

氧化铝生产用汽参数波动对发电的影响

李 坤

遵义铝业股份有限公司 贵州 遵义 563100

【摘要】：氧化铝生产过程中，蒸汽既承担工艺加热任务，又与余热发电、背压发电等能源利用环节密切相关。用汽压力、温度、流量等参数发生波动时，会直接影响汽轮机进汽条件、机组负荷调节和热效率水平，造成发电量下降、运行稳定性减弱及能耗增加。围绕氧化铝生产用汽参数波动与发电效率之间的关系，分析其影响机理、主要表现及优化控制措施，可为企业提升能源利用率、降低生产成本和保障发电系统安全稳定运行提供参考。

【关键词】：氧化铝生产；用汽参数；参数波动；发电效率；能源利用

DOI:10.12417/2705-0998.26.09.060

引言

氧化铝生产属于高耗能工业，蒸汽系统在溶出、蒸发、加热及发电环节中发挥关键作用。用汽参数是否稳定，直接关系到生产连续性和发电系统运行质量。当蒸汽压力、温度或流量出现波动时，汽轮机运行工况会发生变化，机组出力 and 热效率随之受到影响。研究氧化铝生产用汽参数波动对发电的影响，有助于明确能源损失来源，优化蒸汽调配方式，提高发电稳定性与综合能效水平。

1 氧化铝生产用汽波动对发电工况的传导机理

1.1 蒸汽压力变化对汽轮机进汽条件的影响

蒸汽压力是决定汽轮机进汽状态和做功能力的重要参数。氧化铝生产中，蒸汽需要同时满足溶出、蒸发、加热和发电等环节需求，当生产端用汽量突然增加或管网调节不及时，进入汽轮机的蒸汽压力容易出现下降，导致蒸汽焓降减小，单位蒸汽可转换的机械能降低，机组出力随之减弱。压力偏低时，汽轮机喷嘴前后的压差不足，蒸汽流速和膨胀能力下降，叶片受力减小，发电机输出功率难以保持稳定；压力偏高时，虽然短时间内可提高进汽能量，但会增加调节阀节流损失，使汽轮机偏离设计工况运行，造成热能利用不充分。

压力频繁波动还会引起调速系统反复动作，进汽阀门开度不断调整，机组负荷曲线出现明显起伏。对于氧化铝企业而言，蒸汽管网覆盖范围较广，生产装置启停、蒸发负荷变化、余热蒸汽回收不均衡等因素都会传导至发电侧，使汽轮机进汽压力稳定性下降。若缺少压力缓冲和分级调配措施，发电系统难以获得连续、均衡的热源供应，机组运行安全裕度也会受到影响。压力波动持续传递至汽轮机入口后，调速系统需要频繁修正进汽阀开度，容易造成负荷曲线不平稳。低压状态下机组出力下降，高压状态下节流损失增加，管网与设备承受的运行应力也会加大，进而影响发电系统的可靠性。

1.2 蒸汽温度偏移对热效率水平的影响

蒸汽温度直接关系到汽轮机进汽过热度和热能品质。氧化铝生产过程中，蒸汽经过长距离输送、换热利用和管网分配后，

温度容易受到散热损失、减温减压操作以及回收蒸汽掺混影响。蒸汽温度低于设计要求时，过热度不足，汽轮机膨胀后段可能出现湿度升高现象，水滴对叶片产生冲刷，既降低级内效率，也增加设备磨损风险。湿蒸汽比例上升后，部分热能不能有效转化为轴功，发电热耗增大，单位发电量对应的蒸汽消耗量上升。

温度偏高同样会破坏机组经济运行状态，高温蒸汽对主汽管道、阀门和汽轮机高温部件形成更强热应力，长期波动会加剧金属疲劳和密封老化，增加检修频次^[1]。温度变化还会影响汽轮机热膨胀均匀性，若升降温速度过快，转子与汽缸之间的胀差可能扩大，造成振动、摩擦或间隙变化。氧化铝生产用汽具有工艺负荷连续、用热点分散、回收蒸汽品质不一的特点，温度偏移常与压力、流量变化交织出现，使热效率下降并非单一环节损失，而是从蒸汽品质、设备状态和能量转换过程共同体现出来。

1.3 蒸汽流量起伏对机组负荷稳定的影响

蒸汽流量是维持汽轮机负荷稳定的直接条件。氧化铝生产系统中，溶出机组、蒸发器组、焙烧余热利用装置等环节的用汽需求会随生产节奏、物料浓度、设备启停和工况切换发生变化。当生产侧集中增大用汽量时，供给发电机组的蒸汽流量被压缩，汽轮机进汽量减少，机组负荷下降；当工艺用汽短时回落或余热蒸汽集中释放时，进入发电侧的蒸汽量可能快速增加，调节系统需要迅速限制进汽，避免负荷突升。

流量起伏较大时，汽轮机难以保持平稳的膨胀过程，发电机有功功率波动加剧，电网并列运行质量受到影响。频繁流量调整还会造成阀门节流损失增多，蒸汽在调节过程中产生能量折减，削弱余热发电和背压发电的经济性。对于连续生产型氧化铝企业，发电系统通常承担厂区部分自用电供应任务，机组负荷不稳会影响供电平衡，增加外购电需求和能源成本。流量波动还容易使汽轮机处于低负荷或变负荷运行状态，偏离最佳效率区间，导致煤耗、电耗、蒸汽单耗等指标联动恶化。只有保持生产用汽与发电用汽之间的动态匹配，才能减少流量起

伏对机组稳定运行的干扰。

2 用汽参数失稳下发电效率降低的关键因素

2.1 生产用汽与发电用汽分配不均

生产用汽与发电用汽分配不均,主要体现在氧化铝生产系统对蒸汽资源的优先占用与发电系统对稳定汽源需求之间存在协调不足。氧化铝生产过程具有连续性强、工艺链条长、用汽点分散等特点,溶出、蒸发、分解前加热、母液预热等环节均需要持续蒸汽供应。在生产负荷提高、物料处理量增加或设备集中启用时,工艺用汽需求会迅速扩大,蒸汽调配往往优先保障生产流程稳定,发电侧获得的蒸汽量被动减少,汽轮机负荷出现下降。部分企业在蒸汽平衡管理中更注重生产装置的即时需求,对发电系统的热源连续性考虑不足,导致蒸汽在工艺端与发电端之间缺少精细化分配依据。

若蒸汽品质较高的汽源大量进入低品位加热环节,发电系统可利用的高参数蒸汽减少,热能梯级利用水平受到限制。用汽分配不均还会造成背压机组、余热发电装置与生产装置之间的运行边界不清,部分时段出现生产侧蒸汽紧张、发电侧负荷降低,另一部分时段又因回收蒸汽集中释放而形成短时富余。此类波动会削弱发电系统的计划性,使机组难以长期运行在经济负荷区间,蒸汽资源的发电潜力难以充分释放。运行调度无法准确预判蒸汽供应变化时,机组负荷安排容易偏离实际工况,发电量计划与生产用汽需求之间形成偏差。部分高品质蒸汽被临时分流或低效利用,余热蒸汽并入发电系统的连续性降低,导致单位蒸汽发电收益下降。

2.2 蒸汽管网调节滞后与损耗增加

蒸汽管网调节滞后是造成用汽参数波动扩大和发电效率下降的重要因素。氧化铝企业蒸汽管网通常连接锅炉、余热回收装置、减温减压站、生产用汽点和发电机组,系统结构复杂,输送距离较长,调节点数量较多。当某一生产环节用汽负荷发生变化时,管网压力、温度和流量需要经过一定时间才能完成重新平衡,若监测信号传递、阀门响应和调度指令存在滞后,波动会沿管网逐级传导,造成局部压力偏低或蒸汽短时积聚^[2]。

管道保温效果不足、疏水不及时、阀门内漏和减压节流不合理,也会使蒸汽在输送过程中产生热量损失和压力损失,进入发电侧的蒸汽品质下降。部分管网在设计或改造中缺少对生产峰谷负荷的充分校核,主管、支管和调节阀配置与实际用汽变化不完全匹配,容易出现大流量时压降过大、小流量时调节精度不足的问题。蒸汽经过多级减温减压后,虽然能够满足部分工艺设备的使用要求,但可用于做功发电的有效能明显降低。调节滞后与输送损耗叠加后,汽轮机入口参数难以保持稳定,机组调节系统被迫频繁修正进汽状态,阀门节流损失、管网散热损失和凝结水夹带损失同步增加,发电热经济性受到持续削弱。

2.3 机组运行匹配不足与出力波动

机组运行匹配不足主要表现为发电设备设计工况与氧化铝生产实际蒸汽供应特征之间存在偏差。汽轮机、发电机及其辅助系统通常按照一定的额定压力、温度、流量和负荷范围进行选择,而氧化铝生产中的蒸汽来源既包括锅炉供汽,也包括焙烧、蒸发等环节形成的余热蒸汽,参数稳定性和供应节奏具有明显差异。当机组选型偏大而实际可供蒸汽不足时,汽轮机长期处于低负荷运行状态,级内效率下降,单位发电蒸汽消耗增加;当机组选型偏小而余热蒸汽阶段性富余时,多余蒸汽难以完全转化为电能,甚至需要通过放散、旁路或减压方式处理,造成能源浪费。

运行匹配不足还体现在控制系统与生产负荷联动不够紧密,机组不能根据溶出、蒸发、焙烧等环节的负荷变化及时调整运行策略,导致发电出力随蒸汽供应变化被动波动。辅助设备配置不协调也会影响机组稳定,凝汽系统、给水系统、冷却系统能力不足时,汽轮机即使获得一定蒸汽量,也难以保持理想真空和稳定背压。机组频繁偏离最佳负荷区间,会引起振动、热应力变化和运行效率下降,发电曲线呈现不平稳状态。此类问题影响厂区自发电比例,也会增加外购电依赖,使氧化铝生产综合能耗控制难度加大。

3 用汽参数协同控制与发电效益提升路径

3.1 蒸汽压力温度流量联动调控

蒸汽压力、温度和流量之间具有明显的耦合关系,单独控制某一参数难以保证发电系统持续处于稳定工况。氧化铝生产用汽环节较多,工艺装置负荷变化会引起管网压力波动、蒸汽温度变化和流量重新分配,因此需要建立以汽轮机进汽需求为核心的联动调控方式。压力控制应结合生产主汽管、发电支路和减温减压站的运行状态设置分级控制区间,避免生产端瞬时用汽变化直接冲击汽轮机入口。温度控制应加强管道保温、疏水排放和减温水投用管理,防止过热度不足或温度快速波动影响机组热膨胀稳定。流量控制应依据生产负荷、余热蒸汽回收量和机组经济负荷区间进行动态调节,使发电侧获得相对连续的蒸汽供应。

自动化控制系统可将压力、温度、流量信号纳入统一监测平台,通过阀门开度、旁路流量和减温减压参数的协同修正,减少人工调节滞后。对波动频繁的生产单元,可设置缓冲管段、稳压装置或分时用汽策略,削弱负荷突变对发电侧的传导。联动调控的关键不在于简单提高蒸汽供应量,而在于使蒸汽品质、供应节奏和汽轮机运行需求保持匹配,降低节流损失与无效波动。调控过程中需要同步关注主汽压力稳定、过热度保持和进汽流量平衡,避免单一参数调整引发新的工况偏差。通过生产端用汽预测、发电端负荷跟踪和管网阀门协同控制,可使蒸汽在工艺利用与发电转换之间形成更合理的分配关系。

3.2 余热回收与汽水系统优化配置

余热回收与汽水系统配置直接影响氧化铝生产中可用于发电的能源总量和蒸汽品质。焙烧炉烟气、蒸发系统二次蒸汽、溶出闪蒸汽及高温凝结水均具有回收利用价值，若回收路径不清晰或换热设备配置不足，低品位热量容易在排放、冷却和减压过程中损失。优化配置应围绕热能梯级利用展开，将高参数蒸汽优先用于发电或高温工艺环节，中低参数蒸汽用于预热、保温和低温加热，避免高品质蒸汽被低效消耗^[3-5]。汽水系统中，凝结水回收率、除氧器运行稳定性、给水温度和补水比例都会影响锅炉供汽效率及发电热经济性。

凝结水温度较高时，回收进入给水系统可减少燃料消耗，提高蒸汽生产效率；若凝结水排放不畅或水质控制不足，则会增加加热损失和设备结垢风险。余热锅炉、闪蒸罐、换热器、凝结水泵和回水管网需要按生产负荷特征进行统筹配置，保证余热蒸汽能够稳定并入管网或直接服务发电机组。对于波动性较强的余热来源，可通过蓄热、稳压和分级换热方式改善供应连续性。汽水系统优化还应重视排污热回收、疏水回收和管网保温改造，使可回收热量尽可能转化为有效发电能力与生产可用热量。

3.3 典型运行场景下的节能增效

典型运行场景能够直观反映用汽参数优化后对发电系统的改善效果。以氧化铝企业蒸发负荷升高时段为例，生产端蒸汽需求增加后，若缺少协调控制，发电机组容易因进汽量下降

而降负荷运行；设置生产用汽上限、提前调整主汽压力控制目标、保持发电支路最低稳定流量，可使汽轮机避免频繁大幅降载。焙烧余热蒸汽集中释放时，若回收系统与发电机组联动不足，部分蒸汽可能经旁路排放或低效减压利用；通过余热锅炉出口压力稳定控制、并汽节奏优化和凝结水回收强化，可提高余热蒸汽进入发电系统的比例。

设备检修或单条生产线降负荷期间，蒸汽需求结构发生变化，发电侧可根据管网富余程度调整机组负荷，减少放散损失。实际运行中，压力波动幅度降低后，汽轮机调节阀动作频次减少，节流损失下降；温度控制稳定后，机组热耗水平改善，叶片湿蚀和热应力风险减轻；流量分配平稳后，发电出力曲线更加均衡，厂区自发电比例提高。节能增效效果体现在发电量增加，也体现在外购电减少、蒸汽单耗降低、余热利用率提高和设备运行稳定性增强等方面。不同场景下的控制重点有所差异，但核心均指向蒸汽资源由粗放调配转向精细利用。

4 结语

氧化铝生产用汽参数波动会直接影响汽轮机进汽品质、机组负荷稳定和发电热效率。通过加强压力、温度、流量联动控制，优化生产用汽与发电用汽分配，完善余热回收和汽水系统配置，可有效降低蒸汽输送损耗与调节损失，提高机组运行稳定性。蒸汽资源由粗放调配转向精细化管理，有助于提升企业自发电能力，减少外购电依赖，推动氧化铝生产能源利用水平持续改善。

参考文献：

- [1] 张烁,黄信建,宋转,等.高温氧化铝工业生产动态煅烧集控系统研究[J].冶金管理,2025,(12):112-115.
- [2] 王丽娜,荀刚,石祖玮,等.废铝回收在氧化铝生产工艺中应用的技术研究[J].世界有色金属,2025,(24):23-25.
- [3] 吴新果.智能制造在氧化铝冶炼设备中的应用进展[C]//广西网络安全和信息化联合会.第十四届工程技术管理与数字化转型学术交流论文集(上册).2025:219-220.
- [4] 许松.氧化铝生产系统余热综合回收利用的探讨[J].世界有色金属,2025,(21):7-9.
- [5] 温亚平.高有机物种分系统氢氧化铝粒度控制技术分析及应用[J].世界有色金属,2025,(16):219-222.