

一步法注射成型胶料在机筒内的温度场分析

李溪斌, 陈 谦, 韩 露, 刘 存, 吕柏源

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266042)

摘要: 分析一步法注射成型胶料在机筒内的温度场。通过建立实体模型和数学模型, 将整根螺杆平均分成6段, 依次模拟机筒中胶料的温度变化, 螺杆和机筒施加温度约束(140℃), 将螺杆和机筒对胶料的热传导作为温度场的主要影响因素, 热流密度呈线性变化。通过有限元分析, 在螺杆长径比为14、导程为90 mm的情况下胶料在机筒停留48 s即可充分达到塑化温度, 因此对螺杆参数进行优化, 如改变螺杆螺距、减小螺杆长径比等, 可以节省螺杆和机筒材料用量, 达到设备设计优化的目的。

关键词: 注射成型; 温度场; 有限元分析; 螺杆设计

中图分类号: O241.82; TQ330.4⁺6

文献标志码: A

文章编号: 2095-5448(2019)04-0214-06

DOI: 10.12137/j.issn.2095-5448.2019.04.0214

注射成型技术在橡胶制品生产中应用广泛。在一步法注射成型过程中, 胶料塑化温度直接影响挤出效率和产品质量。胶料轴向流动速度、挤出机螺杆和机筒的长度、螺杆转速等是胶料塑化温度的主要影响因素。

本工作运用ANSYS Workbench有限元分析软件对胶料在机筒内的温度场进行分析, 确定胶料在规定时间内是否达到均匀塑化, 从而对螺杆参数和挤出机尺寸进行优化设计。

1 几何模型的建立

分析胶料在机筒中的温度变化需要模拟胶料在螺杆中的运动方式, 首先应该建立螺杆参数对注射温度的数学模型以及螺杆胶料和机筒的物理模型。螺杆参数对注射温度的数学模型如下:

$$T = 41.913 + 21.702 \log(L/D) + 1.193 \lg \theta - 0.597 H_1 + 2.667 \varepsilon + 10.669 n^{0.5} + 0.082 A + 0.087 ML - 0.459 (\theta n)^{0.5} - 0.484 (\theta A)^{0.5} \quad (1)$$

式中, T 为注射温度; L 为螺杆加机头的长度; D 为螺杆直径; L/D 为螺杆长径比; θ 为牵引角; H_1 为喂料段螺槽深度; n 为电机转速。

从式(1)可以看出, 随着 L/D 增大, T 升高, L/D

增大有助于提高胶料的塑化质量^[1]。

螺杆物理模型的建立需要设计一个初始的螺杆, 通过螺杆和转速等条件计算出挤出过程中的塑化时间来进行温度场分析。

螺杆参数: 螺杆形式 双头螺杆, 外径 90 mm, 内径 60 mm, 导程 90 mm, 长径比 14, 螺槽深度 15 mm, 径向间隙 0.2 mm, 螺棱轴向宽度 9 mm, 螺棱法向宽度 6.5 mm, 螺旋升角 17°5'。

根据螺杆参数用UG软件建模, 得到螺杆初始模型(见图1)。机筒的厚度设为42 mm, 加入机筒和胶料, 得到螺杆、胶料和机筒总图(见图2)。

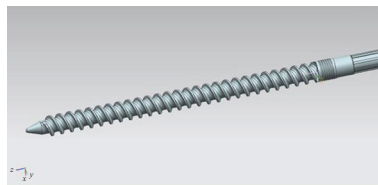


图1 螺杆初始模型

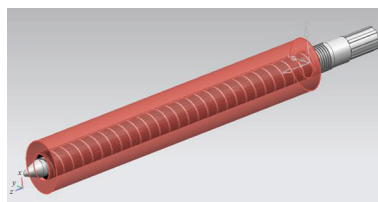


图2 螺杆、胶料和机筒总图

作者简介: 李溪斌(1991—), 男, 山东青岛人, 青岛科技大学硕士研究生, 主要从事高分子材料成型加工设备的研究。

E-mail: 514496784@qq.com

2 塑化时间的计算

几何模型的建立是有限元分析的基础。计算出胶料在机筒内总的塑化时间,才能在有限元分析中设定时间参数。

(1) 螺旋角

机筒处螺旋升角(Φ_b):

$$\Phi_b = \tan^{-1}(S/\pi D_b) = 17^\circ 6' \quad (2)$$

式中, D_b 为螺杆外径。

螺杆根径处螺旋升角(Φ_s):

$$\Phi_s = \tan^{-1}(S/\pi D_f) = 25^\circ 5' \quad (3)$$

式中, D_f 为螺杆根部直径。

螺旋角平均值(Φ):

$$\Phi = \tan^{-1}(S/\pi D) = 20^\circ 9' \quad (4)$$

(2) 螺槽宽度

机筒处螺槽宽度(W_b):

$$W_b = S \cos \Phi_b - e \quad (5)$$

式中, e 为螺棱法向宽度。

螺杆根径处螺槽宽度(W_s):

$$W_s = S \cos \Phi_s - e \quad (6)$$

螺槽宽度平均值(W):

$$W = S \cos \Phi - e \quad (7)$$

(3) 固体移动角(K_s)

$$K_s = \frac{D}{D_b} \times \frac{\sin \Phi + f_s \cos \Phi}{\cos \Phi + f_s \sin \Phi} \quad (8)$$

$$M = \frac{2H}{W_b} \sin \Phi_b \left(K_s + \frac{D}{D_b} \cotan \Phi \right) + \frac{W_s}{W_b} \sin \Phi_b \left(K_s + \frac{D_f}{D_b} \cotan \Phi_s \right) \quad (9)$$

(4) 牵引角(θ)

$$\sin \theta = \frac{\sqrt{1 + K_s^2 - M^2} - K_s M}{1 + K_s^2} \quad (10)$$

(5) 固体输送速率

$$\frac{Q_s}{n} = \pi^2 D_b H (D_b - H) \frac{\tan \theta \times \tan \Phi_b}{\tan \theta + \tan \Phi_b} \quad (11)$$

式中, Q_s 为生产能力, H 为螺槽深度。

(6) 胶料的轴向速度(V_a)

$$V_a = \pi D_b n \frac{\tan \theta \times \tan \Phi_b}{\tan \theta + \tan \Phi_b} \left(1 - \frac{ie}{W + e} \right) \quad (12)$$

计算结果为: $K_s = 0.626$; $M = 0.893$; $\sin \theta = 0.152$; $\theta = 8^\circ 7'$; 固体输送速率为 $0.103 \text{ kg} \cdot \text{r}^{-1}$ 。设 $n = 80 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 每分钟的挤出量为 8 kg , 符合直径为 90 mm 的螺杆的产量。最后得到胶料在机筒

内运动的 $V_a = 1.62 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 。 $L = 1.3 \text{ m}$, 因此胶料在机筒内所停留的总时间 $t = L/V_a = 48 \text{ s}$, 即塑化时间为 48 s [2]。

3 温度场的有限元分析

有限元分析是用较简单的问题代替复杂问题后再求解。它将求解域看成是由许多有限元的小的互连子域组成,对每个单元假定一个合适的近似解,然后推导求解域总的解。这个解不是准确解,而是近似解,因为实际问题被较简单的问题所代替。一般来说,大多数实际问题难以得到准确解。而有限元分析不仅计算精度高,而且能适应各种复杂形状。

有限元热力学分析的目的是计算模型内的温度分布以及热梯度、热流密度等。热载荷包括热源、热对流、热辐射、热流量、外部温度场等。ANSYS Workbench 15.0 软件可以进行两种热分析,即稳态分析和瞬态分析 [3]。

有限元热力学分析的数学模型分为稳态热力学分析和瞬态热力学分析。

稳态热力学分析一般方程为:

$$[K]\{T\} = \{Q\} \quad (13)$$

式中, $[K]$ 是传导矩阵,包括热系数、对流系数、辐射系数和形状系数; $\{T\}$ 是节点温度向量; $\{Q\}$ 是节点热流向量,包括热生成。

瞬态热力学分析一般方程为:

$$[C]\{T_1\} + [K]\{T\} = \{Q\} \quad (14)$$

式中, $[C]$ 是比热矩阵,考虑系统内能的增加; $\{T_1\}$ 是节点温度对时间的导数; $\{T\}$ 是节点温度向量。

胶料在机筒内的传热方式是热传导和热对流。

热传导遵循傅里叶定律:

$$q'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (15)$$

式中, q'' 为表面发出的单位面积上的热流率; k 为热传导系数。

热对流满足牛顿冷却方程:

$$q'' = h(T_s - T_b) \quad (16)$$

式中, h 为热传递系数, T_s 是表面温度, T_b 是流动流体的温度。

4 模拟分析过程与结果

由于胶料无法用一般的流体模拟软件模拟其温度场,本研究中使用一种简化的方法,用ANSYS Workbench来模拟,将胶粉视为固体分段模拟,胶粉在不同温度区间的停留时间作为加载步长,上一温度区间胶粉的平均温度作为下一温度区间胶粉的初始温度进行模拟。通过模拟,可直观地看出温度场的分布状况。胶粉在螺杆中的温度场比较复杂,这是由于其受到很多因素的影响,如胶粉的流动、胶粉与机筒壁的摩擦、胶粉与胶粉的摩擦、机筒壁对胶粉的剪切作用、机筒对胶粉的热传导等。由于加热温度较高,机筒对胶粉的热传导是胶粉在螺杆中的温度场的主要影响因素。因此,在温度场模拟时忽略胶粉流动、机筒壁对胶粉的剪切等因素,胶粉在螺杆中的物理模型可简化为机筒壁对螺槽内胶粉在一定时间(胶粉在螺槽内的停留时间)内的热传导。在模拟温度设置中,除了第1段胶料温度的初值为室温外,其余每段的温度初值均设置为上一段胶料温度的平均值^[4]。将螺杆平均分成6段(如图3所示)。

取其中一段螺杆(如图4所示),利用ANSYS Workbench软件进行有限元分析,选择瞬态热(Transient Thermal),第1步设置工程数据(Engineering Data):胶料密度 $1.043 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$,各向同性导热系数(Isotropic Thermal Conductivity) $0.2 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$,比热容(Specific Heat) $1700 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$;第2步对模型进行网络

划分,对螺杆和胶料采用四面体网格划分法(Tetrahedrons Method),对机筒采用六面体主导的网格划分法(Hex Dominant Method),模型网格划分如图5所示。

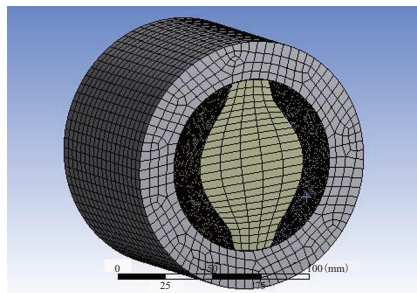


图5 模型网格划分示意

网格划分后对模型施加载荷,第1段胶料温度初值为 22°C 。因为螺杆分为6段,每1段的时长为 8 s ,所以求解步控制(Step Controls)设为2个子步 $1 \sim 8 \text{ s}$ 。对机筒整体和螺杆整体施加温度约束,数值为 140°C 。对胶料表面施加热通量(Heat Flux)。在胶料温度变化的过程中,热流密度呈线性变化^[5],施加载荷时也要加载线性变化的热流密度(见表1)。

最后求解得到第1段胶料的温度场云图,将数据导出到Excel文件,得到每1个单元的温度,求平均值,可得到第1段胶料的平均温度为 89.3°C 。将第1段胶料温度初值修改为 89.3°C ,重新计算Heat Flux,再次求解可以得到第2段胶料的温度场云图,依次类推,得到6段胶料的温度场云图(见图6—11)。将6段胶料温度场云图导出Excel文件,可以得到每段胶料的平均温度。

6段胶料各温度区间的单元分布如图12—17所示。

从图6的第1段胶粉温度分布可以看出,大部分胶粉处于低温状态,这说明胶粉的导热性差。

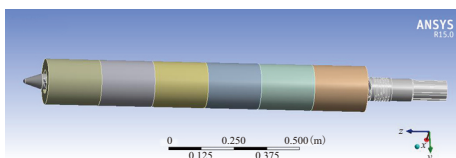


图3 均分为6段的螺杆

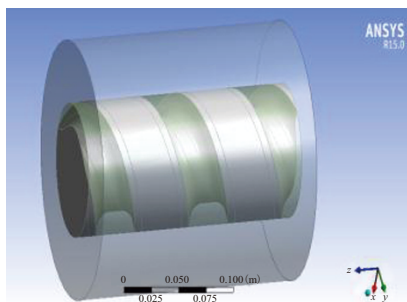


图4 截取的一段螺杆

表1 6段胶料的热流密度和平均温度

胶料	热流密度/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	平均温度/ $^\circ\text{C}$
第1段	3 146.6	89.3
第2段	1 351.4	118.8
第3段	618.6	131.6
第4段	274.6	135.9
第5段	122.6	137.8
第6段	56.0	139.5

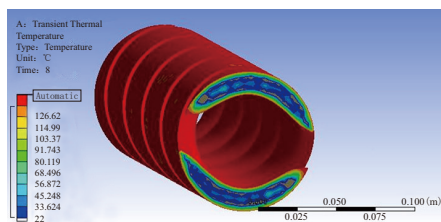


图6 第1段胶料的温度场云图

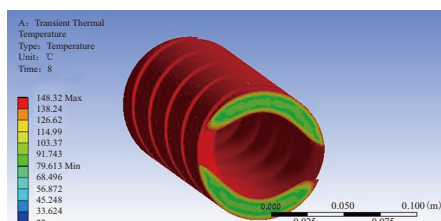


图7 第2段胶料的温度场云图

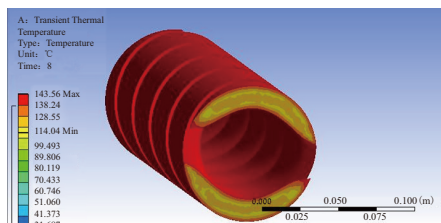


图8 第3段胶料的温度场云图

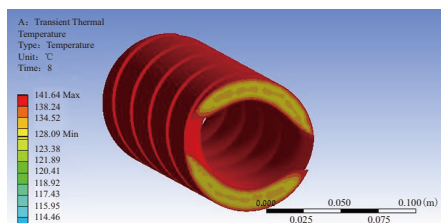


图9 第4段胶料的温度场云图

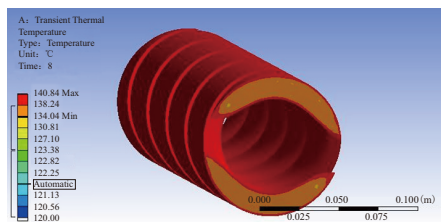


图10 第5段胶料的温度场云图

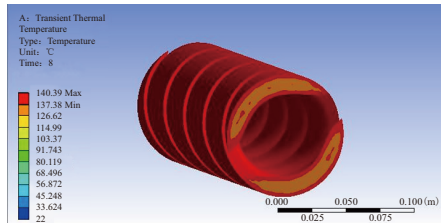


图11 第6段胶料的温度场云图

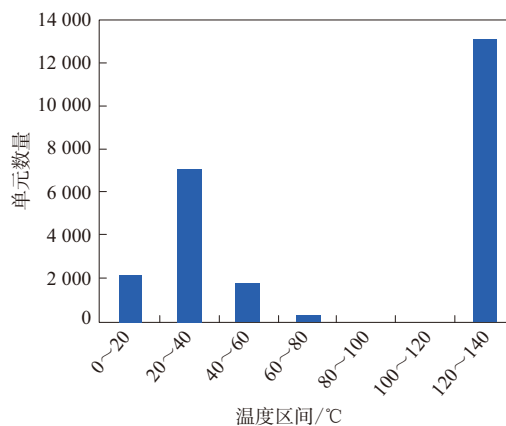


图12 第1段各温度区间单元分布图

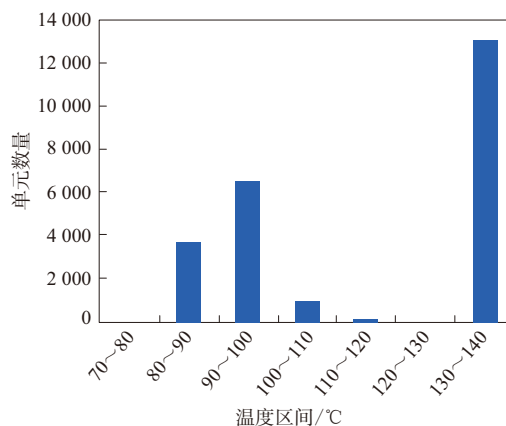


图13 第2段各温度区间单元分布图

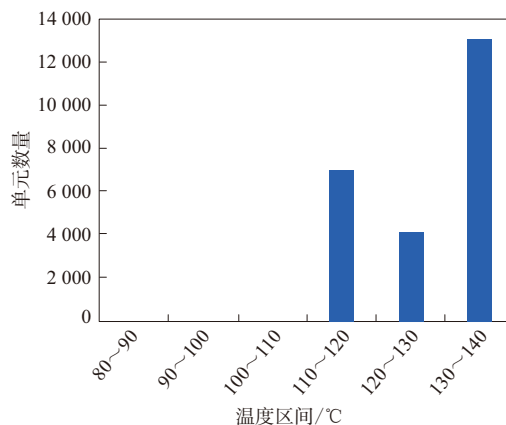


图14 第3段各温度区间单元分布图

从图12可以看出,胶粉单元主要分布在10~50 °C,还有一部分单元分布在120~140 °C,这是因为胶粉表面接触140 °C的机筒和螺杆,因此出现表面温度高的情况。为了消除表面温度对后续计算的影响,接下来的计算中下一段模拟的初始温度均采用上一段模拟的平均温度。总体来

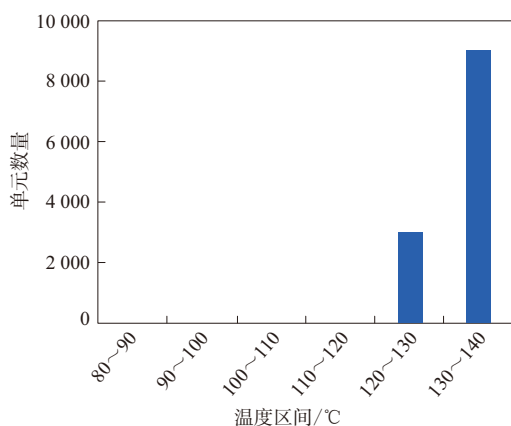


图15 第4段各温度区间单元分布图

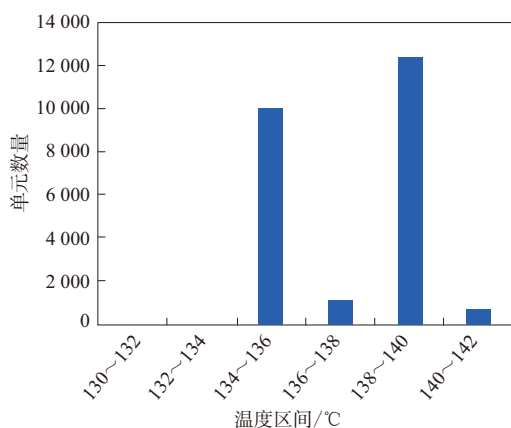


图16 第5段各温度区间单元分布图

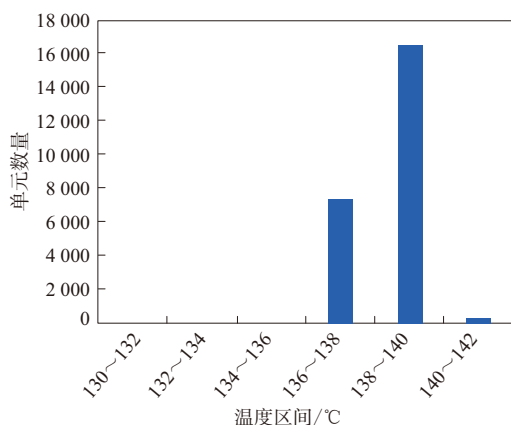


图17 第6段各温度区间单元分布图

看,第1段胶料温度普遍偏低,平均温度为89℃。之后5段胶料的温度逐渐升高,越接近设定的温度(140℃),升温越慢。

5 结构优化

在一步法注射成型中,胶料的塑化程度与螺

杆的设计有很大关系,试验发现第5段胶料温度已经达到137.8℃,最后8s中胶料的热量吸收率较低,改变螺杆长径比可以达到有效节省能源和材料的目的。

对螺杆参数进行优化: $L/D=13$, $D=90$ mm, $L=1.21$ m, $V_a=1.62$ m $\cdot$ min $^{-1}$ 。胶料在机筒内的时间 $t=L/V_a=45$ s,将螺杆分成6段则每一段的时长为7.5 s。

对优化后螺杆中的胶料进行温度场分析,6段胶料的热流密度和平均温度如表2所示。

表2 优化后6段胶料的热流密度和平均温度

胶料	热流密度/(W $\cdot$ m $^{-2}$)	平均温度/℃
第1段	3 146.6	88.3
第2段	1 377.8	117.4
第3段	603.7	130.0
第4段	266.6	135.2
第5段	122.3	137.4
第6段	53.0	139.0

从表2可以看出,胶料在45 s内塑化的结果接近48 s的塑化结果,可以达到需要的塑化程度,将螺杆长度减小7%,可以节省 3.39×10^{-4} m 3 螺杆材料(38CrMoAl)和 1.5×10^{-3} m 3 机筒材料。

6 结语

本工作主要对一步法注射成型过程中的胶粉进行了温度场模拟分析,通过ANSYS Workbench和UG等软件进行建模及有限元分析。

对胶料进行温度场分析有利于挤出机螺杆、机筒等的设计,可以为螺杆设计提供充分的理论支持。根据温度场分析结果调整螺杆长径比、螺距、螺杆直径以达到最优的塑化结果。通过改变螺杆螺距和减小螺杆长径比等,可以节省螺杆和机筒材料用量,达到设备优化的目的。

参考文献:

- [1] 郭英. 螺杆挤出机[M]. 北京:纺织工业出版社,1990.
- [2] 朱复华. 螺杆设计及其理论基础[M]. 南京:轻工业出版社,1992.
- [3] 许进峰. ANSYS Workbench15.0[M]. 北京:电子工业出版社,2014.
- [4] 张植俞. 异向双螺杆废旧胶粉脱硫挤出温度场分析及实验[D]. 北京:北京化工大学,2015.
- [5] 张惠敏,张聪,杨德,等. 数值模拟方法在橡胶注射成型中的应用研究[J]. 橡胶工业,2015,62(7):422-427.

收稿日期:2018-10-14

Temperature Field Analysis of One-step Injection Molding of Compound in Barrel

LI Xibin, CHENG Qian, HAN Lu, LIU Cun, LYU Baiyuan

(Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: The temperature field of one-step injection molding compound in the barrel was analyzed. By establishing physical model and mathematical model, the whole screw was divided into six sections, and the temperature change of rubber compound in barrel was simulated in turn. The screw and barrel were bound by temperature 140 °C. The heat conduction between the screw and barrel was assumed as the main factor affecting the temperature field, and the heat flux changed linearly. Through finite element analysis, the plasticizing temperature could be fully reached with the residence time of 48 s when the length to diameter ratio of the screw was 14 and the lead was 90 mm. Therefore, by optimization of the screw parameters, such as the pitch of the screw and the length to diameter ratio of the screw, the material consumption of the screw and barrel could be reduced, and the equipment design was optimized.

Key words: injection molding; temperature field; finite element analysis; screw design

2018年我国复合橡胶的进出口概况

据中国海关统计,2018年我国复合橡胶的进口量为113 824.66 t,同比降低5.03%,进口金额为38 978.10万美元,同比降低4.24%。其中,与炭黑等混合的未硫化复合橡胶的进口量为97 292.30 t,占复合橡胶总进口量的85.48%,同比增长3.18%,进口金额为31 704.23万美元,同比增长0.15%;其他未硫化的复合橡胶板、片、带的进口量为8 695.35 t,占总进口量的7.64%,同比降低23.97%,进口金额为3 862.31万美元,同比降低11.31%;其他未硫化的初级形状复合橡胶的进口量为7 472.78 t,占总进口量的6.57%,同比降低28.05%,进口金额为3 320.56万美元,同比降低11.90%;未硫化的复合橡胶溶液及分散体的进口量为364.23 t,占总进口量的0.32%,同比降低90.26%,进口金额为91万美元,同比降低90.15%。

2018年我国复合橡胶的出口量为14 625.58 t,同比降低14.42%,出口金额为4 252.39万美元,同比增长3.60%。其中,与炭黑等混合的未硫化复合橡胶的出口量为5 899.60 t,占总出口量的40.34%,同比增长50.40%,出口金额为2 275.44

万美元,同比增长74.41%;其他未硫化的复合橡胶板、片、带的出口量为7 888.10 t,占总出口量的53.93%,同比降低31.56%,出口金额为1 761.71万美元,同比降低28.51%;其他未硫化的初级形状复合橡胶的出口量为825.78 t,占总出口量的5.65%,同比降低46.75%,出口金额为214.20万美元,同比降低33.98%;未硫化的复合橡胶溶液及分散体的出口量为12.10 t,占总出口量的0.08%,同比降低86.63%,出口金额为1.04万美元,同比降低90.95%。

(崔小明)

2018年我国炭黑的进出口概况

据中国海关统计,2018年我国炭黑的进口量为95 382.217 t,同比降低6.62%;进口金额为28 372.06万美元,同比增长15.20%;进口单价为2 974.56美元·t⁻¹,同比增长23.36%。2018年我国炭黑的出口量为875 924.511 t,同比增长19.78%;出口金额为115 290.61万美元,同比增长67.58%;出口单价为1 316.22美元·t⁻¹,同比增长39.90%。

(崔小明)