[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
C21B 13/00 (2006.01)

[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 02818969.8

[45] 授权公告日 2006 年 11 月 15 日

[11] 授权公告号 CN 1284866C

[22] 申请日 2002.8.28 [21] 申请号 02818969.8

[30] 优先权

[32] 2001. 9.27 [33] AT [31] A1533/2001

[86] 国际申请 PCT/AT2002/000254 2002.8.28

[87] 国际公布 WO2003/027332 德 2003.4.3

[85] 进入国家阶段日期 2004.3.26

[71] 专利权人 奥地利钢铁联合企业阿尔帕工业设备制造有限及两合公司

地址 奥地利林茨

[72] 发明人 L·W·克普林格
J·莱德特施拉格 J·申克
S·策勒 K·米利昂尼斯
H·奥夫纳

审查员 王 妤

[74] 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利商标事务所

代理人 龙传红

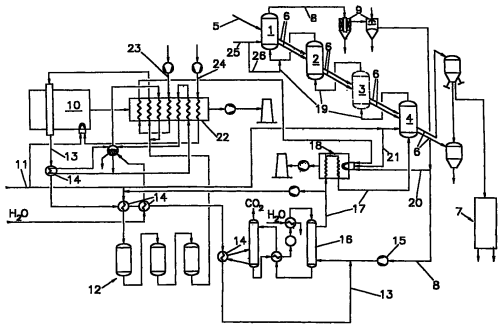
权利要求书 3 页 说明书 10 页 附图 3 页

[54] 发明名称

含金属特别是含铁矿石的粒状材料的还原方法

[57] 摘要

本发明涉及一种还原含铁矿石的粒状材料的方法，所述方法包括至少两个步骤。 按照本发明方法，引导还原气通过至少两个连续串连排列并且由移动的粒状材料形成的反应区，所述粒状材料按与还原气相反的顺序通过反应区。 所述粒状材料在第一反应区内被加热，而在另一反应区内被还原。为了达到最大的预热温度而不形成磁铁矿，调节加入第一反应区内的还原气，使得尽管粒状材料的预热温度在还原反应开始的阈值范围内，但没有或几乎没有还原反应发生，而使还原气的氧化程度升高和/或使还原气的温度降低。 在用于铁矿石的第二反应区内，将温度设定为至少约 600℃，优选 600 – 700℃，特别是 620 – 660℃，并使含铁氧化物的材料还原成方铁矿。



1、一种在至少两步工艺中还原含铁矿石的粒状材料的方法，其中，还原气通过至少两个连续串连排列并且由移动的粒状材料形成的反应区，且粒状材料按与还原气相反的顺序通过反应区，粒状材料分别在排列在首位的用于粒状材料的反应区内被加热和在另外的反应区或另外的多个反应区内被还原，其特征在于，通过提高还原气的氧化程度和/或降低还原气的温度而将第一反应区内的粒状材料加热至预热温度，所述预热温度在还原反应开始的界限范围内，并且相对于避免磁铁矿形成而言为最大值，并且在排在首位的用于粒状材料的反应区内，使最大还原速度保持为每分钟脱除0.2%的氧。

2、根据权利要求1的方法，其特征在于，其中在排在首位的用于粒状材料的反应区内，使最大还原速度保持为每分钟脱除0.05%的氧。

3、根据权利要求1或2的方法，其特征在于，在排在第二位的用于粒状材料的反应区内将温度调节为至少约600℃，并将含铁氧化物的材料还原成方铁矿。

4、根据权利要求3的方法，其特征在于，在排在第二位的用于粒状材料的反应区内将温度调节为600-700℃。

5、根据权利要求3的方法，其特征在于，在排在第二位的用于粒状材料的反应区内将温度调节为620-660℃。

6、根据权利要求1或2的方法，其特征在于，用铁矿石作为粒状材料。

7、根据权利要求1或2的方法，其特征在于，在排在首位的用于粒状材料的反应区内，用还原气的热焓调节粒状材料的温度，并且在该温度下粒状材料可能会发生还原反应，但是，为了避免在该温度下发生还原反应，将还原气的氧化程度升高到在该反应区内不会或几乎不会发生还原反应的程度。

8、根据权利要求1或2的方法，其特征在于，对温度和氧化程度的调节独立于任何用于还原粒状材料的新鲜还原气，同时要避免对用

于最终还原粒状材料的新加入的还原气的化学组成和温度产生任何影响。

9、根据权利要求 1 或 2 的方法，其特征在于，以单一颗粒或颗粒带的形式处理粒状材料，其粒度最大为 12mm。

10、根据权利要求 9 的方法，其特征在于，所述粒状材料的粒度最大为 10mm。

11、根据权利要求 1 或 2 的方法，其特征在于，在第一反应区内，将温度调节到 350-550℃。

12、根据权利要求 11 的方法，其特征在于，在第一反应区内，将温度调节到 400-470℃。

13、根据权利要求 1 或 2 的方法，其特征在于，分别在排在第二位的用于粒状材料的反应区内和任选存在的其它反应区内，调节与未进行热交换时相比已经下降的温度。

14、根据权利要求 1 或 2 的方法，其特征在于，对排在首位的用于粒状材料的反应区内温度的调节是通过向该反应区和/或供给该反应区的还原气中注入液态和/或气态的水进行的。

15、根据权利要求 1 或 2 的方法，其特征在于，对排在首位的用于粒状材料的反应区内温度的调节是通过向该反应区和/或供给该反应区的还原气中混入冷气体进行的。

16、根据权利要求 15 的方法，其特征在于，其中所混入的冷气体为冷 CO_2 和/或冷还原气。

17、根据权利要求 1 或 2 的方法，其特征在于，对排在首位的用于粒状材料的反应区内的还原气的氧化程度的调节是通过向该反应区和/或供给该反应区的还原气中供应气态和/或液态的水进行的。

18、根据权利要求 1 或 2 的方法，其特征在于，对排在首位的用于粒状材料的反应区内的还原气氧化程度的调节是通过向该反应区和/或供给该反应区的还原气中注入 CO_2 和/或 CO_2 与 H_2O 的混合物进行的。

19、根据权利要求 1 或 2 的方法，其特征在于，粒状材料在排在

首位的用于粒状材料的反应区内的平均停留时间至多为 40 分钟。

20、根据权利要求 19 的方法，其特征在于，所述平均停留时间至多为 30 分钟。

21、根据权利要求 1 或 2 的方法，其特征在于，将排在末位的用于铁矿石的反应区内的温度调节到 760-850℃。

22、根据权利要求 21 的方法，其特征在于，将排在末位的用于铁矿石的反应区内的温度调节到 770-800℃。

23、根据权利要求 1 或 2 的方法，其特征在于，在排在第二位的用于粒状铁矿石的反应区内，通过下面的一个或多个措施调节即将形成的方铁矿的氧化程度：

•改变新鲜还原气的氧化程度，

•调节还原气的温度，

•调节在用于铁矿石的第二个反应区后面的反应区内的停留时间，

•调节还原气的具体量，

•调节还原气的组成，特别是改变还原气中甲烷的含量和/或惰性气体的含量。

24、根据权利要求 1 或 2 的方法，其特征在于，在材料的流动方向上，从排在首位的用于粒状材料的反应区后面排列的反应区内出来的还原气在冷却和洗涤后只部分导入第一反应区。

25、根据权利要求 1 或 2 的方法，其特征在于，从排在首位的用于粒状材料的反应区内出来的还原气至少部分再循环到第一反应区内。

26、根据权利要求 1 或 2 的方法，其特征在于，在排在首位的用于粒状铁矿石的反应区内，将还原气中的蒸汽/碳比调节到 2.5-5。

27、根据权利要求 26 的方法，其特征在于，将所述还原气中的蒸汽/碳比调节到 2.5-4。

28、根据权利要求 1 或 2 的方法，其特征在于，当含金属的粒状材料的供给中断时，将反应区内的温度冷却下来。

29、根据权利要求 28 的方法，其特征在于，分别通过调节还原气的温度和/或注入 H_2O 或 CO_2 冷却反应区内的温度。

含金属特别是含铁矿石的粒状材料的还原方法

本发明涉及在至少两步工艺中还原含铁矿石的粒状特别是微粒状材料的方法，其中，还原气通过至少两个连续串连排列并且由移动的粒状材料形成的反应区，且粒状材料按与还原气相反的顺序通过反应区，粒状材料分别在排列在首位的用于粒状材料的反应区内被加热和在另外的反应区或另外的多个反应区内被还原。

这种方法在 US-A-5082251、WO-A-92/02458 和 EP-A-0571358 中是已知的。按照 US-A-5082251，在高压下利用还原气，使富铁的粉矿在串连排列的流化床反应器系统中被还原。然后将如此生产的铁粉热压或冷压成型。

在传统的重整炉中用过热水蒸汽将脱硫预热后的天然气催化重整，生成还原气。然后在热交换器中将重整气冷却，然后借助于铁氧化物催化剂通过 CO 变换提高还原气中的 H_2 比例。然后在 CO_2 洗涤器中除去形成的 CO_2 和来自重整器的 CO_2。

这种气体与只是部分消耗的还原气(顶部气体)混合后加热，粉矿在三个步骤(三个流化床反应器)中逆流还原。

首先将矿物流干燥，然后筛分。然后使矿物进入其中燃烧天然气的预热反应器。在这三个连续反应器中，粉矿在高压下被还原。

由 EP-A-0571358 可知，粉矿还原时，不仅利用其与 H_2 的强吸热反应：$Fe_2O_3+3H_2=2Fe+3H_2O-\Delta H$，而且还利用其与 CO 的放热反应：$Fe_2O_3+3CO=2Fe+3CO_2+\Delta H$。从而可以大幅降低操作成本，特别是其中涉及的能源成本。

根据该现有技术，由于已知工艺的动力学使得直接还原涉及到在直接还原过程中在从外向内不断生长的及在含铁氧化物材料的每一个颗粒或粒子上形成的层中形成磁铁矿。实践已经证明：形成的磁铁矿对还原气的直接还原有抑制作用。因此，为了使加入的含铁氧化物的

材料差不多完全还原，只有提高成本。

形成磁铁矿的反应动力学受气体和固体组成的影响。还原气分子必须由外部气流通过粘附气体边界层，再通过大孔和小孔到达反应位。在反应位上氧分解。氧化后的气体原路返回。因此，矿粒是从外向内还原。因为分解的氧离开空的空间，而矿粒的原始体积几乎不收缩，所以矿粒的孔隙率增加。反应前端从外向内移动，进入矿粒。致密层的存在使得还原气的浓度从外向内下降。气体首先由外通过已经还原的壳层扩散，直至反应前端，气体在此反应后，作为反应产品反向扩散。多孔表面的存在使得在反应前端孔壁上发生相界面反应，同时，气体还向内扩散。矿粒表面上磁铁矿致密层的存在使得反应动力学受到抑制，因为正是该层阻碍了还原气的扩散，从而使还原气不能以与多孔矿粒同样的方式进行质量传递。

磁铁矿层的形成非常迅速，即形成速度越快，含铁氧化物材料的温度越接近约 580℃的极限温度。根据 Baur-Glaessner 图，这种磁铁矿致密层在铁矿粒表面上的形成主要发生在与还原气接触时铁矿石温度为 580℃时。铁矿石的温度低于 400℃时，尽管其仍与还原气接触，但是磁铁矿的形成速度放慢，结果将缓慢地形成磁铁矿致密层。

为了在后续还原步骤中很大程度地分别将上述形成的磁铁矿或磁铁矿和金属铁的混合物转化为金属态，需要在后续处理步骤中有更长的停留时间或更高的固体和/或气体温度。

这些现象导致很多缺点：

-因为在后续还原步骤中停留更长的时间，所以会形成更多的来自固体的磨损，

-这种磨损的增强金属化使得材料附聚的趋势增强，

-该材料形成的流化床的流化性能明显劣化，

-在旋风分离器、降落管(料腿)和运输管(竖管)中形成粘结，

-产品输送所产生的问题，

-最终产品的金属化程度低。

另外，产生的问题还涉及需要提高还原度、更高的粉尘排放量(从

而增加了氧化物的损耗)和大量的废物。特别需要提供在排列在首位的流化床区内具有高还原势的还原气。

从 WO-A-99/09220 可知：为了利用还原气的还原势及其显热，将第一流化床区内含铁氧化物材料的温度调节到低于 400℃，或高于 580℃，或 400-580℃，其中，当温度调节到低于 400℃时，在含铁氧化物材料的流动方向上排列在第一流化床区后面的流化床区中，材料要在 10 分钟内，优选在 5 分钟内通过 400-580℃的温度区；其中，当温度调节到高于580℃时，最多要在10分钟内，优选在5分钟内通过400-580℃的温度区；其中，当温度调节到 400-580℃时，含铁氧化物的材料在该温度范围内最多停留 10 分钟，优选 5 分钟，在达到所需温度后立即进入下一个流化床区。

通过这些措施可以将磁铁矿层的形成降低到可接受的程度。

根据 WO-A-99/09220 中所述的工艺，在从 400℃加热到 580℃的过程中，含铁氧化物材料的温度转换要在尽可能短的时间内完成，并且要避免在临界温度范围内停留。快速经过该温度范围时，尽管还原气分别显示出很高或最佳的还原势，但是磁铁矿的形成极其温和。

本发明是对已知的 WO-A-99/09220 中发明工艺的进一步发展，将已经在第一反应区内的打算还原的粒状材料加热到尽可能高的预热温度，从而可以在很大程度上，或者甚至完全避免难以还原的相如铁矿石中磁铁矿的形成，也不会出现这些相的上述缺点。特别是能够避免预热的时间限制，使得单位时间内材料的变化仅取决于还原，而不取决于预热。

对于铁矿石来说，本发明要达到的目的是为了达到最大的预热温度，调节加入第一反应区内的还原气，使还原气的氧化程度升高，或者使还原气的温度降低，或者这两种措施结合使用，使得尽管粒状材料的预热温度在还原反应开始的界限范围内，但没有或几乎没有还原反应发生，从而在排在第二位的用于铁矿石的反应区内，将温度调节为至少约 600℃，优选 600-700℃，特别是 620-660℃，并将含铁氧化物的材料还原成方铁矿。

为了使待还原的粒状材料达到最高的预热温度，根据本发明的一个优选形式，调节加入第一反应区内的还原气，使还原气的氧化程度升高，或者使还原气的温度降低，或者这两种措施结合使用，使得尽管粒状材料的预热温度在还原反应开始的界限范围内，但没有或几乎没有还原反应发生，从而在排在首位的用于粒状材料的反应区内，使最大还原速度保持为每分钟脱除 0.2%的氧，优选每分钟脱除 0.05%的氧。该方法特别适用于铁矿石。

由“Steel Times International”,2001 年 3 月,第 20 和 22 页可知，通过用喷水的方法将预热反应器的反应器温度降低到约 400℃可以抑制磁铁矿的形成。这样做确实能够有效避免磁铁矿的形成，但其代价是牺牲了预热温度，因此，为了在排在首位的用于粒状材料的还原区后面的反应区内加热待还原的材料，必须增加能量供应。

根据本发明，可以达到高于现有技术中的预热温度，所述预热温度甚至可以更高，以致于只要未处理的还原气被预热后发生还原反应，但通过升高还原气的氧化程度能够防止还原反应的发生。根据本发明，必须将粒状材料的预热温度加热到由预热气导致的还原反应开始发生的界限范围内。

这样做，可以在排在首位的用于粒状材料的还原器内有更长的停留时间，从而可以调节材料的流动，即通过该反应器进入后续还原工艺的流速。对于还原工艺来说，则不需要考虑预热。

优选地，对温度和氧化程度的调节独立于任何用于还原粒状材料的新鲜还原气进行，即同时要避免对用于最终还原粒状材料的新加入的还原气的化学组成和温度产生任何影响。

本发明的方法特别适用于微粒材料，即粒度最大为 12mm，优选最大为 10mm 的材料，其形式可以是单一颗粒或颗粒带。

根据本发明，在第一反应区内，将温度调节到 350-550℃，优选 400-470℃。

利用本发明达到的高预热温度，可以分别在排在第二位的用于粒状材料的反应区内和任选存在的其它反应区内，调节与未进行热交换

时相比已经下降的温度。

有利地是，对排在首位的用于粒状材料的反应区内温度的调节是通过向该反应区和/或供给该反应区的还原气中注入液态和/或气态的水进行的。

根据另一个优选实施方案，对排在首位的用于粒状材料的反应区内温度的调节是通过向该反应区和/或供给该反应区的还原气中混合冷气进行的，例如，混合冷 CO_2 和/或冷还原气。

另一个合适的实施方案的特征在于，对排在首位的用于粒状材料的反应区内的还原气氧化程度的调节是通过向该反应区和/或供给该反应区的还原气中加入气态和/或液态的水进行的。

但是，对排在首位的用于粒状材料的还原区内的还原气氧化程度的调节还可以通过向该反应区和/或供给该反应区的还原气中注入 CO_2 和/或 CO_2/H_2O 混合物进行。

利用本发明，可以使粒状材料在排在首位的用于粒状材料的反应区内的平均停留时间至多为 40 分钟，优选至多为 30 分钟，可以将排在末位的用于铁矿石的反应区内的温度调节到 760-850℃，优选 770-800℃。通过后一个措施，可以避免在铁矿石还原成海绵铁的过程中残余在流化床内的颗粒“粘结”-附聚。

通过下面的一个或多个措施可以适当地实现本发明：

•改变新鲜还原气的氧化程度，

•调节还原气的温度，

•调节在用于铁矿石的第二个反应区后面的反应区内的停留时间，

•调节还原气的具体量，

•调节还原气的组成，特别是改变还原气中甲烷的含量和/或惰性气体的含量。

优选地，在材料的流动方向上，从排在首位的用于粒状材料的反应区后面排列的反应区内出来的还原气在冷却和洗涤后只部分导入第一反应区，优选地，从排在首位的用于粒状材料的反应区内出来的还原气至少部分再循环到第一反应区内。

根据本发明，应当使还原气中的 CO 含量低于 20%，优选为 4-10%，在排在首位的用于粒状材料的反应区内，将还原气的蒸汽/碳比调节到 2.5-5，优选 2.5-4。

为了避免含金属的粒状材料的供给中断时还原反应中断，将反应区内的温度冷却下来是有利的，优选分别通过调节还原气的温度和/或注入 H_2O 或 CO_2 进行冷却。

下面利用附图更详细地描述本发明，其中，图 1 示出一个优选实施方案的工艺图。图 2 示出 Baur-Glaessner 图，其中绘出了没有采用本发明的措施时和采用本发明的措施时的还原过程。图 3a 和 3b 示出利用赤铁矿粒的还原过程。

图 1 所示的装置有四个流化床反应器 1-4，它们依次串连，其中，含铁氧化物的矿石如粉矿通过矿石料管 5 加入第一流化床反应器 1，在这里被加热到预定温度，这一点将在后面更详细地说明。然后，具有下表所示化学组成的粉矿通过料管 6 从一个流化床反应器加入另一个流化床反应器，在每一个流化床反应器 1-4 内都形成流化床区。在压块设备 7 中将完全还原后的材料(海绵铁)热压成型。如果需要，在压块过程中用图中未示出的惰性气体系统保护还原后的铁以免再次氧化。

粉矿的化学分析(wt%)									
Fetot	Fe_2O_3	FeO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	TiO_2	C	LOI
67.8	96.9	0.06	0.06	1.38	0.6	0.04	0.04	0.01	0.95

在粉矿加入第一流化床反应器 1 之前，进行矿石处理，如干燥和筛分，这些都不再详述。

与矿石流的方向相反，还原气通过顶部气体排放管 8 从流化床反应器 4 导向流化床反应器 3 至 1，由在气流方向上排在末位的流化床反应器 1 作为顶部气体排出，然后在湿式洗涤器 9 中冷却和洗涤。

将通过管道 11 供应并在脱硫设备 12 中脱硫的天然气在重整器 10 中进行重整，以此生产还原气。由天然气和蒸汽形成且离开重整器 10 的气体主要由 H_2、CO、CH_2、H_2O 和 CO_2 组成。这种重整天然气通

过重整气管道13供入一个或多个热交换器14，在热交换器14中被冷却到80-150℃，从而将气体中的水分冷凝出来。

用压缩机15将顶部气体压缩后，重整气管道13进入顶部气体排放管8。如此形成的混合气经过CO_2洗涤器16，除去其中的CO_2和H_2S。此时即作为还原气供应。经还原气料管17，在排列在CO_2洗涤器16后面的气体加热器18中将还原气加热到约840℃的还原气温度，然后供入在气流方向上排在首位的流化床反应器4，在流化床反应器4中与粉矿反应，生成直接还原铁。流化床反应器4-1依次串连；还原气通过连接管道19从一个流化床反应器进入另一个流化床反应器。流化床反应器的数目与工艺条件如还原气的性能、所需的还原梯度等一致。例如，虚线所示的流化床反应器3可以省略，使该工艺可以按三段操作。

为了避免惰性气体如N_2的富集，从气路8、17、19中排出一部分顶部气体。排出的顶部气体通过支管20供给气体加热器18，用于加热还原气，并在其中燃烧。可能利用由通过料管21供应的天然气补充欠缺的能量。

在蓄热器22中用来自重整器10的重整天然气和重整器烟气的显热预热经过脱硫设备12的天然气，产生重整所需的蒸汽，预热通过管道23供给气体加热器18的燃烧用空气，如果需要，还预热还原气。还要预热通过管道24供给重整器10的燃烧用空气。

为了避免磁铁矿的形成，或者使磁铁矿的形成最小化，下面根据第一个优选形式进行还原过程：

将110t/h的铁矿石加入流化床反应器1。铁矿石是干燥的，其温度约为70℃。

通过管道17供入流化床反应器4的新鲜还原气的温度是840℃，其供应量是每吨铁矿石2150Nm^3。其化学组成示于下表。

	H_2	CO	CH_4	CO_2	N_2	H_2O
Vol%	61	6	22	2.5	7	1.5

进入第二流化床反应器时，还原气的温度是720℃，进入流化床

反应器 1 时，其温度是 640℃。从流化床反应器 1 出来时，其温度是 450℃。

在流化床反应器 1 中，铁矿石被预热到约 450℃，这一点是通过分别降低供给流化床反应器 1 的还原气的还原势或者提高其氧化程度而不会或几乎不会形成磁铁矿来实现的。根据本发明，这是通过注入温度为 40℃的水进行的。其量是 15Nm^3/h，其通过管道 25 直接导入流化床反应器 1，或通过管道 26 供入与流化床反应器 2 和 1 连接的管道 19 中。这样做可以使还原气的温度降低约 100℃，同时分别降低还原势和提高氧化程度，其定义为：

氧化能力的下降=$(CO_2+H_2O)/(CO+CO_2+H_2O+H_2)$

经过上段流化床反应器 1 后，还原气组成的变化实质上仅由加入的水造成，这是因为没有发生反应。喷水前后氧化程度的增加分别与喷水量相一致。

预热至 450℃的铁矿石在流化床反应器 2 中被部分还原后以 640℃的温度进入流化床反应器 3。在流化床反应器 4 中被完全还原后，其金属化率是 92.5%。

结果证明：尽管存在下述事实：铁矿石被预热到 450℃时，上述用于加热的还原气在导入流化床反应器 1 后具有 640℃的温度，由此可能会造成预还原，但是通过向流化床反应器 1 中注入水，可以有效避免磁铁矿的形成。

通过本发明的措施，可以将被部分消耗的用于加热铁矿石的还原气的还原势降低到不发生任何还原反应的程度，从而铁矿石在流化床反应器 1 中的停留时间可以任意选择。试验证明：可能发生某些非常小的预还原反应，但这对于后续的流化床反应器 2-4 中的还原反应来说是微不足道的。这些预反应发生的最大程度是每分钟脱除 0.2%的氧。大多数矿石的还原速率是每分钟脱除低于 0.05%的氧。

因此，根据本发明，在还原反应开始的界限范围内进行预热，从而可以尽可能高地保持用于预热的还原气的温度，这样做的目的首先是为了达到高的预热温度，其次是为了能够调节流化床反应器 2 中的

高温，在此温度下可以直接形成方铁矿，而不会受到磁铁矿的任何抑制。在铁矿石的还原过程中，其温度至少要达到约 600℃，优选 620-660℃。

根据本发明的一个形式，对高预热温度的调节还可以用通过管道 25 和 26 供应液体 CO_2 流的方法进行，可以用 50Nm^3/h 的 CO_2 流替代上述示例实施方案中加入的水，这样能够达到同样的效果。还可以用 CO_2 和 H_2O 的混合物调解还原气。

对于本发明的方法来说，预热气体和待预热的粒状材料之间不一定采用逆流，而是可以用各种方法进行热交换，即还可以用交叉流动的方法。

从图 2 的 Baur-Glaessner 图可以明显看出：在不采用本发明的措施的还原工艺中，在排在首位的用于待还原材料的流化床反应器中已经形成了磁铁矿。该工艺用圆点和虚线表示(Baur-Glaessner 图应当理解为热力学图，因此是独立于反应动力学的，也可以看作是还原反应的前期图)。

在 Baur-Glaessner 图用 1-4 表示的弯曲的虚括弧示出了根据现有技术在相同编号的反应器中的还原反应过程，即没有采用本发明的措施；小方块和实线及实括弧 1-4 示出本发明的还原过程，例如在相同编号的反应器 1-4 中的反应过程。

由于采用了本发明的措施，即流化床反应器 1 中的温度降低到约 450℃，所以几乎能够彻底避免在流化床反应器 1 中形成磁铁矿。

图 3A 示意性地示出在传统还原过程中形成磁铁矿的过程，其中，利用流化床反应器 1 中的低温还原反应，在约 550℃的温度下，赤铁矿粒子形成致密的磁铁矿，在高温下在流化床反应器 2、3 和 4 中通过后续还原反应形成包括包封有方铁矿的致密金属铁和覆盖这些颗粒的磁铁矿的坚壳带。与此相反，在图 3B 所示的本发明的还原过程中，在约 450℃的温度下在流化床反应器 1 中没有发生还原反应，因此，流化床反应器 1 中使用的赤铁矿原样进入流化床反应器 2。在后续的流化床反应器 3 和 4 中发生高温还原反应，从而形成高度多孔的海绵

铁，并且没有“粘结”现象。

本发明的方法对能量平衡有实质性改善，这是因为在连续排列的用于粒状材料的反应器中，即在流化床反应器 2-4 中还原气温度的降低是可行的，而这是因为在流化床反应器 1 中的高温预热，这与已知的温度达到 50℃或更高的预热工艺不同，特别是可以降低排在末位的用于粒状材料的反应器中的还原气温度，从而可以大幅降低完全还原的材料，即海绵铁在流化床中“粘结”的危险。还能够改善粉矿在输送管线中的流动性，其原因同样是在这种情况下可以使“粘结”的危险性最小化。其它实质性的优点是降低了在气体的加热、运输和分配过程中的高温腐蚀(金属粉化)的危险。

本发明的方法的其它实质性的优点是用简单的设备就可以在整个反应器级联中调节温度分布，因为只需要分别调节水量和任选的 CO_2 量就可达到该目的。与此相反，在现有技术中，必须调节气体量，从而通过不断改变整个级联的压力来响应空管速度。

本发明的方法不仅对还原铁矿石有利，而且对其它金属氧化物材料也是有利的，如其中金属在生产硬金属中作为添加剂的钨氧化物、钒氧化物或钼氧化物。

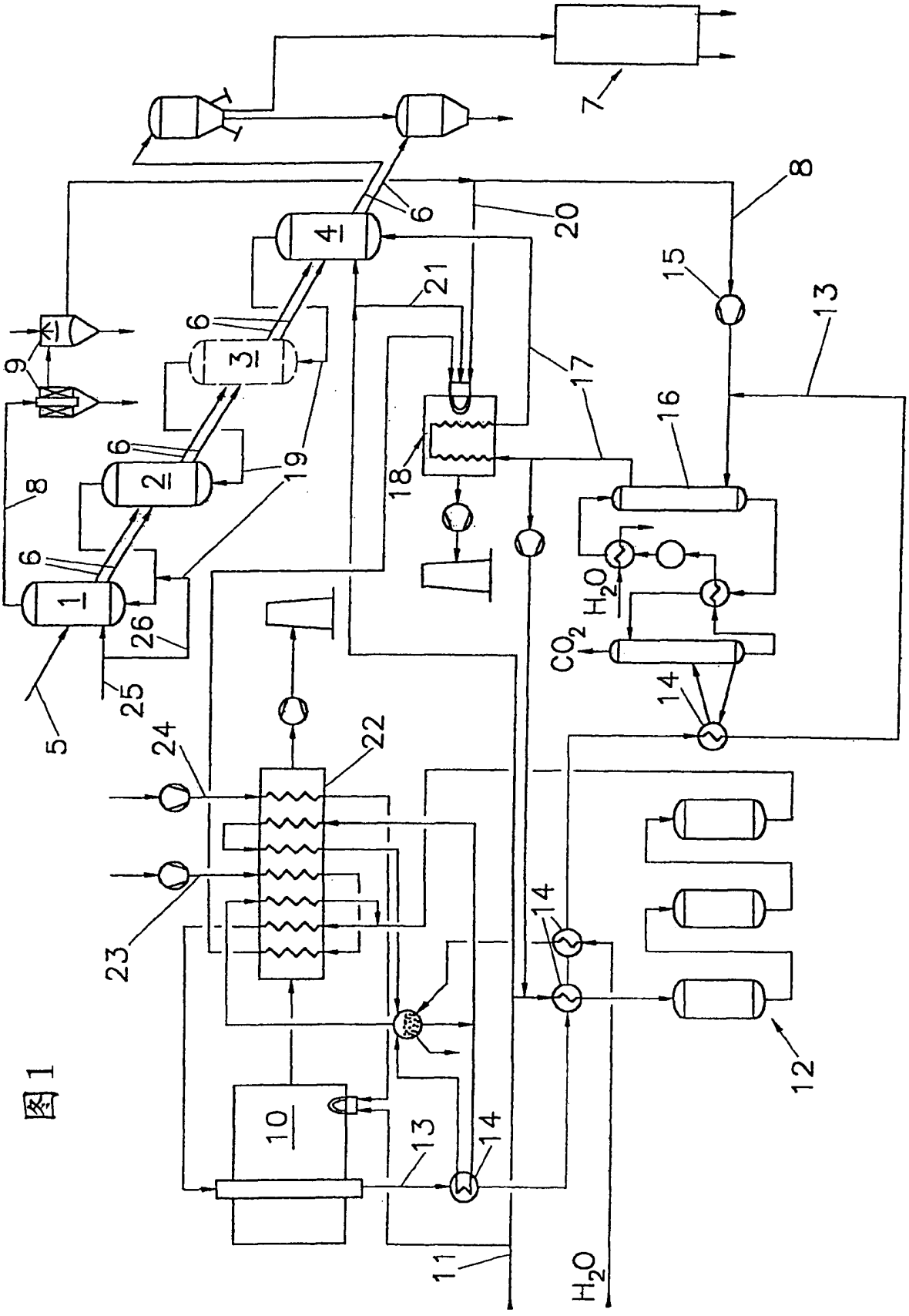
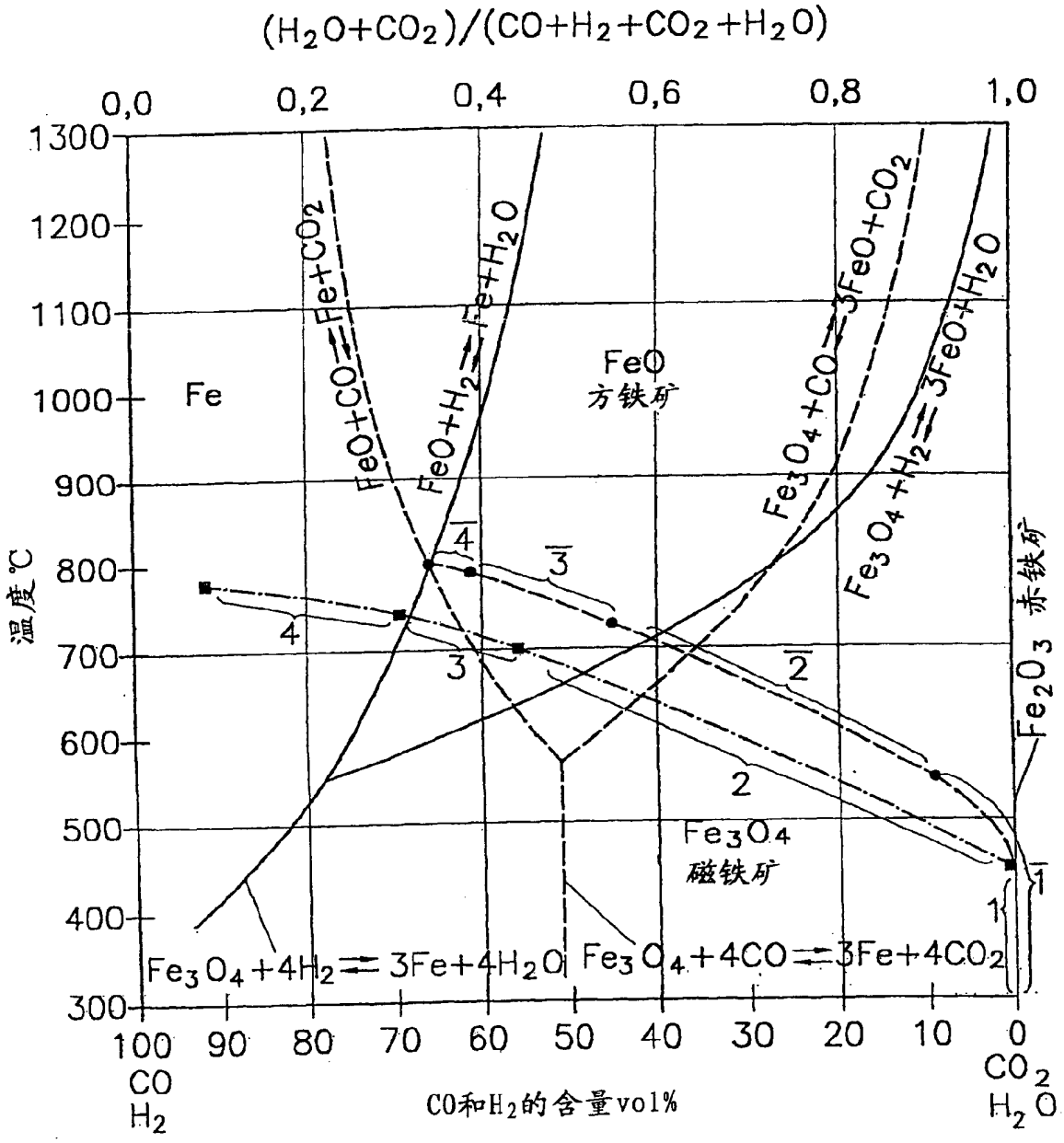

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
H_2O
CO_2
H_2O

图1

图2


(H2O+CO2)/(CO+H2+CO2+H2O)
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1300
1200
1100
1000
900
800
700
600
500
400
300
温度℃
Fe
FeO
方铁矿
FeO+CO=Fe+CO2
FeO+H2=Fe+H2O
Fe3O4+CO=3FeO+CO2
Fe3O4+H2=3FeO+H2O
Fe2O3 赤铁矿
Fe3O4
磁铁矿
4
3
2
1
Fe3O4+4H2=3Fe+4H2O
Fe3O4+4CO=3Fe+4CO2
100 90 80 70 60 50 40 30 20 10 0
CO
H2
CO2
H2O
CO和H2的含量vol%

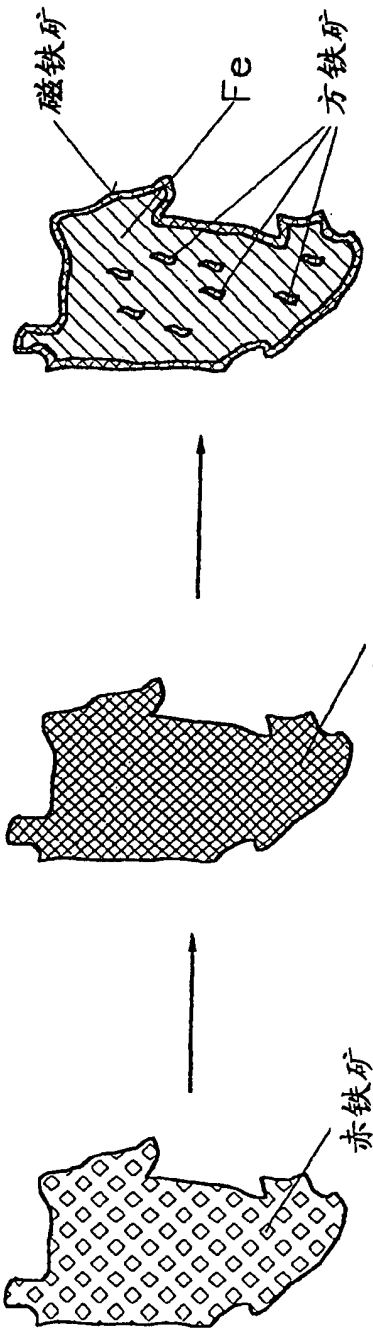


图 3a

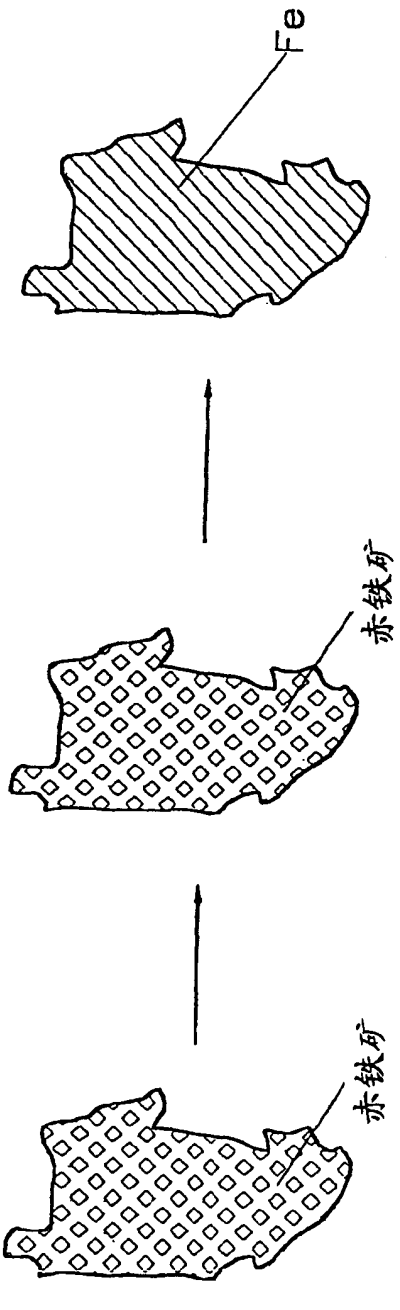


图 3b