

应用理论

基于ANSYS Workbench的介质泄漏对密炼机转子端面密封影响的摩擦静力学分析

汪传生, 张健, 张萌, 聂万富, 温南南, 边慧光*

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266042)

摘要: 基于ANSYS Workbench软件中的结构静力分析模块建立密炼机转子端面动静密封环的有限元模型, 利用仿真技术分别对动静密封环端面直接接触和介质接触进行摩擦静力学分析。结果表明: 动静密封环接触端面压力最大, 导致端面摩擦力最大, 磨损最为剧烈; 混炼物料泄漏会使动静密封环端面接触由直接接触变为介质接触, 端面摩擦磨损加剧, 易导致端面动静密封环损坏甚至失效。

关键词: 密炼机; 转子; 端面密封; 直接接触; 介质接触; 摩擦静力学; 有限元分析

中图分类号: TQ330.4⁺3; O241.82

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2021)03-0179-06

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2021.03.0179



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

密炼机是橡胶成型工艺过程中的必要设备, 密炼机的混炼过程使得橡胶与各种配合剂达到良好的混合和分散效果^[1]。相较于开炼机, 密炼机在混炼全过程中都处于密封状态^[2], 混炼过程初始阶段密炼室内充满橡胶、粉体和液体小料混合物, 这些混炼物料颗粒非常小, 均可通过转子与密炼室间的环形间隙泄漏, 因此在转子端面与密炼室间存在密封装置^[3]。该装置由一个静密封环和一个动密封环组成, 彼此可相互滑动, 动密封环随转子旋转, 静密封环固定在静环套中。为保证动静密封环的使用寿命, 通常在动静密封环的接触面间注入润滑油以确保良好的密封效果^[4-5], 但仍不能保证密封完全, 粒径极小混炼物料颗粒会在混炼过程中进入接触界面。

本工作通过ANSYS Workbench软件中的结构静力(Static Structure)分析模块, 对密炼机转子端面无介质密封(混炼物料颗粒不进入端面)和介质密封(混炼物料颗粒进入端面)2种情况进行有限

元分析, 研究介质(混合物料)泄漏对动静密封环使用寿命的影响。

1 动静密封环有限元模型的建立

1.1 几何模型简化

密炼机转子端面密封结构如图1所示, 处理前动静密封环结构如图2所示。

图1所示的密封结构采用单端密封, 静密封环固定端均布3个直径4 mm的小孔, 用来安装压紧导柱。在有限元模拟中, 孔的存在会产生应力集中, 且使得网格划分复杂, 由于3个孔仅用来安装压紧导柱, 对接触瞬态分析影响不大, 因此为了提高网格划分质量, 减少计算量, 动静密封环简化模型去掉了孔, 如图3所示。

1.2 材料参数设置

动静密封环皆为45#钢, 弹性模量为196~206 GPa, 泊松比为0.24~0.28。在实际工况中, 为提高动密封环的耐磨性能和静密封环的摩擦性能, 动密

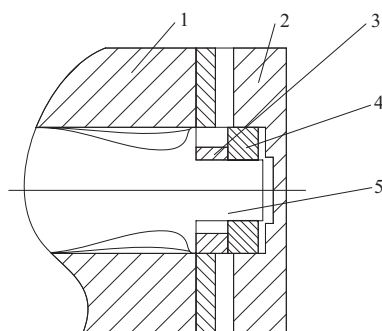
基金项目: 山东省重点研发计划项目(2019GGX102018); 青创科技计划项目(2019KJB007); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2016XJ003)

作者简介: 汪传生(1960—), 男, 安徽潜山人, 青岛科技大学教授, 博士, 主要从事高分子材料加工技术与装备的研究工作。

***通信联系人:** (bianhuiguang@163.com)

引用本文: 汪传生, 张健, 张萌, 等. 基于ANSYS Workbench的介质泄漏对密炼机转子端面密封影响的摩擦静力学分析[J]. 橡胶工业, 2021, 68(3): 179-184.

Citation: WANG Chuansheng, ZHANG Jian, ZHANG Meng, et al. Friction statical mechanics analysis of effect of medium leakage on end face sealing of mixer rotor based on ANSYS Workbench[J]. China Rubber Industry, 2021, 68(3): 179-184.



1—密炼室;2—密封板;3—动密封环;4—静密封环;5—转子。

图1 密炼机转子端面密封结构

Fig. 1 Sealing structure of mixer rotor end face

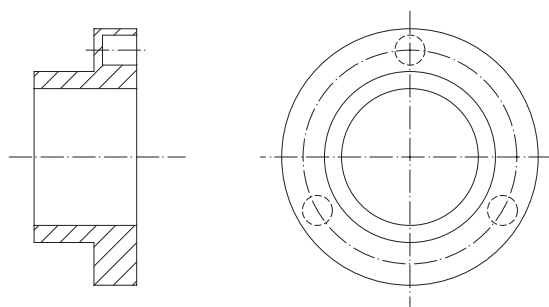


图2 处理前动静密封环结构

Fig. 2 Structure of dynamic and static sealing ring before treatment

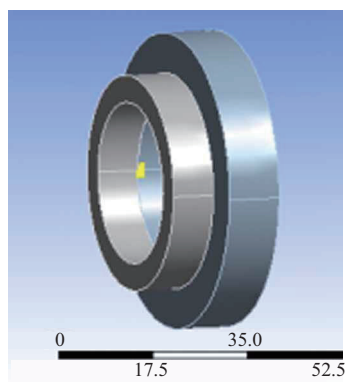


图3 动静密封环有限元模型

Fig. 3 Finite element model of dynamic and static sealing ring

封环表面堆焊硬质合金,静密封环45#钢采取调质处理,因此设置动静密封环的弹性模量为200 GPa,密度为 $7.89 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$,泊松比为0.28。自定义泄漏介质材料弹性模量为0.007 8 GPa,泊松比为0.33。

1.3 接触对参数设置及网络划分

1.3.1 接触模型

弹性力学中,接触问题是指2个物体在受压状态下所发生的力学行为,包括局部应力和应变等;

在实际工程中2个物体相互接触并产生相对运动时接触表面即产生摩擦;在有限元中,以节点来定义接触,理论上2个节点在某一个区域或线上恰好重合即被认为发生了接触。但是在计算中不能精确描述节点的接触,需要设置接触区域。实际计算过程中,当某一个时间增量或载荷步中接触物体移动超出了接触距离,就会被认为发生了穿透^[6-12]。

接触模型可描述为求区域内位移场,使系统势能在接触边界条件约束下达到最小,即

$$\begin{cases} \Pi(U) = \frac{1}{2} U^T K U - U^T F \\ \text{s.t. } \Delta \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, K 、 U 和 F 分别为有限元位移法中的刚度矩阵、未知结点位移向量和结点荷载向量。

实际计算中,由于相互接触的物体材料属性、力学性能等不同,有限元将接触划分为两类:刚性体-柔性体接触和柔性体-柔性体接触。在密炼机密封装置的动静密封环中,动密封环在密炼室内部,静密封环在密炼室端面,更换静密封环较为容易,动静密封环材料均为45#钢,但动密封环表面堆焊的硬质合金较硬,而静密封环调质处理的45#钢较软,所以采用的有限元模型为刚性体-柔性体接触模型。

1.3.2 接触公式

穿透在实际接触物体之间不会发生,因此在有限元分析软件中采用程序强制接触协调来控制穿透,以期模拟真实接触状态。罚函数法接触模型如图4所示,当接触协调性不被强制时就会发生穿透。Workbench Mechanical模块中提供了罚函数法^[5]、拉格朗日乘子法^[6]、增广拉格朗日乘子法^[7]3种强制协调的接触公式。

(1) 罚函数法。罚函数法要求有限的穿透量在交界面处产生接触压力,保持系统平衡需要此接触压力,即接触压力必须大于零。然而,实际的接触物体相互不穿透,因此为了得到最高精度,应使发生在接触界面处的穿透量最小,这意味着理想的接触刚度应非常大,但是刚度值太大会引起收敛困难。如果接触刚度太大,微小的穿透即会产生很大的接触压力,在下次迭代中可能会将接触面推开,采用过大的接触刚度通常会导致收敛振荡且发散。

(2) 拉格朗日乘子法。拉格朗日乘子法接触

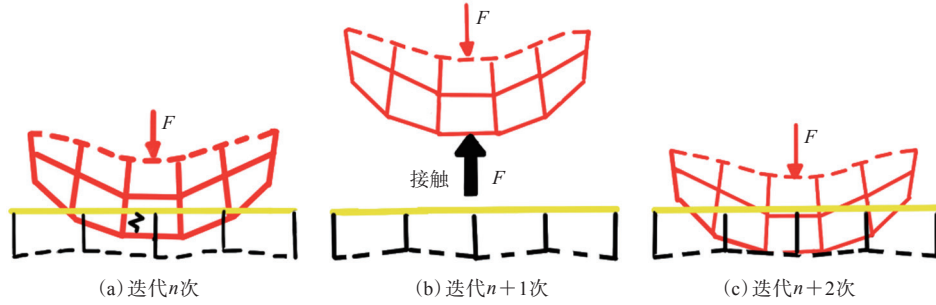


图4 罚函数法接触模型

Fig. 4 Contact model of penalty function method

模型如图5所示,其实质是增加一个附加自由度(接触压力)来满足不可穿透条件。

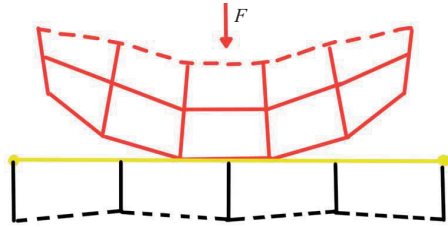


图5 拉格朗日乘子法接触模型

Fig. 5 Contact model of Lagrange multiplier method

(3) 增广拉格朗日乘子法。将以上两种方法结合起来,就是增广拉格朗日乘子法,其接触模型如图6所示。接触协调性基于惩罚刚度确定,一旦达到平衡,检查穿透容差,如果有必要,接触压力增大,迭代继续。

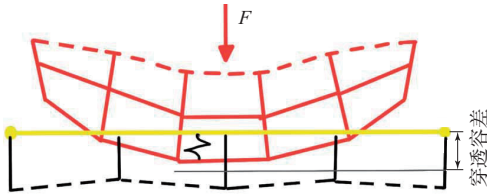


图6 增广拉格朗日乘子法接触模型

Fig. 6 Contact model of augmented Lagrange multiplier method

1.3.3 接触摩擦因数

在密封端面摩擦磨损过程中,理论上金属材料的摩擦因数与表面接触面积及相对运动速度无关,但是在密炼机密封装置中摩擦因数随着介质环境发生变化,且介质环境影响较大,甚至改变端面接触应力和应变的大小。端面密封副的摩擦因数包括接触摩擦因数和介质摩擦因数。摩擦因数(f)的计算公式为

$$f = \frac{F_c + F_f}{W} \quad (2)$$

式中, F_c 为接触摩擦力, F_f 为剪切摩擦力, W 为总负荷。

在平衡情况下, W 为

$$W = W_c + W_f \quad (3)$$

式中, W_c 为接触负荷, W_f 为介质负荷。

混合摩擦状态下密封副的 f 为

$$f = x_c f_c + x_f f_f \quad (4)$$

式中, x_c 为接触负荷比, f_c 为接触摩擦因数, x_f 为介质负荷比, f_f 为介质摩擦因数。

微凸体 F_c 的计算公式为

$$F_c = \frac{1}{R_m} \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} \tau_c(r, \theta) r^2 dr d\theta \quad (5)$$

式中, R_m 为等效微凸体曲率, R_1 和 R_2 分别为变形前后微凸体半径, τ_c 为接触应力, r 和 θ 为极坐标参数。

综上所述,在此次模拟中,静密封环表面设置为接触面,动密封环表面设置为目标表面,端面接触摩擦因数为0.2,端面介质摩擦因数为0.3,默认增广拉格朗日乘子法,使结果更容易收敛。模型采用正六面体划分网格,网格总数为44 800,网格划分模型如图7所示。

1.4 边界条件设置

动密封环随着转子旋转,静密封环固定且受横向压力,两表面接触起到密封作用,因此在动密封环上施加转动惯性负荷,转动速度为 $120 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$,横向压力为1 MPa,静密封环非接触端面施加固定约束,计算时间设置为1 s,将大变形“large deflection”设置成“on”。

2 结果与讨论

2.1 动静密封环接触端面的应力分析

在动静密封环端面直接接触和介质接触2种状态下,对动静密封环接触端面进行应力分析,结

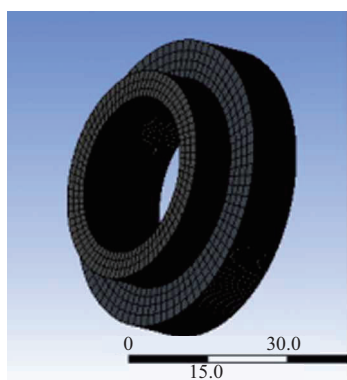


图7 动静密封环接触网格划分模型

Fig. 7 Meshing model for contact between dynamic and static sealing ring

果如图8所示。

从图8可以看出,在端面直接接触和介质接触时,在均匀密封压力作用下,动静密封环的受力均沿圆周方向均匀分布,在接触端面压力最大,摩擦

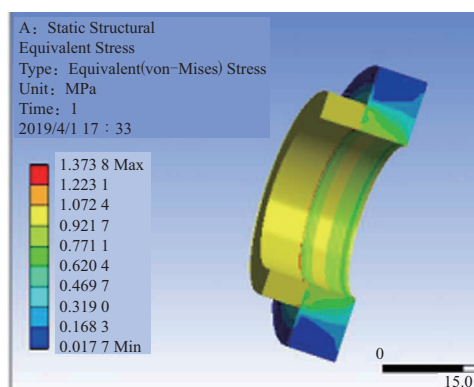
力也最大,磨损较为剧烈。

对比图8(a)与(b)可以看出,动静密封环端面直接接触时,其最大应力为1.373 8 MPa,端面介质接触时,其最大应力为2.108 2 MPa,相较于直接接触增大了53%。因此,密炼过程中,混合物料泄漏会导致动静密封环端面摩擦磨损加剧,动静密封环更易损坏甚至失效。

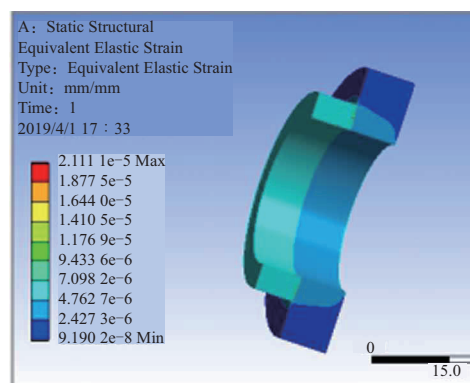
2.2 动静密封环接触端面的应变分析

在动静密封环端面直接接触和介质接触2种状态下,对动静密封环接触端面进行应变分析,结果如图9所示。

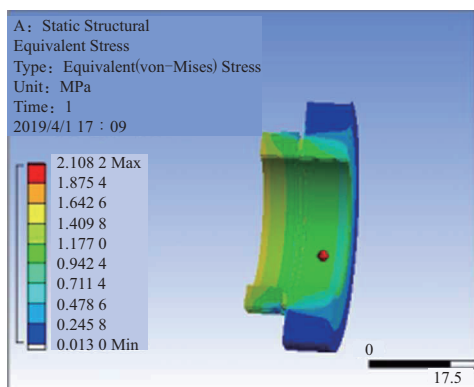
从图9可以看出,在端面直接接触和介质接触时,在均匀密封压力作用下,动静密封环接触端面的应变均不是很大,这是因为密封压力较小,结构钢材本身的刚度足够抵抗应变的变化。



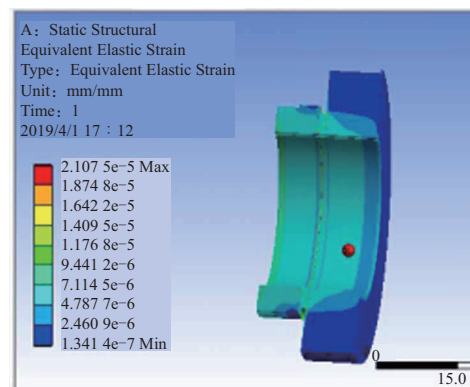
(a) 端面直接接触



(a) 端面直接接触



(b) 端面介质接触



(b) 端面介质接触

图8 不同接触状态下动静密封环接触端面的等效应力云图

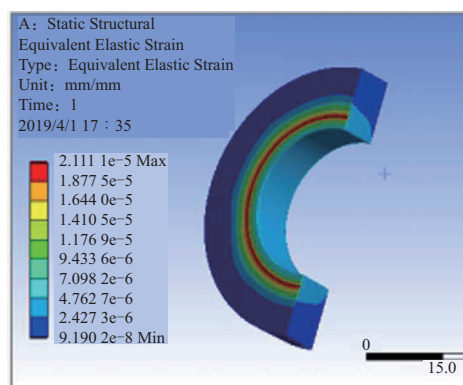
Fig. 8 Equivalent stress nephograms of contact end face of dynamic and static sealing ring under different contact states

图9 不同接触状态下动静密封环接触端面的等效应变云图

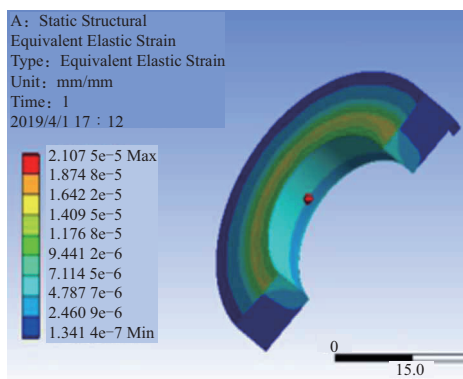
Fig. 9 Equivalent strain nephograms of contact end face of dynamic and static sealing ring under different contact states

对比图9(a)与(b)可以看出,动静密封环直接接触时,其最大应变为 $2.111\ 1\times 10^{-5}$ mm,端面介质接触时,其最大应变为 $2.107\ 5\times 10^{-5}$ mm,两种状态下基本保持一致。

在动静密封环端面直接接触和介质接触2种状态下,静密封环端面的等效应变云图见图10。



(a) 端面直接接触



(b) 端面介质接触

图10 不同接触状态下静密封环端面的等效应变云图

Fig. 10 Equivalent strain nephograms of end face of static sealing ring under different contact states

从图10可以看出,与在端面直接接触时相比,在端面介质接触时静密封环的应变小且更加均匀,这是因为应变发生在中间不均匀的介质中,对端面的总应变影响较小。

3 结语

利用ANSYS Workbench软件中结构静力分析模块,对密炼机转子端面与密炼室室壁间的密封装置——动静密封环进行有限元分析,得到如下结论。

(1) 动静密封环制造所采用的45#钢的刚度足

够,其端面直接接触和介质接触所产生应变基本一致,混炼物料介质的泄漏不会使动静密封环产生很大变形。

(2) 动静密封环接触端面压力最大,导致端面摩擦力最大,磨损最剧烈。

(3) 混炼物料的泄漏使动静密封环端面接触由直接接触变为介质接触,端面处应力增大53%,端面摩擦磨损更剧烈,易导致动静密封环损坏甚至失效。

参考文献:

- [1] 韩帮阔,王琨. 密炼机常见问题的分析及解决措施[J]. 橡塑技术与装备,2020,46(13):27-30.
- [2] HAN B K, WANG K. Analysis and solution of common problems for internal mixer[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment,2020,46(13):27-30.
- [3] HOPMANN C, KOSTKA M, LIPSKI A, et al. Flow paths in a tangential internal mixer as optimisation possibilities for mixing of rubber compounds[J]. Journal of Engineering,2020,73(3):53-59.
- [4] 迟安新. 密炼机的技术改进与提高[J]. 橡塑技术与装备,2017,43(11):41-44.
- [5] CHI A X. Technical improvement of internal mixer[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment,2017,43(11):41-44.
- [6] VITHORIA A D MARINHO, LUANNA V CESARI, ANNARAFFAELA M COSTA, et al. Heat transfer coefficient in internal mixers for different polymers and processing conditions[J]. Chemical Engineering Research and Design,2019,152(12):466-473.
- [7] 余海斌,金进尧,王志飞,等. 密炼机防尘密封问题的检测技术与有限元分析[J]. 橡塑技术与装备,2019,45(13):43-46.
- [8] SHE H B, JIN J Y, WANG Z F, et al. Detection technology and finite element analysis of dustproof sealing of problem of internal mixer[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment,2019,45(13):43-46.
- [9] 王震,赵阳,杨学林. 薄膜断裂和穿透的向量式有限元分析及应用[J]. 计算力学学报,2018,35(3):315-320.
- [10] WANG Z, ZHAO Y, YANG X L. Analysis and application of the vector form intrinsic finite element for fracture and penetration thin-membrane[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics,2018,35(3):315-320.
- [11] 吴和喜,杨秀英,葛良全,等. 求解航空 γ 能谱模拟中的深穿透问题[J]. 核技术,2016,39(7):30-34.
- [12] WU H X, YANG X Y, GE L Q, et al. Solving the deep penetration problem in Monte Carlo simulation of airborne gamma-ray spectrum[J]. Nuclear Techniques,2016,39(7):30-34.
- [13] HAN C, LUO M, ZHANG D H. Optimization of varying-parameter drilling for multi-hole parts using metaheuristic algorithm coupled with self-adaptive penalty method[J]. Applied Soft Computing Journal,2020,95(10):64-89.
- [14] YANG B, YANG Z Y, WANG D, et al. A Lagrangian multiplier

- method for TDOA and FDOA positioning of multiple disjoint sources with distance and velocity correlation constraints[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, DOI: 10. 1155/2020/1382321.
- [10] FENG P H, LING W K, LEI R, et al. Singular spectral analysis-based denoising without computing singular values via augmented Lagrange multiplier algorithm[J]. IET Signal Processing, 2019, 13 (2): 149-156.
- [11] 谭华春, 丁璠, 王梵晔, 等. 一种基于多线性增广拉格朗日乘子法的张量数据恢复方法[P]. 中国: CN 111274525A, 2020-06-12.
- TAN H C, DING F, WANG F Y, et al. A tensor data recovery method based on multi-linear augmented Lagrange multiplier method [P]. China: CN 111274525A, 2020-06-12.
- [12] 汪传生, 王虎子, 胡纪全, 等. 啮合转子冷却系统有限元分析[J]. 橡胶工业, 2018, 65 (10): 1181-1184.
- WANG C S, WANG H Z, HU J Q, et al. Finite element analysis of meshing rotor cooling system[J]. China Rubber Industry, 2018, 65 (10): 1181-1184.

收稿日期: 2020-09-13

Friction Statical Mechanics Analysis of Effect of Medium Leakage on End Face Sealing of Mixer Rotor Based on ANSYS Workbench

WANG Chuansheng, ZHANG Jian, ZHANG Meng, NIE Wanfu, WEN Nannan, BIAN Huiguang

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

Abstract: Based on the static structure module in the ANSYS Workbench software, the finite element model of the dynamic and static sealing ring of the mixer rotor end face was established, and the end face direct contact and medium contact of the dynamic and static sealing ring were analyzed based on friction statical mechanics using simulation technology. The results showed that the pressure at the contact end face of the dynamic and static sealing ring was the highest, so the friction force of the end face was the highest, and the wear was the most severe. The leakage of mixed materials would cause the end face contact of the dynamic and static sealing ring change from the direct contact to medium contact, and the friction wear of the end face became more severe, which could easily cause the dynamic and static sealing ring to be damaged or even fail.

Key words: mixer; rotor; end face sealing; direct contact; medium contact; friction statical mechanics; finite element analysis

一种耐高温防震橡胶材料与制备方法 由宁国中信零部件有限公司申请的专利(公布号 CN 111533972A, 公布日期 2020-08-14)“一种耐高温防震橡胶材料与制备方法”, 涉及的橡胶材料配方为: 丁苯橡胶 100~150, 硅橡胶 10~15, 炭黑 50~60, 碳纳米管 25~35, 白云石 30~40, 白炭黑 2~3, 氧化锌 5~10, 硬脂酸 15~20, 氮化铝 2~3, 石蜡油 35~55, 去离子水 20~40, 玻璃棉粉末 10~30, 聚乙二醇 5~7。其制备方法包括以下步骤: (1) 将氮化铝和白炭黑用环氧氯丙烷和聚乙烯醇进行预混; (2) 将丁苯橡胶、硅橡胶、炭黑、碳纳米管、白云石、石蜡油、去离子水混炼均匀; (3) 胶料和玻璃棉粉末、氧化锌、硬脂酸、聚乙二醇继续混炼均匀, 出片。该橡胶材料耐高温性能优异, 弹性好, 可防

震, 使用寿命长。

(本刊编辑部 赵 敏)

一种高防腐耐磨橡胶材料 由南京思甲宁新材料科技有限公司申请的专利(公布号 CN 111925575A, 公布日期 2020-11-13)“一种高防腐耐磨橡胶材料”, 涉及的橡胶材料配方为: 羧基丁腈橡胶 70~90, 聚四氟乙烯 3~5, 废弃塑料 10~20, 炭黑N330 50~60, 氧化锌 3~5, 硬脂酸 0.5~2.5, 磷酸三丁氧基乙酯 2~4, 防老剂 0.5~2.5, 润滑剂 4~6, 促进剂 1.2~2.4, 偶联剂 0.5~1.5。该橡胶材料具有优异的弹性、耐磨性和耐化学介质性, 质量好, 使用寿命长。

(本刊编辑部 赵 敏)