

高炉扩容中的关键性岩土工程问题

王凤江

(秦皇岛冶金设计研究总院,河北秦皇岛 066001)

【摘要】 高炉属于特种构筑物,其扩容本身产生的加、卸载特征和一般建筑物的增层改造工程不尽相同,而有其自身的特点。从高炉扩容工程的特点出发,对高炉扩容改造实现的途径、荷载的组成与变化特征及其对地基变形的影响进行了讨论。结合工程实例,提出了天然地基条件下地基基础评价的主要内容以及必须注意的主要岩土工程问题。

【关键词】 高炉扩容;岩土工程勘察;基础评价

【中图分类号】 TU 470.2

The Key Problem of Geotechnical Engineering in the Volume Expansion of High Stove

Wang Fengjiang

(QERIM of MCC, Qinhuangdao Hebei 066001 China)

【Abstract】 As the special structure, the reloading and unloading characteristic during the volume expansion of high stove is indescribable to the reconstruction of common building. Based on the characteristic of expansion engineering of high stove, some problems such as the expansion approach, the loading state and its alterant characteristic, including its impact on the settlement of the foundation soils has been discussed in detail. Considering some successful examples had been completed in the volume expansion of high stove, the primary geotechnical engineering problem which need to be noticed in foundation evaluation on natural subgrade has been mentioned.

【Key Words】 volume expansion of high stove; geotechnical engineering investigation; foundation evaluation

0 引言

高炉在到达服务年限后,面临停产大修。为发挥高炉的效益,国内外借高炉大修期,多采用在原有高炉系统基础上进行扩容增产的措施。高炉扩容是指直接利用原高炉的地基或基础,增大高炉容积的设计方法。高炉扩容本身相当于在原地重新建设一座新的高炉,而高炉附属设施基本不变或有针对性地稍作改造。由于扩容改造工程一般在高炉接近大修期时进行,改造本身具有工期短、投产快的特点,同时避免了征用土地、重复建设等巨额投资,因此其社会、经济效益相当显著。为尽量缩短扩容改造中高炉的停产时间,近几年又发展了高炉整体水平推移技术,并在唐钢、包钢、邯钢及酒泉钢铁公司等高炉扩容工程中得以成功应用。该项技术更大程度上缩短了高炉大修工期,减少停产时间,因此倍受关注。高炉扩容改造工作中关键性的岩土工程问题在于能否通过对现役高炉有关地基基础使用情况的调查分析,选择多种方法、手段准确地模拟地基基础的

实际变形过程,预测由于扩容产生的附加变形,在此基础上尽可能充分地挖掘地基和基础的潜力,为扩容工程的顺利开展创造条件。

1 高炉扩容的途径和特点

1.1 扩容途径

就目前国内外采用的扩容方法而言,大体可归结为两类。一种方法是拆除上部炉体,对地基或基础进行有针对性地改造,然后新建上部结构。这种方法多为以往的设计采用。此法一个突出的问题在于,高炉停产、拆除、扩容工作是连续进行的,各工序之间相互制约,必然造成工期相对延长。为尽可能地缩短改造工期,近几年开发了高炉整体水平推移技术,即易地新建炉体,全部耐火材料都在推移前砌筑完成,之后停产、拆除旧炉体,将新炉体推移到旧炉体的基础上。如唐钢 1 260 m³ 高炉扩容至 2 000 m³ 工程中,采用高炉整体水平推移技术,推移质量 4 450 t,推移高度 34 m,推移距离 46 m,创行业国内外最高记录。其施工流程见图 1。

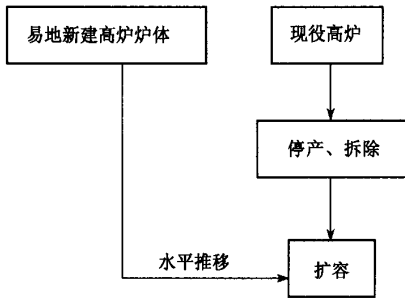


图1 水平推移方法实现扩容

1.2 扩容工程的特点

1) 荷载的组成与变化特征

根据高炉的结构特征,高炉基础上部结构荷载包括:平面均匀分布的炉底荷载、环形均匀分布的炉壳荷载、集中分布的框架柱荷载以及其他柱荷载。上部结构的总荷载可根据高炉容积按 150 kN/m^3 初步估算。从上部结构的施工过程分析,扩容工程总体可分为停产、扒炉、地基基础处理、建炉和投产五个阶段^[1]。在高炉停产后,上部结构的荷载会大幅度减小,扒炉工作完成后则降为零。随着基础改造工作、上部结构重新安装直到投产,基础顶面的荷载又大幅度增加。地基荷载在较短的时间内变化幅度较大(对采用水平推移技术的炉体,荷载增速更快),因此对地基基础适应上述荷载变化的能力要求很高,而和一般建筑物的增层改造工程不尽相同。

2) 地基的变形特点

由于上部结构荷载的变化,高炉地基的变形存在多次反复加、卸载的特点。其总的变形包括三部分:现役高炉基础施工时产生的回弹变形和投产后产生的再压缩直至稳定后的变形 s_1 ; 现役高炉停产、扒炉后地基的回弹变形 s_2 ; 改造后的高炉安装、投产后地基的再压缩变形 s_3 。地基的变形可简单地表示为:

$$s = s_1 + s_2 + s_3 \quad (1)$$

其完整的变形过程可用室内回弹再压缩曲线形象地予以表达(见图2)。

对现役高炉地基而言,其变形在改造之前已经稳定。因此,扩容改造产生的地基附加变形主要是由于现役高炉停产、扒炉后地基的回弹变形和投产后地基的再压缩变形引起的。由于高炉主体的荷载较大,又对不均匀沉降反应敏感,因此地基的变形将会受到严格限制。

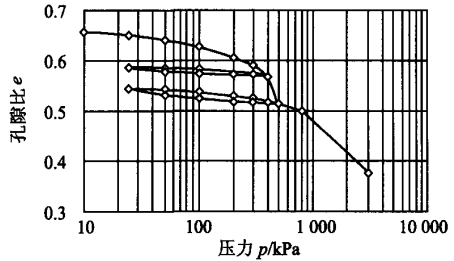


图2 地基土的压缩曲线

2 对岩土工程勘察的特殊要求

校核高炉基础混凝土的强度、评价高炉地基在加载后的工程性质是勘察本身的主要任务。在对原勘察资料和设计文件进行分析时,应着重分析当时所采用的勘察试验手段是否合理,所用规范和评价方法是否正确,从而判断当时所提的地基承载力和变形参数的利用价值,了解当时地基基础的施工过程。至于检验方法的选择应坚持多种手段互相验证的原则。由于高炉扩容工程的勘察工作多是在不停产的条件下进行的,勘探点数量往往有限,勘察方案的设计应尽量作到一孔多用。除常规勘探方法外,可采用放射性同位素测出地基土的含水量,以此推算其物理力学性质;采用波速法测定地基的密实度,推算地基的强度。当勘察场地具备条件时,可在基础侧壁开挖导坑,利用基础做反力,进行基础下地基土的载荷试验^[2](见图3),同时取土样检验其物理力学性质,以便对地基承载力取值和地基变形进行综合分析。当载荷试验不能实施时,应考虑进行孔内旁压试验。对地基土的室内试验而言,应着重进行高压固结试验和三轴剪切试验^[3],并增加试验数量,以全面获取高炉地基的强度计算参数和变形计算参数。和一般建筑物岩土工程勘察试验内容所不同的是,室内应有针对性地进行基础(混凝土)与地基土的应力应变关系研究以及基础和地基土界面的剪切试验。增加地基土加、卸载模量的测定内容,为地基和上部结构的协同作用分析提供依据。

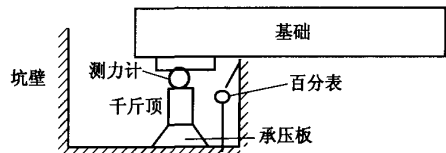


图3 载荷试验示意图

3 岩土工程评价的主要内容

3.1 对地基的评价

地基的强度和变形性质直接决定高炉扩容工程

能否顺利实施及建设资金的投入量。在分析地基的承载力时,应采用多种方法进行综合评价,以免产生片面性结论。如理论计算方法、原位试验方法和工程类比方法^[4]等。在地基强度评价时尤其应注意以下几个物理意义明确的力学特征点: $e-1gp$ 曲线上的先期固结压力;载荷试验所确定的临塑荷载或极限承载力;旁压试验所确定的临塑压力与极限压力。由于长期荷载作用,高炉地基的物理力学性质较建设前会有一些变化^[1](见表1)。其变化程度如何则是勘察本身必须认真解决的问题。邯钢4[#]高炉地基承载力的评价结果表明,由于近30年长期压缩变形的影响,其承载力提高近50%,并因此顺利实现扩容至920 m³高炉的目的。工程实践表明,由于高炉系统的运行,建筑物周边的环境特征可能发生改变,尤其是场地地下水的水位及其腐蚀性特征。对现役高炉的地基进行评价的原因还与不同设计时期执行的规范不完全一致,可能造成分析方法的不配套等问题有关。故应对比新、旧规范,校核上部荷载的强度,进行高炉地基强度和变形的重新验算。

表1 主要物理力学性质指标的变化幅度

位置	孔隙比 e	压缩系数 a_{2-3}/MPa^{-1}	先期固结压力 p_c/kPa	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
基础下	0.604	0.18	265	30	15
基础外	0.703	0.46	196	31.5	10
变化幅度/%	-17.9	-60.8	35.2	-14.3	50

与地基强度相比,地基的变形验算显得比较复杂。它受土体内部的应力分布、土体的应力应变关系、变形计算指标的选择、上部结构与基础的刚度及其与地基的共同作用等复杂因素影响。高炉扩容工艺本身是新生事物,各钢铁企业对高炉地基的变形观测的管理力度、观测措施还存在诸多不合理的因素,观测时间普遍较短。目前尚无系统的观测资料可供分析利用,很大程度上限制了设计理论的进步,也难以提出适合高炉地基变形允许值的统一规定。从充分发挥地基潜力的角度出发,对地基变形不宜提出过高的要求。在变形计算方面,实际工作中多以简化的方法为主,如分层总和法^[3]、考虑三向应力分量的刚性基础平均沉降计算方法^[5]和 $e-1gp$ 曲线法^[6]。考虑地基土的加、卸载过程,在地基变形验算时用三轴压缩试验反复加、卸荷方法确定的“回弹模量”代替“压缩模量”似乎更为合理,这方面已有文献^[7]介绍。

高炉地基土多属于超固结土,先期固结压力 p_c

控制了由于加、卸载所引起的地基变形。故应根据地基土有效应力增量 Δp 与先期固结压力 p_c 来选择不同应力水平下的计算公式,并将计算结果和其他预测方法进行对比分析,以提供合理的地基沉降预测指标。如在邯钢4[#]号高炉扩容工程地基变形验算中发现, $e-1gp$ 曲线法计算结果和现场实测值比较接近(见表2)。

表2 沉降验算结果对比

验算方法	沉降量/mm
GB 50007—2002 分层总和法	81.9
JGJ 71—2004 刚性基础法	116.3
综合变形模量法	115.9
$e-1gp$ 曲线法	101.7
现场观测(投产后一年)	99.3

3.2 对基础强度的评价

校核基础混凝土的强度和实际配筋情况是基础评价的主要内容。基础强度的检测可采用钻芯法、回弹仪法或超声波法,必要时还应确认混凝土的碳化和钢筋的锈蚀程度。高炉基础的受力不仅与上部结构荷载、材料强度、结构形式等有关,还受千变万化的地基土性质的制约。高炉基础一般设计成正多边形(等效直径达20~30 m)或矩形结构,其沿高度有变截面性质,且上部荷载种类繁多,至今还没有统一的计算方法。合理确定地基反力大小及其分布模式是基础内力计算的关键。对有一定埋深的高炉基础,将地基反力简化为直线分布恐与实际有一定出入。邯钢4[#]高炉地基土为硬塑状态的粘性土,有限元数值模拟结果表明地基反力近似呈鞍型分布。基础强度验算时采用了刚性板条法,地基反力简化的分布模型见图4。

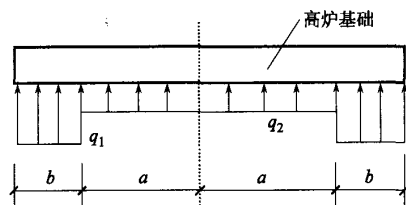


图4 地基反力的分布

图4中 $q_1 = 266.6 \text{ kPa}$, $q_2 = 133 \text{ kPa}$, $a = 11.2 \text{ m}$, $b = 1.8 \text{ m}$ 。

高炉基础的计算理论大致有直线分布理论、弹性地基半无限体理论等。可参照使用的计算方法有悬臂板法^[8]、刚性板条法^[9]和美国混凝土学会(ACI)计算方法^[10]。悬臂板法根据刚性基础的设

计理论,假设基础在上部荷载和地基反力共同作用下形成以基础中心点为半径的若干个塑性铰线,基础底板的净反力 P 按均布荷载采用。针对计算截面 R_2 位置(见图5),高炉基础底板下部半径 R_2 处单位弧长的径向弯矩为:

$$M_R = \frac{P}{3(R_1 + R_2)} (2R_2^3 - 3R_1^2 R_2 + R_1^3) \quad (2)$$

底板下部单位宽度的环向弯矩为:

$$M_\theta = \frac{1}{2} M_R \quad (3)$$

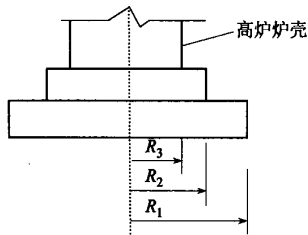


图5 基础尺寸示意图

刚性板条法视基础为绝对刚性、地基反力近似鞍型分布模式。通过板条的静力平衡求解内力。美国混凝土学会(ACI)计算方法假设基础板的刚度不大,属于柔性基础,按 Winkler 地基模型进行计算。不同验算方法下炉体支点的弯矩计算结果见表3(其中 $R_3 = 5.2$ m, $R_2 = 8.1$ m, $R_1 = 13.3$ m, $p = 166.6$ kPa)。

表3 不同验算方法下的弯矩计算结果

计算方法	径向弯矩/(kN·m·m ⁻¹)	环向弯矩/(kN·m·m ⁻¹)
悬臂板法	6 262.9	3 131.4
刚性板条法	6 246.2	
ACI方法	6 486.6	1 221.8

从计算结果分析,三种方法对基础径向弯矩的计算结果较一致,而环弯矩差别较大。总之,现行刚性基础内力的计算方法都是从基础的静力平衡条件推导出来的,计算本身没有考虑到基础的刚性和地基的变形特性对基底接触压力分布的影响。已有的研究成果表明^[9],计算方法的选择与基础板的柔性指数 S 有关:

$$S = \frac{3(1 - \mu_c^2)ER^3}{(1 - \mu^2)E_c h^3} \quad (4)$$

式中: μ_c, μ ——板材料和土的泊松比;

E_c, E ——板材料和土的弹性模量,MPa;

R ——板的半径,m;

h ——板的厚度,m。

当 $S < 0.5$ 时,可把基础看作绝对刚性板计算。

当 $S > 10$ 时,把基础看作绝对柔性。当 S 介于 0.5 和 10 之间时,则应按有限刚度基础进行计算。

4 结论

高炉扩容工程的地基基础评价工作涉及的内容较多,目前积累的经验还显不足,因此对岩土工程师自身的业务素质 and 理论水平要求较高。评价工作应从高炉扩容工程的特点出发,充分利用现代数值仿真技术模拟上部结构、基础与地基的共同作用,采用多种试验手段及计算方法,综合进行。在施工过程中应尽量健全各种监测项目,做好地基反力、变形的全过程观测工作,并保证信息的准确性,为设计理论的进一步完善提供依据。

参考文献

- 1 王凤江. 对某冶金工业炉地基基础的评价. 冶金矿山设计与建设, 1998, 30(6): 37~40
- 2 JGJ 123—2000 既有建筑物地基基础加固技术规范
- 3 GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范
- 4 高大钊, 姜安龙, 张少钦. 确定地基承载力方法若干问题的讨论. 工程勘察, 2004(3): 3~8
- 5 JCJ 72—2004 高层建筑岩土工程勘察规程
- 6 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算(第二版). 北京: 中国水利水电出版社, 2000. 178~198
- 7 《岩土工程手册》编写委员会. 岩土工程手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994. 337~338
- 8 鞠建英. 特种结构地基基础工程手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. 303~308
- 9 徐至钧. 高塔基础设计与计算(修订版). 北京: 中国石化出版社, 2002. 183~191
- 10 张季荣, 朱向荣. 简明建筑基础计算与设计手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. 110~118

收稿日期: 2005-01-27