

建筑用岩棉生产的生命周期评价及节能减排分析

刘富成 赵薇 王天华 张文宇 孙一桢

(辽宁工业大学 土木建筑工程学院 辽宁 锦州 121000)

摘要 :为了量化建筑用岩棉生产过程的环境影响,采用 SimaPro8.0 软件对我国典型岩棉制品生产开展了从“摇篮到大门”全生命周期评价。编制了岩棉生产的生命周期清单,计算了资源消耗、温室效应、酸化、光化学氧化、富营养化和人体毒性 6 种环境影响,并进行了归一化与贡献分析。结果显示,资源消耗和温室效应对环境的影响最为显著,分别占总环境影响值的 45.4%和 20.3%;成纤集棉阶段和原材料生产及运输阶段是造成环境影响的主要阶段,分别占总环境影响值的 49%和 29%。针对生命周期评价结果,提出了针对性的节能减排方案,使得环境影响值由 2.64×10^{-13} yr 减少为 2.35×10^{-13} yr。

关键词 岩棉生产 生命周期评价 环境影响 节能减排

中图分类号 :TU55+1.31

文献标识码 :A

文章编号 :1001-702X(2016)05-0098-05

LCA and energy saving & emission reduction analysis of building rock wool production

LIU Fucheng ZHAO Wei WANG Tianhua ZHANG Wenyu SUN Yizhen

(School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121000, China)

Abstract :A cradle-to-gate life cycle assessment (LCA) was carried out for rock wool production based on SimaPro8.0 software in order to quantify environment impacts. Life cycle inventory for rock wool production was compiled. Abiotic depletion, global warming, acidification, photochemical ozone creation, eutrophication and human toxicity were considered in the phase of impact assessment. Normalization and contribution analysis were conducted. The results show that abiotic depletion and global warming are the main environment impact categories in rock wool production, accounting for 45.4% and 20.3% of the total environmental impact respectively. The processes of collection and raw materials production & transportation present significant influence on the environment, with the contribution of 49% and 29% respectively. According to LCA results, strategies on energy saving & emission reduction were suggested, which have been estimated to reduce environmental impact from 2.64×10^{-13} yr to 2.35×10^{-13} yr.

Key words :rock wool production, life cycle assessment, environmental impact, energy-saving and emission-reduction

2012 年我国建筑总运行能耗为 6.90 亿 tce, 占当年全国能源消耗总量的 19.1%^[1], 而围护结构热损失占建筑物总热损失的 60%~70%^[2]。因此, 建筑外墙围护结构节能技术的改进, 对于建筑节能具有重要意义。岩棉及其制品具有良好的绝热、防火性能, 是目前 A 级建筑保温材料的主要选择。岩棉外墙外保温技术在欧洲比较成熟, 应用广泛, 市场占有率仅次于发

泡聚苯乙烯(EPS)外墙外保温系统^[3]。在我国, 根据建筑材料行业统计数据, 2010 年岩棉矿渣棉产量为 118.41 万 t, 2011 年产量为 148.01 万 t^[4], 增长率为 25%。可以预见, 随着我国建筑节能标准和建筑防火标准的不断提高, 建筑用岩棉制品市场将不断扩大, 技术水平也将不断提高。

生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)是一种对产品、生产工艺及服务全生命周期的环境负荷和资源消耗进行评估的方法或工具。建筑材料是 LCA 应用的主要领域之一, 定量评价建筑材料在全生命周期的能源、资源消耗以及废弃物排放所造成的环境影响是实现建筑节能的起点。

近年来, 国内外学者针对建筑用岩棉开展了一系列 LCA 研究。Schmidt 等^[5]以岩棉、纸制棉、亚麻棉作为建筑屋顶保温材料进行研究, 得出在生命周期中岩棉消耗了最低的一次能

基金项目 国家自然科学基金项目(41201583);

辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LJQ2013069)

收稿日期 2015-10-12

作者简介 刘富成, 男, 1993 年生, 河南信阳人, 硕士研究生。

源,同时对人体潜在健康威胁最小。Tingley 等^[6]基于生命周期理论,对比分析了以 EPS、酚醛泡沫、矿棉板作为建筑外墙保温系统时对环境所造成的影响。马丽萍等^[7]开展了我国典型建筑保温材料生命周期评价研究,对比分析了岩棉板、硬泡聚氨酯板、聚苯板的生命周期环境影响,得出岩棉板影响最小。肖君等^[8]基于 LCA 理论与方法对聚苯乙烯挤塑板和岩棉板在生产、使用、拆除 3 个阶段的能源、资源消耗进行了对比研究。总的来看,现有岩棉 LCA 研究存在两方面的不足:一是我国本土化数据较少,用于 LCA 案例研究的数据多数来源于国外数据库,导致分析结果与我国岩棉生产实际偏差较大;二是对岩棉生产过程没有开展详细的清单分析,难以识别产生环境影响的关键生产过程及污染物来源,涉及的环境影响类型较少。

本文以我国某典型岩棉厂为例,基于 LCA 方法开展建筑外墙外保温用岩棉制品生产过程的环境影响评价研究,编制岩棉制品生产各个阶段的生命周期清单,计算各类环境影响指标,以期为我国岩棉制品生产过程 LCA 数据库的建立提供数据支持。

1 岩棉生命周期评价

1.1 研究目的

利用 SimaPro8.0 生命周期评价软件,以建筑外墙外保温用岩棉制品为研究对象,根据其在我国的生产与应用现状,研究产品的各个生产过程中的资源、能源消耗及环境排放,计算其生产过程中的环境负荷,从而识别岩棉制品在生产过程中对环境造成影响较大环节,寻找改善岩棉制品清洁、节能生产的途径和方法,推动岩棉产业的健康发展。功能单位定义为 1 kg 岩棉制品,产品性能符合 GB/T 25975—2010《建筑外墙外保温用岩棉制品》要求。

1.2 研究范围

本文针对岩棉原材料生产运输、混合熔制、成纤集棉、固化成型、最后切割包装过程进行研究,系统边界如图 1 所示。

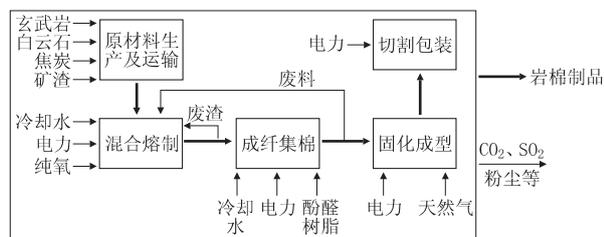


图 1 岩棉制品生产过程系统边界

我国典型岩棉制品的生产流程如下^[9]按照一定的配比将玄武岩、白云石、焦炭、矿渣混合称重,然后投入冲天炉中,经 1400~1550 °C 的高温熔融成混合的熔体。熔体进入离心机,在

离心力作用下牵伸成纤维,同时将一定量的粘结剂(酚醛树脂)均匀喷洒在纤维表面,接着集棉机将附着粘结剂的纤维进行收集,经过摆锤打褶后成为一定厚度的棉毡。棉毡进入固化炉加压定型,鼓入由天然气燃烧所产生的热风,使粘结剂固化,从而形成具有一定厚度和强度的连续岩棉板。从固化炉中出来的岩棉经过冷却、切割包装成为不同尺寸的岩棉板或岩棉带,最后打包入库。岩棉销售、使用以及维护、废弃过程则不包扩在本文的研究范围内。

1.3 清单分析

基于我国典型岩棉制品的生产工艺,主要原料消耗为玄武岩、白云石、矿渣、焦炭、粘结剂(酚醛树脂)、冷却水和工业纯氧。能源消耗为电能和焦炭、天然气。以上数据以某岩棉厂全年记录的数据为主要参考指标,折算为生产 1 kg 岩棉制品的平均数值。

岩棉制品生产中,混合熔制过程冲天炉所产生粉尘、NO_x、SO₂ 等污染物处理后符合 GB 9078—1996《工业炉窑大气污染物排放标准》和 GB 16297—1996《大气污染物综合排放标准》要求。由于焦炭不完全燃烧产生的 CO 经过废气焚烧后全部变成 CO₂,故无 CO 排放。成纤集棉和固化成型过程产生的带有粘结剂的短棉纤维粉尘、游离酚、游离醛,经过捕尘处理后符合 GB 16297—1996 要求。冲天炉、离心机分别自带冷却水循环系统,无废水排放。捕集带冲洗网板,带有酚醛树脂的废水经过处理后符合 GB 8978—1996《污水综合排放标准》要求。从冲天炉收集的渣球及集棉过程收集的废料,重新进入冲天炉进行回收利用。CO₂ 排放主要来源于焦炭和天然气燃烧,本文基于联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)^[10]提供的燃料碳排放系数和我国各种燃料的热值,计算出适合我国的能源 CO₂ 排放系数,焦炭为 3.14 kgCO₂/kg,天然气为 2.09 kgCO₂/kg。CO₂ 排放量可由焦炭和天然气消耗量乘以相应的排放系数计算得到。

1 kg 岩棉制品生产过程的生命周期清单如表 1 所示。

表 1 岩棉制品生产过程清单

原料/能源输入	数量	污染物输出	数量
玄武岩/kg	1.02	CO ₂ /kg	0.966
白云石/kg	0.12	SO ₂ /kg	2.75×10 ⁻⁴
矿渣/kg	0.32	NO _x /kg	1.54×10 ⁻⁴
焦炭/kg	0.28	甲醛/kg	5.20×10 ⁻⁵
酚醛树脂/kg	0.125	酚类/kg	5.00×10 ⁻⁵
电力/(kW·h)	0.32	粉尘/kg	5.74×10 ⁻⁴
天然气/Nm ³	0.042	矿棉尘/kg	3.80×10 ⁻⁴
纯氧/Nm ³	0.025	BOD ₅ /kg	3.15×10 ⁻⁵
冷却水/kg	3.10	SS/kg	4.20×10 ⁻⁵
		COD/kg	5.25×10 ⁻⁵

生命周期清单中,玄武岩、白云石以及辅助原料酚醛树脂等数据来源于 Ecoinvent3.0 数据库,电力^[11]、焦炭和天然气^[12]数据来源我国本土数据。矿渣作为原料,实现了工业废渣的再利用,因此不考虑其生产过程的环境负荷,只考虑其运输过程的环境负荷。运输过程中的数据基于企业提供原材料所在地与岩棉厂之间距离计算得到,运输工具采用净载重为 40 t 的载重卡车,运输距离为 400 km,运输过程的清单采用杨建新等^[12]的研究结果。

1.4 影响评价

影响评价的目的是根据生命周期清单分析的结果识别和评价产品潜在环境影响的大小。本文采用生命周期评价软件 SimaPro8.0 进行计算,评价模型 CML2001 Dec-07。

1.4.1 分类

分类是一个将清单分析的结果划归到影响类型的过程,目的是清晰地显现与清单结果相关的环境问题。基于我国岩棉制品的生产现状及其环境特点,主要考虑 6 种环境影响类型,分别为资源消耗(Abiotic Depletion AD)、温室效应(Global Warming GW)、酸化(Acidification A)、光化学氧化(Photo-

chemical Ozone Creation POC)、富营养化(Eutrophication E)及人体毒性(Human Toxicity HT)。各类环境影响的主要物质、参考物质如表 2 所示。其中基准值为 1995 年全球环境负荷排放总量。

表 2 环境影响类型、特征化、归一化基准值

环境影响类型	环境影响物质	参考物质	基准值
AD	矿产消耗	Sb	1.57×10^{11} kgSbeq/yr
GW	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、CCl ₄	CO ₂	3.86×10^{13} kgCO ₂ eq/yr
A	SO ₂ 、SO _x 、NO _x 、HCl	SO ₂	2.99×10^{11} kgSO ₂ eq/yr
POC	C ₂ H ₄ 、NMVOC、CH ₄	C ₂ H ₄	4.55×10^{10} kgC ₂ H ₄ eq/yr
E	PO ₄ ³⁻ 、NO _x 、NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻	1.29×10^{11} kgPO ₄ ³⁻ eq/yr
HT	进入人体的有毒物质	1 A-DCB	4.98×10^{13} kg1 A-DCBeq/yr

1.4.2 特征化

特征化即针对所确定的环境类型对数据进行分析与定量化。特征化的主要意义在于选择一种衡量影响的方式,通过特定评估工具的应用,将不同的负荷或排放因子在各形态环境问题中的潜在影响加以分析,并量化成相同的形态或是同单位的大小。环境影响特征化计算结果见表 3。

表 3 岩棉板生产生命周期环境影响特征化结果

影响类型	总量	原材料生产及运输	混合熔制	成纤集棉	固化成型	切割包装
AD/kgSbeq.	1.88×10^{-2}	8.58×10^{-3}	4.70×10^{-4}	8.05×10^{-3}	1.50×10^{-3}	2.00×10^{-4}
GW/kgCO ₂ eq.	2.07	0.25	1.02	0.61	0.18	0.01
A/kgSO ₂ eq.	7.53×10^{-3}	1.58×10^{-3}	9.40×10^{-4}	3.86×10^{-3}	9.30×10^{-4}	2.20×10^{-4}
POC/kgC ₂ H ₄ eq.	1.26×10^{-3}	3.40×10^{-4}	5.00×10^{-5}	7.60×10^{-4}	1.00×10^{-4}	1.00×10^{-5}
E/kgPO ₄ ³⁻ eq.	6.49×10^{-4}	2.18×10^{-4}	5.20×10^{-5}	3.01×10^{-4}	6.40×10^{-5}	1.4×10^{-5}
HT/kg1 A-DCBeq.	1.64	0.05	0.02	1.52	0.04	0.01

1.4.3 归一化

归一化的主要目的,一是对不同环境影响类型的相对大小提供参考的标准,从而比较各种环境影响类型的相对大小;二是为下一步的环境影响评估提供依据。归一化方法一般是

用分类评价结果除以基准量,然后比较各个环境影响类型参数结果的相对大小。由于我国环境排放相关影响类型没有建立起系统的归一化基准,因此本文以 1995 年全球环境负荷排放总量^[13]作为归一化基准值(见表 2),归一化结果见表 4。

表 4 岩棉制品生产生命周期环境影响归一化结果

影响类型	总量	原材料生产及运输	混合熔制	成纤集棉	固化成型	切割包装
AD/yr	1.20×10^{-13}	5.46×10^{-14}	2.99×10^{-15}	5.13×10^{-14}	9.55×10^{-15}	1.27×10^{-15}
GW/yr	5.36×10^{-14}	6.42×10^{-15}	2.64×10^{-14}	1.58×10^{-14}	4.66×10^{-15}	2.59×10^{-16}
A/yr	2.52×10^{-14}	5.28×10^{-15}	3.14×10^{-15}	1.29×10^{-14}	3.11×10^{-15}	7.36×10^{-16}
POC/yr	2.77×10^{-14}	7.47×10^{-15}	1.10×10^{-15}	1.67×10^{-14}	2.20×10^{-15}	2.20×10^{-16}
E/yr	5.03×10^{-15}	1.69×10^{-15}	4.03×10^{-16}	2.33×10^{-15}	4.96×10^{-16}	1.09×10^{-16}
HT/yr	3.29×10^{-14}	1.03×10^{-15}	4.70×10^{-16}	3.05×10^{-14}	8.03×10^{-16}	2.01×10^{-16}

从环境影响的归一化结果可以得知,生产 1 kg 岩棉制品的环境影响的最大值是 AD,为 1.20×10^{-13} yr,占总环境负荷比例的 45.4%,其次为 GW、HT、POC 和 A,分别占 20.3%、

12.5%、10.5%和 9.5%,最小的环境影响类型为 E,占 1.8%。从环境影响来源来分析,岩棉制品生产过程对环境影响的大小排序为:成纤集棉>原材料生产及运输>混合熔制>固化成

型>切割包装,分别占的比例为49.0%、29.0%、13.1%、7.9%和1.0%。

1.5 结果解释

结果解释是LCA中根据研究目的和范围的要求对影响评价的结果进行归纳以形成结论的阶段。

根据环境影响的归一化结果可知,在岩棉制品生产的各个阶段,成纤集棉阶段造成的环境影响最为显著,占岩棉制品生产总环境影响值的49%;其次为原材料生产及运输阶段,在环境影响中所占的比例为29%,随后是混合熔制阶段所占的比例为13.1%;固化成型和切割包装2个阶段造成的环境影响总和不足10%,相对于岩棉制品生产前3个阶段所占比例比较小。成纤集棉阶段产生的环境影响主要类型为AD和HT,主要原因是在成纤集棉过程中要使用离心机、集棉机、摆锤设备等能耗较高的生产设备,耗费了占整个生产过程中41.5%的电力,而电力的生产过程引起的非可再生资源消耗对AD影响较大。HT值比较高的原因是,成纤集棉阶段酚醛树脂作为粘结剂被使用,生产酚醛树脂要消耗对人体有毒的异丙苯等有机物,同时排放醛、酚等对人体健康有损害的物质,从而使HT的值比较高。原材料生产及运输阶段对环境产生影响的主要来源是AD,原因是在此阶段需要消耗大量玄武岩、白云石、焦炭等矿藏资源。混合熔制阶段的GW值比较高则是主要来源于焦炭在冲天炉中燃烧,产生大量的CO₂。

岩棉制品生产过程中6种环境影响类型的大小为AD>GW>HT>POC>A>E。AD的环境负荷主要来源于原材料生产及运输阶段和成纤集棉阶段,所占的比例分别为45.5%和42.75%,GW的环境负荷来源当中混合熔制阶段和成纤集棉阶段占绝大部分,比例分别为49.25%、29.48%;AD的环境负荷主要阶段是成纤集棉阶段,达到了92.7%,造成A最大阶段的是成纤集棉,原因是:在此阶段消耗了大量的电力,而我国电力的生产大量是靠化石燃料的燃烧所产生的,因此会对环境造成一定的酸化效应。E和POC数量比较大的阶段同样是成纤集棉阶段,具体原因与A分析结果一致。

2 岩棉制品生产过程的节能减排方案

基于上述LCA分析结果,识别出成纤集棉过程的电力消耗、原材料生产及运输过程的矿产资源消耗、混合熔制过程的焦炭消耗是产生环境影响的主要环节。因此,从生产工艺角度,依据文献[14]提出以下节能减排方案:(1)优化冲天炉结构,设置烟气热回收装置,提高风温度,平均生产1t岩棉制品可回收冲天炉废弃能量中的60%~70%;(2)针对成纤集棉工序选择节能型设备风机、电机、泵,约可降低能耗20%;(3)成纤集棉过程捕集带排放的废气经过高除尘器进行处理,降低排放浓度90%。

方案改进前后混合熔制阶段和成纤集棉阶段的环境影响归一化结果见表5。

表5 方案改进前后混合熔制阶段和成纤集棉阶段环境影响值

项 目		AD/yr	GW/yr	A/yr	POC/yr	E/yr	HT/yr
改进前	混合熔制	2.99×10 ⁻¹⁵	2.64×10 ⁻¹⁴	3.14×10 ⁻¹⁵	1.10×10 ⁻¹⁵	4.03×10 ⁻¹⁶	4.70×10 ⁻¹⁶
	成纤集棉	5.13×10 ⁻¹⁴	1.58×10 ⁻¹⁴	1.29×10 ⁻¹⁴	1.67×10 ⁻¹⁴	2.33×10 ⁻¹⁵	3.05×10 ⁻¹⁴
改进后	混合熔制	2.93×10 ⁻¹⁵	1.99×10 ⁻¹⁴	2.99×10 ⁻¹⁴	1.04×10 ⁻¹⁵	3.78×10 ⁻¹⁶	4.29×10 ⁻¹⁶
	成纤集棉	5.00×10 ⁻¹⁴	1.51×10 ⁻¹⁴	1.17×10 ⁻¹⁴	1.57×10 ⁻¹⁴	2.16×10 ⁻¹⁵	3.01×10 ⁻¹⁴
降低比例/%	混合熔制	2.0	24.6	4.8	5.5	6.2	8.7
	成纤集棉	2.5	4.4	9.3	6.0	7.3	1.3

由表5可知,通过上述节能减排措施,混合熔制阶段GW减少了24.6%,A减少了4.8%,HT减少了8.7%;成纤集棉阶段AD减少了2.5%,GW减少了4.4%,A减少了9.3%,HT减少了1.3%,其它环境影响同样有相应的削减。此外,从环境影响归一化结果来看,方案改进前岩棉制品生产的总的环境影响为2.64×10⁻¹³yr,改进后为2.35×10⁻¹³yr,降低比例为10.98%,取得了积极的效果。

3 结 论

(1)运用LCA方法定量分析了岩棉制品生产的全过程对

环境造成的影响,生产1kg岩棉制品的AD、GW、A、POC、E、HT分别为:1.20×10⁻¹³yr、5.36×10⁻¹⁴yr、2.52E×10⁻¹⁴yr、2.77×10⁻¹⁴yr、5.03×10⁻¹⁵yr和3.29×10⁻¹⁴yr,AD、GW、HT是岩棉制品生产对环境影响的主要因素。

(2)岩棉制品生产的4个阶段中,成纤集棉和原材料生产及运输阶段对环境的影响最为明显,分别占总环境影响值的49%和29%。成纤集棉阶段耗费了大量的电能,同时排放甲醛、酚类、粉尘等有毒有害物质,对环境造成极大的影响;原材料生产及运输阶段需要消耗大量的矿产资源,AD值较高,使环境影响值较高。

(3)为达到节能减排的目的,基于岩棉企业的生产特点,采取了降低生产能耗的生产工艺,工艺实施后岩棉制品生产的环境影响由 2.64×10^{-13} yr 下降为 2.35×10^{-13} yr,降低比例为 10.98%。

参考文献:

[1] 清华大学建筑节能研究中心.中国建筑节能年度发展研究报告 2014[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.

[2] 顾天舒,谢连玉,陈革.建筑节能与墙体保温[J].工程力学,2006,23(增刊):167-184.

[3] 江英政.岩棉外墙保温系统欧洲应用经验与耐久性评估[J].建设科技,2012(22):62-65.

[4] 中国建材工业协会.中国建筑材料工业年鉴[M].北京:中国建筑材料工业出版社,2012:62-65.

[5] Schmidt C, Jensen A A, Clausen A U *et al.* A comparative life cycle assessment of building insulation products made of stone wool, paper wool and flax[J].The International Journal of Life Cycle Assessment, 2004, 9(2):122-129.

[6] Tingley D D, Hathway A, Davison B. An environmental impact comparison of external wall insulation types[J]. Building and En-

vironment, 2015, 85:182-189.

[7] 马丽萍,蒋莹,赵平,等.我国典型建筑保温材料生命周期评价研究[J].新型建筑材料,2013(2):41-44.

[8] 肖军,赵平,刘睿劼.建筑保温板生命周期环境影响研究[J].安全与环境学报,2013,13(1):138-141.

[9] 王晓磊.降低岩棉生产能耗技术的研究[J].节能,2013(10):11-16.

[10] IPCC climate change 2007 Synthesis report[C].//Contribution of Working Groups iii and iii to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.2007.

[11] Di X H, Nie Z R, Yuan B R *et al.* Life cycle inventory for electricity generation in China[J].The International Journal of Life Cycle Assessment, 2007, 12(4):217-224.

[12] 杨建新,徐成,王如松.产品生命周期评价方法及应用[M].北京:气象出版社,2002.

[13] Guinee J B, Gorree G, Heijungs R *et al.* Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards [M]. Kluwer Academic Publisher Dordrecht, 2002.

[14] 王晓磊.岩棉生产工艺的节能环保措施[J].节能,2012(4):11-13.



(上接第 83 页)

由图 8 可见,水柱冲击试验次数从 20 次增大到 160 次时,钛片的水滴接触角只是略微减小,且均超过 155° ,仍展现出优异的超疏水性。这意味着所制备的超疏水钛片具有良好的耐水柱冲击性,可适应恶劣的暴雨天气。

3 结 语

采用简单的电化学法制备出 TiO_2 纳米管钛片,经全氟癸基三氯硅烷修饰后实现了钛片的超疏水性,水滴通过在超疏水钛片上的滚动带走污染粉末,使钛片表面保持洁净,可提高户外钛金属及合金建筑物的耐污性能。此外,所制备的超疏水钛片还展现出优异的耐高低温性、耐腐蚀性、耐水柱冲击,意味着可适应较为恶劣的环境。这种稳定的超疏水钛片将有助于钛金属及制品在建筑业及其它领域的推广应用。

参考文献:

[1] 杨红,陈纲伦.钛金属及其在建筑上的应用[J].工业建筑,2001,31(12):81-82.

[2] 宋鸿玉.钛在我国建筑的应用[J].中国钛业,2012(4):12-15.

[3] Wang B, Liang W X, Guo Z G *et al.* Biomimetic superhydrophobic and superhydrophilic materials for oil/water separation: a new strategy beyond nature [J]. Chemical Society Reviews, 2015, 44:336-361.

[4] 林淑云,梁伟欣,杨聪强,等.超疏水自清洁涂层的研究进展[J].福建建设科技,2015(4):53-55.

[5] Zhang Y B, Chen Y, Shi L *et al.* Recent progress of double-structural and functional materials with special wettability [J]. Journal of Materials Chemistry, 2012, 22:799-815.

[6] Ouyang H M, Fei G T, Zhang Y *et al.* Large scale free-standing open-ended TiO_2 nanotube arrays: stress-induced self-detachment and in situ pore opening [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2013(1):7498-7506.

[7] Yan J F, Zhou F. TiO_2 nanotubes: Structure optimization for solar cells [J]. Journal of Materials Chemistry, 2011, 21:9406-9418.

[8] Wang G Y, Wang H R, Guo Z G. A robust transparent and anti-fingerprint superhydrophobic film [J]. Chemical Communications, 2013, 49:7310-7312.

