

高原低气压 与工业生产

张劲峰 沈有光 吕仁海

甘肃科学技术出版社

前 言

高原地区占我国国土总面积约三分之二，涉及陕、甘、宁、青、云、贵、川、藏、晋、冀、内蒙、新疆十二个省区。高原地区大气压强较平原地区下降，这一特点常为人们不加分析地忽略。实践证明，在科研、设计、生产、基本建设、技术引进等工作中充分重视高原低气压的影响，从中找出规律，可产生一系列的技术改造措施，并从中获得显著的效益。

尽管工业生产工艺因行业和产品不同而千差万别，但这些工艺多是一些基本单元过程的不同组合，笔者从分析高原低气压对这些基本单元过程的影响入手，辅以部分生产实例，力图从理论和实践的结合上找出一般规律。但由于这一课题涉及专业及行业较多，作者水平有限，其中定有错误和缺点，尚希读者批评指教。

本文可供高原地区从事科研、经济技术管理及各行业工业生产的人员及大专院校师生参考。我们以此文抛砖引玉，希望有更多论述高原低气压影响规律的论著问世，以不断丰富和深化这一课题，产生更大的经济效益。

我们衷心感谢涂湘湘、林贵增、吴棣华、曲德林、袁维仁、郁锋等同志，感谢他们为本书所付出的辛勤劳动。

作 者

目 录

一、值得深入探索的课题	(1)
二、对低压气相化学反应的直接影响	(9)
1. 低气压对化学平衡的影响	(10)
2. 低气压对反应速度的影响	(13)
3. 实例：低气压与醋酸乙烯合成反应	(20)
三、低气压与常压沸腾化学反应体系	(30)
1. 沸点下降对化学平衡的影响	(31)
2. 沸点下降对反应速度的影响	(33)
3. 实例：低气压与醋酸乙烯聚合反应	(36)
四、对反应温度的间接影响	(44)
1. 温度对复杂反应的影响	(45)
2. 关于活化能	(48)
3. 实例：低气压对醋酸甲酯分解反应的影响	(51)
五、低气压对流体输送过程的影响	(56)
1. 容积式气体压缩机容积排气量下降	(57)
2. 气体压缩机重量排气量下降	(60)
3. 对容积式气体压缩机功率的影响	(62)
4. 排气温度升高	(65)
5. 对气体输送阻力的影响	(65)
6. 低气压与离心风机	(67)
7. 湿式气柜重量贮存能力下降	(70)

8. 离心泵吸入高度下降	(71)
六、对含湿气体性质及相应过程的影响	(74)
1. 含湿气体饱和湿度增高	(74)
2. 低气压对相对湿度的影响	(77)
3. 对露点的影响	(78)
4. 对负压干燥的影响	(79)
5. 对干燥速度的影响	(80)
6. 低气压与 $i-d$ 图	(83)
7. 实例: 低气压与聚乙烯醇干燥	(86)
七、低气压对常压精馏过程的影响	(88)
1. 雾沫夹带增加, 生产能力下降	(89)
2. 塔板压降增加, 易产生液泛	(91)
3. 精馏塔温度指标需另行确定	(93)
4. 冷凝器的冷凝效果下降	(95)
5. 对处理粘稠物系常压精馏塔的影响	(97)
八、高原低气压与锅炉	(99)
九、低气压对仪表及电器的影响	(109)
十、注意联系生产实际综合分析	(121)
附录 I 压强单位换算表	(136)
附录 II 某些反应的动力学积分式	(137)

一、值得深入探索的课题

迄今为止，在某些机电产品的应用和高原生物学等领域，高原低气压的影响已为人们所注意。但相对低气压对人们生活 and 工业生产影响的广度和深度，这一课题仍需加以深入探索。

一套在平原地区运转多年，为实践证明是成熟可靠的装置，搬迁到高原地区以后，其运转状况、工艺条件、生产能力乃至经济效益都有可能由于高原大气压强降低而发生变化。在进行设计、科研、基本建设、生产准备、投料试车的过程中，都应结合当地气压等条件，因地制宜地具体分析，以求得最佳效果。

我们认为应深入研究高原低气压对工业生产的影响是基于如下原因：

第一，这种研究在我国有特殊重要的意义。人类的活动离不开环境，深入研究我国的地理特点并找出这些活动与自然环境的关系，从中总结规律，将使我们的工作更有成效。

山地和高原在我国分布极广，其面积占全国国土总面积的65%以上，海拔千米以上的地区分布在我国西部和中部地区。

四大高原（青藏、内蒙古、黄土及云贵）主要分布在大兴安岭——太行山——雪峰山一线以西的广大地区。青藏高

原包括青海、西藏和四川省西部,面积230万平方公里,几乎占全国面积的四分之一,平均海拔4 000米,号称“世界屋脊”;内蒙古高原西起甘肃、新疆,东抵大兴安岭,南界长城,包括内蒙古自治区全部和甘肃、宁夏、河北等省区的一部分,海拔1 000米左右;黄土高原包括山西全省和陕、甘、宁等省区的一部分,海拔1 000~2 000米;云贵高原包括云南省东部和贵州省大部,平均海拔从2 000米下降到1 000米。

这就是说:在我国大部分地区都必须重视高原低气压的影响。除此之外还应指出:某些对大气压强较敏感的工业装置,即使在海拔500米的地区,也不能忽略气压变化造成的影响。由于历史原因,高原地区一般工业较落后,工业装置往往采用自东部平原地区或国外引进的方式。在引进过程中就必须考虑大气压强降低后带来的一系列复杂影响。

表1-1列出了我国海拔千米以上的主要城市及其大气压强。可以看出,海拔千米以上的省会就有7个,还有不少中小城市(如康定)海拔也较高,至于海拔较高的地、县就更多了。在这些地区分析低气压影响时,可向当地查询海拔或气压和查阅有关气象资料及设计资料。

第二,高原低气压的影响往往容易不加分析地被忽视。目前不少单位在基本建设、设计和生产准备中没有考虑高原低气压的影响,简单地认为高原地区气压与平原地区相差不大,因此忽略这种影响,认为不会造成严重的后果。笼统地认为在平原地区生产正常的装置和工艺生搬硬套到高原地区也一定运转正常。这样,不少企业建成后某些技术指标长期达不到平原地区同类厂水平,却不知道是低气压在作怪,造成了较大的经济损失。

表1-1

城市名称	海拔 (米)	平均压强 (毫巴)	城市名称	海拔 (米)	平均气压 (毫巴)
呼和浩特	1 063	895.9	石咀山	1 092	892.2
包头	1 044	898.2	银川	1 111	890.7
阿克苏	1 104	900.4	中宁	1 184	882.4
兰州	1 517	847.8	西宁	2 261	774.9
临夏	1 917	807.6	民和	1 814	818.1
大同	1 067	894.5	延安	957.6	907.9
长海	926.5	910.4	康定	2 617.7	742.6
天水	1 131	887.3	会泽	2 109.5	788.1
威宁	2 234	777.3	大理	1 990	799
贵阳	1 071	893.3	昆明	1 891	809.9
安顺	1 393	859.9	蒙自	1 300.7	868.1
拉萨	3 658	652	日喀则	3 800	637.8

还有不少人认为：许多装置尤其是化工装置是由设备和管道系统组成的，这些系统是密闭的，因而不会受到高原低气压的影响，这种看法是不全面的。密闭的系统总会直接或间接地受到外界的影响，即使在高压下进行的化肥生产过程，也需要多级压缩机造成这种高压。多级压缩机的第一级吸入口必然受高原低气压的影响，致使其重量排气量大幅度下降，造成整个装置生产能力较平原地区大幅度下降。至于对其它各类单元过程的影响，也可从以下各节的分析中看

出。

当然，不能认为高原低气压对一切工业生产过程都必定造成极其严重的后果，对千差万别的各行业生产作简单的结论显然是不适当的。但是对许多产品的生产过程，高原地区大气压强降低的数值已足以造成不可忽略的影响。

以兰州地区海拔1 570米，大气压强635毫米汞柱的聚乙烯醇生产装置为例，该装置是由日本引进后翻版建设的，若照搬平原地区同类装置其影响如下：

醋酸乙烯合成工序的催化剂收率较平原地区下降约12%，合成工序的生产能力下降12%。

原在平原地区采用的工艺条件中，约有三分之一需要重新修改确定才能用于生产。

醋酸乙烯聚合工序生产能力下降1.7倍，若套用平原地区同类厂条件无法生产。如不改进工艺唯多加引发剂，仅此一项每年浪费26万余元。

聚乙烯醇干燥速率加快约7%，这是造成影响产品挥发份和手感以至影响成品色相的重要原因之一。

精馏塔的最大处理能力下降，部分塔易发生液泛，部分冷凝器的冷凝效果降低。

回收工序醋酸甲脂分解转化率降低，造成回收工序生产能力下降约8%。由于分解转化率下降，分离过程中动力消耗增加。

工艺流程中的气体压缩机的重量排气量下降约16~18%。

由这些影响可以看出，尽管生产过程在密闭系统内进行，但低气压所造成的影响是不应忽略的，类似这样的影

响，不是偶然的、个别的现象。在高原地区从事科研设计、工业生产的人员，有必要加强对高原低气压影响注意分析的意识。

第三，高原低气压对国民经济不少行业和部门有广泛影响。例如：由于高原低气压的影响，高原地区气体介电性能下降，以空气为绝缘介质的高压电器将易于放电，高原型高压电器应专门研制。内燃机汽缸中的绝对压强因高原低气压影响降低，造成在高原地区大量使用的内燃机功率大幅度降低。某些仪表特别是气体和蒸汽测量仪表也受低气压的影响需加以校正。在电子、精加工、光学仪器等行业中广泛采用的空调系统也受低气压的影响，空调风机应重新选型，电机应另行配套。甚至农用水泵的吸入扬程也受低气压的影响而下降。各类气体压缩机在高原地区排气量下降，排气温度升高，轴功率下降。高原低气压对化工生产各单元过程均可能造成影晌（如对质量传递过程、热量传递过程、动量传递过程、化学反应过程）。低压气体输送的管道阻力将增加，湿式气柜的缓冲能力下降，精馏、吸收、干燥、冷凝等操作均可能不同程度受到高原低气压的影响，而上述单元过程在化纤、石油、热工、轻工、纺织、食品等行业广泛使用，这些单元过程以不同介质和不同规模的组合又形成了无数产品的生产工艺过程。这就使分析高原低气压的影响成为一个复杂而广泛的问题。高原低气压不仅对工业生产，而且对人体生理，包括体育运动生理，体育比赛选址，乃至人们的日常生活都可能造成影响。高原生物学已成为一专门学科，为适应高原地区氧及二氧化碳分压低的环境，高原生物自有其生理特点。

这是一个极有实际意义和经济意义的课题，并已为许多生产实践过程所证明。分析和克服高原低气压的影响是有规律可循的。在一些投产多年、技术力量较强的企业中，也可能存在高原低气压的影响，有待改造。

第四，高原低气压的影响决非简单而无须深究的问题，它涉及多行业多学科的知识，特别是要有一定的工程经验。它涉及流体力学、物理化学、物理学、化学工程、化学反应工程，流变学及动力、化工、热工、暖通、仪表电气、机械等专业。迄今为止，人类所取得的大多数科研成果和工业成果多产生于平原地区，不少数据和图表甚至是以标准状况为其前提条件的。在高原地区加以应用时就必须注意到环境变化这个因素，而环境总压强的变化是最敏感、最突出的。在具体分析它对个别工程项目的影响时，要求具备从复杂流程中迅速找出这些影响的能力。探索这一课题的目的在于：对从平原地区或国外新引进的工业项目进行技术把关，将高原低气压的影响消除在建成之前。对已建成的企业中低气压所造成的影响加以挖掘，以采取相应措施从而获得经济效益。鉴于行业多，范围广，笔者只能在简述对不同单元过程进行分析的一般性步骤后，列出有限实例加以说明。期望使这种分析深入到更多的工艺过程中去，从而获得更大的效益，总结出更丰富的内容。实践已证明，由此课题出发可以导致许多技术革新措施，且往往用费甚少而效果明显。

高原低气压对工业生产的影响并不总是表现为不利影响。例如在高原低气压的作用下，干燥速度加快对某些生产过程是有利的。又如受低气压的影响，许多常压沸腾体系的温度下降，因而设备的腐蚀速度较平原地区同类装置有所减慢。

但在多数情况下，由于平原地区原有装置的条件多是经优化选择的，搬迁至高原地区后，低气压若使这些条件明显变化，往往表现为脱离优化条件，造成不利影响。在克服这些不利影响所采用的手段上也有其共性，例如可采用加压措施恢复至平原地区的优化条件，这样做通常较简便有效。在分析低气压影响的过程中，可使我们进一步认识装置原理和技术条件，寻求在高原条件下最适宜的工艺条件，从而有可能使在平原地区某些运转正常的工艺在高原地区得到进一步改进，即实现某些装置工艺条件在高原地区的优化。

鉴于许多行业采用化工单元过程，而且在熟悉高原低气压对各单元过程的影响之后，就可以做到迅速找出低气压对复杂工业项目的影响，因此分析拟以高原低气压对这些单元过程的影响入手。在此之前，先就大气压强、它与海拔的关系，它的单位及其换算作一简要说明。

众所周知，大气压强是空气重量造成的，在地球每1平方公里的地面上有10 130 000吨的空气，因此整个地球大气层有大约517亿万吨的空气。由于空气是可以压缩的，空气层越靠近地面密度越大，越到高空密度越小。空气层厚约800公里，和我们关系最密切的是对流层，即地面以上12公里左右的空气层（严格地说是赤道上空16~18公里，在两极7~9公里），对流层空气的总重量为整个大气层重量的80%。由于空气有重量，空气柱就产生了压力，所谓大气压强就是在一定高度上作用于一点的空气柱的重量。

在0°C时，纬度为45度海平面上的大气压强为760毫米汞柱，这一数值即为一个大气压。

海拔高度与大气压强的关系如下表。

海拔 (公里)	0	1	2	3	4	5	5.5	20	50	100
压强 (毫米汞柱)	760	671	593	524	463	405	380	41	0.41	0.007

粗略计算两者关系还可下式:

$$P = P_0 \left(1 - \frac{0.0065}{293} H \right)^{5.256}$$

式中 P_0 为温度为 0°C 海拔高度为 0 时大气压强取

$$1.0336 \text{ kg/cm}^2;$$

P 为海拔高度为 H 处的大气压强;

H 为海拔高度 (米, 但此单位计算时不代入)。

压强的单位及其换算见附表 I。

在实际生产中, 压强测量仪表的显示值多是被测介质的压强与大气压强之差, 我们称之为表压, 而称被测介质的实际压强为绝对压强, 简称绝压。下式表明了它们之间的关系:

$$P_{\text{绝压}} = P_{\text{表压}} + P_{\text{大气压}}$$

此式表明, 照搬平原地区装置和工艺条件就意味着采用了和平原地区相同的 $P_{\text{表压}}$ 而系统内的绝对压强因高原 $P_{\text{大气压}}$ 下降而降低了, 而且降低的数值为高原地区大气压强与平原地区大气压强之差。

若被测介质的压强低于大气压强, 则称为负压, 其值等于大气压强减去介质绝对压强, 可用下式表示:

$$P_{\text{负压}} = P_{\text{大气压}} - P_{\text{绝对压强}}$$

$P_{\text{负压}}$ 亦称为真空度, 如果某装置在平原地区控制真空度为 700 mmHg , 则装置绝对压强为 $760 - 700 = 60 \text{ mmHg}$ 。该装置搬至兰州地区 (大气压强 635 mmHg) 不可能达到真空度 700 mmHg , 若要求其操作条件与平原地区相同 (即绝压相同), 则控制真空度应为: $635 - 60 = 575 \text{ mmHg}$ 。

二、对低压气相化学 反应的直接影响

许多产品的生产过程都包括化学反应过程，例如许多化工产品的生产，食品工业中的发酵过程，燃料的燃烧，污水处理中的生化处理过程，冶金工业中的冶炼过程。在生产流程中，化学反应过程往往是整个装置的核心部分，化学反应进行的如何，对整个生产影响很大。尽管化学反应设备本身投资可能不大，但却常常是整条生产线的关键。工业生产中不少反应并没有达到化学平衡，因而在反应后常有一个分离过程。化学反应过程中条件是否适当，对其后的分离提纯和降低分离过程中的能耗都有很大的影响。正因为如此，在高原低气压对工业生产各单元过程的影响中，尤其要充分重视对化学反应的影响。

对于高压下进行的化学反应，由于外界环境气压变化的数值相对于反应体系间的绝对压强可以忽略，因此高原低气压一般说来对高压下进行的化学反应直接影响很小。

当反应在常压或压强较低的条件下进行，相对说来大气压强的变化就比较明显。高原低气压对这类化学反应的影响可以从两方面着手分析，一是从化学热力学角度出发进行分析对化学平衡的影响，二是从化学动力学角度出发进行分析其对反应速度的影响。具体对某一生产过程，哪个方面的

影响是主要的，其定量影响分别有多大，要具体结合反应机理进行分析和计算。由于在工业生产中（特别是有机化学反应），为了提高装置的生产能力或连续化生产的程度，化学反应在反应器中往往远离化学平衡状态，此时反应速度的影响常是问题的关键，即主要矛盾。

1. 低气压对化学平衡的影响

首先应确定反应是否可逆。若反应较迅速地进行到底，则不存在化学平衡问题，许多无机化学反应就是如此。

其次确定反应过程中是否有气相物质。若反应物及生成物均属固相或液相，则高原低气压的直接影响可以忽略。

再次，若化学反应前后虽有气态物质，但其克分子数在反应前后并无变化，高原低气压对此类反应的化学平衡亦无影响。

设有一化学反应：



其化学平衡常数 K_p 为：

$$K_p = \frac{P_G^g \cdot P_R^r}{P_A^a \cdot P_B^b} \quad (2-1)$$

式中 P_A, P_B, P_G, P_R 分别为反应物及生成物的分压。

K_p 仅是温度的函数，若A、B、G、R为气相物质，依道尔顿分压定律：

$$P_i = P \cdot X_i$$

式中 P 为总压， P_i 为*i*物质的分压， X_i 为*i*物质的分子分数。

则代入 (2-1) 式得:

$$K_p = \frac{X_G^g \cdot X_R^r}{X_A^a \cdot X_B^b} \cdot P^{(a+b)-(g+r)} \quad (2-2)$$

设 K_x 为用分子分数表示的化学平衡常数, 则:

$$K_x = \frac{X_G^g \cdot X_R^r}{X_A^a \cdot X_B^b} = K_p \cdot P^{-\Delta n} \quad (2-3)$$

式中 $\Delta n = (g+r) - (a+b)$

K_x 不仅与温度有关, 而且与系统总压有关, 这就是说: 当高原低气压导致化学反应体系绝对压强降低后, 虽然没有改变 K_p 的数值, 但却改变了 K_x 的数值, 即改变了化学反应体系中各物质的相对组成。由于 K_x 直接与平衡转化率相联系, 因而低气压对平衡产率的影响, 通过 K_x 观察比较明显。

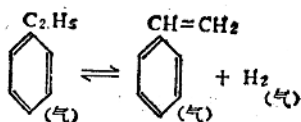
由 (2-3) 式可定性看出: 对于体积缩小的化学反应, $\Delta n < 0$, 在高原地区反应器内绝压 P 降低, K_x 下降, 平衡向逆方向移动。反之, 对体积增加的化学反应 $\Delta n > 0$, 高原低气压将使 K_x 增加, 化学平衡向正方向移动。

设 $P_{高}$ 为化学反应体系在高原地区绝对压强, $P_{平}$ 为该反应体系在平原地区绝对压强, 则依 (2-3) 式可导出平原地区与高原地区的 K_x 比值为:

$$\frac{K_{x,平}}{K_{x,高}} = \left(\frac{P_{高}}{P_{平}} \right)^{\Delta n} \quad (2-4)$$

通常平原地区的平衡常数为已知, 或依标准生成自由能进行计算 (计算方法见下节), 再依 (2-4) 式求 $K_{x,高}$, 从而计算出在高原地区的平衡转化率, 以定量判断高原低气压对化学平衡的直接影响。

实例: 乙苯脱氢制苯乙烯的化学反应式为:



反应在600°C进行,此时平衡常数 $K_p = 0.178$,反应于常压下进行,求该反应在平原地区(大气压强为1大气压)及西宁地区(0.763大气压)乙苯的平衡转化率和苯乙烯的最大产率。

由化学反应方程式可知,此反应为体积增加的反应, $\Delta n > 0$,可定性判断高原低气压对平衡转化率提高是有利的。

取1公斤分子乙苯为计算基准,设平衡时有 x 公斤分子苯乙烯生成,则化学反应前后的公斤分子数为:

	乙苯	苯乙烯	氢气
反应前公斤分子数	1	0	0
平衡时公斤分子数	$1 - x$	x	x
平衡时公斤分子分数	$\frac{1 - x}{1 + x}$	$\frac{x}{1 + x}$	$\frac{x}{1 + x}$
各气体平衡分压	$\frac{1 - x}{1 + x}P$	$\frac{x}{1 + x}P$	$\frac{x}{1 + x}P$

则:

$$K_x = \frac{\left(\frac{x}{1+x}\right)^2}{\frac{1-x}{1+x}} = \frac{x^2}{1-x^2}$$

$$K_p = K_x \cdot P^{\Delta n} = \frac{x^2}{1-x^2} \cdot P$$

在平原地区 $P = 1$ 大气压

$$K_p = 0.178 = \frac{x^2}{1-x^2} \cdot 1 = \frac{x^2}{1-x^2}$$

解得 $x_{\text{平}} = 38.9\%$

即在平原地区乙苯平衡转化率（即苯乙烯最大产率）为38.9%。

在西宁地区 $P = 0.763$ 大气压

$$K_p = 0.178 = \frac{x^2}{1-x^2} \cdot P = \frac{x^2}{1-x^2} \times 0.763$$

解得 $X_{\text{西}} = 43.5\%$

在西宁地区乙苯平衡转化率（即苯乙烯最大产率）较平原地区明显上升，达43.5%。

2. 低气压对反应速度的影响

在常压反应过程中若有气相物质，则低气压使反应系统绝对压强降低后，将导致气体浓度的变化。而浓度对反应速度的影响是很大的，这样，高原低气压对这类反应的影响就表现为浓度对反应速度的影响。一般说来，化学反应的级数越高，低气压对反应速度的影响就越显著。

对于基元反应，实验已总结出质量作用定律，即反应速度与各反应物浓度的乘积成正比，并且每种反应物浓度的方次等于反应式中各反应物的系数。

如基元反应 $aA + bB \rightarrow \text{产物}$

反应速度可表示为 $r = k \cdot C_A^a \cdot C_B^b$ (2-5)

式中 k 为反应速度常数， C_A 及 C_B 分别为A物质及B物质的浓度。

若A、B为气相，依气态方程：

$$P_i = \frac{n_i}{V} RT = C_i RT$$

式中 P_i 为*i*物质的分压， n_i 为*i*物质的克分子数， R 为气体常数， T 为绝对温度， C_i 为*i*物质的体积克分子浓度。