(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 101716463 A
(43)申请公布日 2010.06.02

(21)申请号 201010039505.0

(22)申请日 2010.01.05

(71)申请人 浙江大学
地址 310027 浙江省杭州市浙大路38号

(72)发明人 高翔 骆仲泱 岑可法 倪明江
吴祖良 张涌新 吴卫红 钟毅
施正伦 周劲松 方梦祥 余春江
王树荣 程乐鸣 王勤辉

(74)专利代理机构 杭州求是专利事务所有限公司 33200
代理人 张法高

(51)Int.Cl.
*B01D 53/90*(2006.01)
*B01D 53/80*(2006.01)
*B01D 53/60*(2006.01)
*B01D 53/64*(2006.01)
*B01D 53/72*(2006.01)
*B01D 47/06*(2006.01)

权利要求书 2 页 说明书 4 页 附图 1 页

(54)发明名称

电催化氧化联合石灰-石膏法的多种污染物同时脱除装置及方法

(57)摘要

本发明公开了一种电催化氧化联合石灰-石膏法的多种污染物同时脱除装置及方法。装置包喷雾降温装置、静电增强反应器、文丘里装置、双循环多种污染物一体化吸收塔、湿式静电除雾器，烟气经喷雾降温装置降温后进入静电增强反应器，烟气在静电增强反应器内所形成的电晕放电区域中进行电晕放电处理，处理后的烟气进入双循环多种污染物一体化吸收塔，在吸收塔内的经喷淋除尘和喷淋吸收，净化后的烟气依次进入喷淋塔上部的波纹板除雾器和静电除雾器，脱除烟气中气溶胶。本发明具有以下优点：1)实现多种污染物同时脱除，同时有效的控制细微颗粒和气溶胶的污染；2)各种污染物都可达到较高的脱除效率；3)脱除吸收副产物对环境不会造成二次污染。

CN 101716463 A

1. 一种电催化氧化联合石灰－石膏法的多种污染物同时脱除装置，其特征在于包括增压风机 (1)、喷雾降温装置 (2)、静电增强反应器 (3)、文丘里装置 (4)、双循环多种污染物一体化吸收塔 (5)、湿式静电除雾器 (6)、工艺水罐 (7)、工艺水泵 (8)、石灰浆液箱 (9)、石灰浆液泵 (10)、石灰浆液循环箱 (11)、石灰浆液循环泵 (12)、沉淀池 (13)、灰水循环泵 (14)、氧化风机 (1 5)，工艺水由工艺水罐 (7) 经工艺水泵 (8) 输送至喷雾降温装置 (2)、石灰浆液箱 (9)、湿式静电除雾器 (6) 以及双循环多种污染物一体化吸收塔 (5) 上层除雾器；烟气经增压风机 (1) 进入喷雾降温装置 (2) 经工艺水喷淋降温后，经静电增强反应器 (3) 的电晕放电处理，其中空气由氧化风机 (15) 输送，后经文丘里装置 (4) 进入双循环多种污染物一体化吸收塔 (5)，在双循环多种污染物一体化吸收塔 (5) 中烟气经灰水循环泵 (14) 喷雾除尘及喷淋吸收处理后，烟气进入湿式静电除雾器 (6)，后由烟囱排出；喷淋后的灰水以及经喷雾降温装置 (2) 的工艺水都进入沉淀池 (13)；石灰浆液由石灰浆液箱 (9) 经石灰浆液泵 (10) 进入石灰浆液循环箱 (11)，后经石灰浆液循环泵 (12) 进入双循环多种污染物一体化吸收塔 (5) 对烟气进行喷淋吸收处理。

2. 根据权利要求 1 所述的一种电催化氧化联合石灰－石膏法的多种污染物同时脱除装置，其特征在于所述的静电增强反应器 (3) 是长方形结构，包括绝缘装置 (16)、上气室 (17)、喷嘴电极 (18)、电晕放电区域 (19)、极板 (20)、混气室 (21)、氧化风机接口 (22)、布风板 (23)、下气室 (24)，静电增强反应器 (3) 内从上到下设有上气室 (17)、电晕放电区域 (19)、混气室 (21)、下气室 (24)，电晕放电区域 (19) 分成多个电晕放电单元，每个电晕放电单元由极板 (20) 分隔开，每个电晕放电单元内并排布置喷嘴电极 (18)，喷嘴电极 (18) 垂直于极板 (20) 放置，混气室 (21) 与下气室 (24) 之间设有布风板 (23)，混气室 (21) 区域的静电增强反应器 (3) 壳体上设有氧化风机接口 (22)，静电增强反应器 (3) 顶部设有绝缘装置 (16)。

3. 根据权利要求 1 所述的一种电催化氧化联合石灰－石膏法的多种污染物同时脱除装置，其特征在于所述的双循环多种污染物一体化吸收塔 (5) 包括吸收塔入口 (25)、灰水储槽 (26)、灰水喷淋层 (27)、石灰浆液储槽 (28)、石灰浆液喷淋层 (29)、波纹板除雾器 (30)，双循环多种污染物一体化吸收塔 (5) 采用两段式设计，双循环多种污染物一体化吸收塔 (5) 下部为灰水储槽 (26) 和灰水喷淋层 (27)，上部为石灰浆液储槽 (28) 和石灰浆液喷淋层 (29)，石灰浆液喷淋层 (29) 为 2 ～ 4 层喷淋结构，双循环多种污染物一体化吸收塔 (5) 顶部为波纹板除雾器 (30)，烟气由吸收塔入口 (25) 进入双循环多种污染物一体化吸收塔 (5)，先经灰水喷淋层 (27) 与文丘里装置 (4) 结合喷雾除尘，后进入石灰浆液喷淋层 (29) 经石灰浆液空塔喷淋脱硫脱硝，后经波纹板除雾器 (30) 除雾后排出双循环多种污染物一体化吸收塔 (5)。

4. 一种电催化氧化联合石灰－石膏法的多种污染物同时脱除方法，其特征在于烟气进入喷雾降温装置 (2)，将烟气的温度调节至 70 ～ 80℃，烟气从静电增强反应器 (3) 底部进入下气室 (24)，烟气在下气室 (24) 中会有一个缓冲，在下气室 (24) 的上部有布风板 (23)，布风板 (23) 上部是混气室 (21)，补充的氧化空气会在混气室 (21) 中加入并和烟气均匀混合，混气室 (21) 的上部是电晕放电区域 (19)，电晕放电区域 (19) 根据烟气处理量大小分成多个电晕放电单元，每个电晕放电单元由极板 (20) 分隔开，每个电晕放电单元内并排布置多个的喷嘴电极 (18)，喷嘴电极数量根据实际烟气量可调，放电喷嘴电极垂直于极板放置，

电晕放电反应器使用 20kV ～ 50kV 直流高压电，喷嘴电极 (18) 接正高压，极板接负高压，电晕放电区域 (19) 的上部是上气室 (17) 和烟气出口，经过上气室 (17) 缓冲的烟气从出口流出进入双循环多种污染物一体化吸收塔 (5)，双循环多种污染物一体化吸收塔 (5) 下部是灰水储槽 (26) 和灰水喷淋层 (27)，灰水由沉淀池 (13) 在灰水循环泵 (14) 的作用下不断被输送到灰水喷淋层 (27) 与文丘里装置 (4) 结合对烟气进行喷雾除尘，双循环多种污染物一体化吸收塔 (5) 上部安装有 2 ～ 4 层石灰浆液喷淋层 (29) 和石灰浆液储槽 (28)，由石灰浆液循环泵 (12) 的不断输送到石灰浆液喷淋层 (29)，和逆流而上的烟气充分接触反应，对烟气进行喷淋吸收除去烟气的多种污染物，喷淋液气比为 8 ～ 20，系统出口烟尘排放小于 $30mg/m^3$；$SO_2$ 排放小于 $200mg/m^3$，且系统脱硫效率不低于 96％；NO 排放浓度小于 $150mg/m^3$，且系统脱硝效率不低于 60％，双循环多种污染物一体化吸收塔 (5) 上下部的浆液循环分离，净化后的烟气进入双循环多种污染物一体化吸收塔 (5) 上部的波纹板除雾器 (30)，经波纹板除雾器 (30) 除雾后的烟气中的气溶胶量小于 $100mg/m^3$，烟气再通过湿式静电除雾器 (6) 的进一步除雾后气溶胶量小于 $30mg/m^3$，后经烟囱排出。

# 电催化氧化联合石灰－石膏法的多种污染物同时脱除装置及方法

## 技术领域

[0001] 本发明属于环保技术领域，尤其涉及一种电催化氧化联合石灰－石膏法的多种污染物同时脱除装置及方法。

## 背景技术

[0002] 目前国内外对于燃煤烟气中硫氧化物，氮氧化物，多环芳烃和二噁英等污染物的控制手段一般采用不同的设备和方法分别加以治理。国内外硫氧化物的主要控制技术是石灰石－石膏法脱硫技术和半干法脱硫技术。其中石灰石－石膏法脱硫技术存在投资大，运行费用较高，脱硫副产物难以回收利用等缺点；而半干法脱硫技术一般对高硫煤的适应性比较差，且主要应用于 300MW 以下机组的电厂及热电联产锅炉尾气脱硫。

[0003] 国内外脱除烟气中氮氧化物的主要技术为选择性催化还原法 (SCR) 和选择性非催化还原法 (SNCR)。但 SCR 和 SNCR 脱除氮氧化物都需要安装昂贵复杂的设备。如在 SCR 设备的安装中，其催化剂的费用占总投资额的35％，而且一般设备运行 2 ～ 3 年后需要跟换新的催化剂，运行成本很高。这两种工艺在发展中国家使用较少。

[0004] 国内外对于金属汞，多环芳烃和二噁英类物质的治理正处于起步阶段，还没有成熟的工艺技术，大都是采用活性炭吸附法进行去除。活性炭吸附后的产物属于危险固体废弃物，可能造成二次污染。此外，这类危险固体废弃物的处理成本也是相当昂贵的。

[0005] 迄今为止，还没有一项技术可以同时脱除烟气中的硫氧化物，氮氧化物，多环芳烃和二噁英这四种污染物。进入 90 年代后，人们开始逐渐认识到对各种污染物分别治理，不仅占地面积大，而且投资费用高。为了降低烟气净化的费用，适应现有电厂的需要，开发可以同时脱除多种污染物的新技术和新设备已成为烟气净化技术的发展趋势。

[0006] 一种采用电催化氧化联合石灰－石膏法吸收的烟气净化技术可以同时脱除烟气中的硫氧化物，氮氧化物，金属汞，多环芳烃和二噁英这四种污染物。其原理是利用烟气中的水蒸气和氧气等非污染物作为自由基生成源，在电晕区域的作用下，被分解成 O，OH，$O_3$，$HO_2$ 等氧化性自由基，与烟气中的 $SO_2$，NOx，$Hg^0$，多环芳烃和二噁英反应生成 $SO_3$，$H_2SO_4$，$NO_2$，$HNO_3$，二价汞，$CO_2$ 和 $H_2O$，这些反应产物在后续的石灰－石膏法工艺中被吸收，从而实现多种污染物的同时脱除。

## 发明内容

[0007] 本发明的目的是针对目前未有能够同时脱除烟气中的硫氧化物，氮氧化物，金属汞，多环芳烃和二噁英的技术空白，提供一种电催化氧化联合石灰－石膏法的多种污染物同时脱除装置及方法。

[0008] 电催化氧化联合石灰－石膏法的多种污染物同时脱除装置包括增压风机、喷雾降温装置、静电增强反应器、文丘里装置、双循环多种污染物一体化吸收塔、湿式静电除雾器、工艺水罐、工艺水泵、石灰浆液箱、石灰浆液泵、石灰浆液循环箱、石灰浆液循环泵、沉淀池、

灰水循环泵、氧化风机，工艺水由工艺水罐经工艺水泵输送至喷雾降温装置、石灰浆液箱、湿式静电除雾器以及双循环多种污染物一体化吸收塔上层除雾器；烟气经增压风机进入喷雾降温装置经工艺水喷淋降温后，经静电增强反应器的电晕放电处理，其中空气由氧化风机输送，后经文丘里装置进入双循环多种污染物一体化吸收塔，在双循环多种污染物一体化吸收塔中烟气经灰水循环泵喷雾除尘及喷淋吸收处理后，烟气进入湿式静电除雾器，后由烟囱排出；喷淋后的灰水以及经喷雾降温装置的工艺水都进入沉淀池；石灰浆液由石灰浆液箱经石灰浆液泵进入石灰浆液循环箱，后经石灰浆液循环泵进入双循环多种污染物一体化吸收塔对烟气进行喷淋吸收处理。

[0009] 静电增强反应器是长方形结构，包括绝缘装置、上气室、喷嘴电极、电晕放电区域、极板、混气室、氧化风机接口、布风板、下气室，静电增强反应器内从上到下设有上气室、电晕放电区域、混气室、下气室，电晕放电区域分成多个电晕放电单元，每个电晕放电单元由极板分隔开，每个电晕放电单元内并排布置喷嘴电极，喷嘴电极垂直于极板放置，混气室与下气室之间设有布风板，混气室区域的静电增强反应器壳体上设有氧化风机接口，静电增强反应器顶部设有绝缘装置。

[0010] 双循环多种污染物一体化吸收塔包括吸收塔入口、灰水储槽、灰水喷淋层、石灰浆液储槽、石灰浆液喷淋层、波纹板除雾器，双循环多种污染物一体化吸收塔采用两段式设计，双循环多种污染物一体化吸收塔下部为灰水储槽和灰水喷淋层，上部为石灰浆液储槽和石灰浆液喷淋层，石灰浆液喷淋层为 2 ～ 4 层喷淋结构，双循环多种污染物一体化吸收塔顶部为波纹板除雾器，烟气由吸收塔入口进入双循环多种污染物一体化吸收塔，先经灰水喷淋层与文丘里装置结合喷雾除尘，后进入石灰浆液喷淋层经石灰浆液空塔喷淋脱硫脱硝，后经波纹板除雾器除雾后排出双循环多种污染物一体化吸收塔。

[0011] 电催化氧化联合石灰－石膏法的多种污染物同时脱除方法是：烟气进入喷雾降温装置，将烟气的温度调节至 70 ～ 80℃，烟气从静电增强反应器底部进入下气室，烟气在下气室中会有一个缓冲，在下气室的上部有布风板，布风板上部是混气室，补充的氧化空气会在混气室中加入并和烟气均匀混合，混气室的上部是电晕放电区域，电晕放电区域根据烟气处理量大小分成多个电晕放电单元，每个电晕放电单元由极板分隔开，每个电晕放电单元内并排布置多个的喷嘴电极，喷嘴电极数量根据实际烟气量可调，放电喷嘴电极垂直于极板放置，电晕放电反应器使用 20kV ～ 50kV 直流高压电，喷嘴电极接正高压，极板接负高压，电晕放电区域的上部是上气室和烟气出口，经过上气室缓冲的烟气从出口流出进入双循环多种污染物一体化吸收塔，双循环多种污染物一体化吸收塔下部是灰水储槽和灰水喷淋层，灰水由沉淀池在灰水循环泵的作用下不断被输送到灰水喷淋层与文丘里装置结合对烟气进行喷雾除尘，双循环多种污染物一体化吸收塔上部安装有 2 ～ 4 层石灰浆液喷淋层和石灰浆液储槽，由石灰浆液循环泵的不断输送到石灰浆液喷淋层，和逆流而上的烟气充分接触反应，对烟气进行喷淋吸收除去烟气的多种污染物，喷淋液气比为 8 ～ 20，系统出口烟尘排放小于 $30mg/m^3$；$SO_2$ 排放小于 $200mg/m^3$，且系统脱硫效率不低于 96％；NO 排放浓度小于 $150mg/m^3$，且系统脱硝效率不低于 60％，双循环多种污染物一体化吸收塔上下部的浆液循环分离；净化后的烟气进入双循环多种污染物一体化吸收塔上部的波纹板除雾器，经波纹板除雾器除雾后的烟气中的气溶胶量小于 $100mg/m^3$，烟气再通过湿式静电除雾器的进一步除雾后气溶胶量小于 $30mg/m^3$，后经烟囱排出。

[0012] 本发明与现有技术相比具有的有益效果：

[0013] 1) 可以实现多种污染物，如硫氧化物，氮氧化物，多环芳烃和二噁英的同时脱除，为烟气的治理大大节省了投资成本，工艺简单可靠；

[0014] 2) 污染物的脱除效率高，其中硫氧化物的脱除效率可以达到95％以上，氮氧化物的脱除效率可以达到60％以上，金属汞的脱除效率可以达到80％以上，多环芳烃以及二噁英类物质的脱除效率可达80％以上；

[0015] 3) 该装置脱除副产物对环境不会造成二次污染；

[0016] 4) 该装置可以有效的控制细微颗粒 ($PM_{2.5}$) 和气溶胶的污染。

## 附图说明

[0017] 图1电催化氧化联合石灰－石膏法的多种污染物同时脱除装置及方法结构示意图；

[0018] 图2本发明的静电增强反应器结构示意图；

[0019] 图3本发明的双循环多种污染物一体化吸收塔结构示意图；

[0020] 图中：增压风机1、喷雾降温装置2、静电增强反应器3、文丘里装置4、双循环多种污染物一体化吸收塔5、湿式静电除雾器6、工艺水罐7、工艺水泵8、石灰浆液箱9、石灰浆液泵10、石灰浆液循环箱11、石灰浆液循环泵12、沉淀池13、灰水循环泵14、氧化风机15、绝缘装置16、上气室17、喷嘴电极18、电晕放电区域19、隔板20、混气室21、氧化风机接口22、布风板23、下气室24、吸收塔入口25、灰水储槽26、灰水喷淋层27、石灰浆液储槽28、石灰浆液喷淋层29、波纹板除雾器30。

## 具体实施方式

[0021] 如图1所示，电催化氧化联合石灰－石膏法的多种污染物同时脱除装置包括增压风机1、喷雾降温装置2、静电增强反应器3、文丘里装置4、双循环多种污染物一体化吸收塔5、湿式静电除雾器6、工艺水罐7、工艺水泵8、石灰浆液箱9、石灰浆液泵10、石灰浆液循环箱11、石灰浆液循环泵12、沉淀池13、灰水循环泵14、氧化风机15，工艺水由工艺水罐7经工艺水泵8输送至喷雾降温装置2、石灰浆液箱9、湿式静电除雾器6以及双循环多种污染物一体化吸收塔5上层除雾器；烟气经增压风机1进入喷雾降温装置2经工艺水喷淋降温后，经静电增强反应器3的电晕放电处理，其中空气由氧化风机15输送，后经文丘里装置4进入双循环多种污染物一体化吸收塔5，在双循环多种污染物一体化吸收塔5中烟气经灰水循环泵14喷雾除尘及喷淋吸收处理后，烟气进入湿式静电除雾器6，后由烟囱排出；喷淋后的灰水以及经喷雾降温装置2的工艺水都进入沉淀池13；石灰浆液由石灰浆液箱9经石灰浆液泵10进入石灰浆液循环箱11，后经石灰浆液循环泵12进入双循环多种污染物一体化吸收塔5对烟气进行喷淋吸收处理。

[0022] 如图2所示，静电增强反应器3是长方形结构，包括绝缘装置16、上气室17、喷嘴电极18、电晕放电区域19、极板20、混气室21、氧化风机接口22、布风板23、下气室24，静电增强反应器3内从上到下设有上气室17、电晕放电区域19、混气室21、下气室24，电晕放电区域19分成多个电晕放电单元，每个电晕放电单元由极板20分隔开，每个电晕放电单元内并排布置喷嘴电极18，喷嘴电极18垂直于极板20放置，混气室21与下气室24之间设有布

风板 23，混气室 21 区域的静电增强反应器 3 壳体上设有氧化风机接口 22，静电增强反应器 3 顶部设有绝缘装置 16。静电增强反应器采用自由基簇射专利技术，通过正电晕产生强氧化性的自由基，氧化烟气中的 NO 成易于吸收的 NO2、HNO3 和 HNO2 等物质。

[0023] 如图 3 所示，双循环多种污染物一体化吸收塔 5 包括吸收塔入口 25、灰水储槽 26、灰水喷淋层 27、石灰浆液储槽 28、石灰浆液喷淋层 29、波纹板除雾器 30，双循环多种污染物一体化吸收塔 5 采用两段式设计，除尘和脱硫脱硝分段实施。双循环多种污染物一体化吸收塔 5 下部为灰水储槽 26 和灰水喷淋层 27，与文丘里装置 4 结合进行喷雾除尘，实现除尘效果，上部为石灰浆液储槽 28 和石灰浆液喷淋层 29，石灰浆液喷淋层 29 为 2 ～ 4 层喷淋结构，采用石灰浆液进行空塔喷淋脱硫脱硝，实现脱硫脱硝功能。双循环多种污染物一体化吸收塔 5 顶部为波纹板除雾器 30，烟气由吸收塔入口 25 进入双循环多种污染物一体化吸收塔 5，先经灰水喷淋层 27 与文丘里装置 4 结合喷雾除尘，后进入石灰浆液喷淋层 29 经石灰浆液空塔喷淋脱硫脱硝，后经波纹板除雾器 30 除雾后排出双循环多种污染物一体化吸收塔 5。双循环多种污染物一体化吸收塔上下部的水循环分离，可以解决吸收塔内部设备的堵塞问题。

[0024] 电催化氧化联合石灰 - 石膏法的多种污染物同时脱除方法是 ：烟气进入喷雾降温装置 2，将烟气的温度调节至 70 ～ 80℃，烟气从静电增强反应器 3 底部进入下气室 24，烟气在下气室 24 中会有一个缓冲，在下气室 24 的上部有布风板 23，布风板 23 上部是混气室 21，补充的氧化空气会在混气室 21 中加入并和烟气均匀混合，混气室 21 的上部是电晕放电区域 19，电晕放电区域 19 根据烟气处理量大小分成多个电晕放电单元，每个电晕放电单元由极板 20 分隔开，极板 20 间距采用 80 ～ 120mm，每个电晕放电单元内并排布置多个的喷嘴电极 18，喷嘴电极数量根据实际烟气量可调，放电喷嘴电极垂直于极板放置，电晕放电反应器使用 20kV ～ 50kV 直流高压电，喷嘴电极 18 接正高压，极板接负高压，接通电源后，喷嘴电极 18 和极板 20 间形成强烈的电晕放电，那么从喷嘴喷出的湿烟气在静电增强反应器 3 中被分解成具有强氧化性的自由基（如 O，OH，$O_3$，$HO_2$ 等）。这些自由基物质能有效氧化烟气中的 $SO_2$ 为 $SO_3$ 和 $H_2SO_4$ 等，氧化 NOx 为 $NO_2$ 和 $HNO_3$ 等，氧化 $Hg^0$ 成二价汞，降解多环芳烃和二噁英为无害物质（如 $CO_2$，$H_2O$ 等）。电晕放电区域 19 的上部是上气室 17 和烟气出口，经过上气室 17 缓冲的烟气从出口流出进入双循环多种污染物一体化吸收塔 5，双循环多种污染物一体化吸收塔 5 下部是灰水储槽 26 和灰水喷淋层 27，灰水由沉淀池 13 在灰水循环泵 14 的作用下不断被输送到灰水喷淋层 27 与文丘里装置 4 结合对烟气进行喷雾除尘，双循环多种污染物一体化吸收塔 5 上部安装有 2 ～ 4 层石灰浆液喷淋层 29 和石灰浆液储槽 28，由石灰浆液循环泵 12 的不断输送到石灰浆液喷淋层 29，和逆流而上的烟气充分接触反应，对烟气进行喷淋吸收除去烟气的多种污染物，喷淋液气比为 8 ～ 20，系统出口烟尘排放小于 $30mg/m^3$ ；$SO_2$ 排放小于 $200mg/m^3$，且系统脱硫效率不低于 96％ ；NO 排放浓度小于 $150mg/m^3$，且系统脱硝效率不低于 60％，双循环多种污染物一体化吸收塔 5 上下部的浆液循环分离，可以解决吸收塔内部设备的堵塞问题 ；净化后的烟气进入双循环多种污染物一体化吸收塔 5 上部的波纹板除雾器 30，经波纹板除雾器 30 除雾后的烟气中的气溶胶量小于 100mg/m3，烟气再通过湿式静电除雾器 6，湿式静电除雾器 6 能够高效捕集吸收塔内出来的酸雾和未捕集的烟尘，解决湿法吸收塔尾部的腐蚀问题，以及进一步提高除尘效果，经湿式静电除雾器的进一步除雾后气溶胶量小于 30mg/m3，后经烟囱排出。

烟囱
工艺水
石灰石粉
烟气
空气
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15

图 1

16
17
18
19
20
21
22
23
24

图 2

30
29
28
27
25
26

图 3