种方法确定轮胎硫化温度与硫化时间这 2 个条件,应当做到(1)至少在轮胎硫化最缓慢的部位(往往是最厚的部位)必须保证达到正硫化(2)轮胎硫化启模后,离开硫化机冷却期间,在相当长的一段时间内,其内部温度相当高,硫化反应还在进行,存在后硫化效应。必须利用后硫化效应,这样既避免过硫化又节能(3)最理想的状况是在硫化结束时,轮胎各部位胶料均获得最佳硫化程度,同步达到正硫化。

测温法和气泡点法相互比较,测温法自有其特点(1)依据相关的化学反应原理和数学方法计算和确定(2)适用于任何种类和规格的轮胎,对大规格和高成本的轮胎更有效(气泡点法通常

只用于较小型轮胎如轿车轮胎和轻型载重轮胎)(3)当前的轮胎硫化测温仪已能自动完成硫化测温 and 硫化计算的所有任务,轮胎硫化测温变成了快捷和轻松的事情(4)不需像气泡点法那样要多次反复硫化、解剖分析,测温法少则 1 次,多则 2~3 次便可确定轮胎的硫化时间(5)使用历史久远,人们比较熟悉。

以热电偶作为温度传感器的热电偶轮胎硫化测温技术是最常用的测温法,这种技术实际上包括硫化测温 and 硫化计算 2 部分,本节将介绍这种技术的原理、方法和仪器<sup>[3~7]</sup>。

## 1 热电偶

热电偶是温度传感器。2 条不同金属导线连接在一起的时候,便产生一电压  $U_0$ ,见图 1。 $U_0$  是连接点处温度的函数,其大小可直接用作温度的直接量度,因此  $U_0$  也被叫做热电势,这样连接的一对导线被叫做热电偶。其中,铜-铜镍(或叫康铜)热电偶,也叫 T 型热电偶;镍铬-铜镍热电偶,也叫 E 型热电偶;铁-铜镍热电偶,也叫 J 型热电偶。

仔细分析图 1,如果想测量热电偶 2 端线之间的电压,便会碰到复杂因素,由于它的开放端与电位差计的终端连接,当热电偶导线连接到电位差计的终端处时,事实上生成了附加的热电偶,如果电位差计的终端接线柱是铜,铜导线与铜接线柱的铜/铜连接不产生电压,没问题;而铜镍导线与铜接线柱的铜镍/铜连接便生成与热电偶连接点相反的电压,复杂因素掺杂进来了,这时的电压测量反映的是热电偶连接点处温度与电位差计终

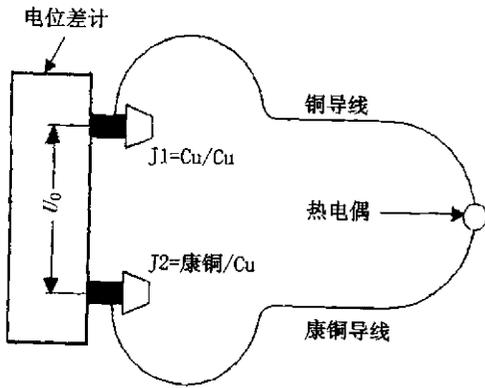


图1 热电偶测温原理电路图

端接线柱处温度之间的温差,并非单纯是热电偶连接点处的温度。克服这个问题的一种方法是将铜镍/铜电位差计连接置为已知温度 $0^{\circ}\text{C}$ (冰点),见图2,之所以选择 $0^{\circ}\text{C}$ 是因为可用冰浴精密产生和控制它。应当理解,在冰浴中的连接点的电压

不是等于0,借助冰点的附加电压测量的电压是涉及冰点连接点处温度为 $0^{\circ}\text{C}$ 的温度,“冰点连接”叫做参比端温度为 $0^{\circ}\text{C}$ 。

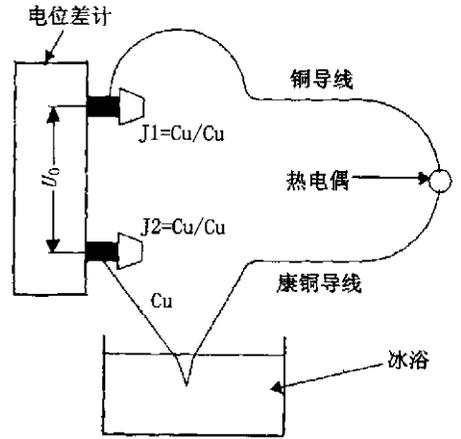


图2 参比端为 $0^{\circ}\text{C}$ 的热电偶连接

表1 铜-铜镍热电偶  $E(t)$  分度表

$t, ^{\circ}\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$E, \text{mV}$									
0	0.000	0.039	0.078	0.117	0.156	0.195	0.234	0.273	0.312	0.352
10	0.391	0.431	0.470	0.510	0.549	0.589	0.629	0.669	0.709	0.749
20	0.790	0.830	0.870	0.911	0.951	0.992	1.033	1.074	1.114	1.155
30	1.196	1.238	1.279	1.320	1.362	1.403	1.445	1.486	1.528	1.570
40	1.612	1.654	1.696	1.738	1.780	1.823	1.865	1.908	1.950	1.993
50	2.036	2.079	2.122	2.165	2.208	2.251	2.294	2.338	2.381	2.425
60	2.468	2.512	2.556	2.600	2.643	2.687	2.732	2.776	2.820	2.864
70	2.909	2.953	2.998	3.043	3.087	3.132	3.177	3.222	3.267	3.312
80	3.358	3.403	3.448	3.494	3.539	3.585	3.631	3.677	3.722	3.768
90	3.814	3.860	3.907	3.953	3.999	4.046	4.092	4.138	4.185	4.232
100	4.279	4.325	4.372	4.419	4.466	4.513	4.561	4.608	4.655	4.702
110	4.750	4.798	4.845	4.893	4.941	4.988	5.036	5.084	5.132	5.180
120	5.228	5.277	5.325	5.373	5.422	5.470	5.519	5.567	5.616	5.665
130	5.714	5.763	5.812	5.861	5.910	5.959	6.008	6.057	6.107	6.156
140	6.206	6.255	6.305	6.355	6.404	6.454	6.504	6.554	6.604	6.654
150	6.704	6.754	6.805	6.855	6.905	6.956	7.006	7.057	7.107	7.158
160	7.209	7.260	7.310	7.361	7.412	7.463	7.515	7.566	7.617	7.668
170	7.720	7.771	7.823	7.874	7.926	7.977	8.029	8.081	8.133	8.185
180	8.237	8.289	8.341	8.393	8.445	8.497	8.550	8.602	8.654	8.707
190	8.759	8.812	8.865	8.917	8.970	9.023	9.076	9.129	9.182	9.235
200	9.288	9.341	9.395	9.448	9.501	9.555	9.608	9.662	9.715	9.769
210	9.822	9.876	9.930	9.984	10.038	10.092	10.146	10.200	10.254	10.308
220	10.362	10.417	10.471	10.525	10.580	10.634	10.689	10.743	10.798	10.853
230	10.907	10.962	11.017	11.072	11.127	11.182	11.237	11.292	11.347	11.403
240	11.458	11.513	11.569	11.624	11.680	11.735	11.791	11.846	11.902	11.958

参比端为 $0^{\circ}\text{C}$

热电偶热电势和温度的关系是用它的分度公式和根据分度公式计算的分度表来描述的。

通常见到的热电偶热电势 - 温度关系的分度表,都是相对于参比端温度为 0℃ 而言的。将热电偶的热电势和温度的对应关系列成的表格称为热电偶的分度表。每种型号热电偶分度表可包括 3 种形式:第 1 种形式为 E(t) 分度表,即 E(热电势)作为 t(温度)的函数分度表,也就是常用的 t/℃ ~ E/mV 表。这种表格便于从温度值查出热电势值,它的最小温度间隔为 1℃,热电势以 mV 为单位,符合我国测温工作者的习惯。表 1 就是铜 - 铜镍热电偶 E(t) 分度表;第 2 种形式为 t(E) 分度表,即 E/mV ~ t/℃ 表。这种表适宜于从热电势值查出温度值。这类表的优点是,可以直接从现场测得的热电势按表格迅速查出温度值;第 3 种形式为 E(t), S(t) 分度表。由这种表可以从温度 t 查出热电势 E 和塞贝克系数(即热电势率 dE/dt),这对测量准确度要求较高的计量传递工作、热物理的研究工作以及有关热工程的设计等,在计算温度 - 热电势关系时十分有用。

热电偶的热电势与温度关系的参考函数关系也可用多项式表示:

$$E = \sum_{i=0}^n c_i (t_{90})^i$$

式中 E—热电势(mV); t<sub>90</sub>—1990 国际温标(ITS-90)(℃); c<sub>i</sub>—系数。

实际上,人们最关注的是热电偶测得的热电势所反映的测量端的温度,即上式的逆函数:

$$t_{90} = \sum_{i=0}^n c_i (E)^i$$

利用参考函数的逆函数可以非常方便地根据热电势值计算出相应的温度,避免繁琐的迭代计算。表 2 表示铜 - 铜镍(T 型)热电偶的参考函数及其逆函数的系数。

选用热电偶要考虑热电偶的测温范围和测温允差。热电偶的测温允差与热电偶的类型、热电偶金属线直径、测温范围和测温允差等级有关。轮胎硫化测温常用的 3 种热电偶的测温允差见表 3。

虽然 E, J, T 型热电偶是标准化热电偶,但是市面上这 3 种热电偶的组成和技术指标未必都符合标准规定,一般的应用者可从测温允差来检验它们,如果测温允差过得去,一般也便可应用。

表 2 铜 - 铜镍(T 型)热电偶的参考函数及其逆函数的系数

参考函数	参考函数的逆函数
	温度范围 0℃ ~ 400℃
温度范围 0℃ ~ 400℃	热电势范围 0.0mV ~ 20.872mV
C <sub>0</sub> 0.000 000 0...	0.000 000 0...
C <sub>1</sub> 3.874 810 636 4 × 10 <sup>-2</sup>	2.592 800 × 10 <sup>1</sup>
C <sub>2</sub> 3.329 222 788 0 × 10 <sup>-5</sup>	-7.602 961 × 10 <sup>-1</sup>
C <sub>3</sub> 2.061 824 340 4 × 10 <sup>-7</sup>	4.637 791 × 10 <sup>-2</sup>
C <sub>4</sub> -2.188 225 684 6 × 10 <sup>-9</sup>	-2.165 394 × 10 <sup>-3</sup>
C <sub>5</sub> 1.099 688 092 8 × 10 <sup>-11</sup>	6.048 144 × 10 <sup>-5</sup>
C <sub>6</sub> -3.081 575 877 2 × 10 <sup>-14</sup>	-7.293 422 × 10 <sup>-7</sup>
C <sub>7</sub> 4.547 913 529 0 × 10 <sup>-17</sup>	.....
C <sub>8</sub> -2.751 290 167 3 × 10 <sup>-20</sup>	.....

表 3 3 种热电偶的测温允差等级

类型	1 级允差	2 级允差	3 级允差
T 型 温度范围	-40 ~ +125℃	-40 ~ +133℃	-67 ~ +40℃
允差值	±0.5℃	±1℃	±1℃
温度范围	125 ~ 350℃	133 ~ 350℃	-200 ~ -67℃
允差值	±0.004 t	±0.007 5 t	±0.015 t
E 型 温度范围	-40 ~ +375℃	-40 ~ +333℃	-167 ~ +40℃
允差值	±1.5℃	±2.5℃	±2.5℃
温度范围	375 ~ 800℃	333 ~ 900℃	-200 ~ -167℃
允差值	±0.004 t	±0.007 5 t	±0.015 t
J 型 温度范围	-40 ~ +375℃	-40 ~ +333℃	—
允差值	±1.5℃	±2.5℃	—
温度范围	375 ~ 750℃	333 ~ 750℃	—
允差值	±0.004 t	±0.007 5 t	—

参比端为 0℃

虽然 E, J, T 型热电偶的负极 EN, JN, TN 都是铜镍合金,但具体成分比例不同,例如,在美国 T 型热电偶的负极材料为商品“ADAMS”康铜, J 型热电偶的负极材料为商品“SAMA”康铜,故应注意它们之间不能互相替换,否则会造成大的误差。

热电偶测温的一个缺点是测温准确度难以超过 0.2℃。有些人将热电偶测得的温度表示到小数点后第 3 位是不合实际和没有道理的。

E, J, T 型热电偶一般都是廉金属热电偶。E 型热电偶的测温范围 -200 ~ +800℃, J 型热电偶 -210 ~ 1200℃, T 型热电偶 -200 ~ +400℃。

T 型热电偶的特点是热电性能好,电势与温度关系近似线性,而且热电势值大、灵敏度高、复制性好,是一种准确度高的廉金属热电偶,在 0 ~ -100℃ 范围内,可作二等标准热电偶使用。T 型

热电偶可以在还原性、氧化性、惰性气氛及真空中使用。不过铜易氧化,故使用温度不得超过 $350^{\circ}\text{C}$ ,而且铜的导热系数高,低温测量时易产生误差。

J型热电偶,由于负极是纯铁,氧化速度快,易生锈,使用时应对热电极进行处理。这种热电偶不能在高温( $540^{\circ}\text{C}$ 以上)含硫的气氛中使用。

E型热电偶的热电势率大,属所有热电偶中最大,易于制成热电堆,测量微小变化的温度。它的耐热性和抗氧化性能都比J型和T型热电偶好,它适宜在 $0^{\circ}\text{C}$ 以下使用,而且在湿度大的情况下较其他热电偶更耐腐蚀,但不适宜在还原性及含硫、碳和卤族的气氛中使用。这种热电偶的缺点是负极加工较困难,均匀性也较差,在热中子照射下易发生热电势漂移。

图2的整个装置实际上就是一种测温装置——原始而简陋的测温装置,在上世纪70年代前,国内正是用这样的装置加上一个转换器进行多路热电偶轮胎硫化测温的,其艰难、麻烦和不精确是可想而知的。

现在轮胎硫化测温已有现代化仪器可用,例如华南理工大学轮胎CAD组姚钟尧等研制的轮胎硫化测温仪<sup>[6,7]</sup>。这种仪器能自动完成硫化测温 and 硫化计算2部分技术的全部任务,测温范围室温 $\sim 250^{\circ}\text{C}$ ,测温允差小(T型热电偶, $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ),测温热电偶参比端既不用冰浴,也不需补偿导线,温度补偿可随室温变化自动实现,可同时测定和计算热电偶轮胎20个点的温度和硫化程度。

## 2 硫化计算

轮胎硫化测温能得到位置—时间—温度3者的数据,这只是测温的初始目标,终极目的是根据测温数据,求得测温胎各部位各自的最高温度,并计算各部位胶料的硫化程度——包括后硫化造成的硫化程度,从而确定或调整硫化工艺条件——主要是硫化时间。这是一项专门技术,叫做硫化计算技术(CURE CALCULATION)。

硫化计算技术涉及硫化计算理论、活化能的测定、计算时间—温度数据、分析测温点数据是否符合硫化极限要求、调整硫化时间以便适合厚度的变化、调整硫化工艺条件等。除了后2者之外,现代化硫化测温仪必须能代替人工完成,而华南理工大学轮胎CAD组研制的轮胎硫化测温仪都

能完成。

橡胶胶料的硫化仪曲线是计算硫化程度和确定硫化时间的一种基本依据,然而,来自任何给定的硫化仪曲线的信息是在一个恒定的温度下产生的,只在这个硫化仪测定的温度下是有效的。而一个加压硫化的轮胎承受一个变化的温度范围,即轮胎各部位胶料是在变温下硫化的。有一个众所周知的阿累尼乌斯关系式,它将一种温度的硫化信息与不同温度的硫化信息联系起来。这种相互关系的最简单形式可用下式(1)表示:

$$\frac{t_1}{t_2} = e^{\frac{E}{R}(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2})} = \frac{v_2}{v_1} \quad (1)$$

式中 $t_1$ 是温度 $T_1$ 的时间, $t_2$ 是温度 $T_2$ 的时间, $E$ 是活化能, $R$ 是气体常数, $T_1$ 和 $T_2$ 是开氏(Kelvin)温度(即绝对温度), $v_1$ 和 $v_2$ 分别是在温度 $T_1$ 和 $T_2$ 下的硫化速率。

定义 $v_0$ 为在已知温度 $T_0$ 下计算的已知速率(取自在 $T_0$ 运行的硫化仪曲线),在任意温度 $T$ 下的速率 $v$ 可以参照在温度 $T_0$ 下的 $v_0$ ,从而 $T_0$ 变为参比温度。因此上式(1)变为下式(2):

$$\frac{v}{v_0} = e^{\frac{E}{R}(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T})} \quad (2)$$

通过将参比温度 $T_0$ 的硫化速率 $v_0$ 赋值为1.0,上式(2)可进一步简化为式(3):

$$v = e^{\frac{E}{R}(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T})} \quad (3)$$

这时称 $v$ 为相对硫化速率(或等效硫化速率, equivalent cure rate)。可以从任何热电偶位置选择数据计算任意时刻的 $v$ 并画成像图3一样的相对硫化速率—时间曲线。

图3中速率—时间曲线下方的面积应当代表相对于参比温度 $T_0^{\circ}\text{C}$ 的相对硫化量。由于笔者武断地给该参比温度的硫化速率 $v_0$ 赋值为1.0,因此,把曲线下方的面积叫做等效硫化程度或硫化等效时间(cure equivalent time,下文使用简称EQT),即

$$\text{EQT} = \int_0^t e^{\frac{E}{R}(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T})} dx \quad (4)$$

式中 $x$ 是时间变量, $t$ 是硫化时间,其他变量和参数的意义如上述。

简单说来,硫化计算的原理就是通过阿累尼乌斯关系式,把已收集的测温点时间—温度数据、硫化仪曲线数据和测温轮胎每一区域的硫化程度联系起来,EQT(等效硫化时间)是相对硫化速率

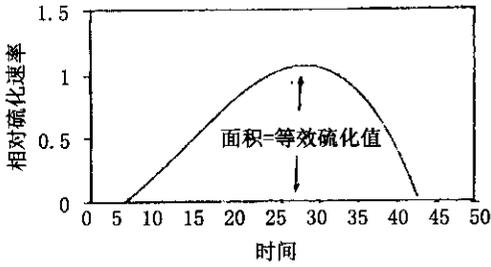


图3 计算胶料在变温下硫化的等效硫化时间原理图  
对硫化时间的定积分。

这个定积分在计算中实际上不是对函数积分而是采用离散的温度数据进行近似计算,因此,计算中所用的时间间隔  $\Delta x$  大小将影响硫化程度值。华南理工大学轮胎 CAD 组的测温仪设置采样周期有 5s, 10s, 15s, 20s, 30s 和 60s 等 6 档可供选用,采样周期即是计算硫化程度的时间间隔  $\Delta x$ ,采样周期越小,计算硫化程度的误差便越小。

华南理工大学轮胎 CAD 组的测温仪依据式(4),可以用测温数据计算各测温点某一时间间隔的等效硫化时间、到某一时刻累计的等效硫化时间、总的等效硫化时间、后硫化效应和同步硫化的情况。

### 3 活化能的测定

由式(4)可以看到,要进行测温轮胎的硫化计算,必须给出橡胶硫化反应活化能  $E$  值,即必须测定活化能。

轮胎硫化实质上是一个化学反应——橡胶硫化(交联)反应过程,因此可以应用阿累尼乌斯方程式描述硫化反应速率  $k$  与温度  $T$  关系:

$$k = Ae^{-\frac{E}{RT}} \quad (5)$$

式中  $k$  是反应速度常数,  $A$  是一个常数(叫频率因子),  $E$  是活化能 [J/(mol·K) 或 kcal/mol],  $R$  是气体常数 [等于 8.3144J/(K·mol) 或是 1.987 cal/(K·mol)],  $T$  是温度。在阿累尼乌斯方程式中,温度必须用绝对温度 [K(开氏 kelvin)温度 K, K = 273 + °C] 表示。

阿累尼乌斯方程式(5)是测定硫化反应表现活化能  $E$  的依据。对式(5)2 边取对数得:

$$\ln k = \ln A - \frac{E}{R T} \quad (6)$$

硫化仪试验曲线能够确定在某一恒定温度胶料的硫化特性时间  $t^\circ$  ( $t^\circ$  代表  $t_{10}$ ,  $t_{25}$ ,  $t_{50}$ ,  $t_{75}$  和  $t_{90}$  等)。这些特性时间参数的倒数  $1/t^\circ$  (例如  $1/t_{90}$ )

可以表征反应速度常数  $k$ , 即  $k = 1/t^\circ$ 。

以  $1/t^\circ$  代替式(6)中的  $k$ , 并令  $Y = \ln t^\circ$ ,  $X = 1/T$ ,  $a = -\ln A$ ,  $b = E/R$ , 则式(6)转变成直线方程(7):

$$Y = a + bX \quad (7)$$

如果直线方程(7)的斜率  $b$  确定了,则活化能由  $E = bR$  也就可求出。

显然,可以采用硫化仪试验确定活化能  $E$  这个问题就是硫化仪试验数据组( $T_i, t_i^\circ$ ) ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) ( $T, t^\circ$ ) 的直线方程拟合问题,拟合的方法是\*\*最小二乘法\*\*。

假设做硫化仪试验,得到同一胶料在不同温度的不同硫化特性时间  $t^\circ$  的数据( $T_i, t_i^\circ$ ) ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 表示  $N$  组观测数据,即  $N$  个观测点。( $T_i, t_i^\circ$ ) 可转变为 ( $X_i, Y_i$ ), 计算  $X_i$  及  $Y_i$  的平均值如下:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, \quad \bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i \quad (8)$$

确定直线(7)所根据的原则是使该直线与所有观测数据误差的平方和达到极小值。由于平方运算也称为“二乘”运算,因此上述求直线的方法通常称为\*\*最小二乘法\*\*。由最小二乘法可推知直线方程(7)截距  $a$  和斜率  $b$  的计算公式:

$$a = \bar{Y} - b\bar{X} \quad (9)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N X_i Y_i - \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N X_i) (\sum_{i=1}^N Y_i)}{\sum_{i=1}^N X_i^2 - \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N X_i)^2} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (10)$$

由于计算  $a, b$  的式(9)(10)中所有的量都可从观测数据中得出,因此由直线方程(7)

$$Y = a + bX$$

便可确定。

为了更清晰明确表示求直线方程(7)的计算式和步骤,令

$$l_{XX} = \sum X^2 - \frac{1}{N} (\sum X)^2 \quad (11)$$

$$l_{YY} = \sum Y^2 - \frac{1}{N} (\sum Y)^2 \quad (12)$$

$$l_{XY} = \sum XY - \frac{1}{N} (\sum X)(\sum Y) \quad (13)$$

因此,将上列3式分别代入式(10)和(9),可得:

$$b = \frac{l_{XY}}{l_{XX}} \quad (14)$$

$$a = \bar{Y} - b \bar{X} \quad (15)$$

$$r = \frac{\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X - \bar{X})^2 \cdot \sum(Y - \bar{Y})^2}} = \frac{l_{XY}}{\sqrt{l_{XX} \cdot l_{YY}}} \quad (16)$$

式(16)中  $r$  是相关系数。在直线问题的回归分析中  $r$  是描述 2 个相关变量线性关系的密切程度的一个数量性的指标,而在本问题中,由于变量  $Y$

表 4 求直线方程的计算步骤

$\sum X$	$\sum Y$	$N$
$\bar{X}$	$\bar{Y}$	
$\sum X^2$	$\sum Y^2$	$\sum XY$
$(\sum X)^2/N$	$(\sum Y)^2/N$	$(\sum X)(\sum Y)/N$
$l_{XX}$	$l_{YY}$	$l_{XY}$

( $\ln t^e$ )和  $X(1/T)$ 是确定的函数关系,因此,笔者认为可将  $r$  当成衡量试验稳定性(试验误差,试验数据离散度)的尺度。求直线方程的计算步骤总结在表 4 中。

上述的直线拟合方法,实际上也是一元线性回归分析所用的方法。

依据上述原理和方法编制程序,使之成为所研制的轮胎硫化测温仪系统的求硫化反应活化能模块<sup>[6]</sup>,可以快捷和方便地用胶料的硫化仪试验数据确定胶料的硫化反应活化能。表 5 是桦林集团有限责任公司韩雷等确定子午线轮胎测温部位用胶的活化能试验数据和结果<sup>[10]</sup>。由于原始试验数据完整,可应用测温仪系统的求硫化反应活化能模块计算活化能,算得的结果也列在表 5 中未列。对照 2 者的计算结果,可以说是一致的或基本相同的。

表 5 子午线轮胎测温部位用胶的活化能

( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ )

部 件	151℃	161℃	171℃	181℃	韩雷等人所测数据		测温仪系统所测数据	
	$\times t_{90}$	$\times t_{90}$	$\times t_{90}$	$\times t_{90}$	活化能	相关系数	活化能	相关系数
胎面胶	13.55	7.37	3.55	1.97	101.7	0.9983	104.3	0.9991
胎侧胶	18.52	9.67	5.07	2.68	100.8	0.9991	103.1	0.9999
垫肩胶	7.27	3.92	2.20	1.27	90.9	0.9996	93.0	1.0000
胎体胶	11.80	4.98	2.57	1.40	110.9	0.9991	113.1	0.9980
带束层胶	14.87	7.47	3.83	2.08	103.1	0.9995	105.1	1.0000
上三角胶	11.42	6.00	3.30	1.85	95.0	0.9997	97.0	1.0000

采用硫化仪试验确定活化能  $E$ ,要注意几个问题:

(1)根据试验数据的直线方程拟合,观测点数应不小于 5 个。一般在  $100^\circ\text{C} \sim 180^\circ\text{C}$  范围选择四五个不同的温度做试验。在试验之前确定计算等效硫化时间的参比温度,最好在参比温度下做重复试验。

(2)为了把热电偶测温数据转化为硫化等效值,参比温度的选择应是严格的,因为活化能  $E$  出现在计算的 EQT 的  $e$  幂中[见式(4)],测定的温度愈超过参比温度,则计算中的误差几率愈大。

(3)自同一批胶料而不同生产工序的,所测定的硫化特性时间  $t^e$  数值往往不同,因此活化能  $E$  也不同,见表 6。

(4)据文献介绍,选用  $t_{10}$  和  $t_{90}$  确定活化能  $E$  都可以,国外采用  $t_{10}$  的情况较多,国内通常选用

$t_{90}$ 。国外认为硫化机硫化尼龙载重胎,启摸时达到 70% 以上较宜,对于子午线轮胎则提出用气泡点  $t_b$ (与轮胎不出现气泡的最小硫化时间对应的等效硫化时间)作为在硫化机中加压硫化时间。

(5)由本文方法测定的活化能是橡胶硫化反应的表观活化能,是当反应活化能在整个硫化反应温度范围是恒定不变的。因此,应当尽可能选定有代表性的观测点做硫化仪试验。

(6)由式(4)可知,若活化能以  $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$  为单位,它的值在千位上发生变化,则 EQT 值随之变化不大,并不敏感。在电脑不普及的时代,可能由于这个原因,国外的轮胎生产厂家将轮胎测温各部件胶料的反应活化能通通当成:有的是  $20.6\text{kcal}/\text{mol}$ ( $86310\text{ J}/\text{mol}$ );有的是  $22\text{kcal}/\text{mol}$ [ $92090\text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ];有的是  $22.8\text{kcal}/\text{mol}$  即 [ $95390\text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ]。实际上,活化能  $E$  值是随

胶料配方变化的,这一点从表2各部位用胶的活化能值差异也能看出。提倡各部位胶料使用各自的活化能值计算EQT。

表6是某厂轮胎A8胶料在不同工序的硫化仪试验数据和应用测温仪系统模块确定的活化能。表中的 $r_{0.05}(16)$ 是描述相关系数临界值的符号,下标0.05是显著性水平值,16是剩余平方和自由度,其值 $=N-2=18-2=16$ ( $N$ 是数据样本数)。其他相关系数临界值符号意义与此相仿,相关系数临界值可从回归分析或数理统计书籍的相关系数检验表查得。可以清楚看到,同一胶料在不同工序的 $t_{90}$ 明显不同,由此算得的活化能也明显不同。

采用表6中试验编号1,7,13和18的试验数据求活化能,这些数据 and 结果列在表7中。可以

看到,由于数据样本数少( $N=4$ ),计算结果的 $E$ 和 $r$ 值又明显与表6中值不同。请注意A8压出胶的 $r=0.3389$ ,远小于相关系数临界值 $r_{0.05}(2)=0.950$ 和 $r_{0.01}(2)=0.990$ 。从数理统计来说,这意味着有95%或99%把握说式(3)中变量 $Y$ 和 $X$ 的线性关系不成立。然而,这个结论有悖客观规律——变量 $Y(\ln t^{\circ})$ 和 $X(1/T)$ 是确定的线性关系。所以,应在试验的稳定性上检查问题——试验误差太大,试验数据太离散。在本例中应将 $r$ 当成衡量试验稳定性的尺度。

列表6和表7这些例子,无非说明(1)必须有足够的数据样本数(2)保证试验的稳定性;(3)适当做重复实验。从试验设计原理考虑,测温仪系统要求数据样本数 $N$ 不得小于5。

表6 某厂A8胶料不同工序的硫化仪曲线 $t_{90}$ 及其硫化反应表观活化能

试验编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
试验温度 $T, ^{\circ}C$	140	140	140	140	140	140	150	150	150
$t_{90}, \mu\text{min}$									
原片胶	30.75	32.50	35.00	30.85	32.40	34.80	16.75	22.00	21.00
压出胶	23.00	22.00	22.25	21.75	28.00	27.50	14.75	14.90	15.30
试验编号	10	11	12	13	14	15	16	17	18
试验温度 $T, ^{\circ}C$	150	150	150	160	160	160	160	160	160
$t_{90}, \mu\text{min}$									
原片胶	19.00	19.70	18.80	10.20	10.70	11.13	10.00	11.25	10.65
压出胶	15.90	16.50	16.00	9.25	9.50	9.00	9.00	9.50	9.30
计算结果									
原片胶	活化能 $E=83304.57$ ( $J/(mol \cdot K)$ )				相关系数 $r=0.9890$				
压出胶	活化能 $E=70601.57$ ( $J/(mol \cdot K)$ )				相关系数 $r=0.9835$				
相关系数临界值	数据样本数 $N=18$ $r_{0.05}(16)=0.468$				$r_{0.01}(16)=0.590$				

表7 A8胶料4组硫化仪曲线试验数据求硫化反应表观活化能

试验编号	1	7	13	18
试验温度 $T, ^{\circ}C$	140	150	160	160
A8 原片胶 $t_{90}, \mu\text{min}$	30.75	16.75	10.20	10.65
A8 压出胶 $t_{90}, \mu\text{min}$	23.00	14.75	9.25	9.30
A8 原片胶计算结果	活化能 $E=81872.8$ ( $J/(mol \cdot K)$ )		相关系数 $r=0.9642$	
A8 压出胶计算结果	活化能 $E=69541.9$ ( $J/(mol \cdot K)$ )		相关系数 $r=0.3389$	
相关系数临界值	数据样本数 $N=4$ $r_{0.05}(2)=0.950$		$r_{0.01}(2)=0.990$	

#### 4 热电偶轮胎的准备

热电偶轮胎测温开始之前须具备下列条件:  
(1)所研究的轮胎结构和配方(硫化特性)必须已经确定,如果以后厚度和硫化特性发生改变,则热

电偶测定价值很小(2)硫化工艺条件已确立;(3)硫化胶囊符合标准(厚度已知且均匀一致);(4)所选用的硫化机和硫化模型必须是正常和令人满意的,硫化机和模型系统之间已达到温度平衡(5)硫化中的硫化介质是令人满意的,外温、

内温和内压在工艺规定范围之内,循环水流量在规定范围之内(6)埋置热电偶后的胎坯厚度在工艺规定范围之内,胎坯温度符合正常条件。

测温前要选择好所需测量的点,这些点一般是有代表性的点、受关注的点,诸如胎肩区域(尤其对大型轮胎),胎圈部位、特别是采用大三角胶的胎圈部位(三角胶区域),生胶较厚处,第2,3带束层末端,带束层与胎面胶之间,带束层与胎体之间,气密层接头处。可在最关注部位和区域应设多点,还应考虑轮胎在上、下模型时对应点、对称点的设定。图4表示轮胎硫化测温的测温点。

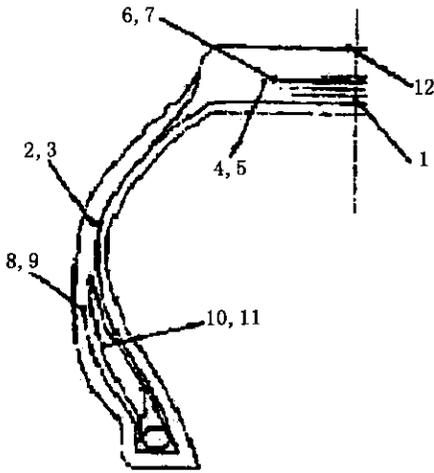


图4 热电偶轮胎测温点的分布

1 - 在胎体与第1带束层之间;2 - 在胎侧最薄处(上模);3 - 在胎侧最薄处(下模);4 - 在第3带束层末端(上模);5 - 在第3带束层末端(下模);6 - 在第3带束层末端上5mm处(上模);7 - 在第3带束层末端上5mm处(下模);8 - 在胎体反包末端(上模);9 - 在胎体反包末端(下模);10 - 在胎圈部分最厚部分的中心(上模);11 - 在胎圈部分最厚部分的中心(下模);12 - 在胎冠与模型之间(要避开花纹沟)

作为温度传感器的热电偶线,可在成型时安置于轮胎内需测量的点,也可在已成型的胎坯中埋设。

如果采用胎坯埋热电偶线,一般做法是:将生胎的2侧胎侧胶在胎冠接头处用刀划开,用汽油将胎侧扒开,再把胎冠的接头扒开,将事先准备好的编号热电偶线按照图4的测量点埋线。埋在轮胎内部的测温线要保留足够的长度,例如让测温点端线成蛇形段,并用薄胶片固定,避免定型时因生胎膨胀而拉断热电偶。所有测量点的线全部埋好后,再把胎冠和胎侧分别压合到原状态。部分轮胎在胎肩部分有花纹,在这些位置埋线时在胎冠相应位置画标记,装胎硫化时使标记部分尽量

避开花纹沟部分。

在实际测温之前,还要解决多路热电偶线穿过硫化机的问题。对于2半模硫化机,事情比较简单,例如,在分型面放置具有缺口的薄软铜环就可解决问题。对于活络模硫化机,有的厂是让热电偶线通过胶囊下钢圈卡环上开的 $\Phi 10$ 孔(不测温时可用铝块堵住,正常使用),通过下侧板空隙,在蒸气室硫化机的下气室的预留口处出来(热板式硫化机可从下环排水),之后与测温仪连接。

测温不单要测轮胎在硫化机中加压加热期间的内部温度,还必须测轮胎脱模冷却期间的温度。因为轮胎脱模后,其内部温度仍很高,自身继续硫化,俗称后(期)硫化。轮胎越厚,后硫化效应越大,不可忽视,所以测温时要测定冷却期间各点的温度,直到 $100^{\circ}\text{C}$ 或 $120^{\circ}\text{C}$ 以下,以便计算各点的后硫化效应。

## 5 现代化的轮胎硫化测温仪

华南理工大学轮胎CAD组研制的轮胎硫化测温仪,能自动完成硫化测温 and 硫化计算2部分技术的全部任务,已在广州珠江、宝力、华南轮胎公司、辽宁浪马轮胎公司、天津国际联合轮胎公司、山东成山和玲珑轮胎公司、上海轮胎研究所、杭州中策的总厂、朝阳、永固和新安江等4个工厂,河南风神轮胎公司、贵州轮胎公司和前进公司等轮胎厂应用,其可靠性、实用性和先进性已被用户认可,声誉很好<sup>[7-9]</sup>。

这种测温仪,主要由数据采集器和笔记本型电脑构成,采用基于WINDOWS的Borland C++ Builder 5做开发工具和面向对象的编程技术,从而组成分布式计算机测温系统。

测温仪的用途和功能,简要地说,是在轮胎硫化时间同时测定20个部位在不同时刻的温度,并且在测温的同时可计算各部位的等效硫化时间。测温一结束,测温仪便可立即输出测温数据文件和各种图表——诸如测温点时间-温度曲线图、位置-时间-温度-EQT数据表、“各测温点等效硫化效应计算结果表”、“轮胎硫化测温试验综合报告表”和“轮胎硫化测温报告表”等。

研制者已有多篇论文叙述仪器的技术指标、性能、功能和特点<sup>[6-7]</sup>,这里只选取该测温仪的其中一个界面略作介绍。图5是测温仪的测温对话

框图5中:

(1)右上方设置了“开始测温”、“关闭二次水”、“启模”、“暂停测温”、“继续测温”、“结束测温”等6个按钮,它们覆盖了硫化测温过程必须和可能发生的操作,由它们引起的连锁效应都在数据文件和数据输出中反映出来。

(2)开始测温之后,在这些按钮下方的“开始测温时间”、“累计测温时间”也跟着显示,当然,“系统时间”是一到此界面便显示着和一直显示到底。

(3)界面的主要部分是“各测温点在各个时

刻(s)的对应温度(℃)”表。表中“ No. 1 ,No. 2 , ..... ,No. 20 ”这一行表示测温点的编号,即测温位置,最左边一列是时间列,其中910SG是关闭二次过热水的时间;时间列还含EQT栏,其值表示到该时刻时的累计等效硫化时间,OK!表示该测温点的等效硫化时间在该时刻已等效它的 $t_{90}$ 。(图5中出现5处“OK!”例如在No.1列与850S EQT行交叉处有一个)。此例是“测温同时计算等效硫化时间”,因此,这个图(实际上是表)是“位置-时间-温度-EQT”表。

硫化测温仪(华南理工大学轮胎CAD组研)

文件(F) 显示(S) 工具(T) 帮助(H)

测温的点数: 20 测温周期: 10 秒

开始测温 关闭二次水 启模 暂停测温 继续测温 结束测温

系统时间: 16:41:04 开始测温时间: --- 测温累计时间: ---

各测温点在各个时刻(秒)的对应温度值(℃)

注: 单纯测温时双击鼠标左键可修改数据!

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12	No.13	No.14	No.15	No.16	No.17	No.18	No.19	No.20
788S	152.9	156.5	159.1	157.1	158.1	156.4	163.2	155.9	161.9	157.2	152.9	158.7	155.9	159.5	160.9	155.8	164.8	156.1	161.1	159.0
EQT	298	365	776	882	449	789	983	OK!	596	878	274	OK!	678	1035	518	783	867	856	1559	827
798S	153.2	156.9	159.2	157.1	158.4	156.5	163.1	158.1	162.2	157.2	153.2	157.1	158.1	158.5	160.3	155.9	165.1	156.1	171.7	159.0
EQT	383	OK!	794	967	664	775	928	571	617	893	288	396	890	1052	528	782	836	878	1599	944
808S	153.4	157.2	159.3	157.2	158.8	158.5	163.4	168.2	162.4	157.3	153.5	157.4	156.2	159.5	160.4	155.1	165.2	156.2	118.5	159.0
EQT	316	387	811	822	488	789	953	588	639	968	289	412	785	1069	545	795	924	884	1680	951
818S	153.8	157.4	159.5	157.3	158.8	158.8	163.4	168.4	162.5	157.3	154.8	157.7	156.3	158.6	160.8	155.1	165.4	156.3	74.4	168.0
EQT	328	413	829	837	486	893	978	886	661	923	312	429	211	1006	OK!	889	953	899	1698	978
828S	154.2	157.7	159.8	157.3	159.2	158.6	163.5	168.5	162.8	157.4	154.3	158.1	158.4	159.8	160.9	155.2	165.4	156.4	116.3	168.8
EQT	341	428	847	862	512	817	888	823	683	837	325	486	734	1184	588	821	882	712	1681	986
838S	154.4	158.1	159.7	157.3	159.4	158.7	163.6	168.6	163.0	157.4	154.7	158.3	158.6	159.7	161.2	155.2	165.7	156.4	136.2	168.1
EQT	354	446	865	867	529	831	903	641	766	962	339	483	748	1121	599	835	1092	726	1085	1012
848S	154.8	158.4	159.7	157.5	159.8	158.9	163.5	168.8	163.1	157.5	155.8	158.8	158.7	159.7	161.4	155.2	165.8	156.5	138.2	168.1
EQT	368	484	883	883	546	848	955	858	729	967	353	488	784	1138	617	848	1042	741	1082	1029
858S	155.2	158.7	159.8	157.5	159.8	163.9	169.3	163.3	157.6	155.4	158.9	158.8	159.7	161.8	156.3	165.9	165.5	166.5	106.1	168.1
EQT	OK!	481	901	908	OK!	889	891	676	752	882	367	498	779	1155	635	861	1072	755	1088	1046
868S	155.4	158.1	159.8	157.8	168.1	158.9	163.8	161.1	163.5	157.5	156.7	158.2	158.9	159.8	161.8	155.5	168.1	156.5	108.8	168.1
EQT	397	489	820	1012	879	875	1108	694	775	892	OK!	516	785	1173	854	875	1182	789	1888	1063
878S	155.9	158.3	160.1	157.8	168.2	157.8	163.9	161.2	163.7	157.7	155.9	158.4	157.8	158.9	162.8	155.4	166.2	156.6	104.7	168.1
EQT	411	518	938	1029	697	889	1134	712	788	1012	386	535	818	1198	673	888	1133	783	1688	1088
888S	156.8	159.5	168.2	157.8	168.4	157.1	163.9	163.9	157.8	158.2	158.7	157.1	158.9	162.1	155.5	166.3	158.8	123.9	168.2	
EQT	426	536	957	1044	814	984	1188	738	823	1027	411	564	825	1288	692	981	1184	797	1018	1097
898S	156.2	158.7	168.2	157.7	168.7	157.2	163.9	161.4	164.8	157.8	158.5	158.9	161.2	159.8	162.6	156.6	168.4	158.8	168.2	164.2
EQT	441	555	875	1088	831	919	1188	748	847	1043	426	573	841	1225	711	915	1195	812	1629	1097
908S	156.5	168.8	168.3	157.8	168.3	157.3	164.8	161.5	164.1	157.9	158.8	160.1	157.4	168.8	162.7	165.7	166.5	158.8	2.2	168.3
EQT	456	674	984	1075	849	933	1213	787	871	1059	442	582	857	1243	731	829	1226	826	1623	1115
918SG	158.6	168.2	168.4	157.7	181.1	157.3	164.8	161.6	164.3	157.9	157.1	158.4	157.4	168.8	162.9	155.8	168.8	158.8	68.8	168.4
EQT	472	584	1013	1091	887	948	1238	785	895	1073	458	612	872	1289	758	842	1257	648	1623	1132

文件(F) 显示(S) 工具(T) 帮助(H)

文件名: 0731.txt

图5 轮胎硫化测温仪的测温对话框(位置-时间-温度表中含EQT值)

(4)由“位置-时间-温度-EQT”表(图5)可看出20个测温点数据是同时、连续和连片的同屏显示而不是单点和单一时刻显示,还可前后左右滚动阅读。这种显示方式有利于监测和及时地硫化操作,有许多好处。此外,还可看到各测温点某一时间间隔的等效硫化时间、到某一时刻累计的等效硫化时间、总的等效硫化时间、后硫化效应和同步硫化的情况。

(5)在表名旁可看到提示语——“注:单纯测温时,双击鼠标左键可修改数据”。这只是3种

温度数据修正功能中的1种。  
(6)界面上方有“文件”、“显示”、“工具”和“帮助”等4个菜单项,这些菜单还有下拉的2级或3级菜单项,其中的每一项,实际上就是一项功能。

单单从上述这个界面的功能和表现,可领略该测温仪的实用性、可靠性和先进性。当然,测温仪系统有多个功能模块、界面和对话框,共同支持测温仪自动完成硫化测温 and 硫化计算2部分技术必须完成的全部任务。下面仅简述测温仪根据测

温数据所输出的图表 :图 6 是数据曲线分析对话框 ,图中的选择框和按钮显示了测温仪系统绘制和打印测温点的时间 - 温度曲线的功能 :绘制 20 个测温点中任意一点的时间 - 温度曲线 ,一次性

可任选 6 条曲线迭合在同一图中 ,不同编号的曲线用不同颜色表示(见图 6 右上方) :曲线也可缩小或放大 ;分 4 次调用显示曲线功能 ,便可显示 20 个点的温度 - 时间曲线。

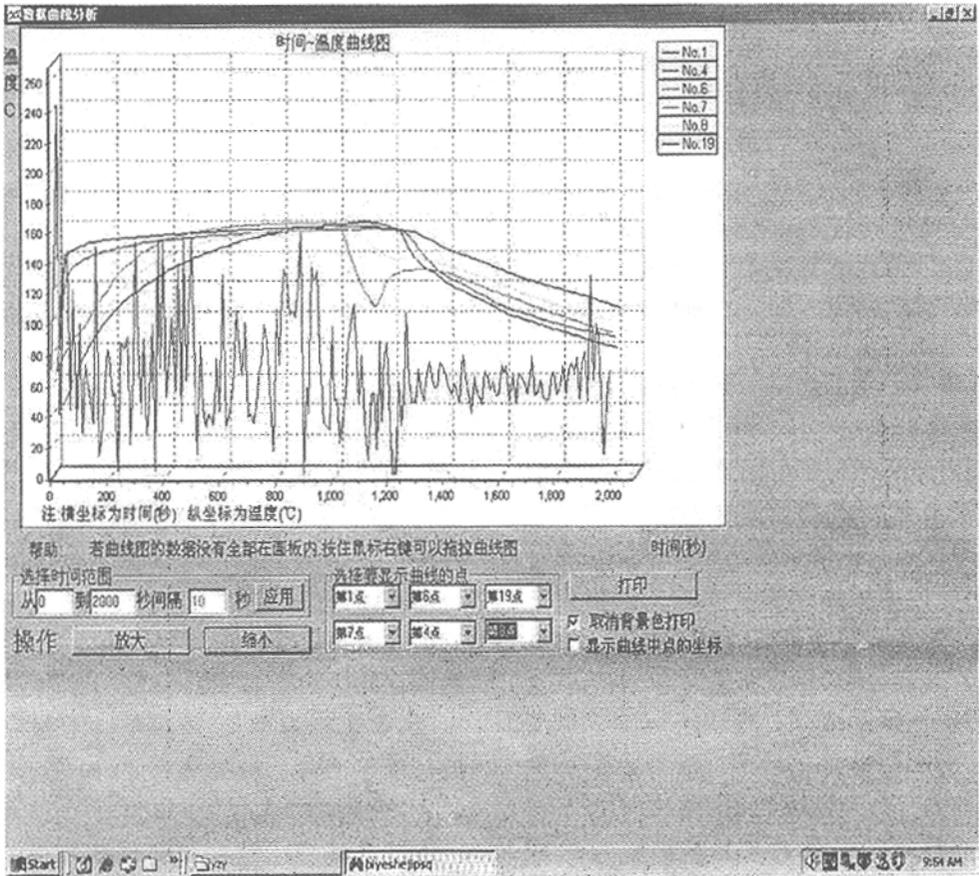


图 6 3. X 版硫化测温仪的数据曲线分析框

时间 - 温度曲线图的另一个用处是能够帮助用户很容易地检查测温热电偶是否失效、是否异常和有效的测温热电偶有无异常点。例如 ,图下方有一条许多脉冲的曲线( No. 19 褐红色 ) ,这是异常数据 ,因为热电偶 No. 19 断了。当发现有效热电偶有异常点时 ,配合测温仪系统的文件转换和温度数据修正功能 ,则可方便地修正异常点 ,使数据资源有效和充分利用。

“各测温点等效硫化时间计算结果表”包含测温位置、 $T_0/^\circ\text{C}$  ,  $t_{90}/\text{s}$  ,  $F/J(\text{mol} \cdot \text{K})$  , 启模时的  $\text{EQT}/\text{s}$  , 总的  $\text{EQT}/\text{s}$  , 后硫化  $\text{EQT}/\text{s}$  , 硫化程度 /% 等栏目。

“轮胎硫化测温试验综合报告表”兼有“轮胎硫化测温报告表”和 2 者的主要内容 ,特别是能显示每一测温点的最高温度。它包含测温位置、最高温度/ $^\circ\text{C}$ 、启模温度/ $^\circ\text{C}$ 、启模时的  $\text{EQT}/\text{s}$ 、总的  $\text{EQT}/\text{s}$ 、后硫化的  $\text{EQT}/\text{s}$ 、硫化程度 /%。

位置 - 时间 - 温度 -  $\text{EQT}$  等数据文件 ,类似图 5 和图 6 以及“各测温点等效硫化时间计算结果表”、“轮胎硫化测温试验综合报告表”和“轮胎硫化测温报告表”(为节省篇幅 ,这 3 个表省略表示。)等图表 ,既是原始资料 ,也是分析结果 ,生成它们是现代化的硫化测温仪应有之义。测温一结束 ,测温仪便可立即输出这些数据文件和图表。

参考文献 :

- [ 1 ] 王登祥 ,Kinlmmel. 美国轮胎公司确定轮胎硫化时间的方法 [ J ]. 轮胎工业 ,1999 ,19( 5 ) 290 ~ 295.
- [ 2 ] 王 欣. 轮胎硫化条件的设定 [ J ]. 辽宁化工 ,2000 ,29( 6 ) : 349 ~ 352.
- [ 3 ] 姚钟尧 ,姚耀文. 微机等效硫化效应测定仪 [ J ]. 轮胎工业 ,1993 ,13( 9 ) 23 ~ 24.
- [ 4 ] 姚钟尧 ,姚耀文. 微机测温仪与轮胎硫化测温 [ J ]. 特种橡胶制品 ,1998 ,19( 6 ) 37 ~ 41.

( 下转第 48 页 )

32MPa,气量进一步增大,图5为输送系统,清扫气量达到 $1020\text{m}^3/\text{h}$ (标准状态下),管道中最低气速(变径处)可达到 $22\text{m}/\text{s}$ 的要求,最大气速 $v_{\text{max}}$ 达到 $36\text{m}/\text{s}$ (在输送管进料口)。

在清扫过程中由于物料量少,特别是清扫最后阶段,管道内基本没有物料,管道内不同点气速和管道压力损失完全可以用纯空气流体力学进行计算。

## 5 过滤喷嘴和空气过滤装置的滤芯影响

对于炭黑气力输送,与其他物料相比,输送比较困难,主要是其粘性和粘子破碎问题。可靠的方式是采用旁通管低速密相输送,在输送管上增加助推器(过滤喷嘴和单向阀)补气。为了保证喷嘴和单向阀的正常工作,在空气管路上安装滤芯,输送用干燥、清洁的压缩空气。即使这样,这些元件1a需更换1次,保证其透气性。如果用户不按要求使用,过滤喷嘴和滤芯的长期使用使其透气性下降,除了造成输送能力下降、输送压力高等问题外,还会造成在清扫时气量不足,在输送管中产生残余物料。在设计的装置中,可以在压送罐顶部充气管路上增加旁路和V1阀门,在该气路上安装可靠的单向阀,不安装过滤装置,在输送和清扫时采用不同口径的管路,来保证清扫可靠。

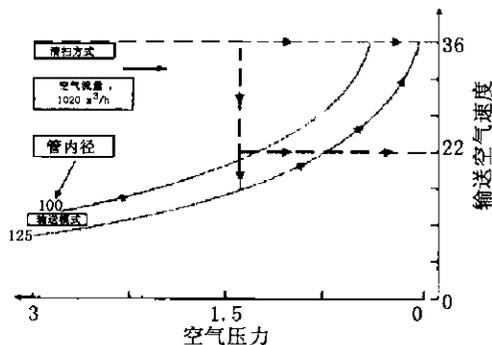


图5 变径管对输送和清扫气速的影响

## 6 控制软件保证清扫的可靠性

输送管道上的所有2位分配阀门,均配置有可靠的到位信号,在物料输送前,根据目标罐自动调整和判别各阀门状态,确保物料输送路径正确无误。更换输送物料时,在变更输送管道上分配阀门通道前,控制系统控制相应执行元件,自动对管道进行清扫,彻底消除人工错误操作产生物料的混杂。

## 7 结论

气力输送除了保证输送能力、料气比、粒子破碎等问题外,输送结束后在管道内的残余问题也越来越受到人们的关注。本文对各种物料输送残余量的影响因素分别进行了分析和讨论,指出气量控制是关键。对输送和管道清扫气量控制分别进行讨论,物料输送和清扫空气控制必须由单独管路控制。对输送管的变径作用和可能产生的后果也进行了分析,指出变径可以降低输送速度,减小物料破碎,但同时容易产生物料在输送结束后在变径处的残余,必须仔细计算管路在清扫过程中各点的气速,保证各点气速不小于清扫气速。

此外对输送管材料,过滤喷嘴的作用也进行了解释,用户必须注意,保持压缩空气的清洁,按时更换过滤器,保证输送正常、可靠。

### 参考文献:

- [1] 陈宏勋主编. 管道物料输送与工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [2] David Mills. Pneumatic Conveying Design Guide, Second edition[M]. Butterworth-Heinemann/Elsevier, 2004.
- [3] 詹德新,王家楣编著. 工程流体力学[M]. 湖北: 湖北科学技术出版社, 2001.

### (上接第41页)

- [5] 姚钟尧,姚耀文. 轮胎硫化测温仪3.0版简介[J]. 橡胶工业, 2001, 48(2): 101~106.
- [6] 姚钟尧,罗超云,姚耀文. 3.2版轮胎硫化测温仪[J]. 橡胶工业, 2003, 50(12): 743~750.
- [7] 姚钟尧. 工程机械轮胎硫化测温仪[J]. 橡胶工业, 2005, 52(1): 54~57.

- [8] 蔡大扬. 缩短定型硫化机外胎硫化时间的试验情况[J]. 轮胎工业, 1996, 16(7): 412~416.
- [9] 梁亚平,张志勇,朱国勋,傅建华. 轮胎硫化测温及硫化条件的制定[J]. 轮胎工业, 2001, 21(11): 697~699.
- [10] 韩雷,沈世刚,栗波,林化,刘淑梅. 子午线轮胎硫化温度的测定[J]. 轮胎工业, 1999, 19(7): 427~431.