

RH 用机械真空泵抽气过程影响因素研究

许海虹*

(中冶南方工程技术有限公司 炼钢分公司 武汉 430223)

Design of Fume Extraction Unit for RH Vacuum Refining Furnace: A Simulation Study

Xu Haihong*

(WISDR Steelmaking Branch, Wuhan 430223, China)

Abstract We addressed design optimization of the fume extraction unit, pumped with fully dry mechanical vacuum pumps and installed with RH refining furnace in metallurgical industry. The influence of the major components, including the stage/number/pumping-speed /alignment of vacuum pumps (Roots and screw pumps), chamber-volume in front of and gas-path section volumes behind master-valve, leakage, on the C-contents, chamber pressure and fume extraction capacity of a RH furnace with different refining tonnages was investigated with self-developed simulation software and exemplified with a four-stages (comprising 13, 13, 8, and 8 dry pumps) vacuum system for 300 t RH furnace. The simulated results show that the chamber-volume, leakage-rate, pumping speed and all have a major impact. We suggest that the self-developed simulation software be of some technological interest in design optimization of fume extraction unit for RH furnace.

Keywords RH, Vacuum refining, Mechanical vacuum pump, Computer simulation

摘要 全干式机械真空泵正以其出色的节能环保效果越来越多的在冶金行业炼钢厂真空精炼工艺中得到应用。本文正是利用自主研发的与真空循环脱气工艺(RH)真空精炼过程相结合的RH用机械真空泵抽气过程计算机仿真程序,研究了4级串联式全干式机械真空泵方案中,真空主阀前后设备及管道容积、各级真空泵泵间管道容积、各级真空泵(罗茨泵和螺杆泵)的不同抽气能力、系统漏气量等因素对RH机械真空泵抽气过程的影响,为不同RH吨位或RH真空精炼工艺条件下,机械真空泵系统的设计和研发打下坚实的基础。

关键词 RH 真空精炼 机械真空泵 计算机仿真

中图分类号: TF769.4

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjovst.2019.03.05

随着用户对于钢铁产品的需求由普优钢向优特钢产品的转变,钢铁厂对洁净钢冶炼工艺和装备技术需求不断递增,特别是低成本、高品质、节能环保的真空循环脱气工艺(RH)真空精炼工艺和装备技术,是现阶段仍需不断研究的课题。

真空泵是RH真空精炼装置的核心组成部分,由于出色的低运行成本、节能环保效果,采用全干式机械真空泵的RH真空精炼装置数量正在迅速增长,技术水平也在不断发展提高,显示出全面替代传

统广泛应用的蒸汽喷射泵的势头。从已投入运行的RH用全干式机械真空泵的建设模式上看,均由国外供货商技术总负责,包括罗茨泵和螺杆泵在内的核心设备均采用进口产品,初期建设成本高昂,给进一步推广带来很大的难度,因此研制出自主集成、具有较高国产化率的全干式机械真空泵系统显得尤为紧迫。本文正是利用自主研发的与RH真空精炼过程相结合的RH用机械真空泵抽气过程计算机仿真程序,研究了4级串联式全干式机械真空泵方案中,

收稿日期: 2018-10-25

* 联系人: Tel: (027) 81997138; E-mail: 03078@wisdr.com

真空主阀前后设备及管道容积、各级真空泵泵间管道容积、各级机械真空泵(罗茨泵和螺杆泵)的不同抽气能力、系统漏气量等因素对 RH 机械真空泵抽气过程的影响,为不同 RH 吨位或 RH 真空精炼工艺条件下,机械真空泵系统的设计和研究打下坚实的基础。

1 RH 用机械真空泵系统抽气过程的影响因素
采用全干式机械真空泵的 RH 真空处理装置中,处于真空状态下的设备和管道主要包括真空室、真空加料设备、水冷抽气管道、真空主阀、真空布袋过滤器和机械真空泵泵前、泵间抽气干管等。因为

RH 真空处理装置的每炉次起始运行状态是预抽状态,即从真空室至真空主阀之间的是常压状态,从真空主阀至第 4 级真空泵之间的压强是 2.5 kPa,所以将上述设备和管道的容积划分为真空主阀前设备及管道容积、真空主阀后设备及管道容积和各级真空泵泵间管道容积等 3 部分,对 RH 机械真空泵抽气过程的影响是不同的,需分别研究。

各级真空泵在不同 RH 真空精炼工艺下作用不同,设定的工作压强也不同,因此各级真空泵的抽气能力对 RH 机械真空泵抽气过程的影响体现在不同阶段,本文按表 1 的工作模式研究此影响,另外还需研究系统漏气量对 RH 机械真空泵抽气过程的影响。

表 1 不同操作模式下各级真空泵的工作状态和工作压强区间
Tab. 1 Operation modes and pressure profiles of the vacuum pumps in RH refining

工作压强	预抽模式 2.5 kPa	轻处理模式 6 kPa	深真空脱氢模式 67 Pa	深真空脱碳模式 67 Pa	吹氧模式 15 kPa
1 级罗茨真空泵 /Pa	×	×	2,500 ~ 67	2,500 ~ 67	×
2 级罗茨真空泵 /Pa	×	×	9,000 ~ 350	9,000 ~ 350	×
3 级罗茨真空泵 /kPa	×	40 ~ 6	40 ~ 0.85	40 ~ 0.85	40 ~ 15
4 级螺杆真空泵 /kPa	100 ~ 2.5	100 ~ 20	100 ~ 3.6	100 ~ 3.6	100 ~ 33

2 各影响因素的量化计算

下面以国内某钢厂 300 t RH 真空处理装置为样本,各部位实际需抽空容积如表 2 所示,1~4 级真空泵的单台抽气能力分别按 91800、19050、16000、2500 m³/h 选取,1~4 级真空泵的设备数量分别为 13、13、8 和 8 台,与样本相同。下面将按上述设备参数对各影响因素对 RH 机械真空泵抽气过程的影响进行量化分析。

表 2 300 t RH 真空处理装置各部位容积

Tab. 2 Properties of the exemplified fume extraction unit

部位	容积/m ³
真空室至真空主阀	~ 230
真空主阀至第 1 级真空泵	~ 440
第 1 级真空泵至第 2 级真空泵	~ 85
第 2 级真空泵至第 3 级真空泵	~ 20
第 3 级真空泵至第 4 级真空泵	~ 10

选择的量化指标包括真空室内压强、钢液中碳含量、“抽气时间”和各级真空泵的工作效率。其中真空室内压强考察的是深真空脱碳模式下压强达到 67 Pa 所需的时间,钢液中碳含量考察的是深真空脱碳模式下钢液中碳含量达到 15 × 10⁻⁶所需的时间,“抽气时间”考察的是深真空脱氢模式下压强达

到 67 Pa 所需的时间,各项时间越短,RH 的生产效率越高,这是 RH 真空精炼装置高效稳定生产的必要保证;各级真空泵的工作效率考察的是深真空脱碳模式下压强达到 67 Pa 时各级真空泵的工作效率,工作效率越高,真空泵发热越小,这是真空泵设备正常运行的必要保证。样本厂的各量化指标计算结果如表 3 所示,根据设备保证值而定的建议量化值也显示在表 3 中。

表 3 样本厂各量化指标

Tab. 3 Definition of the volumes of the simulation example

量化指标	真空室内压强 达到 67 Pa 的时间 /s	钢液中碳含量 达到 15 × 10 ⁻⁶ 的时间 /s	抽气 时间	1 级 真空泵 工作 效率	2 级 真空泵 工作 效率	3 级 真空泵 工作 效率
样本厂 量化值	805	1083	223	0.86	0.91	0.73
建议 量化值	900	1140	300	0.85	0.9	0.75

2.1 真空主阀前设备及管道容积

RH 真空精炼装置的工艺布置、真空室及抽气管道尺寸的选择都会影响真空主阀前设备和管道的

容积。由于 RH 真空处理装置的每炉次起始运行状态是预抽状态,所以真空主阀的布置应尽量靠近真空室侧;真空室尺寸越大,越有利于碳脱氧、氧脱碳或脱气反应的进行,但不利于真空室内工作压强的尽快形成;抽气管道尺寸越大,阻损越小,真空室内

的压强越低,但工作压强的形成越慢。下面以样本中真空室至真空主阀的容积 230 m^3 为基准(容积 2),计算该容积从低 10%(容积 1)至高 10%(容积 3)的 3 种情况下,真空室内的压强和钢液中的含碳量,计算结果如图 1 和图 2 所示。

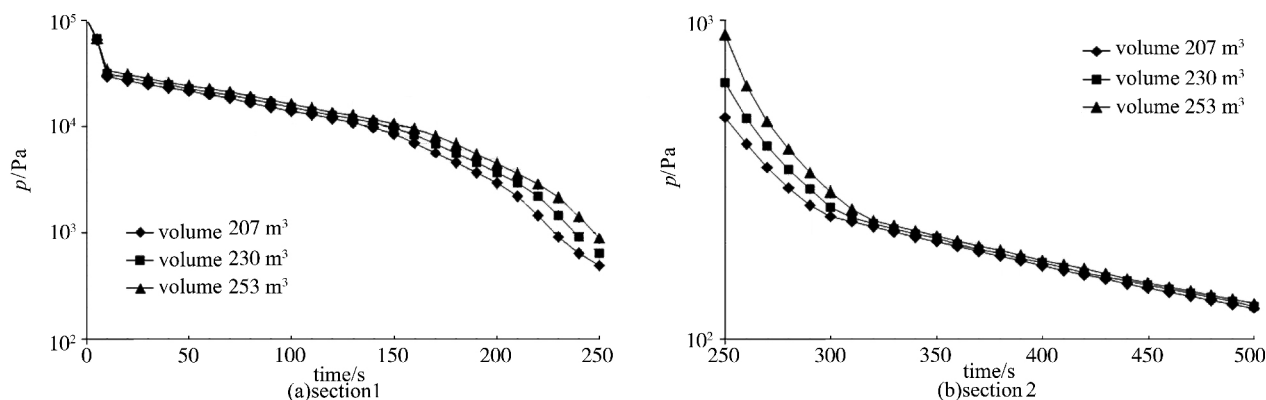


图 1 不同真空主阀前容积时真空室内压强

Fig. 1 Effect of the chamber volume in front of master-valve on the pressure time evolution

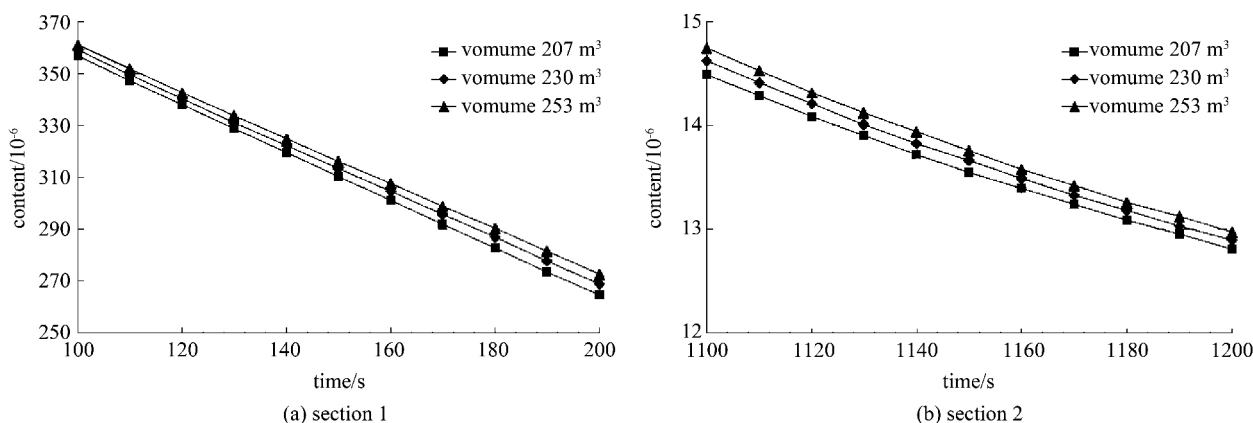


图 2 不同真空主阀前容积时钢液中碳含量

Fig. 2 Influence of the chamber-volume on the time-dependent C-content in steel

从图 1 中可以看出,真空室内压强达到 10 kPa 的耗时,容积 1 和容积 3 分别比基准容积快 10 s 和慢 8 s ;达到 1 kPa 的耗时,容积 1 和容积 3 分别比基准容积快 10 s 和慢 10 s 。这种 10 s 的差距基本上一直保持到 0.4 kPa ,然后差距慢慢缩小,直到 67 Pa 时,差距缩小到 6 s 。

从图 2 中可以看出,钢液中碳含量达到 350×10^{-6} 的耗时,容积 1 和容积 3 分别比基准容积快 3 s 和慢 2 s ,然后差距慢慢放大,直到 210×10^{-6} 时,差距放大到 6 s ,这种 6 s 的差距一直保持到反应终了。

从以上计算结果可以得出结论,真空主阀前设

备及管道容积对真空室内的压强和钢液中的含碳量影响一般。真空室的设计尺寸还是应优先满足大直径插入管的设置需要,以提高循环流量,加快化学反应的速度;抽气管道的设计尺寸应适当放大,以降低阻损,获得更低的真空室内压强。

下面将真空主阀前设备及管道容积分别是 184 m^3 (-20%)、 207 m^3 (-10%)、 230 m^3 、 253 m^3 ($+20\%$)、 276 m^3 ($+20\%$) 的 5 种情况下,得到的各量化指标计算结果如表 4 所示。

2.2 真空主阀后设备及管道容积

真空布袋过滤器和机械真空泵前抽气干管尺

寸的选择都会影响真空主阀后设备和管道的容积。由于 RH 真空处理装置的每炉次起始运行状态是预抽状态,所以该容积是处于压强 2.5 kPa 的真空状态,一方面该容积越大,真空主阀开启均压后整体容积的压强越低,越有利;但另一方面该容积越大,工作压强的形成越慢。上述两方面是矛盾的,所以需

要通过计算才能得到结论。下面以样本中真空主阀至第 1 级真空泵的容积 440 m³ 为基准(容积 2),计算该容积从低 10%(容积 1)至高 10%(容积 3)的 3 种情况下,真空室内的压强和钢液中的含碳量,计算结果如图 3 和图 4 所示。

表 4 不同真空主阀前容积的各量化指标计算结果

Tab. 4 Calculated results involving the different chamber volumes

真空主阀前设备及管道容积/m ³	184	207	230	253	276
达到 67 Pa 的时间/s	793	799	805	811	817
805 s 时真空室内的压强/Pa	65.9	66.5	67	67.6	68.1
钢液中碳含量达到 15×10^{-6} 的时间/s	1071	1077	1083	1089	1095
达到 67 Pa 时各级真空泵	67/307/	67/307/	67/307/	67/307/	67/307/
泵前压强/Pa	741/3583	741/3584	741/3584	741/3584	741/3584
各级真空泵工作效率	0.86/0.91/0.73	0.86/0.91/0.73	0.86/0.91/0.73	0.86/0.91/0.73	0.86/0.91/0.73
“抽气时间”保证值/s	203	213	223	232	241

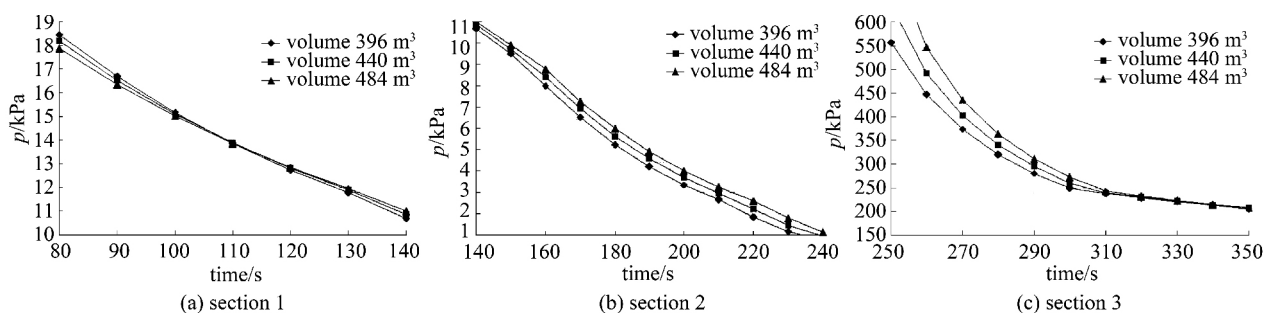


图 3 不同真空主阀后容积时真空室内压强

Fig. 3 Time evolution of the chamber pressure depends on the volume behind master-valve

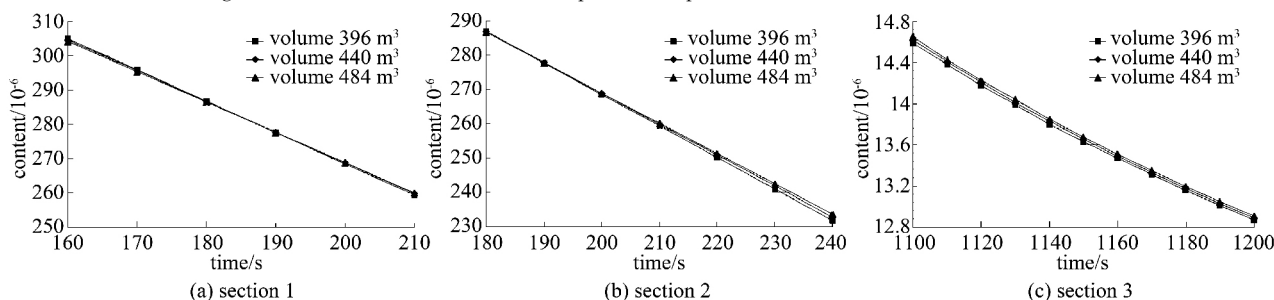


图 4 不同真空主阀后容积时钢液中碳含量

Fig. 4 Influence of the total gas-path volume on the C-content in steel

从图 3(a) 中可以看出,确实如上面所述,在 110 s 以前,真空主阀后设备及管道容积越大,真空室内压强反而越低,但在 110 s 以后,该容积越小,越有利于尽快形成工作压强,110 s 时真空室内压强约为 14 kPa。从图 3(b) 中可以看出,真空室内压强达到 1~2 kPa 时,容积 1 和容积 3 分别比基准容积 2 快 5 s 和慢 5 s,差距达到最大;从图 3(c) 中可以看出,差距随后慢慢缩小,直到 0.23 kPa 时,差距缩小到 1 s。

从图 4(a) 中可以看出,钢液中的碳含量变化规律与真空室内压强的变化规律是一致的,钢液中碳含量达到 280×10^{-6} 时是分界点,此时是 185 s。从图 4(b) 和图 4(c) 中可以看出,钢液中碳含量低于 280×10^{-6} 后,容积 1 和容积 3 分别比基准容积 2 快 1 s 和慢 1 s,这种差距一直保持到反应終了。

从以上计算结果可以得出结论,真空主阀后设备及管道容积对真空室内的压强和钢液中的含碳量影响有限。如果需要加大真空布袋过滤器的过滤面

积,可以适当增大设备体积以容纳更多的滤袋;机械真空泵前抽气干管的设计尺寸应适当放大,以均衡压强,使各真空泵的工作状态趋于一致;如果受场地条件限制,真空泵泵房可以适当远离 RH 设备本体,而只需将真空主阀设置在靠近真空室侧。下面

将真空主阀前设备及管道容积分别是 352 m^3 (- 20%)、 396 m^3 (- 10%)、 440 m^3 、 484 m^3 (+ 20%)、 528 m^3 (+ 20%) 的 5 种情况下,得到的各量化指标计算结果如表 5 所示。

表 5 不同真空主阀后容积的各量化指标计算结果

Tab. 5 Calculated results with the different volumes behind master-valve

真空主阀后设备及管道容积/ m^3	352	396	440	484	528
达到 67 Pa 的时间/s	802	804	805	807	808
805 s 时真空室内的压强/Pa	66.7	66.9	67	67.2	67.3
钢液中碳含量达到 15×10^{-6} 的时间/s	1080	1082	1083	1084	1086
达到 67 Pa 时各级真空泵	67/307/	67/307/	67/307/	67/307/	67/307/
泵前压强/Pa	741/3584	741/3584	741/3584	741/3584	741/3584
各级真空泵工作效率	0.86/0.91/0.73	0.86/0.91/0.73	0.86/0.91/0.73	0.86/0.91/0.73	0.86/0.91/0.73
“抽气时间”保证值/s	216	220	223	225	228

2.3 各级真空泵泵间管道容积

各级真空泵泵间管道容积取决于真空泵泵房内各级真空泵的工艺布置,好的工艺布置应使真空泵的工作状态均衡一致、利于各级真空泵的检修,以及尽量小的占地面积。下面以样本中各级真空泵泵间管道容积 85、20 和 10 m^3 为基准,计算各容积从低 10% 至高 10% 的 3 种情况下,真空室内的压强和钢液中的含碳量。需要特别说明的是,计算时各级真空泵泵间管道容积的减小或增加,均在真空主阀后设备及管道容积中予以补偿,以消除总容积的变化带来的影响。

各计算结果的曲线高度重合,所以未示意,这说

明各级真空泵泵间管道容积对真空室内的真压强和钢液中的含碳量基本没有影响,因为各级真空泵泵间管道容积的变化量相对于各级真空泵抽气能力来讲实在是太小了。

2.4 1 级真空泵抽气能力

由表 1 可知,1 级真空泵的工作压强区间是 $2500 \sim 67 \text{ Pa}$,以样本中 1 级真空泵的单台抽气能力 $91800 \text{ m}^3/\text{h}$ 、设备数量 13 台(抽气能力 2)为基准,计算设备数量从少 1 台(抽气能力 1)至多 1 台(抽气能力 3)的 3 种情况下,真空室内的压强和钢液中的含碳量,计算结果如图 5 和图 6 所示。

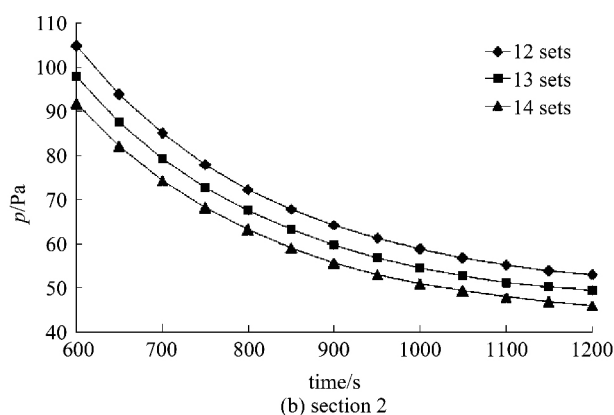
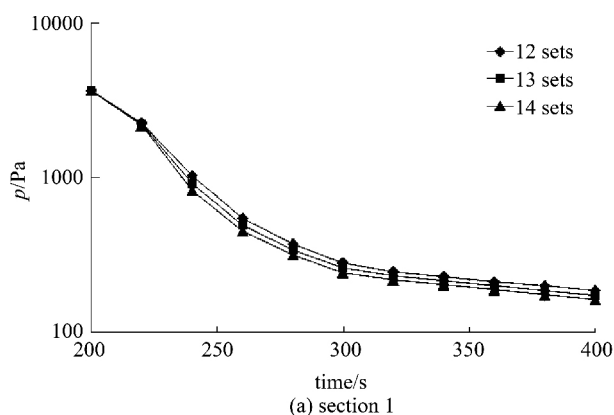


图 5 1 级真空泵不同抽气能力时真空室内压强

Fig. 5 Vessel pressure as a function of the pumping speed of pumps in Stage-I

从图 5(a) 中可以看出,在 1 级真空泵投入工作之后,3 种抽气能力下真空室内压强计算结果的曲

线才开始有所区别,此时是 217 s。从图 5(b) 中可以看出,在此之后,3 种抽气能力之间的差距越来越大,

真空室内压强达到 67 Pa 的时间,抽气能力 1 和抽气能力 3 分别比基准抽气能力 2 慢 57 s 和快 44 s,基准

抽气能力 2 的时间是 805 s,此时抽气能力 1 和抽气能力 3 的真空室内压强分别为 72 和 63 Pa。

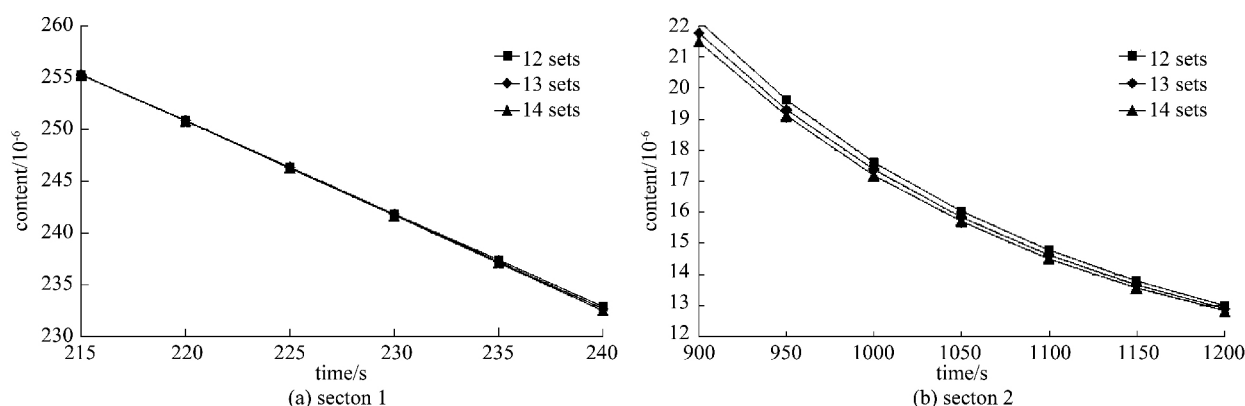


图 6 1 级真空泵不同抽气能力时钢液中碳含量

Fig. 6 C-content as a function of the pumping speed of pumps in Stage-I

从图 6(a) 中可以看出,同上,在 1 级真空泵投入工作之后,3 种抽气能力下钢液中碳含量计算结果的曲线才开始有所区别,但总体来说区别并不明显。从图 6(b) 中可以看出,在真空精炼的尾段,同一时刻下抽气能力 1 和抽气能力 3 的钢液中碳含量分别比基准抽气能力 2 的钢液中碳含量高或低都在 0.4×10^{-6} 以下;钢液中碳含量达到 20×10^{-6} 以下的时间,抽气能力 1 和抽气能力 3 比基准抽气能力 2 慢 7 s 和快 5 s,基准抽气能力 2 的时间是 935 s。

从以上计算结果可以得出结论,1 级真空泵抽气能力对真空室内的压强影响较大,但此种幅度真空室内压强的变化对钢液中的含碳量影响较小。如果 1 级真空泵设备数量减少,则 1 级真空泵的压缩

比将降低,工作效率提升,单台真空泵的有效抽气能力加大,可以部分补充因设备数量减少损失的抽气能力;对 2 级、3 级、4 级真空泵影响不大,只是工作点前移了。在“抽气时间”满足保证值的前提下,钢液中的最终含碳量和耗时是评判的最终标准。有的业主还专门规定了“有效抽气能力”的保证值,则必需设置足够的设备数量来满足,但实际上由于上述原因,此保证值并不必要。1 级真空泵的单台抽气能力较大,占地面积大,造价昂贵,需根据实际需要谨慎选择设备数量。下面将 1 级真空泵设备数量从 10 台至 14 台的 5 种情况下,得到的各量化指标计算结果如表 6 所示。

表 6 不同 1 级真空泵抽气能力下各量化指标计算结果

Tab. 6 Influence of the pumping speed of pumps in Stage-I on the calculated results

1 级真空泵设备数量/台	10	11	12	13	14
达到 67 Pa 的时间/s	1059	939	862	805	761
805 s 时真空室内的压强/Pa	85	78	72	67	63
钢液中碳含量达到 15×10^{-6} 的时间/s	1120	1101	1090	1083	1078
达到 67 Pa 时各级真空泵	67/243/	67/265/	67/286/	67/307/	67/327/
泵前压强/Pa	586/2883	639/3123	690/3356	741/3584	790/3804
各级真空泵工作效率	0.89/0.91/0.74	0.88/0.91/0.73	0.87/0.91/0.73	0.86/0.91/0.73	0.85/0.91/0.73
“抽气时间”保证值 [*] /s	532	378	279	223	216

2.5 2 级真空泵抽气能力

由表 1 可知,2 级真空泵的工作压强区间是 9000 ~ 350 Pa,以样本中 2 级真空泵的单台抽气能力 $19050 \text{ m}^3/\text{h}$ 、设备数量 13 台(抽气能力 2)为基准,计算设备数量从少 1 台(抽气能力 1)至多 1 台

(抽气能力 3) 的 3 种情况下,真空室内的压强和钢液中的含碳量,计算结果如图 7 和图 8 所示。

从图 7(a) 中可以看出,在 2 级真空泵投入工作之后,3 种抽气能力下真空室内压强计算结果的曲线才开始有所区别,此时是 156 s。在此之后,3 种

抽气能力下真空室内压强之间的差距越来越大,直至1级真空泵投入工作,差距又开始收窄。从图7(b)中可以看出,从315 s后,3种抽气能力下真空室内压强之间的差距已经在3%以内,而且还越来越小;805 s时基准抽气能力2的真空室内压强达到

67 Pa,此时抽气能力1和抽气能力3的真空室内压强分别为68和66 Pa,抽气能力1和抽气能力3的真空室内压强达到67 Pa的时间,分别比基准抽气能力2慢12 s和快9 s。

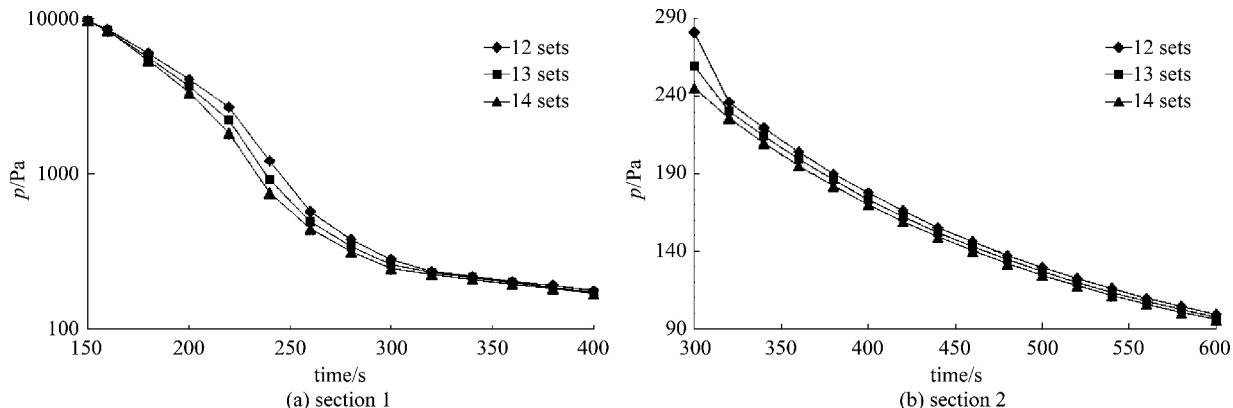


图7 2级真空泵不同抽气能力时真空室内压强

Fig. 7 Vessel pressure as a function of the pumping speed of pumps in Stage-II

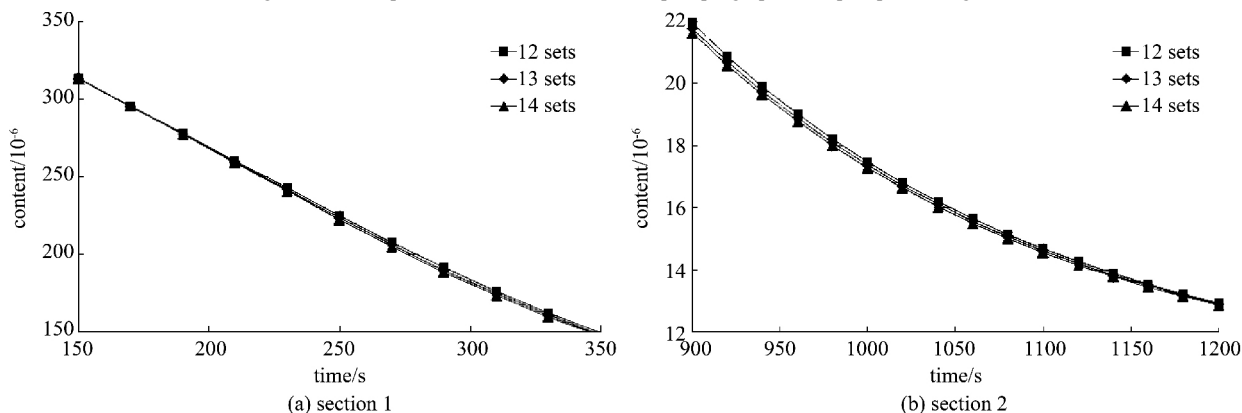


图8 2级真空泵不同抽气能力时钢液中碳含量

Fig. 8 C-content as a function of the pumping speed of pumps in Stage-II

从图8(a)中可以看出,同上,在2级真空泵投入工作之后,3种抽气能力下钢液中碳含量计算结果的曲线才开始有所区别,但总体来说区别并不明显。从图8(b)中可以看出,在真空精炼的尾段,同一时刻下抽气能力1和抽气能力3的钢液中碳含量分别比基准抽气能力2的钢液中碳含量高或低都在 0.2×10^{-6} 以下。钢液中碳含量达到 20×10^{-6} 以下的时间,抽气能力1和抽气能力3比基准抽气能力2慢3 s和快3 s,基准抽气能力2的时间是935 s。

从以上计算结果可以得出结论,2级真空泵抽气能力对真空室内的压强和钢液中的含碳量影响都较小。如果2级真空泵设备数量减少,则2级真空泵的压缩比将降低,工作效率提升,单台真空泵的有

效抽气能力加大,可以部分补充因设备数量减少损失的抽气能力;但1级真空泵的压缩比将提高,工作效率降低,发热量加大;对3级、4级真空泵影响不大,只是工作点前移了。下面将2级真空泵设备数量从10台至14台的5种情况下,得到的各量化指标计算结果如表7所示。

2.6 3级真空泵抽气能力

由表1可知,3级真空泵的工作压强区间是40~0.85 kPa,以样本中3级真空泵的单台抽气能力 $16000 \text{ m}^3/\text{h}$ 、设备数量8台(抽气能力2)为基准,计算设备数量从少1台(抽气能力1)至多1台(抽气能力3)的3种情况下,真空室内的压强和钢液中的含碳量,计算结果如图9和图10所示。

表 7 不同 2 级真空泵抽气能力下各量化指标计算结果

Tab. 7 Calculated results involving the pumping speed of pumps in Stage II

2 级真空泵设备数量/台	10	11	12	13	14
达到 67 Pa 的时间/s	850	832	817	805	796
805 s 时真空室内的压强/Pa	71	69.4	66	67	68
钢液中碳含量达到 15×10^{-6} 的时间/s	1095	1090	1086	1083	1080
达到 67 Pa 时各级真空泵	67/373/	67/347/	67/326/	67/307/	67/290/
泵前压强/Pa	707/3431	720/3488	731/3540	741/3584	748/3618
各级真空泵工作效率	0.82/0.93/0.73	0.84/0.92/0.73	0.85/0.91/0.73	0.86/0.91/0.73	0.87/0.9/0.73
“抽气时间”保证值/s	262	240	228	223	219

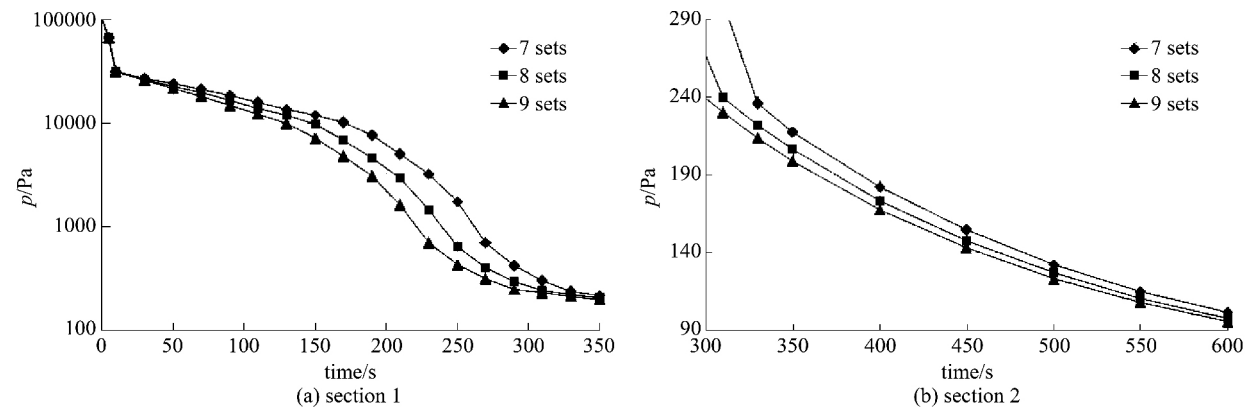


图 9 3 级真空泵不同抽气能力时真空室内压强

Fig. 9 Vessel pressure as a function of the pumping speed of pumps in Stage-III

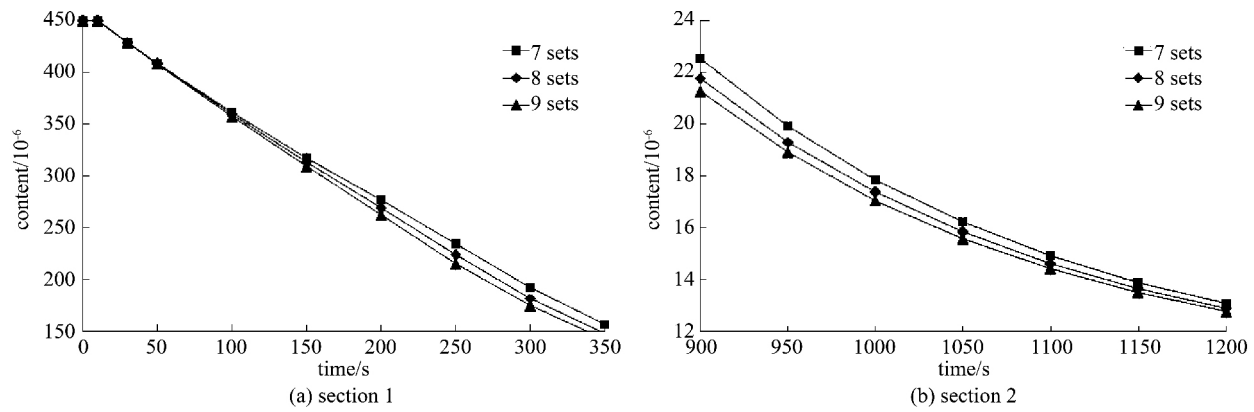


图 10 3 级真空泵不同抽气能力时钢液中碳含量

Fig. 10 C-content as a function of the pumping speed of pumps in Stage-III

从图 9(a) 中可以看出,由于 RH 真空处理装置的每炉次起始运行状态是预抽状态,所以真空主阀开后后被抽容积的压强快速进入 3 级真空泵的工作压强区间。3 种抽气能力下真空室内压强之间的差距快速拉大,直至 2 级真空泵全速工作,差距又开始收窄。从图 9(b) 中可以看出,从 335 s 后,3 种抽气能力下真空室内压强之间的差距已经在 6% 以内,而且还越来越小;805 s 时基准抽气能力 2 的真空室内压强达到 67 Pa,此时抽气能力 1 和抽气能力 3 的

真空室内压强分别为 68.5 和 66 Pa,抽气能力 1 和抽气能力 3 的真空室内压强达到 67 Pa 的时间,分别比基准抽气能力 2 慢 15 s 和快 10 s。

从图 10(a) 中可以看出,同上,3 种抽气能力下钢液中碳含量之间的差距从一开始就快速拉大,直至 2 级真空泵全速工作,差距又开始收窄。从图 10(b) 中可以看出,在真空精炼的尾段,同一时刻下抽气能力 1 和抽气能力 3 的钢液中碳含量分别比基准抽气能力 2 的钢液中碳含量高或低都在 0.8×10^{-6}

以下。钢液中碳含量达到 20×10^{-6} 以下的时间,抽气能力 1 和抽气能力 3 比基准抽气能力 2 慢 13 s 和快 10 s,基准抽气能力 2 的时间是 935 s。

从以上计算结果可以得出结论,3 级真空泵抽气能力对真空室内的压强和钢液中的含碳量影响都较大。如果 3 级真空泵设备数量减少,则 3 级真空泵的压缩比将降低,工作效率提升,单台真空泵的有效抽气能力加大,可以部分补充因设备数量减少损失的抽气能力;但 2 级真空泵的压缩比将提高,工作效率降低,发热量加大。下面将 2 级真空泵设备数

量从 6 台至 9 台的 4 种情况下,得到的各量化指标计算结果如表 8 所示。

2.7 4 级真空泵抽气能力

由表 1 可知,4 级真空泵的工作压强区间是 100 ~ 3.6 kPa,以样本中 4 级真空泵的单台抽气能力 $2500 \text{ m}^3/\text{h}$ 、设备数量 8 台(抽气能力 2)为基准,计算设备数量从少 1 台(抽气能力 1)至多 1 台(抽气能力 3)的 3 种情况下,真空室内的压强和钢液中的含碳量,计算结果如图 11 和图 12 所示。

表 8 不同 3 级真空泵抽气能力下各量化指标计算结果

Tab. 8 Calculated results involving the pumping speed of pumps in Stage III

3 级真空泵设备数量/台	6	7	8	9
达到 67 Pa 的时间/s	843	820	805	795
805 s 时真空室内的压强/Pa	70.7	68.5	67	66.1
钢液中碳含量达到 15×10^{-6} 的时间/s	1117	1097	1083	1073
达到 67 Pa 时各级真空泵	67/314/	67/310/	67/307/	67/304/
泵前压强/Pa	916/3565	816/3578	741/3584	681/3586
各级真空泵工作效率	0.86/0.88/0.78	0.86/0.9/0.75	0.86/0.91/0.73	0.86/0.92/0.7
“抽气时间”保证值/s	253	235	223	213

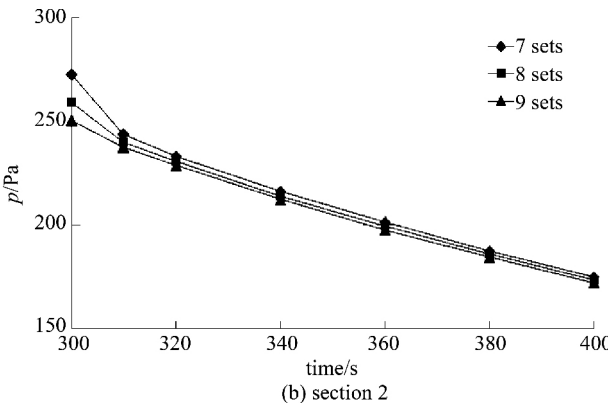
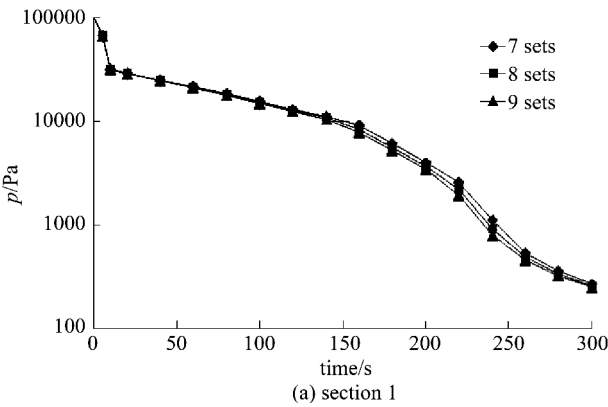


图 11 4 级真空泵不同抽气能力时真空室内压强

Fig. 11 Vessel pressure as a function of the pumping speed of Stage-IV pumps

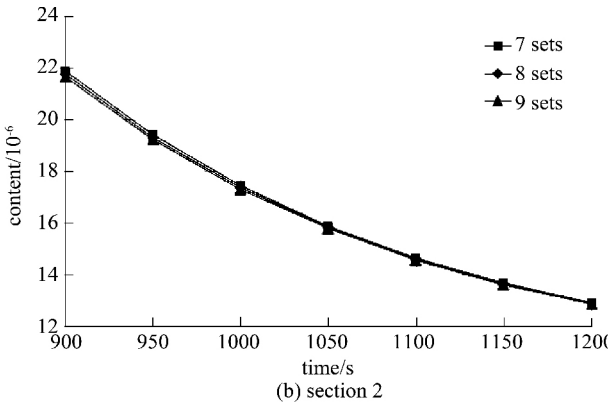
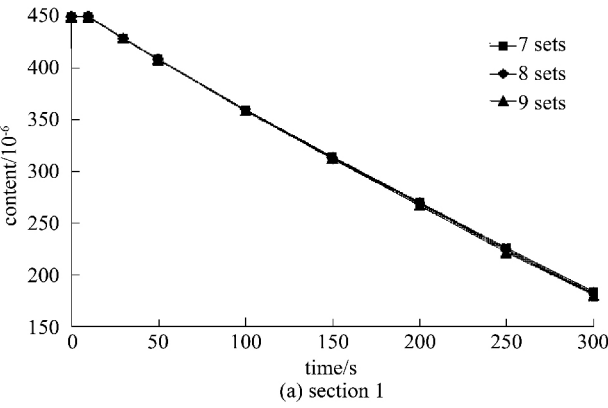


图 12 4 级真空泵不同抽气能力时钢液中碳含量

Fig. 12 C-content as a function of the pumping speed of pumps in Stage-IV

从图 11(a) 中可以看出,由于 4 级真空泵一开始就进入运行状态,所以 3 种抽气能力下真空室内压强一开始就有差距,而且渐渐拉大,直至 1 级真空泵投入工作,差距又开始收窄。从图 11(b) 中可以看出,从 310 s 后,3 种抽气能力下真空室内压强之间的差距已经在 2% 以内,而且还越来越小; 805 s 时基准抽气能力 2 的真空室内压强达到 67 Pa,此时抽气能力 1 和抽气能力 3 的真空室内压强分别为 67. 3 和 66. 8 Pa,抽气能力 1 和抽气能力 3 的真空室内压强达到 67 Pa 的时间,分别比基准抽气能力 2 慢 3 s 和快 2 s。

从图 12(a) 中可以看出,同上,3 种抽气能力下钢液中碳含量之间的差距一开始就有,但微乎其微。

从图 12(b) 中可以看出,在真空精炼的尾段,同一时刻下抽气能力 1 和抽气能力 3 的钢液中碳含量分别比基准抽气能力 2 的钢液中碳含量高或低都在 $0. 2 \times 10^{-6}$ 以下。钢液中碳含量达到 20×10^{-6} 以下的时间,抽气能力 1 和抽气能力 3 比基准抽气能力 2 慢 2 s 和快 2 s,基准抽气能力 2 的时间是 935 s。

从以上计算结果可以得出结论,4 级真空泵抽气能力对真空室内的压强和钢液中的含碳量影响都非常小。如果 4 级真空泵设备数量减少,则 3 级真空泵的压缩比将提高,工作效率降低,发热量加大。下面将 4 级真空泵设备数量从 6 台至 9 台的 4 种情况下,得到的各量化指标计算结果如表 9 所示。

表 9 不同 4 级真空泵抽气能力下各量化指标计算结果

Tab. 9 Calculated results with the pumping speed of pumps in Stage IV

4 级真空泵设备数量/台	6	7	8	9
达到 67 Pa 的时间/s	813	808	805	803
805 s 时真空室内的压强/Pa	67. 7	67. 3	67	66. 8
钢液中碳含量达到 15×10^{-6} 的时间/s	1089	1086	1083	1081
达到 67 Pa 时各级真空泵	67/310/	67/308/	67/307/	67/306/
泵前压强/Pa	823/4768	776/4095	741/3584	714/3186
各级真空泵工作效率	0. 86/0. 9/0. 65	0. 86/0. 9/0. 69	0. 86/0. 91/0. 73	0. 86/0. 91/0. 76
“抽气时间”保证值/s	228	225	223	221

2.8 系统漏气量

机械真空泵系统必然存在或多或少的漏气量,漏气量的多少取决于密封型式、数量和安装精度。低压强的系统漏气量肯定高于高压强下的系统漏气量,但这里简化成与压强无关的常数。下面以样本中系统漏气量 $50 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 为基准(漏气量 2),计算系统漏气量从低 20% (漏气量 1) 至高 20% (漏气量

3) 的 3 种情况下,真空室内的压强和钢液中的含碳量,计算结果如图 13 和图 14 所示。

从图 13(a) 中可以看出,由于系统漏气量一直存在,所以 3 种漏气量下真空室内压强一开始就有差距,但微乎其微。从图 13(b) 中可以看出,真空室内压强越低,差距就越大,805 s 时基准漏气量 2 的真空室内压强达到 67 Pa,此时漏气量 1 和漏气量 3

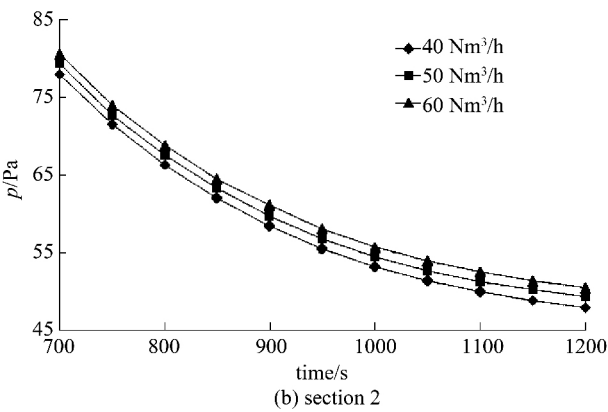
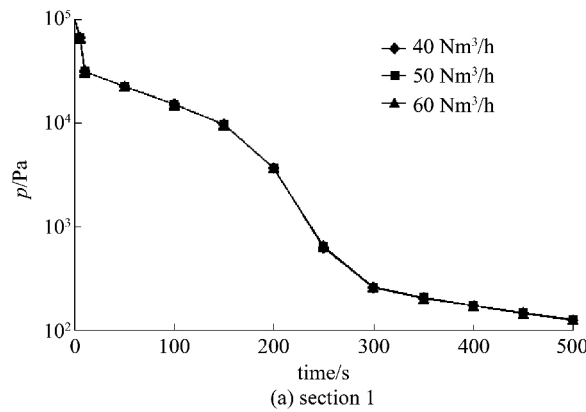


图 13 系统漏气量不同时真空室内压强

Fig. 13 Vessel pressure vs the leakage

的真空室内压强分别为 65.8 和 68.3 Pa,漏气量 1 和漏气量 3 的真空室内压强达到 67 Pa 的时间,分别比基准抽气能力 2 快 13 s 和慢 14 s。

从图 14 中可以看出,3 种系统漏气量下钢液中碳含量计算结果的曲线从始至终一直区别不明显,在真空精炼的尾段,同一时刻下漏气量 1 和漏气量 3 的钢液中碳含量分别比基准系统漏气量 2 的钢液中碳含量高或低都在 0.1×10^{-6} 以下;钢液中碳含

量达到 20×10^{-6} 以下的时间,系统漏气量 1 和系统漏气量 3 比基准系统漏气量 2 快 1 s 和慢 2 s,基准抽气能力 2 的时间是 935 s。

从以上计算结果可以得出结论,系统漏气量对真空室内的压强影响较大,压强越低,影响越大,但此种幅度真空室内压强的变化对钢液中的含碳量影响较小。下面将系统漏气量从 40 至 $60 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 的 3 种情况下,得到的各量化指标计算结果如表 10 所示。

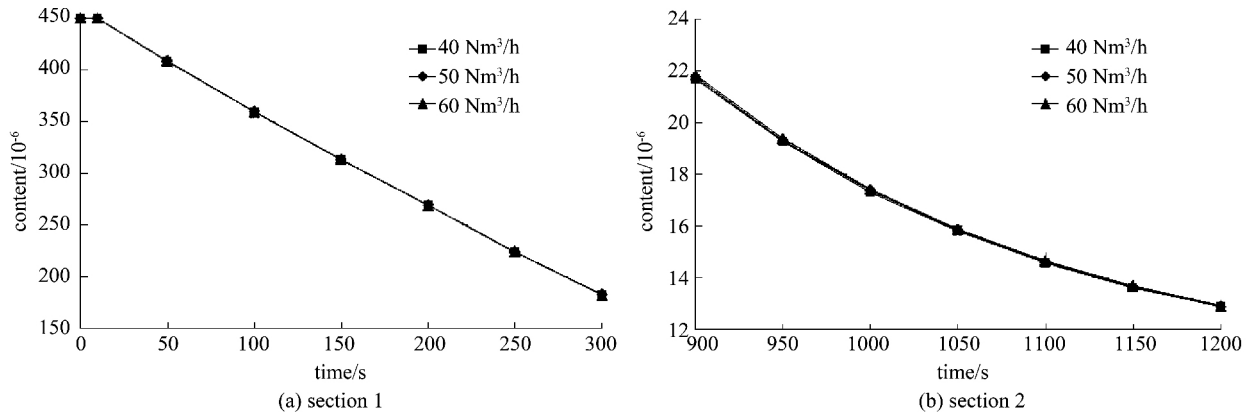


图 14 系统漏气量不同时钢液中碳含量

Fig. 14 C-content vs the leakage

表 10 不同系统漏气量下各量化指标计算结果

Tab. 10 Calculated results with different leakage

系统漏气量/ Nm^3/h	40	50	60
达到 67 Pa 的时间/s	792	805	819
805 s 时真空室内的压强/Pa	65.8	67	68.3
钢液中碳含量达到 15×10^{-6} 的时间/s	1082	1083	1085
达到 67 Pa 时各级真空泵	67/307/	67/307/	67/307/
泵前压强/Pa	741/3584	741/3584	741/3584
各级真空泵工作效率	0.86/0.91/0.73	0.86/0.91/0.73	0.86/0.91/0.73
“抽气时间”保证值/s	220	223	228

3 各影响因素的量化分析

下面将真空主阀前设备及管道容积、真空主阀后设备及管道容积、各级真空泵泵间管道容积、各级真空泵抽气能力和系统漏气量等影响因素对真空室内压强、钢液中碳含量、“抽气时间”和各级真空泵的工作效率的影响做一总结,以真空室内压强达到 67 Pa 的时间与基准时间的差值、钢液中碳含量 $\leq 15 \times 10^{-6}$ 的时间与基准时间的差值、“抽气时间”与基准时间的差值,以及各级真空泵工作效率与基准工作效率的差值作为判定标准,标记出较大的影响因素,结果详见表 11。

从表中可以看出,对真空室内压强达到 67 Pa

的时间影响较大的因素从大到小有 1 级真空泵的抽气能力、3 级真空泵的抽气能力、系统漏气量和 2 级真空泵的抽气能力;对钢液中碳含量 $\leq 15 \times 10^{-6}$ 的时间影响较大的因素从大到小有 3 级真空泵的抽气能力、1 级真空泵的抽气能力和真空主阀前设备及管道容积;对“抽气时间”的影响较大的因素从大到小有 1 级真空泵的抽气能力、3 级真空泵的抽气能力和真空主阀前设备及管道容积;对各级真空泵工作效率影响较大的因素从大到小是前级和本级真空泵的抽气能力。

如果根据表 3 中设备保证值而定的建议量化值来确定各级真空泵的抽气能力,结合各影响因素对各量化指标的影响权重,则样本厂 1-4 级真空泵的

设备数量可以优化为 12、12、7 和 10 台,相应的各量化指标计算结果如表 12 所示。该优化方案大幅提高了 3 级真空泵的工作效率,保证了真空泵设备稳

定运行,同时减少了设备费用,代价是延长了脱碳至 15×10^{-6} 的时间 19 s 或者脱氢至 1.5×10^{-6} 的时间 29 s,但也在保证值要求范围内。

表 11 各影响因素对各量化指标的影响

Tab. 11 Calculated impact of the components mentioned above

影响因素	真空室内压强	钢液中碳含量	“抽气时间”	各级真空泵工作效率
真空主阀前设备及管道容积, $\pm 10\%$	-6s/ +6s	-6s/ +6s	-10s/ +9s	-0/ +0
真空主阀后设备及管道容积, $\pm 10\%$	-1s/ +2s	-1s/ +1s	-3s/ +2s	-0/ +0
各级真空泵泵间管道容积, $\pm 10\%$	-0s/ +0s	-0s/ +0s	-0s/ +0s	-0/ +0
1 级真空泵抽气能力, $\pm 7.7\%$	+57s/ -44s	+7s/ -5s	+56s/ -7s	+0.01/ -0.01 ^{*1}
2 级真空泵抽气能力, $\pm 7.7\%$	+12s/ -9s	+3s/ -3s	+5s/ -4s	-0.01/ +0.01 ^{*2}
3 级真空泵抽气能力, $\pm 12.5\%$	+15s/ -10s	+14s/ -10s	+12s/ -10s	-0.01/ +0.01 ^{*3}
4 级真空泵抽气能力, $\pm 12.5\%$	+3s/ -2s	+3s/ -2s	+2s/ -2s	-0.04/ +0.03 ^{*4}
系统漏气量, $\pm 20\%$	-13s/ +14s	-1s/ +2s	-3s/ +5s	-0/ +0

注: * 1 指 1 级真空泵; * 2 指 1 级真空泵; * 3 指 2 级真空泵; * 4 指 3 级真空泵。

表 12 样本厂的全量化指标

Tab. 12 Calculated impact of the components involved the simulation example

量化指标	真空室内压强达到 67 Pa 的时间/s	钢液中碳含量达到 15×10^{-6} 的时间/s	抽气时间 /s	1 级真空泵工作效率	2 级真空泵工作效率	3 级真空泵工作效率
样板厂量化值	805	1083	223	0.86	0.91	0.73
建议量化值	900	1140	300	0.85	0.9	0.75
优化方案量化值	868	1102	282	0.86	0.91	0.8

4 结论

本文利用自主研发的与 RH 真空精炼过程相结合的 RH 用机械真空泵抽气过程计算机仿真程序,研究了 4 级串联式全干式机械真空泵方案中,真空主阀前后设备及管道容积、各级真空泵泵间管道容积、各级机械真空泵(罗茨泵和螺杆泵)的不同抽气能力、系统漏气量等因素对 RH 机械真空泵抽气过程的影响,得到如下结论:

(1) 真空主阀前设备及管道容积对各量化指标影响一般,真空室的设计尺寸还是应优先满足大直径插入管的设置需要,以提高循环流量,加快化学反应的速度;抽气管道的设计尺寸应适当放大,以降低阻损,获得更低的真空室内压强。

(2) 真空主阀后设备及管道容积对各量化指标影响有限。如果需要加大真空布袋过滤器的过滤面积,可以适当增大设备体积以容纳更多的滤袋;机械真空泵泵前抽气干管的设计尺寸应适当放大,以均衡压强,使各真空泵的工作状态趋于一致;如果受场地条件限制,真空泵泵房可以适当远离 RH 设备本体,而只需将真空主阀设置在靠近真空室侧。

(3) 各级真空泵泵间管道容积对各量化指标基本没有影响,机械泵泵房内的工艺布置重点应放在使真空泵的工作状态均衡一致、利于各级真空泵的检修,以及尽量小的占地面积等方面。

(4) 各级真空泵的抽气能力对各量化指标的影响各不相同,需根据真空精炼生产效率和设备稳定运行的实际需要谨慎选择设备数量。

(5) 系统漏气量仅对真空室内最终获得工作压强的时间影响较大,如果极限压强上不去,则系统漏气量是重点检查对象。

参 考 文 献

[1] 张 鉴. 炉外精炼的理论与实践 [M]. 北京: 冶金工业出版社,1999

[2] 2011 ~ 2020 年中国钢铁工业科学与技术发展指南 [M]. 北京: 冶金工业出版社,2012: 87

[3] 雷贵民. VD/VOD 炉用的新型机械真空泵系统 [J]. 工业加热,2013,42(5): 65 - 68

[4] 董荣华,周 宏,胡 兵,等. 干式(机械泵)真空系统应用于 RH 工艺的实践 [J]. 中国冶金,2011,21(4): 43 - 48