

汽电双驱拖动技术在铜冶炼节能中的运用

Application of Steam-electric Dual Drive Technology in Energy Saving of Copper Smelting

供稿|李健, 宋成 / LI Jian, SONG Cheng

内容导读

2011年国家统计局发布的《2010年国民经济和社会发展统计报告》，将有色金属冶炼等6大行业归为高耗能行业，而铜冶炼属于典型的有色金属冶炼行业。高耗能行业是工业领域能源消费和碳排放的主体，为实现碳达峰碳中和的“双碳”目标，迫切要求高耗能行业节能降碳。本文主要通过蒸汽利用方案的对比，论述了汽电双驱拖动技术在铜冶炼节能降耗中的优势，以及在不同铜冶炼工艺条件下的适应性，比较了汽电双驱系统的不同轴系配置特点，为铜冶炼厂节能方案选择和设备配置等提供参考。

引言

根据《中华人民共和国节约能源法》（2018年修正本），年综合能源消费总量1万t标准煤（相当于耗电量8130万kWh）以上的用能单位被列为重点用能单位。某铜冶炼厂制酸用单台二氧化硫（SO₂）风机（风量 $Q=240000\text{ m}^3/\text{h}$ ，升压63 kPa），功率达到5600 kW，单台设备一年用电量达到4400万kWh。而制氧站所用的单台离心空压机（排气量 $Q=210000\text{ m}^3/\text{h}$ ，压力360 kPa）功率则达到了17000 kW，单台设备一年用电量更是超过1.3亿kWh，可见耗电量非常大，铜冶炼企业节能降耗的意义显得尤其重要。本文介绍了汽电双驱技术的发展由来以及现状，通过蒸汽利用方案的对比，论述了汽电

双驱拖动技术在铜冶炼节能降耗中的优势，以及在不同铜冶炼工艺条件下的适应性，比较了汽电双驱系统的不同轴系配置特点，其多种运行模式可以满足用户不同的功能需求，表明汽电双驱系统具有较强的灵活性和适应性。

汽电双驱技术的发展由来及现状

电拖系统

目前，驱动设备运转最常用的原动机是各类交流电动机，即电拖系统。从发电厂开始算起，电动机拖动负载的过程，实际上需经历四次能源转化过程，即化学能（或核能）转化为热能（蒸汽），蒸汽的热能转化为汽轮机的机械能，汽轮机的机械能

再转化为发电机的电能，发电机的电能又转化为电动机的机械能。在每次的转化过程中不可避免存在各种效率损失，从而造成了能源的浪费。

纯汽拖系统

基于电拖系统效率损失大，造成能源浪费的问题，在某些具有合适蒸汽源的工厂，会直接采用汽轮机拖动负载，省掉了机械能转化为电能，电能又转化为机械能的中间过程，直接由热能转化为机械能来拖动负载，大大提高了能源转化的效率。这种拖动方案即为纯汽拖系统，用汽轮机代替电机作为唯一原动机来拖动负载。

汽电双驱拖动系统

在很多行业，蒸汽源一般是通过高温炉窑连接的余热锅炉产汽，并且是工艺用汽后剩余的富余蒸汽，但这些汽源具有蒸汽量不恒定，随工艺变化而突发性波动的特点。如果采用这类汽源的蒸汽来驱动汽轮机并直接拖动负载，可能造成某时段因汽轮机出力不足等问题引发整个生产系统不稳定，从而造成不可估量的损失。为了节约能源，同时解决纯汽拖系统不稳定问题，发展了汽电双驱系统。汽电双驱系统是将汽轮机、电机与被拖动的负载同轴连接布置，实现2种原动机联合驱动同一负载。该系统的2种原动机互为备用，既可单独驱动，又能联合驱动，通过电机对汽轮机的补功可以很好的解决短时或偶发的汽源波动问题。

汽电双驱技术的发展现状

汽电双驱技术在水泥行业^[1]和电力^[2-4]等行业均有广泛运用。在钢铁行业，李文瑞等^[5]研究了汽电双驱机组在氩氧精炼炉（AOD炉）高温烟气余热回收项目中的工程应用，表明汽电双驱机组具有运行经济性好，灵活性较高，汽轮机汽耗率较低等特点，可显著增加AOD炉余热回收项目的工程效益。在铜冶炼行业，孟继军等^[6]和袁剑平^[7]介绍了国产化汽电双驱空增压一体机组的成功应用案例，机组具有结构紧凑，高效节能的特点。汽电双驱拖动技术已被列入《国家工业节能技术应用指南与案例（2020）》之二：冶金行业节能改造技术。

铜冶炼蒸汽利用节能方案及对比

铜冶炼蒸汽产汽情况

在铜冶炼中，冶炼主工艺、硫酸工艺生产过程中均存在大量的余热，即冶金炉高温烟气余热、硫酸干吸工序余热及转化工序余热；冶金炉高温烟气采用余热锅炉进行余热回收生产6.0 MPa中压饱和蒸汽，硫酸干吸工段低温热回收系统（HRS）和转化四段回收余热生产1.25 MPa饱和蒸汽。

蒸汽利用节能方案及对比

蒸汽余热发电利用节能方案

2019年以前投产的铜冶炼项目，常规做法是将熔炼余热锅炉和吹炼余热锅炉所产的中压（6.0 MPa）饱和蒸汽，送余热发电站进行发电，并网后再回到电网中进行设备的电力驱动，如图1所示。



图1 中压饱和蒸汽发电利用示意图

同样，硫酸系统中的转化余热锅炉和HRS低温回收装置所产的低压（1.25 MPa）饱和蒸汽，全部进入全厂1.25 MPa蒸汽管网，除直接用于全厂低压蒸汽工艺消耗外，富余部分的低压饱和蒸汽全部进入余热发电机组利用压差进行发电，并网后再回到电网中进行设备的电力驱动，如图2所示。

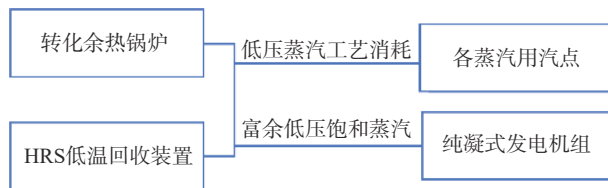


图2 低压饱和蒸汽发电利用示意图

蒸汽直接驱动负载利用节能方案

自从2019年“侧吹熔炼+多枪顶吹吹炼”（简称“侧+顶”）工艺的铜冶炼项目投产成功后，新上的铜冶炼项目大多数将熔炼余热锅炉和吹炼余热锅炉所产的6.0 MPa中压饱和蒸汽，送入硫酸转化一段过热为5.5 MPa（400℃）的过热蒸汽，直接用于驱动

大功率的制氧空压机或制酸 SO₂ 风机。当中压过热蒸汽不足以同时承担驱动制氧空压机和制酸 SO₂ 风

机时，优先考虑用于驱动更大功率的制氧空压机，如图 3 所示。

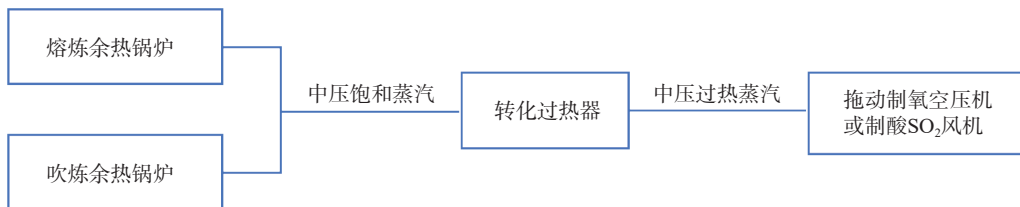


图 3 中压过热蒸汽拖动负载利用示意图

而硫酸系统中的转化余热锅炉和 HRS 低温回收装置所产 1.25 MPa 低压饱和蒸汽，全部进入全厂 1.25 MPa 蒸汽管网，除直接用于全厂低压蒸汽工艺消耗外，富余部分的低压饱和蒸汽过热后，直接用于拖动 SO₂ 风机，如图 4 所示。一般情况，低压蒸

汽拖动 SO₂ 风机后仍有富余，则可以利用汽电双驱机组中的电机同时作为发电机来用，直接向厂区电网进行输送电能，既不需要新建余热发电设备，也不需要“上网并网费”，可谓一举两得，是目前正在推广的技术。

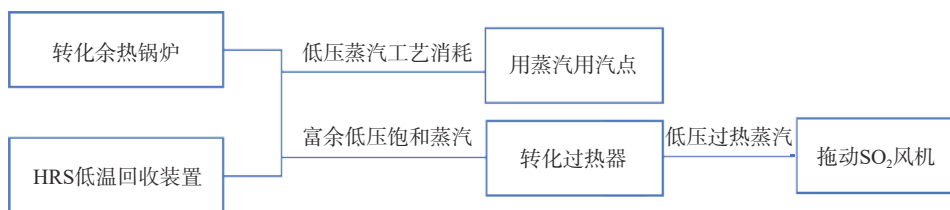


图 4 低压饱和蒸汽拖动负载利用示意图

铜冶炼蒸汽利用方案对比

蒸汽用来发电和蒸汽用来拖动负载两种蒸汽利用方案的投资主要包括厂房投资和设备投资两项固定资产投资。厂房投资方面，蒸汽用来发电方案的厂房投资更高，因为该方案需要分别建设负载（如制氧空压机或 SO₂ 风机）所在地厂房，还需另建设

余热发电厂房，而蒸汽用来拖动负载方案仅需建设一个厂房。设备投资方面，蒸汽用来拖动负载方案因设备数量更多，其设备投资要略高。综合而言，两种方案的固定资产投资基本相当，两种方案都是目前运行成熟可靠的方案，维护成本低。表 1 是以上两种蒸汽利用方案的运行情况对比。

表 1 蒸汽利用方案对比

方案	设备配置	蒸汽汽耗率/(kg/kWh)		汽轮机输出功率/kW	运行中效率损失	人员配置数	上网差价/(元/kWh)
		高压	低压				
1	汽轮机+余热发电机组	6.66	8	23600	合计损失8%：①齿轮箱损失2%；②电机损失3%；③发电机损失3%。功率损失合计：23600 kW×8%=1888 kW	36	0.03
2	汽轮机+变速离合器+电机+风机或离心空压机	4.25	8	23600	合计损失3.5%：①齿轮箱损失2%；②电机空转损失0.5%；③变速离合器损失1%。功率损失合计：23600 kW×3.5%=826 kW	18	无

根据上述表中数据，电价按 0.6 元/kWh，机组年运行时间按 8000 h，人员平均年收入按 10 万元，上述计算不包含蒸汽汽耗率差异带来的经济效益差距。从机组运行角度，产生的主要经济效益分析如下：

（1）能耗经济效益

方案 2 比方案 1 每小时节约能耗为：1888-826=1062（kW）。

方案 2 每年节约的能耗经济效益为：1062 kW×

0.6 元/kWh×8000 h≈510 万元。

(2) 运营经济效益

方案 2 比方案 1 每年减少的人工成本为：
(36-18) 人×10 万元/人=180 万元。

(3) 上网差价

方案 2 比方案 1 每年减少的上网差价为：
0.03 元/kWh×23600 kW×8000 h=566 万元。

综合以上计算，方案 2 比方案 1 每年多产生经济效益为：510+180+566=1256（万元），可见汽电双驱方案对企业具有较好的直接经济效益，而且还极大减小了企业的用电量，从源头上减少了能源消耗，对国家节能减碳的贡献更是成效显著。

不同铜冶炼工艺的汽电双驱拖动系统选择

目前广泛使用的铜冶炼工艺主要有“闪速熔炼+PS 转炉吹炼”工艺^[8]、“闪速熔炼+闪速吹炼”工艺^[9]（简称“双闪”工艺）和“侧吹熔炼+多枪顶吹吹炼”工艺^[10]（简称“侧+顶”工艺）这 3 种工艺。汽电双驱拖动系统主要存在于“侧+顶”工艺的铜冶炼工艺中，产生这种现象的主要原因是铜冶炼工艺本身的特点导致的。下面对汽电双驱拖动技术与这 3 种工艺的适应性进行分析。

“闪速熔炼+PS 转炉吹炼”工艺

在这种工艺中，虽然闪速熔炼炉的烟气量稳定，但因 PS 转炉为间歇式工作（不能连续送风）的特点，进而造成余热锅炉产汽波动，导致混合后的产汽量波动频繁，工艺用汽后剩余的富余蒸汽也频繁波动且有规律。因此在这种工艺条件下，如果采用汽电双驱技术方案来拖动负载，将导致电机频繁启动以应对汽轮机出力不足时进行补功，对设备的运行稳定性造成不确定性影响，因此汽电双驱技术方案不建议应用在采用“闪速熔炼+PS 转炉吹炼”工艺的铜冶炼中。

“闪速熔炼+闪速吹炼”工艺

闪速熔炼炉和闪速吹炼炉的烟气均连续稳定，烟气波动量小，表 2 是某 50 万 t/a“双闪”工艺铜冶炼项目采用汽电双驱技术方案的蒸汽量平衡表。从蒸汽量平衡表可见，中压过热蒸汽基本满足拖动制氧空压机的蒸汽消耗。而低压蒸汽有较多剩余，拖动

SO₂ 风机的电机则可以选用有发电功能的电机，把多余的低压蒸汽用来发电。需要特别注意的是，由于闪速炉每周需要进行停炉点检，导致全厂系统临时停机，这将造成汽电双驱系统的启动频繁，也是“双闪”工艺项目较少采用汽电双驱技术方案的原因之一。

表 2 “双闪”工艺全厂蒸汽量平衡表

蒸汽	项目	平均蒸汽量/(t/h)	
		夏季	冬季
中压过热蒸汽 (5.5 MPa, 400℃)	闪速炉余热锅炉产汽	109	
	管网汽水损失	-2	
	拖动制氧空压机蒸汽消耗	-106	
	蒸汽剩余	1	
低压过热蒸汽 (1.25 MPa)	干吸低温热回收装置 (HRS) 产汽	103	
	转化四段热管锅炉产汽	25	
	全厂低压蒸汽消耗	-76	-84.5
	拖动 SO ₂ 风机蒸汽消耗	-34	
	蒸汽剩余	18	9.5

“侧+顶”工艺

侧吹熔炼炉和多枪顶吹吹炼炉的烟气具有连续、稳定和波动量小的特点，表 3 是某 30 万 t/a“侧+顶”工艺铜冶炼项目采用汽电双驱技术方案的蒸汽量平衡表。平衡表中剩余的 8 t 中压过热蒸汽可以用来补充冬季时低压蒸汽的不足。因此，“侧+顶”工艺的蒸汽利用适合采用汽电双驱技术方案。

表 3 “侧+顶”工艺全厂蒸汽量平衡表

蒸汽	项目	平均蒸汽量/(t/h)	
		夏季	冬季
中压过热蒸汽 (5.5 MPa, 400℃)	熔炼炉和吹炼炉余热锅炉产汽	97	
	管网汽水损失	-2	
	拖动制氧空压机蒸汽消耗	-87	
	蒸汽剩余	8	
低压过热蒸汽 (1.25 MPa)	干吸低温热回收装置 (HRS) 产汽	65	
	转化四段热管锅炉产汽	30	
	全厂低压蒸汽消耗	-51	-59.1
	拖动 SO ₂ 风机蒸汽消耗	-43	
	蒸汽剩余	1	-7.1

铜冶炼的汽电双驱系统轴系配置及案例

目前在铜冶炼中，汽电双驱系统根据电机和负

载在系统中位于不同的位置有2种典型的轴系配置方式,分别是汽电同侧配置和汽电异侧配置,2种配置方式均得到了成功应用,用户可以结合自身的实际情况进行选择。

汽电同侧配置

汽电同侧配置指的是汽轮机和电机配置在负载的同一侧,汽轮机通过变速离合器与电机连接,电

机通过齿轮箱与负载连接,这种配置的工作模式如图5所示。

汽电异侧配置

汽电异侧配置指的是汽轮机和电机分别配置在负载的两侧,汽轮机通过变速离合器与负载的一侧连接,电机通过离合器与负载的另一侧连接,这种配置的工作模式如图6所示。

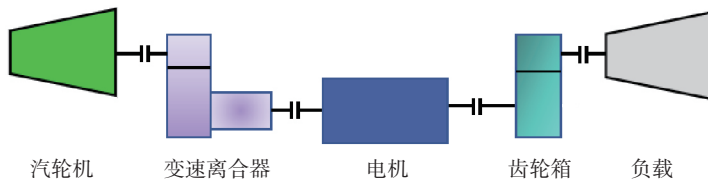


图5 汽电同侧配置

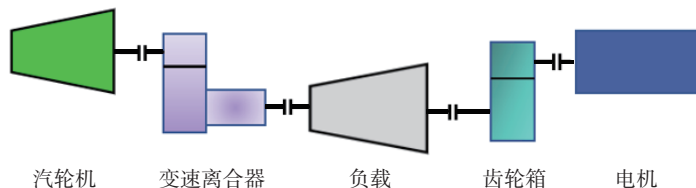


图6 汽电异侧配置

两种配置方式的比较

对于汽电同侧配置,其主要优点是,电机一直处于热备用状态,随时投入使用,电机常作为两用电机,兼具发电功能。缺点是当汽轮机或电机发生异常时,系统需要先停机进行检修。如果用户所产蒸汽拖动负载后仍有剩余,选择汽电同侧配置的方式较好,因为此时电机做的功用于发电,直接产生经济效益。

而对于汽电异侧配置,其主要优点是,当汽轮机或电机发生异常时,系统可以不停机进行检修,且控制灵活性更强。缺点是机组配置了2个离合器,增加了机组的故障点,而且此时的电机是停机状态,启动机组需要一定的时间。如果用户所产蒸汽拖动负载后基本没有剩余,或者用户更侧重于系统发生异常后的可维护性,选择汽电异侧配置的方式较好,此时电机仅作为冷备用电机使用。

综上,以上两种配置方式主要取决于用户的侧重点,如果更看重经济效益,适合选择汽电同侧配置方案,如果更看重检修的维护性,适合选择汽电

异侧配置。

汽电双驱机组的运行模式

汽电双驱机组具有多种运行模式可以满足用户不同的功能需求,使得汽电双驱系统的灵活性和适应性显著提高。

开机模式:如图6(或图5)所示,系统开机时,负载由同步电机启动。负载(压缩机或风机等)正常运行后,当铜冶炼副产蒸汽参数满足汽轮机冲转条件时,汽轮机启动运行,达到工作转速后通过变速离合器啮合投入机组运行。

汽电联合驱动模式:如图6(或图5)所示,当汽轮机输出功率小于负载运行所需功率时,由汽轮机与电动机共同驱动负载。

蒸汽驱动模式:如图6(或图5)所示,当汽轮机输出功率大于负载运行所需功率时,由汽轮机驱动整个机组;富余的功率则可以通过电机发电。

电力驱动模式:如图6(或图5)所示,当蒸汽条件不正常或汽轮机出现故障,汽轮机通过离合器自动脱离机组,由电机单独驱动负载正常运行。

国内采用汽电双驱拖动方案的案例

近些年来，国内铜冶炼项目采用汽电双驱拖动

方案已得到广泛的成功应用，表4是目前采用汽电双驱拖动方案的应用案例情况。

表4 采用汽电双驱拖动方案应用情况表

序号	应用项目	冶炼工艺	规模/(万t/a)	投产时间	配置方式
1	赤峰云铜有色金属有限公司搬迁项目	“侧+顶”	40	2019年05月	汽电异侧
2	广西南国铜业有限公司一期项目	“侧+顶”	30	2019年08月	汽电同侧
3	广西南国铜业有限公司二期项目	“侧+顶”	40	2023年10月	汽电同侧
4	金川集团铜业有限公司铜冶炼技术升级项目	“侧+顶”	30	建设中	汽电异侧
5	广西金川有色金属有限公司二期项目	“侧+顶”	30	建设中	汽电异侧

结束语

在全球能源紧缺和环保压力日益严峻的大背景下，无论是已建投产项目，还是拟建项目，低碳减碳已成行业发展的主要趋势。铜冶炼作为高耗能行业，节能降耗的责任重大，需要不断提高和应用先进的节能技术，践行绿色发展理念。汽电双驱技术在保证系统设备稳定性的基础上，减少了能量转化环节，提高了能量利用效率，获得了良好的经济效益，是铜冶炼企业值得推广的节能方案。

参考文献

- [1] 胡希栓, 肖阳. 高温风机的汽电双拖动技术研究. 水泥技术, 2019(2): 30
- [2] 岳中石, 陈志强, 郝振华, 等. 大型电厂汽电双驱引风机技术实施及研究. 中国仪器仪表, 2023(9): 17
- [3] 孟金国. 汽电双驱引风机设备特点及经济性探讨. 山西电力,

2022(1): 54

- [4] 杨春, 杨德荣, 王灵梅, 等. 660 MW 火电机组轴流式引风机驱动系统分析. 节能技术, 2019, 37(6): 509
- [5] 李文瑞, 刘凯, 岳党教, 等. 变频运行高转速汽电双拖机组的工程应用. 冶金动力, 2022(5): 56
- [6] 孟继军, 吴沛佳, 朱安安. 首套国产化汽电双驱空增压一体机组的研制与应用. 通用机械, 2019(4): 42
- [7] 袁剑平. 新技术和新装备在南国铜业的应用及发展. 有色金属 (冶炼部分), 2021(5): 31
- [8] 陈谦, 李韧. 铜火法冶金典型工艺单位产品排气量的比较分析. 有色金属 (冶炼部分), 2013(5): 57
- [9] 臧轲轲. 金冠铜业提升双闪速炉作业率影响因素分析. 中国有色冶金, 2020, 49(1): 30
- [10] 朱文云, 何宗庆, 李奕龙, 等. 富氧侧吹熔炼-多枪顶吹吹炼炼铜工艺杂质元素行为. 有色金属 (冶炼部分), 2023(3): 25

作者简介: 李健 (1983—), 男, 江西赣州人, 高级工程师, 工学硕士, 主要从事有色冶金设备的开发与设计。E-mail: 290909311@qq.com。