

综述·专论

橡胶冷喂料挤出机螺杆构型的发展状况

王宁¹, 苗露², 胡学志³, 潘弋人¹, 王之林¹, 刘彦昌^{1*}

(1. 青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061; 2. 青岛绿金源安全技术有限公司, 山东 青岛 266043; 3. 青岛软控机电工程有限公司, 山东 青岛 266317)

摘要:综述橡胶冷喂料挤出机螺杆构型的发展。在概述冷喂料挤出机基本螺杆构型的几何特点及混合和塑化能力的基础上, 评述冷喂料挤出机螺杆塑化段的主副螺棱构型、中断和沟槽螺棱构型、销钉机筒构型、传递混合构型、凸耳螺杆构型的结构特征、混合和塑化原理以及喂料段的结构和特性, 并预测未来冷喂料挤出机螺杆构型的发展趋势。

关键词:冷喂料挤出机; 螺杆构型; 螺棱; 销钉机筒; 塑化段; 喂料段; 混合; 塑化

中图分类号: TQ330.4⁺6

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2023)04-0311-09

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2023.04.0311



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

由于经济、控制和挤出质量的优势, 橡胶冷喂料挤出机已经取代热喂料挤出机, 广泛应用在当代橡胶工业中。冷喂料挤出机至少包括喂料、塑化和计量3个基本功能段。与热塑性塑料挤出机相比, 冷喂料挤出机的塑化作用实际上是软化胶料, 而胶料因为是无定形聚合物, 故在挤出加工温度范围(20~120℃)内没有固体与液体之间的相转变, 也就是说, 沿着冷喂料挤出机螺杆长度方向胶料逐渐被加热软化。由于胶料具有高粘度和低软化点的性质, 因此在冷喂料挤出过程中必须冷却螺杆和机筒, 以导出额外的粘性生热量, 防止胶料焦烧和橡胶分子分解。

螺杆是冷喂料挤出机的核心部件, 螺杆构型决定冷喂料挤出机的挤出能力(加工范围、产量)和挤出质量(均质性、挤出温度)。自从20世纪30年代诞生冷喂料挤出机^[1]以来, 相继开发了许多冷喂料挤出机螺杆构型。绝大多数螺杆构型的变化在塑化段, 目的是提高胶料塑化均匀性; 少量螺杆构型变化在喂料段, 目的是提高“吃胶”能力, 但对于冷喂料挤出机螺杆构型还没有系统的原理性评

价。本文对冷喂料挤出机主要螺杆构型的发展进行回顾和评价。

1 基本螺杆构型

冷喂料挤出机螺杆基本构型是连续、双头和等深变距的螺棱, 如图1(a)所示。连续螺棱使螺杆的泵送能力高。与单头螺棱相比, 双头螺棱的螺槽变窄, 提高了螺杆热传递能力, 并增大了喂入胶条时螺杆拖进力。恒定的螺棱深度和较小的导程不仅可产生需要的几何压缩比, 而且可使沿螺杆长度的剪切生热始终处于较低水平。

冷喂料挤出机螺杆几何模型如图1(b)所示, 沿螺槽方向速度分量 v_{bz} 拖曳胶料流向挤出出口, 而垂直螺槽速度方向分量 v_{bx} 引起胶料循环流动(或环流)^[2-4], 使得胶料一定程度的横向混合, 如图2(a)所示。环流对螺棱过度圆角的设计有要求, 如果螺棱拖曳侧的过渡圆角半径为零, 环流将在此处引起Moffatt漩涡^[3], 如图2(b)所示, 造成胶料长时间滞留, 因此螺棱拖曳侧的过渡圆角必须具有较大的曲率半径。

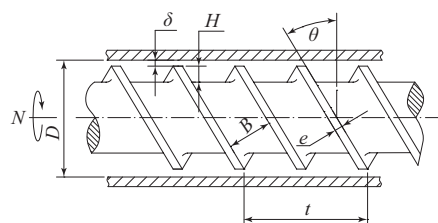
基金项目:山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2020CXGC010312)

作者简介:王宁(1995—), 男, 山东临沂人, 青岛科技大学在读硕士研究生, 主要从事高分子材料加工成型技术的研究。

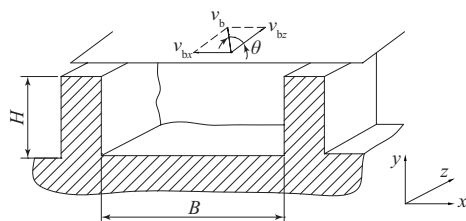
***通信联系人**(jnelyc@126.com)

引用本文:王宁, 苗露, 胡学志, 等. 橡胶冷喂料挤出机螺杆构型的发展状况[J]. 橡胶工业, 2023, 70(4): 311-319.

Citation: WANG Ning, MIAO Lu, HU Xuezhizhi, et al. Development status of screw configurations of cold feed rubber extruder[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(4): 311-319.



(a) 基本构型

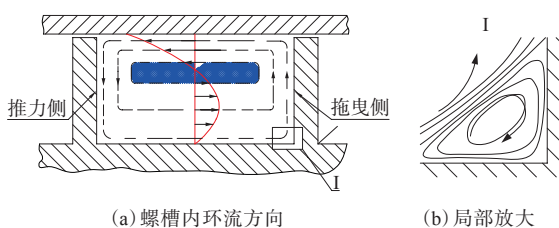


(b) 几何模型

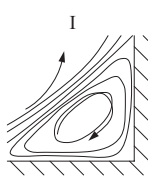
N —螺杆转速; D —螺杆直径; δ —螺棱顶部与机筒的间隙; H —螺棱高度; θ —螺棱螺旋角; B —螺棱螺槽宽度; e —螺棱宽度; t —螺棱螺槽导程; v_b —螺杆静止时机筒的运动速度; v_{bx} —垂直螺槽方向速度分量; v_{bz} —沿螺槽方向速度分量。

图1 冷喂料挤出机螺杆

Fig. 1 Screw of cold feed extruder



(a) 螺槽内环流方向



(b) 局部放大

图2 螺槽胶料横向流动示意

Fig. 2 Diagram of compound transverse flow in screw channel

θ , v_{bx} 和 v_{bz} 的计算公式为

$$\theta = \arctan\left(\frac{t}{D\pi}\right) \quad (1)$$

$$v_{bx} = D\pi N \sin \theta \quad (2)$$

$$v_{bz} = D\pi N \cos \theta \quad (3)$$

在螺槽内环流的主要特征是螺槽中心区域存在不流动层或未混合区[图2(a)中的蓝色区域]。这种环流导致在靠近机筒和螺杆表面的区域中胶料有大的剪切速率和长的停留时间^[5],致使在螺槽中胶料的剪切应变和温度存在明显区域差异:中心区域的剪切应变小于和温度低于其他区域。中心区域胶料的温度低称为冷核现象,通常发生在从喂料段开始到大约塑化段中部^[6]。因此,基本螺杆构型产生的简单剪切对于胶料的塑化作用是不

够的。

实践已经证明,采用基本螺杆构型的早期冷喂料挤出机(仅通过增大螺杆长径比来增强塑化功能)的塑化性能较差,只适合很软的胶料挤出,而不适合高弹性胶料挤出,因为当加工后者时,需要较高的螺杆转速来塑化,引起螺槽内胶料温差增大,甚至局部高温,导致胶料焦烧或橡胶分子分解,而较低的螺杆转速造成胶料挤出生产不经济。

在冷喂料挤出机中,靠近机筒和螺杆表面的胶料最先被摩擦加热,而塑化胶料的主要热量是胶料的粘性生热。由于在基本螺杆构型的螺槽中存在固有的胶料剪切速率不均匀性,因此,必须通过胶料均匀分布混合以实现均匀塑化。在螺杆螺槽中,完成胶料分布混合的基本任务是将中心区域的胶料向螺槽外围传递,使之参与螺槽横截面的循环流动,即实现胶料的内外混合。通常在单螺杆挤出机中,通过改善横截面混合和轴向混合来提高胶料的分布混合效果。对于高粘度流体,根据分布混合理论^[7-9],实现有效分布混合不仅需要大的剪切应变和/或拉伸形变,而且需要流体微元的频繁分流和重新取向来增大其界面面积,因此增强流体混合作用需要改变螺杆构型,引入复杂的流动。

2 螺杆构型发展

2.1 塑化段

2.1.1 主副螺棱构型

1963年,主副螺棱构型螺杆^[10-11]开辟了冷喂料挤出时代。该主副螺棱构型源自于热塑性塑料挤出机螺杆的主副螺棱概念,其螺杆也称为屏障螺杆。主副螺棱构型的结构特征为:副螺棱导程大于主螺棱导程,副螺棱高度小于主螺棱高度。因此,塑化段螺槽分为主螺槽A(入口螺槽)和副螺槽B(出口螺槽),前者由宽逐渐变窄,后者宽度变化相反,如图3所示。

由于螺槽容积变化,拖曳作用使主螺槽A内胶料的压力增大,迫使胶料通过屏障间隙 δ_0 回流进入副螺槽B。这种流动不仅破坏了主螺槽内的不流动层,而且强迫所有胶料通过窄的屏障间隙,产生大的剪切作用而塑化(一种特殊的塑化模式)。然

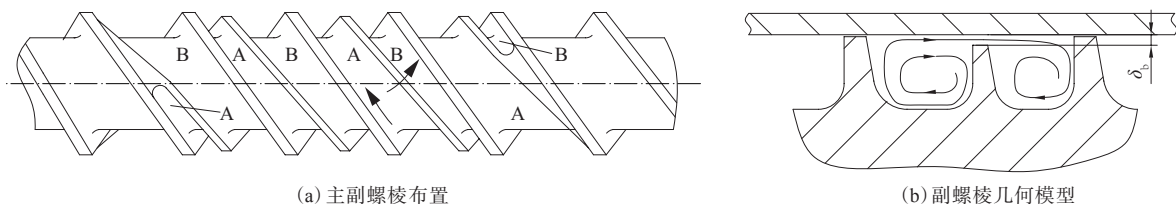


图3 屏障螺杆构型

Fig. 3 Barrier screw configuration

而由于回流的重新取向作用小,这种螺杆基本上仅用于热炼^[12]。

虽然与变距螺杆相比,主副螺棱构型螺杆有较好的塑化胶料能力,但是这种构型不适合大规格挤出机(螺杆直径 $>90\text{ mm}$),因为大规格挤出机的 δ_b 大,限制了其塑化能力。如果大规格挤出机采用较小的 δ_b ,则将降低其产量并且使挤出胶料温度过高。

2.1.2 中断和沟槽螺棱构型

1970年,J. P. LEHNEN等^[12]将中断和沟槽螺棱引入到塑化段中,发明了一种冷喂料挤出机螺杆,如图4所示,其在喂料段之后,有1个多头、反向的中断螺棱段和1个类似主副螺棱布置的螺棱段。然而,副螺棱有与主螺棱一样的高度和比主螺棱宽度大的宽度,并且在副螺棱上设有许多深度与其高度一样的沟槽。

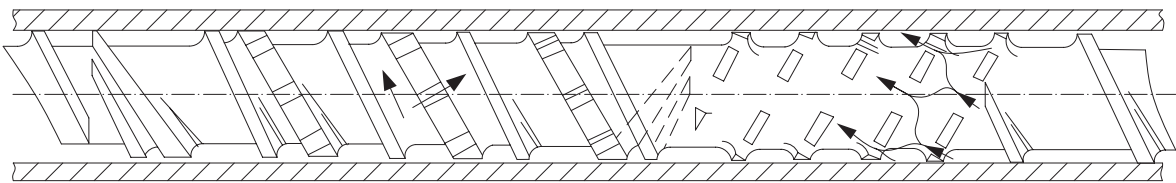


图4 中断和沟槽螺棱螺杆构型

Fig. 4 Screw configuration with interrupted and grooved flights

多个螺棱中断或沟槽将使螺槽间胶料产生大量的回流分流和重新取向,消除胶料的不流动层,增强胶料的横截面混合和轴向混合,改善胶料的分布混合效果,实现胶料的均匀塑化。由于螺棱中断的长度和沟槽的宽度较大,在它们中胶料的剪切速率较小,粘性生热低。中断螺棱段使胶料产生预塑化作用,主副螺棱段进一步增强胶料的混合和塑化作用。

试验表明,尽管这种螺棱构型能够均匀塑化高粘度胶料,但是其向前泵送能力低,而且螺杆的能耗大(因为反向中断螺棱段是压力损耗段)、自洁性差和机械加工成本高。因此,这种螺杆构型应用并不广泛。

2.1.3 销钉机筒构型

1972年,H. G. L. MENGES等^[13]发明了径向销钉机筒冷喂料挤出机。其结构特点是在塑化段的机筒上径向安装6—10排销钉,在每一销钉排平面上沿周向等间距布置6—12个销钉,销钉几乎伸到螺杆芯轴表面,如图5所示。在每一销钉排的轴向位置,螺棱有宽度比销钉直径稍大的沟槽,以使

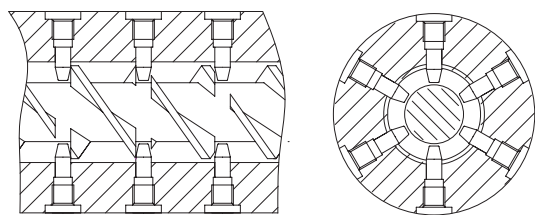


图5 径向销钉机筒冷喂料挤出机

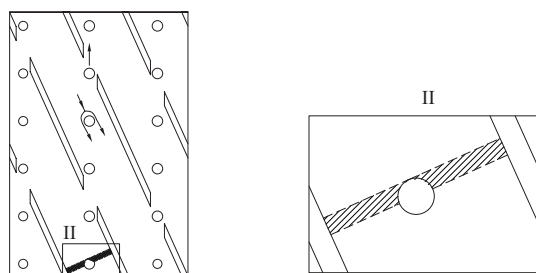
Fig. 5 Radial pin barrel cold feed extruder

销钉通过旋转的螺杆螺棱。

径向销钉机筒冷喂料挤出机部分螺杆段展开、销钉引起的螺槽中心区域胶料重新分布和销钉后的胶料流动分别如图6—8所示。虽然径向销钉机筒冷喂料挤出机螺杆构型变化不大,但是机筒销钉与螺杆的共同作用引起的胶料复杂流动变化对其分布混合和塑化有显著的增强作用。

(1)沿螺槽宽度方向,销钉连续引起螺槽内胶料频繁分流[见图6(a)]和重新取向^[14-19](见图8),并且短期推动螺槽中心区域的胶料移到螺槽外围,参与循环流动(见图7)。

(2)在销钉与螺棱侧面之间胶料存在收敛流动引起的拉伸流动[见图6(b)],拉伸流动将引起



(a) 螺杆静止、机筒运动

(b) 局部放大

图6 径向销钉机筒冷喂料挤出机部分螺杆段展开示意

Fig. 6 Unrolled diagram of partial screw sections of radial pin barrel cold feed extruder

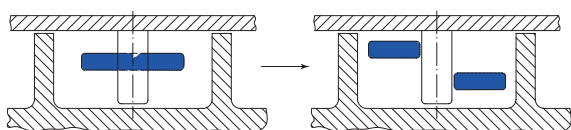
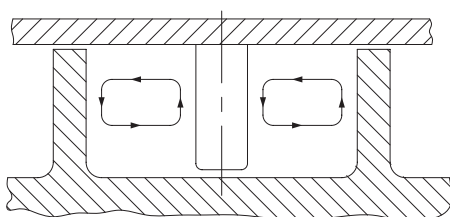
图7 销钉引起的螺槽中心区域胶料重新分布示意
Fig. 7 Redistribution of compound in center region of screw channel caused by pin

图8 销钉后的胶料流动示意

Fig. 8 Diagram of compound flow behind pin

流体微元的界面面积以指数方式增大^[20]。

(3) 销钉直接推动胶料通过螺棱沟槽, 增强螺槽间胶料的位置交换和轴向混合[见图6(a)]。

由于销钉与螺棱侧面之间的平均间隙较大、剪切速率小, 销钉引起的胶料的粘性生热低, 使径向销钉机筒冷喂料挤出机能够实现胶料的低温、均化和高产量挤出, 这是径向销钉机筒冷喂料挤出机的重要成功, 其结束了胶料挤出很长时间一直由热喂料挤出机占主导地位的局面。但是螺棱沟槽会降低螺杆的泵送能力, 其输送流率仅为单螺杆挤出机的50%^[14], 这种固有缺陷限制了径向销钉机筒冷喂料挤出机产量进一步提高。

上述径向布置的销钉至少存在两类问题: 不能连续通过热调节流体和部分销钉容易断裂。为了克服这些问题, 2004年U. COLOMBO^[21]发明了切向销钉机筒冷喂料挤出机, 如图9所示, 其销钉沿螺杆切向布置。不同于径向销钉沿螺槽宽度方

向分流, 切向销钉沿螺槽深度方向分流, 并且胶料会全部绕过销钉(如图10所示), 能够一直推动螺槽中心区域的胶料移到螺槽外围, 进一步增强分布混合效果。另外, 由于销钉与螺杆芯轴或机筒表面之间的间隙较小, 胶料的粘性生热较高, 塑化较快。同时, 因为热调节流体通过销钉, 热交换能力增大, 切向销钉机筒冷喂料挤出机能够以最佳方式有效控制胶料温度, 非常适合有特定温度要求的胶料挤出, 并且可以通过进一步增大螺杆转速来提高挤出产量^[22]。目前, 切向销钉机筒冷喂料挤出机在橡胶工业中有少量应用。

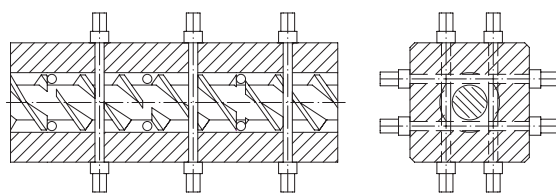


图9 切向销钉机筒冷喂料挤出机

Fig. 9 Tangential pin barrel cold feed extruder

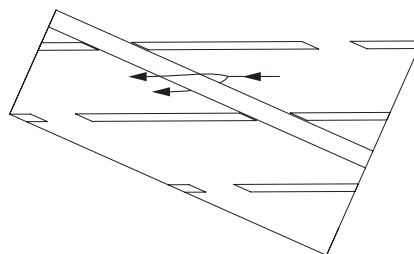


图10 切向销钉机筒冷喂料挤出机部分螺杆螺槽展开示意

Fig. 10 Unrolled diagram of partial screw channel of tangential pin barrel cold feed extruder

销钉机筒冷喂料挤出机的进一步发展是2013年刘彦昌等^[23]发明的混合型销钉机筒冷喂料挤出机, 如图11所示。该类型挤出机兼有径向和切向销钉构型的优点, 与这两者相比, 它在胶料的混合和塑化效果以及挤出产量方面有进一步提高^[24]。

2009年, T. IWATA等^[25]在径向销钉机筒冷喂料挤出机螺杆的基础上, 发明了一种变螺槽螺

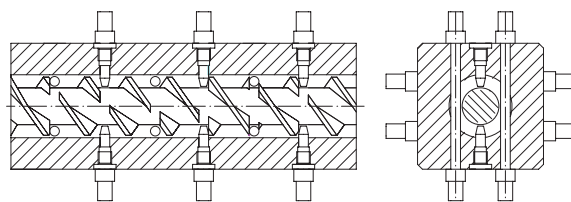


图11 混合型销钉机筒冷喂料挤出机

Fig. 11 Mixed type pin barrel cold feed extruder

杆,如图12(a)所示,在2头螺棱的螺杆塑化段(或混合段)中,在1头螺棱上设置多个大的螺棱中断,在每个中断内有2头等长的附加螺棱段。这2头附加螺棱段与另1头基本连续螺棱平行并且并排相错排列,造成螺槽头数在2和3之间重复变化。多排机筒销钉通过基本连续螺棱的沟槽和螺棱中断(即附加螺棱的上游侧和下游侧)。

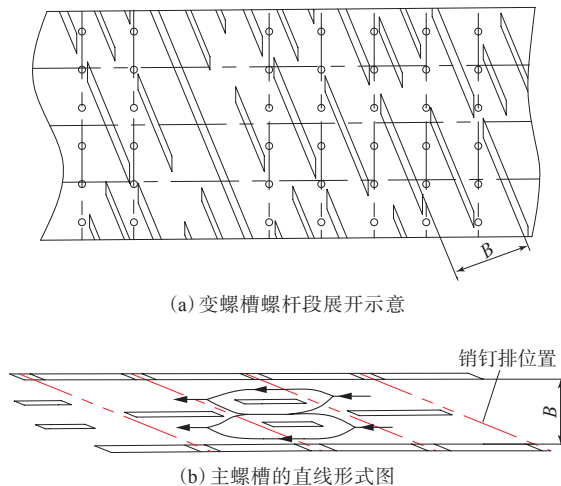


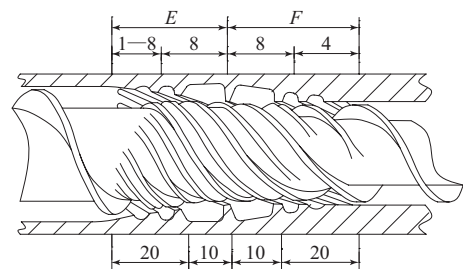
图12 变螺槽螺杆段展开示意

Fig. 12 Unrolled diagram of variable channel screw section

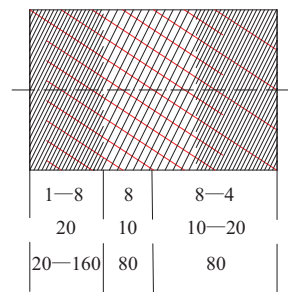
对于混合型销钉机筒冷喂料挤出机,除了机筒销钉的混合作用之外,变螺槽螺杆又增加了螺槽数量变化引起的分流和合流作用,即当螺槽头数在2与3之间交替重复变化时,对胶料流动进行重复分流和合流[见图12(b)]。另外,当一排机筒销钉在不同头数的螺槽之间通过时,横推胶料在分流之间转移。通过这种分流增强作用,进一步提高胶料的分布混合和塑化效果。由于双头螺棱中的1头螺棱是基本连续的,这种螺杆构型的向前输送能力类似于径向销钉机筒螺杆构型。然而,目前还没有这种螺杆的工程分析和试验对比数据。

2.1.4 传递混合构型

螺杆传递混合段如图13所示,传递混合构型的特征包括^[26]: (1) 在给定轴向长度($E+F$)内,螺杆螺槽深度从最大值减小到基本为零(在 E 内)后再增大(在 F 内),而机筒螺槽深度从基本为零增大到最大值(在 E 内)后再减小(在 F 内); (2) 螺杆与机筒通常有多头且方向相反的螺棱,螺杆与机筒螺棱形成大量的交叉螺棱顶面。



(a) 传递混合段截面



(b) 传递表面展开示意

图13 螺杆传递混合段

Fig. 13 Transfer mixing section of screw

在图13(a)中机筒上面的数字是螺杆螺棱的数量,在机筒下面的数字是机筒螺棱的数量。在图13(b)中,红色线代表螺杆螺棱,黑色线代表机筒螺棱;下面的数字是剪切点(切割点)数量。

传递混合构型的作用有: (1) 交叉螺棱顶面的相对运动以逐层和细分的方式,在螺杆与机筒之间传递100%的胶料; (2) 大量交叉螺棱顶面产生的高密度剪切点,极大地增强了胶料的流动分流和重新取向效应^[27-28],显著改善了胶料的分布混合效果,这种传递混合又称为多次切割传递混合; (3) 在传递混合过程中,大量剪切点对胶料强烈剪切做功,逐层塑化胶料,提高胶料的均匀塑化效果。

螺棱头数(或剪切点密度)决定胶料的混合和塑化的均匀程度和效率。然而,螺棱头数的增加受到螺棱强度和螺槽向前输送能力的限制。通过调节交叉螺棱之间的径向间隙,可以控制胶料的剪切生热程度。

1979年,P. MEYER^[29]将传递混合设计应用到冷喂料挤出机上,发明了传递混合式冷喂料挤出机,其目的是用小长径比螺杆实现高门尼粘度胶料的塑化,避免大长径比螺杆引起的过热危险。这种冷喂料挤出机螺杆包括单头螺棱的喂料和压

缩段、第一传递混合段E和第二混合段F及双头螺棱的挤出段。在传递混合段中,螺杆和机筒的螺棱头数大体分3段变化:螺杆螺棱头数以“少-多-少”的方式变化,机筒螺棱头数以“多-中-少”的方式变化。这样的螺棱头数变化造成“低-高-低”的剪切点密度变化,引起“慢-快-慢”3个阶段的混合过程^[28]。在传递混合段入口区附近,最少的螺杆螺棱头数和最多的机筒螺棱头数可使机筒螺棱容易细分和剪切塑化在螺杆螺槽中的硬胶料,并在浅机筒螺槽中发生有效的向前输送,避免螺槽被阻塞。

尽管传递混合式冷喂料挤出机有良好的混合和塑化效果以及小长径比(大约为其他冷喂料挤出机的一半),但是在小径向间隙中胶料的高剪切速率和硬胶料引起高的粘性生热,并且其制造费用高,这些缺点限制了它的应用推广。

1992年,G. CAPELLE^[30]结合传递混合和销钉机筒的概念,发明了销钉机筒传递式冷喂料挤出机。它有与传统冷喂料挤出机类似的喂料段、两排销钉的销钉机筒段、传递混合段和挤出段。在传递混合段对胶料产生强烈塑化作用之前,销钉机筒段对胶料先进行低剪切速率的预塑化,使挤出胶料的温升降低、挤出产量增大和挤出波动变小。

同年,G. CAPELLE^[31]又发明了一种带节流阀的销钉机筒传递式冷喂料挤出机,如图14所示。在这种挤出机的传递混合段中,螺杆和机筒有恒定的螺棱头数和等宽的螺槽,例如,4头螺杆螺棱和12头机筒螺棱使传递混合段有良好的自洁性和低制造费用。起节流阀作用的多个销钉位于传递混合段机筒螺槽最深位置处,沿机筒圆周等角度径向插入机筒螺槽内。通过调节销钉插入深度,从全闭到全开范围,可以任意减小在这一区段中

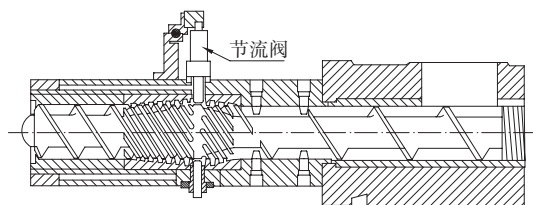


图14 带节流阀的销钉机筒传递式冷喂料挤出机
Fig. 14 Pin barrel transfermix cold feed extruder with throttle

机筒螺槽的容积来提高传递混合段的塑化功能,可以根据胶料的挤出量和挤出温度预先使挤出机性能处于最佳状态。

带节流阀的销钉机筒传递式冷喂料挤出机已经获得了重要成就,并引起了广泛重视。与普通销钉机筒冷喂料挤出机相比,它除了具有较低挤出温度、较好挤出均匀性、较高挤出产量和较小能耗的优点之外,还有很强的可调节性和较低的制造成本^[32]。

2.1.5 凸耳螺杆构型

2011年,T. D. MAZZOCCA^[33]发明了一种凸耳型冷喂料挤出机,其螺杆如图15所示,发明这种挤出机的目的是解决普通销钉机筒冷喂料挤出机对胶料完全混合能力受限制问题。这种螺杆有双头螺棱,在塑化段的螺槽内设置多个从螺杆芯轴向凸出的凸耳,凸耳以90°相位角的间隔围绕芯轴布置。平行于螺杆芯轴表面的凸耳截面形状类似船形,凸耳的高度比螺棱高度低一个预定值,并且沿挤出机螺杆长度这一预定值逐渐变小,凸耳的长度方向与螺棱稍微不平行。在螺棱顶面上与凸耳前端对齐位置处设有凹槽。

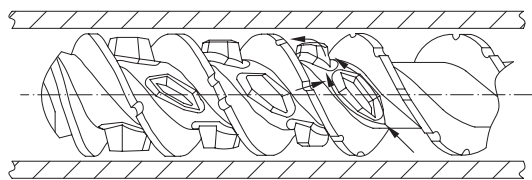


图15 凸耳型冷喂料挤出机的螺杆
Fig. 15 Screw of lug type cold feed extruder

在挤出机运行时,凸耳对螺槽内的胶料有分流作用,消除冷核的存在,并且在凸耳与螺棱侧面间存在收敛流道引起的拉伸流动和在凸耳顶面与机筒间存在大的剪切作用。另外,螺棱顶面凹槽产生小部分胶料回流,改善轴向混合。通过这些混合增强作用能够获得期望的混合和塑化效果。

这种螺杆构型可使螺杆长度变小和驱动功率降低,在短时间内允许胶料以最低生热快速通过挤出机。然而,凸耳会增大胶料的流动阻力,降低挤出产量。这种螺杆构型的功能性需要试验或模拟分析来进一步证实。

2.2 喂料段

冷喂料挤出机通常采用胶条喂料。足够的螺

杆螺棱旋转拖进力是胶条喂料成功的关键。对于基本螺杆构型,螺棱的摩擦拖进作用包括螺棱顶面和螺棱侧面两方面的贡献,后者是由于螺棱嵌入胶条内而引起的^[34]。

在冷喂料挤出机喂料口处,尽管螺杆构型的变化较少,然而仅在少数情况下才使用基本螺杆构型,在大多数情况下则用改进螺杆构型。喂料段螺杆展开如图16所示。在冷喂料挤出机中广泛应用的喂料段螺杆构型是多头螺棱和双头螺旋沟

槽构型[图16(a)中的红线]。螺棱头数通常为4或6,依赖螺杆直径而变。双头沟槽的螺旋角度大于螺棱的螺旋角度,沟槽深度大于多头螺棱的高度,并与塑化段和挤出段螺槽深度相同,这样双头螺旋沟槽切断多头螺棱。当螺杆旋转时,螺棱中断两侧的棱边将产生刺入效应。刺入效应和多头螺棱显著增强对胶条的拖进作用,保证顺利喂料。然而,这种螺杆喂料段构型的制造成本很高。

少量应用的另外两种改进的喂料段螺杆构型

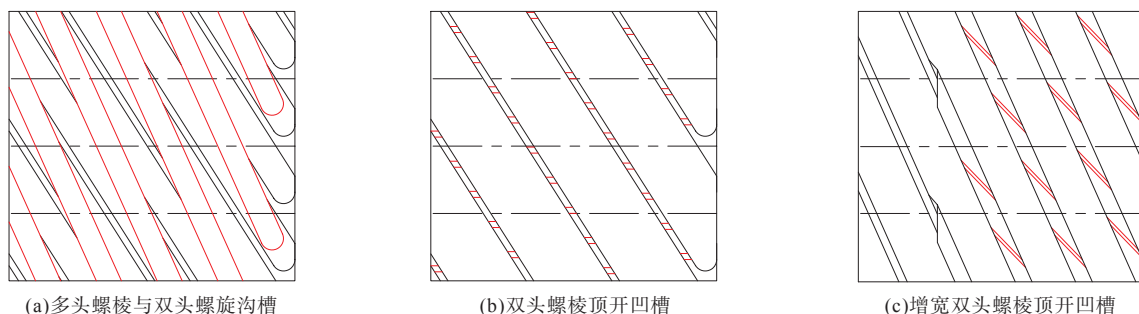


图16 喂料段螺杆展开示意

Fig. 16 Unrolled diagram of screw section at feed section

是在普通双头螺棱的顶面上沿螺杆轴线方向开设多个浅而窄的凹槽[图16(b)中的红线]和在增宽双头螺棱的顶面上开设多头浅而窄的螺旋凹槽[图16(c)中的红线]。这些凹槽不仅增强螺棱摩擦拖进胶条作用,而且有利于排除胶料内包裹的空气。后一种构型由于有宽螺棱,对胶条拖进作用更强,然而会增大螺杆侧向受力和喂料能耗。

3 结语

在冷喂料挤出机塑化段中,为了增强分布混合和塑化作用,必须在螺杆构型中引入基于胶料频繁分流和重新取向的分布混合结构,实现的方法主要有以下3种。

(1) 在螺杆螺棱上设计凹槽、沟槽或中断。在主副螺棱构型中的屏障间隙可以被认为是一种特殊的凹槽。

(2) 在螺槽中设置分流元件,例如销钉、附加螺棱或凸耳。

(3) 在螺杆螺槽和机筒螺槽之间加强胶料传递作用,例如传递混合构型。

不同分布混合结构对胶料产生不同程度的频繁分流和重新取向作用。在已有的塑化段混合结

构中,传递混合构型对胶料的频繁分流和重新取向作用最大。

为了实现胶料的分布混合和塑化效果的最大化,应当采用中断剪切混合原理。这就要求分布混合结构必须提供很强的重新取向作用(无规取向)。可以认为,销钉机筒变螺槽螺杆构型有近似的无规取向作用。

因此,未来可以取代普通销钉机筒螺杆构型并有广泛应用前景的螺杆构型是带节流阀的销钉传机筒递式和销钉机筒变螺槽螺杆构型,它们都能很好地体现螺杆与机筒联合对胶料混合的作用。

可以预测,为了克服带节流阀销钉传递式冷喂料挤出机成本高及销钉机筒变螺槽螺杆冷喂料挤出机产量受限的问题,螺杆塑化段构型的一个发展方向是基于中断剪切混合原理且由提供无规或近似无规取向作用的混合结构构成的螺杆构型;螺杆喂料段构型的发展方向是有足够拖进力、低螺杆侧向受力、低喂料功率消耗和低制造成本的螺杆构型。

参考文献:

- [1] WHITE J L, POTENTE H. 螺杆挤出[M]. 何红, 金志明, 译. 北京:

- 化学工业出版社, 2005: 42-43.
- [2] MOHR W D, SAXTON R L, JEPSON C H. Theory of mixing in the single-screw extruder[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1957, 49(11): 1857-1862.
- [3] MOFFATT H K. Viscous and resistive eddies near a sharp corner[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1964, 18(1): 1-18.
- [4] 魏新利, 董卫刚. 胶料在单螺杆橡胶挤出机中的三维流场分析[J]. *橡胶工业*, 2003, 50(6): 366-369.
- WEI X L, DONG W G. 3D flow field analysis of rubber compound in single screw rubber extruder[J]. *China Rubber Industry*, 2003, 50(6): 366-369.
- [5] MANAS-ZLOCZOWER I. Mixing and compounding of polymers[M]. Munich, GER: Hanser, 2009: 863.
- [6] LIMPER A, SCHRAMM D. Process description for the extrusion of rubber compounds—Development and evaluation of a screw design software[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2002, 287(11): 824-835.
- [7] SPENCER R S, WILEY R M. The mixing of very viscous liquids[J]. *Journal of Colloid Science*, 1951, 6(2): 133-145.
- [8] MOHR W D, SAXTON R L, JEPSON C H. Mixing in laminar-flow systems[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1957, 49(11): 1855-1856.
- [9] ERWIN L. Theory of laminar mixing[J]. *Polymer Engineering and Science*, 1978, 18(13): 1044-1048.
- [10] SMITH D H, CHRISTY R L. Modern extrusion equipment[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1972, 45(5): 1434-1441.
- [11] PAUL G. Method and apparatus for refining and separating plastic materials[P]. USA: USP 3375549A, 1968-04-02.
- [12] LEHNEN J P, MENGES H G L, HARMS E G. Apparatus for conveying plastic material[P]. USA: USP 3652064 A, 1972-03-28.
- [13] MENGES H G L, HARMS E G, HEGELE R. Method and apparatus for mixing viscous materials[P]. USA: USP 4178104A, 1979-12-11.
- [14] BRZOSKOWSKI R, WHITE J L, SYZDLOWSKI W, et al. Modelling flow in pin-barrel screw extruders[J]. *International Polymer Processing*, 1988, 3(3): 134-140.
- [15] YABUSSHITA Y, BRZOSKOWSKI R, WHITE J L, et al. Flow of rubber compound in a pin barrel screw extruder[J]. *International Polymer Processing*, 1989, 4(4): 219-224.
- [16] SHIN K C, WHITE J L. Basic studies of extrusion of rubber compounds in a pin barrel extruder[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1993, 66(1): 121-138.
- [17] 魏新利, 李成清, 王定标. 销钉机筒挤出机内物料流动与混合效果的数值模拟[J]. *橡胶工业*, 2004, 51(12): 746-749.
- WEI X L, LI C Q, WANG D B. Numerical simulation of flow and distributive mixing in pin-barrel extruder[J]. *China Rubber Industry*, 2004, 51(12): 746-749.
- [18] CHEN J N, DAI P, YAO H, et al. Numerical analysis of mixing performance of mixing section in pin-barrel single-screw extruder[J]. *Journal of Polymer Engineering*, 2011, 31(1): 53-62.
- [19] SCHOPPNER V, SCHADOMSKY M, HOPMANN C, et al. Investigations of the mixing behaviour of pin-type rubber extruders[C]. The 31st International Conference of the Polymer Processing Society, Chengdu, 2016: 130003-130005.
- [20] YAO W G, TAKAHASHI K, ABE Y. Analytical study on flow and distributive mixing of a new type pin mixing section for screw extruder[J]. *International Polymer Processing*, 1996, 11(3): 222-227.
- [21] COLOMBO U. Screw extruder with improved mixing pins[P]. USA: USP 6814481B2, 2004-11-09.
- [22] 王祥, 林广义, 吕宁宇, 等. 橡胶切向销钉冷喂料挤出机挤出性能的研究[J]. *橡胶工业*, 2019, 66(1): 57-61.
- WANG X, LIN G Y, LYU N N, et al. Study on extrusion property of tangential pin cold-feeding rubber extruder[J]. *China Rubber Industry*, 2019, 66(1): 57-61.
- [23] 刘彦昌, 章华, 钱志华. 一种混合型销钉机筒冷喂料挤出机[P]. 中国: CN 102114699B, 2013-06-05.
- [24] 刘树明. 混合型销钉机筒冷喂料挤出机理及实验研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2014.
- [25] IWATA T, OHIWA I. Screw extruder[P]. USA: USP 7476096B2, 2009-01-13.
- [26] FRENKEL D. Device for homogenizing flowable substances[P]. GER: DE 1142839B, 1963-01-31.
- [27] LI T, CHENG H F, MANAS-ZLOCZOWER I. Analysis of mixing efficiency in a multi-cut transfermix[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1995, 68(5): 773-782.
- [28] 巫静安. 多流道传递混合(MCT)螺杆挤出机的结构原理及特色[J]. *橡塑技术与装备*, 1996, 22(3): 15-19.
- WU J A. Structure principle and characteristics for multi-cut-transfermix (MCT) screw extruder[J]. *China Rubber/Plastics Technology and Equipment*, 1996, 22(3): 15-19.
- [29] MEYER P. Mixing apparatus[P]. USA: USP 4136969, 1979-01-30.
- [30] CAPELLE G. Degassing extruder[P]. USA: USP 5141426A, 1992-08-25.
- [31] CAPELLE G. High performance extruder with a constant number of threads in the inlet and outlet regions of a transfer shearing section[P]. USA: USP 5147198A, 1992-09-15.
- [32] GERD C. 销钉传递式挤出机的试验和应用[J]. 毛海涛, 译. *橡塑技术与装备*, 1995, 5(2): 17-23.
- GERD C. Experiment and application for pin-transfer screw extruder[J]. MAO H T, Translator. *China Rubber/Plastics Technology and Equipment*, 1995, 21(2): 17-23.
- [33] MAZZOCCA T D. Lug type extruder screw[P]. USA: USP 9011131B2, 2015-04-21.
- [34] 刘彦昌, 于芳, 马冲, 等. 冷喂料橡胶挤出机的喂料行为[J]. *高分子材料科学与工程*, 2020, 36(10): 103-108.
- LIU Y C, YU F, MA C, et al. Feeding behaviour of cold-feed rubber extruders[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2020, 36(10): 103-108.

Development Status of Screw Configurations of Cold Feed Rubber Extruder

WANG Ning¹, MIAO Lu², HU Xuezh³, PAN Yiren¹, WANG Zhilin¹, LIU Yanchang¹

(1. Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China; 2. Qingdao Lvjinyuan Security Technology Co., Ltd, Qingdao 266043, China; 3. Qingdao MESNAC Machinery and Electric Engineering Co., Ltd, Qingdao 266137, China)

Abstract: In this article, the development of the screw configurations of cold feed rubber extruders was reviewed. Firstly, the geometry features and mixing and plasticizing capability of the basic screw configuration of the cold feed extruder were summarized. Then, the structural characteristics, mixing and plasticizing principle of the plasticizing section with different screw configurations, including the main and secondary screw flight configurations, interrupted and grooved screw flight configurations, pin barrel configurations, transfer mixing configurations, and lug screw configurations, were discussed. Moreover, the structure and characteristics of the feeding section of the cold feed extruder were also reviewed. In the last part, the development trend of the screw configurations of the cold feed extruder in the future was predicted.

Key words: cold feed extruder; screw configuration; screw flight; pin barrel; plasticizing section; feeding section; mixing; plasticizing

专利3则

由北京飞燕石化环保科技发展有限公司申请的专利(公布号 CN 115178077A, 公布日期 2022-10-14)“一种丁基橡胶废气处理装置及其处理工艺”, 涉及的废气处理装置的除雾机构下方安装喷淋机构。喷淋机构包括分流管、连接管、喷淋架和单向双头喷嘴, 其中分流管的上端安装2个连接管, 连接管的一端安装喷淋架, 喷淋架的下端面设有单向双头喷嘴; 分流管的外侧安装洗涤机构。该发明装置和工艺便于对生产丁基橡胶的烟气进行循环脱硝操作, 在不同处理阶段对烟气进行有效冷却, 对脱硝后的溶液进行循环利用, 解决了现有烟气脱硝过程中不便对烟气进行及时冷却、不便对脱硝后的溶液进行循环利用等问题。

由湖北航聚科技有限公司申请的专利(公布号 CN 115160574A, 公布日期 2022-10-11)“一种羟基封端苯醚撑硅橡胶及其制备方法”, 提供了一种硅橡胶的制备方法。其制备步骤如下: 将50~60份八甲基环四硅氧烷、10~30份4,4'-双(二甲基羟基硅基)二苯醚或者4,4'-双(二甲基羟基硅基)二苯醚和1,4-双(二甲基羟基硅基)苯的混合物以及10~20份羟基硅油进行混合, 然后进行真空干燥; 加入催化剂, 在惰性氛围中加热、搅拌进行反应, 制得硅氧烷共聚物; 升温破坏催化

剂; 升温至170~200 °C, 在压力665~1 330 kPa下反应0.5~2 h。以该羟基封端苯醚撑(苯醚1,2-亚乙基)硅橡胶与含氢硅油反应可生成氢气放出, 其可作为发泡剂成分, 用于制备发泡硅橡胶材料; 可用作室温硫化发泡硅橡胶材料的基础聚合物, 该发泡硅橡胶材料可广泛应用于核电站、中子加速器、X射线检查设备等环境条件苛刻的场所。

由扬州东星橡胶股份有限公司申请的专利(公布号 CN 115181345A, 公布日期 2022-10-14)“一种阻燃抗静电传送带覆盖层用橡胶材料及其制备方法”, 涉及的橡胶材料配方(用量/份)为: 氟化磷腈橡胶 5~10, 丁苯橡胶 45~65, 含苯环的热塑性聚氨酯弹性体 10~15, 补强剂 25~45, 五氧化二磷 1~2, 多聚磷酸 0.2~0.6, 功能共聚物 5~10, 2,4,6-三氧代-1,3,5-三嗪-1,3,5(2H,4H,6H)-三丙酸 2~3, 石墨烯 5~10, 偶联剂 3~5, 硬脂酸 1~3, 环烷油 1~2, 硫化剂 2~4, 其他助剂 3~6。其中功能共聚物是由烯丙基三苯基溴化磷、N-(4-氰基-3-三氟甲基苯基)甲基丙烯酰胺、2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸、N-乙烯基吡唑通过自由基聚合制成。该橡胶材料具有显著的阻燃、抗静电, 且力学性能、耐老化性能和环保性能优异。

(本刊编辑部 赵 敏)