

高密度聚乙烯装置挤压机齿轮泵入口温度的影响因素分析

张晋波 陈敏章 黄晓斌

(中国石油兰州石化公司)

摘 要: 针对兰州石化 17 万吨 / 年高密度聚乙烯装置 1# 线 JSW 双螺杆挤压机 Z-425 生产 5000S 牌号产品时, 齿轮泵入口熔融物料温度波动易引发树脂氧化降解、产生色粒及螺杆结碳、运行周期缩短的问题, 以齿轮泵入口温度 TE-4421 为研究对象, 结合装置实际运行数据与工艺调整工况, 系统分析筒体各段温度、闸阀开度、粉料熔体流动速率、稳定剂加入量、催化剂粒径及齿轮泵蒸汽加热方式六大因素对 TE-4421 温度的影响规律。结果表明: TE-4421 控制在 175 ~ 200℃ 可有效规避物料降解、减少色粒生成; 混炼段温度过低会加剧剪切热升高物料温度, 输送段温度适度下调可带走物料余热; 减小闸阀开度、粉料熔体流动速率偏低、稳定剂缺失、催化剂细粉含量高、齿轮泵加热蒸汽品位偏高均会造成齿轮泵入口温度上升。通过优化工艺参数、稳定助剂加注、优选催化剂及调整蒸汽加热等级, 可精准控制熔融物入口温度, 抑制产品色粒与螺杆结碳, 实现装置长周期稳定运行, 为同类 HDPE 挤压造粒系统温度管控及产品质量优化提供工程参考。

关键词: 高密度聚乙烯; 挤压机; 熔融物料温度 ;TE-4421; 色粒;

前 言

兰州石化公司 17 万吨 / 年高密度聚乙烯装置采用日本三井油化淤浆法及 CX 新工艺乙烯聚合生产工艺, 装置共有两条生产线, 其中 1# 线主要生产的产品牌号为 5000S。5000S 产品兼具高拉伸强度、高刚性、可纺性与优异耐候性和耐磨性, 广泛应用于制造工业绳索、渔网、单丝及延伸带、延伸条等。

挤压造粒单元是 HDPE 生产过程中的关键环节, 其工艺水平对 5000S 产品质量有着至关重要的影响。目前我国大部分螺杆挤压机大多依靠进口。在国外, 也仅有德国科倍隆 (CWP)、日本制钢所 (JSW)、日本神户制钢所 (KOBEL)、美国法雷尔公司等为数不多的几家公司拥有设计、制造大型混炼造粒机组成套技术的能力。17 万吨 / 年高密度聚乙烯装置 1# 线挤压机为日本制钢所 (JSW) 供应。

温度是挤压机运行过程中重要条件之一, 聚乙烯粉料从加入料斗到最后成型为制品是经历了一个复杂的温度过程的。物料由固态变为粘流态, 需要热量。挤出过程热量的来源有两个: 一是机筒外部加热通过机筒传给物料的热量, 二是物料与物料之间、物料与螺杆、物料与机筒之间的摩擦热和物料受剪切而生成的热量。挤压机内部局部高温可能导致聚乙烯树脂氧化降解产生色粒, 最终影响产品质量, 因此挤压机运行过程中熔融物料温度得控制至关重要。

1 1# 线挤压机 Z-425 概况及运行现状

1.1 挤压机 Z-425 概况

兰州石化公司 17 万吨 / 年高密度聚乙烯装置采用日本三井油化淤浆法及 CX 新工艺乙烯聚合

生产工艺，装置共有两条生产线，1# 线挤压造粒机组 Z-425 由日本制钢所 JSM 原厂供应，其中混炼机型式为 CMP-280P 双螺杆挤出机，螺杆长径比 (L/D) 为 10，容量为 13000kg/h，电机功率 2600kw，螺杆转速分两档，高档转速 540r/min，低档转速 370r/min；熔融物泵（文中后续均以“齿轮泵”简称）型式为齿轮泵 KNT-30S，减速比为 1/23，齿轮转速为 115 ~ 1150r/min；过滤网更换器为 NSC305DBW 宽型，过滤面积 0.177 m²；切粒机为 ADC-75 型，转速 115 ~ 1150r/min。

1.2 挤压机 Z-425 运行现状

1# 线挤压造粒机组 Z-425 共有 5 段缸体组成，其中 2#、3#、4#、5# 夹套均有测温探头，闸阀处于 3#、4# 号缸体之间，齿轮泵 Z-425-2 入口有压力和温度探头，因筒体上的温度探头实际测量的是夹套的温度，非筒体内物料的温度，只有齿轮泵 Z-425-2 入口温度探头检测熔融物料的温度。齿轮泵 Z-425-2 轴瓦设有 4 个温度探头。齿轮泵转速、切粒机转速均可以手动调整，但自挤压机组 Z-425 投用至今，齿轮泵转速一直不能与齿轮泵入口压力投自动控制，齿轮泵转速需要岗位人员根据挤压机下料负荷进行手动调节。挤压机下料量波动造成齿轮泵吸入压力波动时，齿轮泵转速无法自动跟踪调节。由于挤压机受进料、压力波动等因素影响，其输出本身有微小的波动，当齿轮泵不能自适应调整时，若齿轮泵转速较高时会导致挤压机筒体无法被熔体完全填满，出现“饥饿”现象；若齿轮转速较低时熔体饱胀会造成混炼过度甚至造成挤压机电流过高，过载停机。因挤压机齿轮泵转速没有与入口压力实现自控，齿轮泵入口压力时高时低，不稳定的熔体流动，造成部分物料流动缓慢，长期受热，反复降解，是 5000S 产品色粒产生的主要原因之一。

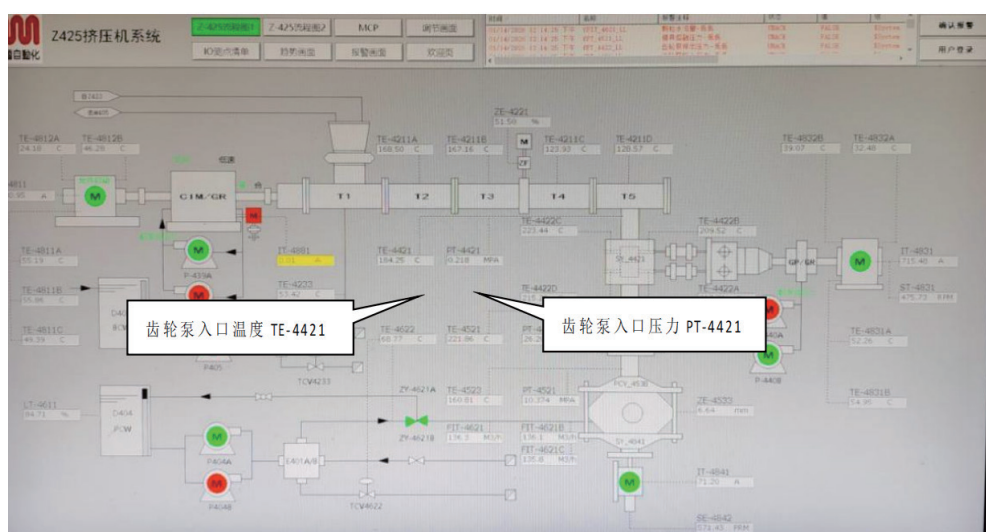


图 1 1# 线挤压机 Z-425 控制画面

1# 线挤压造粒机组 Z-425 混炼机双螺杆为空心轴结构，原设计有内部冷却，但因螺杆转速过高，冷却水旋转接头处泄漏量过大，1997 年开机后不久因泄漏量无法控制进行了拆除，至今未再恢复。因挤压机螺杆无内部冷却系统，剪切热导致螺杆温度过高，滞流在螺杆表面的物料在高温下极易降解和氧化，产生黄点、黑点。

为减少 5000S 产品色粒，稳定 5000S 产品质量，装置投产以来针对挤压机 Z-425 做了很多工艺调整和改造工作；但 1# 线 5000S 产品色粒问题仍反复存在，一般运行 3 至 6 个月需要停机清理螺杆，且每次清理时螺杆在闸阀后靠近闸阀的位置严重结碳。2023 年 12 月装置清理螺杆后对挤压机筒体温度进行了适当调整，之后 1# 线挤压机组 Z-425 长周期运行 18 个月未再产生 5000S 产品色粒问题。通过对 2023 年 12 月份开机后工艺条件分析，筒体内熔融物料的温度起到了至关重要的作用，因挤压机组齿轮泵前能测到熔融物料实际温度的测温点仅有 TE-4421，本片论文以 TE-4421 的影响因素

和控制为出发点进行分析。

2 齿轮泵入口温度 TE-4421 对 5000S 产品色粒的影响分析

图 2 为 2023 年 12 月 1# 线挤压机螺杆抽出清理前后 TE-4421 温度的变化情况，螺杆清理前 1# 线产品色粒已超出合格品 (≥ 20 个 /kg) 指标，色粒处于失控状态，从图中可以看出当时的齿轮泵入口温度 TE-4421 温度长时间停留在 200℃ 以上。12 月 8 日，1# 线挤压机复位开车，开车前期齿轮泵入口温度 TE-4421 仍持续在 200℃ 以上，产品色粒约 15 个 /kg 左右，持续偏高，12 月 9 日，装置对齿轮泵转速，筒体 4# 段、5# 段温度进行了调整，当天齿轮泵入口温度由 200℃ 以上降低至约 180℃，产品色粒从 15 个降低至 5 个 /kg 一下。后期装置又多次进行了齿轮泵转速及筒体温度的调整，1# 线挤压机之后运行稳定，长达 18 个月 1# 线产品未再发生色粒问题。

依据 2023 年 12 月至 2025 年 4 月 1# 线挤压机运行数据分析，齿轮泵入口温度 TE-4421 控制在 175 ~ 200℃ 时，1# 线挤压机运行过程中，筒体内局部高温未能明显超过 5000S 产品的降解温度而导致产品色粒的增多。

3 齿轮泵入口温度 TE-4421 的影响因素分析

3.1 筒体温度对温度 TE-4421 的影响

日常的操作中，当筒体 2# 段、3# 段温度在 170℃ 左右时，上下小幅调整后 TE-4421 温度均未发生较大变化。

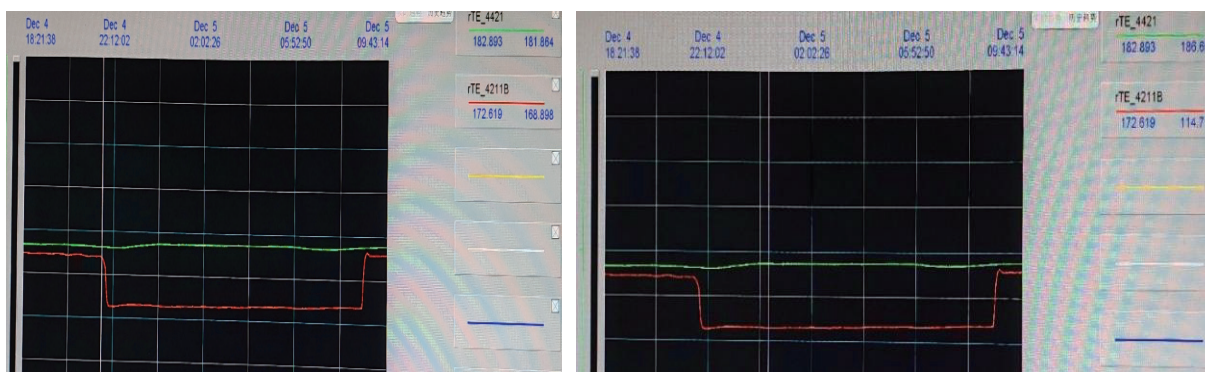


图 2 2025 年 12 月 5 日 3# 段温度异常波动趋势

图 2 为 2025 年 12 月 5 日 3# 段温度异常波动时对应的 TE-4421 温度变化，从图中可以看出：3# 段温度大幅下降至 120℃ 后，TE-4421 的温度明显上涨，由原来的 181℃ 上涨至 187℃，之后 2# 段温度恢复至 170℃ 后，TE-4421 温度缓慢下降，但未再恢复到原来的 181℃。

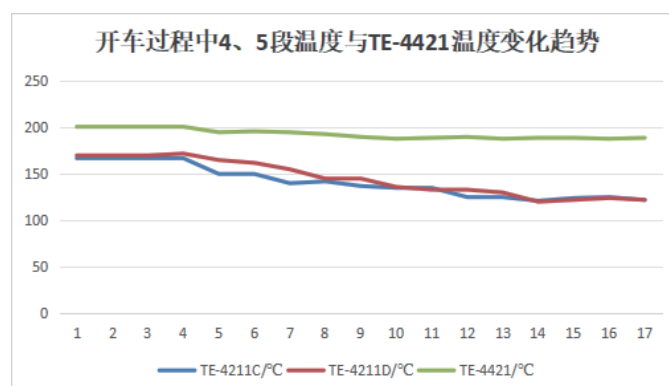


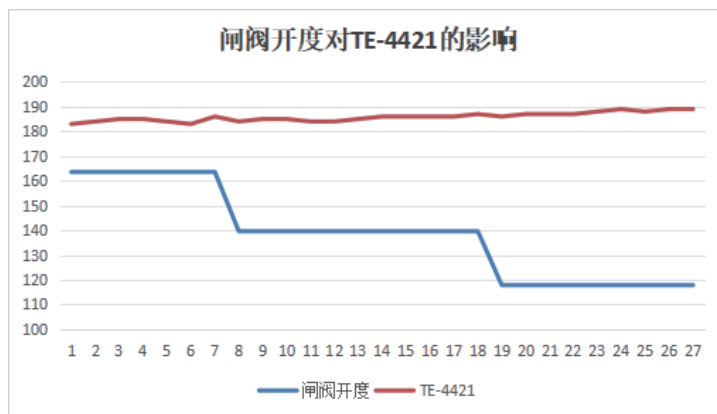
图 3 挤压机开机前期 4、5 段温度与 TE-4421 温度变化趋势

图3为1#线挤压机开机后4、5段温度与TE-4421温度变化趋势，从图中可以看出，当筒体4#段、5#段温度在160℃以上时，TE-4421温度明显偏高，达到200℃，甚至更高；缓慢降低4#段、5#段温度在130℃左右时，TE-4421温度同时缓慢下降至190℃左右，之后继续降低4#段、5#段温度时，TE-4421温度基本稳定在189℃左右，未再下降。

通过对日常调整和异常现象的分析可知：2#、3#段为闸阀前的混炼段，略高的筒体加热温度可主动提供部分热能，加快5000S粉料的熔融，降低熔体粘度，减轻对剪切热的依赖，分散剪切热。若混炼段温度大幅下降，低于140℃（HDPE的熔点通常为130～135℃），剪切热会剧烈大幅上涨，最终导致熔融物料温度TE-4421上涨；4#、5#段主要是物料输送段，此段的主要作用是稳定输送，降低夹套温度可以通过热交换直接带走物料热量，使物料整体温度降低，但不建议该段温度低于120℃。温度过低，会增加熔体粘度，非啮合双螺杆输送段虽为低剪切段，但仍有剪切力存在，过低的温度会导致输送段产生较高的剪切热，导致物料温度局部和整体上涨。

3.2 闸阀开度对温度 TE-4421 的影响

在生产5000S产品期间，在其他工艺条件基本保持不变的情况下将1#线挤压机闸阀开度分别从81.8℃调整至69.8℃，在调整至58.9℃后TE-4421的温度变化如下图所示：



注：为使对比更明显，图中闸阀开度均做了“×2”处理

图4 闸阀开度对TE-4421的影响

从图中可以看出，降低闸阀开度后，TE-4421整体呈上升趋势，在确保产品颗粒无夹生料等异常现象时，适当提高闸阀温度可以降低剪切热，降低熔融物料的整体温度。

3.3 粉料产品熔体质量流动速率对温度 TE-4421 的影响

2025年6月装置1#线生产L5200产品（熔体质量流动速率为0.5g/10min，5kg砝码），6月23日L5200产品生产完后开始转产，1#线挤压机开机，开机前期TE-4421温度变化如下图所示：

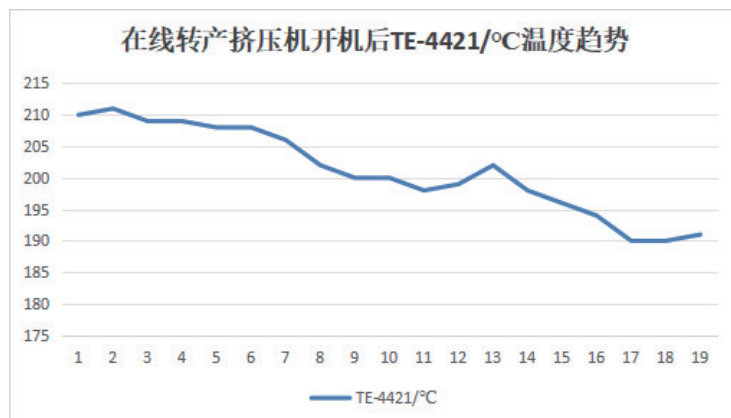


图5 1#线在线转产挤压机开机后TE-4421温度变化趋势

因转产前期粉料熔体质量流动速率过低，需要更高的剪切热，物料整体温度过高，TE-4421 偏高，此时筒体内局部高温可能超过了物料降解温度，导致螺杆表面结碳，虽然后面随着粉料熔体质量流动速率快速下降物料整体温度下降，但螺杆表面部分结碳物料导致螺杆表面粗糙，螺杆表面粗糙会导致局部剪切应力集中，大概率导致局部过热，同时粗糙表面也会成为物料“滞留区”，高温物料滞留极易发生氧化降解，进一步形成积碳，陷入恶性循环。

3.4 稳定剂加入量对温度 TE-4421 的影响

图为 2026 年 2 月 26 日 1# 线稳定剂下料不好，稳定剂未加入后 TE-4421 温度波动趋势。

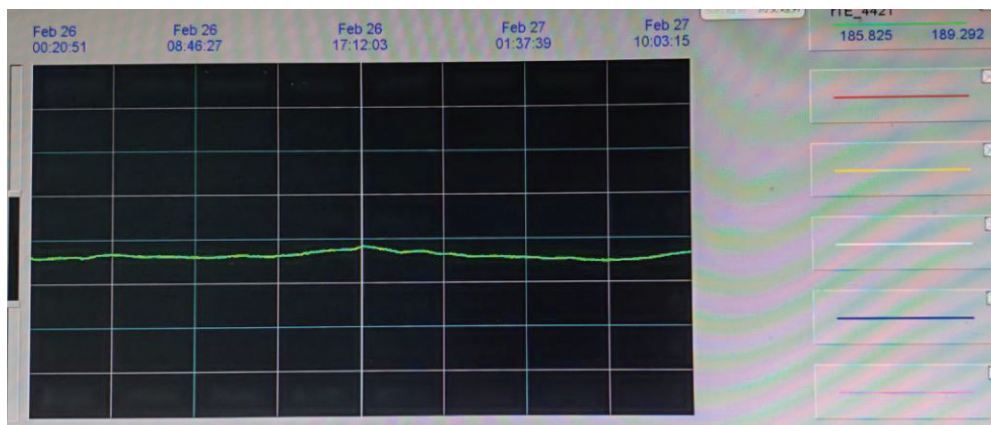


图 6 1# 线稳定剂停加前后 TE-4421 温度变化趋势

从图中可以看出，稳定剂下料不好，停加后，TE-4421 温度逐渐上涨，最高上涨至 189℃，较之前稳定剂正常加入时温度 184℃ 高出 5℃，稳定剂恢复加入后，短时间内将稳定剂加入量由之前的 0.2% 提高至 0.45%，TE-4421 温度缓慢下降至 183℃。主要因 5000S 复合稳定剂中含有硬脂酸钙、硬脂酸锌等润滑组分，这些成分在加工过程中起到了降低熔体粘度和减少摩擦生热的作用，停加稳定剂后，物料温度整体上涨。因此，不论在挤压机开机前期还是稳定后，稳定剂的正常加入有利于降低熔融物料整体温度，在正常生产过程中要保证稳定剂的正常加入。

3.5 催化剂粒径对温度 TE-4421 的影响

2026 年 2 月 26 日至 3 月 3 日装置生产 5000S 产品期间使用 A 厂家的催化剂，该时间段前后均使用 B 厂家的催化剂，催化剂粒径分布如下图所示：

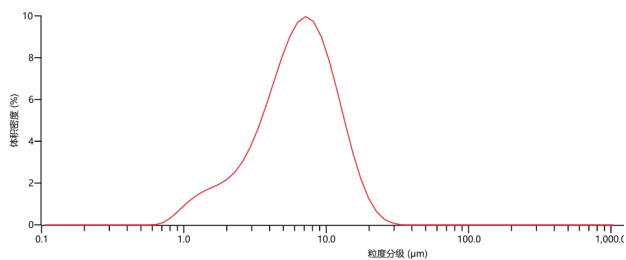


图 7 B 厂家催化剂粒径分布

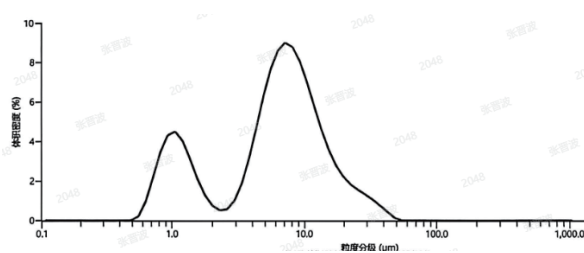


图 8 A 厂家催化剂粒径分布

切换催化剂前后挤压机 Z-425 主机电流波动情况如下图所示：

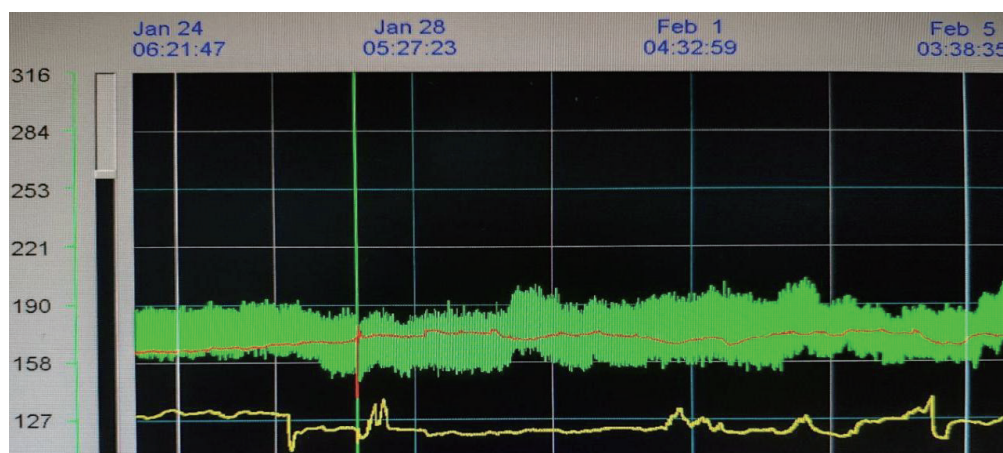
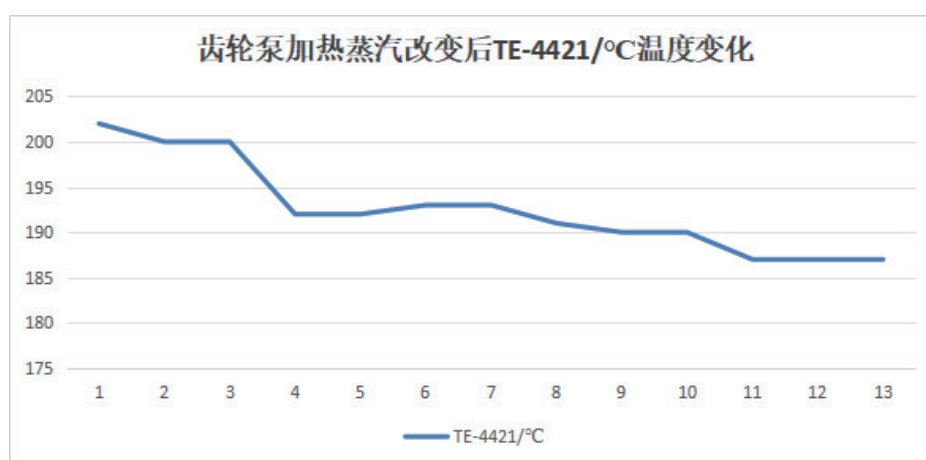


图9 使用A厂家催化剂生产前后挤压机主机电流波动趋势

从图中可以看出，在使用A厂家的催化剂进行生产时，挤压机Z-425主机电流波动幅度明显增加，切换至B厂家的催化剂后，挤压机Z-425主机电流波动幅度明显下降。正常生产过程中，挤压机主电机Z-425电流波动幅度的大小主要受下料量波动影响，Z-425主机电流波动幅度增大说明下料量不稳定，结合催化剂粒径分析，A厂家催化剂粒径分布在1 μ m处有个明显的峰，催化剂粒径分布决定了聚乙烯粉料粒径，使用A厂家催化剂生产时，聚乙烯粉料粒径会出现细粉含量多，因聚乙烯粉料细粉含量高，造成聚乙烯粉料流动性变差，最终导致挤压机Z-425下料量波动增大，主机电流波动幅度增加。

Z-425主机电流波动幅度增加后，挤压机内熔融树脂温度TE-4421波动情况如下图所示。



注：数据记录为1次/两小时

图10 2026年4月1日至4月10日TE-4421温度趋势

从图中可以看出，TE-4421整体出现缓慢上涨的趋势，2026年3月底装置再次使用A厂家催化剂生产5000S产品，主机电流波动幅度增大，TE-4421从使用前的当日最高温195 $^{\circ}$ C缓慢上涨至204 $^{\circ}$ C，4月份切换B厂家催化剂后，TE-4421从使用前的当日最高温204 $^{\circ}$ C缓慢下降至195 $^{\circ}$ C。挤压机主机电流波动幅度增加，说明挤压机下料量波动较大，在其他工艺条件不变的情况下，下料量波动增加会直接导致物料的填充度和局部压力发生较大的变化，特别是在下料增瞬间增大的情况下，填充度升高，局部压力峰值会导致摩擦力飙升，局部剪切热增加，最终导致TE-4421温度上涨。

3.6 齿轮泵蒸汽加热对温度TE-4421的影响

下图为挤压机开机正常后，将齿轮泵蒸汽加热由次高压蒸汽改为中压蒸汽后 TE-4421 的变化趋势。

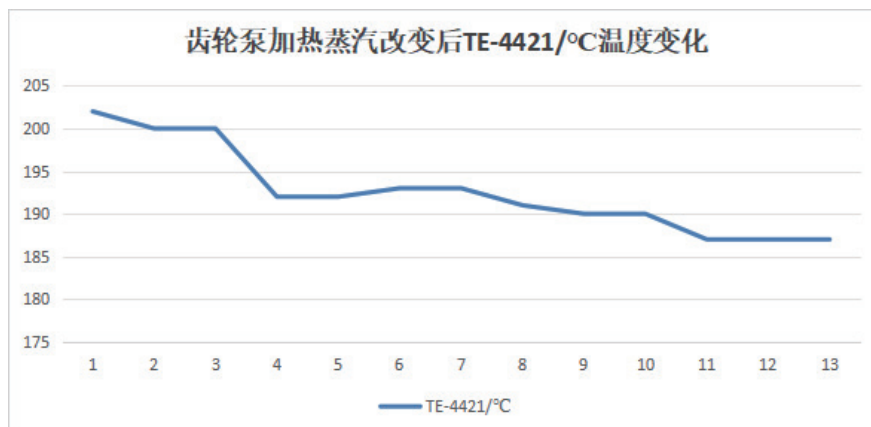


图 11 齿轮泵加热改为中压蒸汽后 TE-4421 温度趋势

从图中可以看出，齿轮泵蒸汽加热由次高压蒸汽改为中压蒸汽后，TE-4421 温度下降明显，从理论上分析，齿轮泵蒸汽加热改为中压蒸汽后，齿轮泵处温度快速大幅下降，4 个轴瓦处的测温点由原来的 260℃ 降低至 225℃，后系统的温度降低，物料输送系统上的温差降低，导致物料整体温度降低。

4 结 论

1. 温度控制区间至关重要：高密度聚乙烯 5000S 产品生产过程中，挤压机齿轮泵入口温度 TE-4421 稳定控制在 175 ~ 200℃ 时，可有效避免筒体内局部温度超过树脂降解温度，大幅减少产品色粒生成，保障产品质量合格，实现装置长周期平稳运行。

2. 筒体分段温度影响机制不同：挤压机 2#、3# 混炼段温度不宜低于 160℃，温度过低会加剧物料剪切生热，使齿轮泵入口温度逆势升高；4#、5# 物料输送段适度降低筒体温度可通过热交换带走物料热量，但温度不宜低于 120℃，否则会增大熔体粘度、产生额外剪切热，造成物料温度反弹。

3. 闸阀开度与熔体流动性显著影响料温：减小闸阀开度会增大物料流动阻力与剪切热，导致 TE-4421 温度上升；在无夹生料前提下适当提高闸阀开度，可降低剪切热、稳定熔融物料温度。粉料熔体流动速率偏低时物料熔融难度增大，剪切热激增，易造成物料超温、螺杆结碳并形成恶性循环。

4. 稳定剂与催化剂是重要间接影响因素：稳定剂中的润滑组分可降低熔体粘度、减少摩擦生热，停加或下料异常会使齿轮泵入口温度明显升高，合理提高稳定剂加入量可起到降温控温效果；催化剂粒径分布决定聚乙烯粉料粒度，细粉含量过高会造成下料量波动、电机电流震荡，引发局部剪切热增大与料温攀升。

5. 齿轮泵加热蒸汽等级影响入口料温：降低齿轮泵加热蒸汽品位，由次高压蒸汽改为中压蒸汽，可降低轴瓦及设备本体温度，减小系统传热温差，有效降低齿轮泵入口熔融物料温度。

6. 工艺管控优化方向：生产中可通过分段精准控制筒体温度、合理设定闸阀开度、保证稳定剂连续稳定加注、优选粒径分布均匀的催化剂、优化齿轮泵加热蒸汽等级等措施，稳定挤压机齿轮泵入口熔融物温度，从源头抑制 5000S 产品色粒产生与螺杆结碳问题，提升装置运行周期与产品质量稳定性。

参考文献

- [1] 王增旺 田成忠 史小文等. 高密度装置操作规程 [M], 兰州: 中国石油兰州石化分公司, 2023.
- [2] 张师军 乔金樑. 聚乙烯树脂及其应用 [M]. 1, 北京: 化学工业出版社, 2016. 367 ~ 378.