

DOI: 10.11779/CJGE2015S1002

# 石灰炉渣轻质混合料处理地基试验研究及工程应用

闫澍旺, 李嘉\*, 张京京, 孙立强

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 材料的击实性能和抗压强度是进行地基处理选取材料时考虑的两个重要性能指标, 可以作为地基处理施工的质量控制参数, 对工程性质有重要影响。石灰和炉渣均为轻质材料, 合理使用石灰炉渣混合材料进行地基处理可以显著减小地基的附加应力, 同时可大量利用工业废料, 是一种经济环保的方法。从理论上分析了石灰炉渣混合材料强度提高的机理, 并对石灰炉渣混合料的性质进行了试验研究, 通过对不同配比的混合材料进行击实试验、无侧限抗压强度试验, 得到了不同比例混合材料的击实性能和无侧限抗压强度。结合一则工程实例, 对石灰炉渣轻质材料桩法处理地基进行分析计算, 表明该材料可以应用于地基处理。

**关键词:** 石灰; 炉渣; 配合比; 击实性能; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU44 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)S1-0006-05

作者简介: 闫澍旺(1950-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程软土方面的教学与研究工作。E-mail: yanshuwang@tju.edu.cn。

## Experimental research and engineering application of lime-slag mixed materials used in foundation treatment

YAN Shu-wang, LI Jia, ZHANG Jing-jing, SUN Li-qiang

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety in Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The compaction performance and compressive strength of materials are important indices need to be considered when selected in foundation treatment. The two factors can be used as quality control parameters in construction and have important influence on engineering properties. Lime and slag are both lightweight materials. The rational use of lime-slag mixed materials in foundation treatment can achieve the results of reducing the additional stress in foundation, and it is an economic and environmentally friendly way because vast industrial waste can be used. The strength increasing mechanism of lime-slag mixed materials is theoretically analyzed. Compaction tests and unconfined compressive strength tests are on the lime-slag mixed materials with different mix proportions by volume are carried out. The compaction property and unconfined compressive strength are obtained. Combined with an engineering example, a foundation treatment project using piles of lime-slag mixed lightweight materials is analyzed and calculated, indicating that this kind of mixed materials can be used in foundation treatment.

**Key words:** lime; slag; mix proportion; compaction performance; unconfined compressive strength

## 0 引言

炉渣是煤燃烧后产生的固体废物, 据统计, 全世界每年因燃煤产生煤灰约 60000 万吨<sup>[1]</sup>, 2005 年中国有色金属行业产生炉渣 766 万吨<sup>[2]</sup>, 炉渣的处理是有色金属、发电厂等燃煤行业所面临的主要环境问题之一, 炉渣堆积占用大量土地资源, 而且还会造成环境的污染, 因此炉渣成为环境部门关注的问题。炉渣的主要化学成分为氧化钾、氧化钠、氧化钙、氧化镁、二氧化硫、氧化铝以及三氧化硫等, 其中二氧化硫和氧化铝含量较高, 具体比例与产生炉渣的原煤和具体工艺有关。

目前炉渣已经应用于矿山回填、路基垫层等工程

领域, 效果较好, 在国外, 也有将其应用于治理受重金属污染的土壤<sup>[3]</sup>。将炉渣和石灰混合用作地基处理是一种经济环保的地基处理方法, 如利用石灰炉渣混合料制作桩基等。石灰炉渣混合材料的主要固化剂是生石灰, 中国有关规范<sup>[4]</sup>规定石灰桩掺合料宜优先选用粉煤灰、火山灰、炉渣等工业废料, 并规定生石灰和掺合料宜根据地质情况采用 1:1 或 1:2 的配比。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51322904, 51279127, 41402263); 天津市重点项目基金项目(13JCZDJC35300); 教育部新教师基金项目(20130032120053)

收稿日期: 2015-03-26

\*通讯作者

规范对混合料配比的规定概括性较高, 没有针对某种具体掺合料规定应采用的配合比, 对于炉渣这一特定的工业废料, 不同配合比下混合料具体的性质尚需要进行试验分析。本文对石灰炉渣混合材料的化学机理进行理论分析, 并进行石灰炉渣掺合料的力学性能相关的试验, 为工程选用石灰炉渣混合料进行地基处理提供试验指导, 为不同条件下的工程选用合理的配合比提供依据。

## 1 炉渣石灰混合料强度提高机理

### 1.1 化学作用机理

石灰是土木工程中最早使用的胶凝材料之一, 生产原材料丰富、分布广泛, 生产工艺简单, 使用方便且成本低廉, 至今仍大量使用。

石灰炉渣混合料中的化学作用主要是胶凝作用, 石灰炉渣混合料中的石灰在有水的环境中发生水化, 形成  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  胶体,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  胶体不稳定, 经再结晶后构成合成晶体紧密胶结而具有较高强度。炉渣中含有的氧化铝在生石灰水化过程中形成的强碱性环境下可反应形成铝酸石灰水化物 ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ ), 与炉渣颗粒结合能提高混合料的强度<sup>[5]</sup>。

其次, 石灰炉渣混合料中会发生离子交换, 炉渣中的氧化钾、氧化钠在有水的环境中极易转化为离子态, 在石灰水化过程中产生的钙离子与钠离子、钾离子等交换。

再次, 混合料水化产生的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  与空气中的  $\text{CO}_2$  接触发生缓慢的碳化反应生成  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$  结晶又与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  结晶相结合, 构成  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2$  合成结晶。

胶凝、离子交换和碳化作用共同作用, 可在石灰桩周形成 20~100 mm 厚的硬壳层<sup>[6]</sup>, 在试验中也可观察到试件表面形成的硬壳层, 经过养护的试件受压破坏后可以非常明显地观察到试件表面的硬壳层, 且养护时间越长, 该硬壳层越明显, 养护 28 d 试件无侧限抗压试验中伴随压力增大裂纹发展, 硬壳层有明显的剥落现象, 硬壳层的硬度比试件内部更高, 见图 1。



图 1 石灰炉渣化学作用在试件表面形成的硬壳层

Fig. 1 Crust of lime-slag mixed materials under chemical reaction

此外, 石灰炉渣混合料水化过程中释放出大量的热量, 吸收大量的水分, 使土中水分迅速大量蒸发, 加速土体固结, 有利于桩间土强度的提高。

### 1.2 物理作用机理

炉渣和石灰密度都较小, 经试验测定, 天然堆积状态下炉渣的密度为  $602.459 \text{ kg/m}^3$ , 石灰的密度为  $953.279 \text{ kg/m}^3$ , 按照不同配合比混合后进行击实试验得到的最大干密度也明显低于土的密度, 是一种轻质材料, 用作桩基形成复合地基有很大的优势, 主要包括:

- (1) 石灰炉渣混合材料自重小, 进而对下层软弱土产生的附加应力小。
- (2) 具有上浮作用, 石灰炉渣混合材料桩和加固区的土体形成一个浮筏共同承担荷载作用。
- (3) 成桩过程对桩间土有一定的挤密作用, 使桩间土强度提高。
- (4) 桩体短粗的外形特征能够很好地避免桩体模量偏小的缺陷, 比起普通的复合地基处理方法, 其在极软地基中发生刺入破坏和鼓胀破坏的可能性较小。

## 2 炉渣石灰混合料的相关试验

### 2.1 石灰炉渣混合料击实性能

通过击实试验可以得到试样的最大干密度和对应的最佳含水率, 为了研究石灰炉渣混合材料在不同配合比时的击实性能, 分别对不同配合比的混合材料按照相关规范<sup>[7]</sup>进行击实试验, 试验结果如表 1 所示。

表 1 不同配合比混合料的最优含水率和最大干密度

Table 1 Optimum water contents and maximum dry densities of lime-slag mixed materials with different proportions

石灰 : 炉渣 体积比	石灰 : 炉渣 质量比	最优含水率	最大干密度 $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
2 : 8	1 : 2.528	37.8%	1029.6
3 : 7	1 : 1.475	35.4%	1046.6
4 : 6	1 : 0.948	36.8%	1068.7
5 : 5	1 : 0.632	38.0%	1079.5

4 种配比的最优含水率分布在 35.4%~38.0% 之间, 考虑到试验有一定的误差, 最优含水率的变化范围不大。由于炉渣密度比石灰更小, 随炉渣所占体积比的增大, 炉渣所占的质量比反而减小, 最大干密度总体上呈略微上升的趋势, 但变化范围不大, 最大平行差为 4.73%。

此外在击实试验过程中发现, 当含水率控制在最优含水率的干侧时(即含水率小于最优含水率), 石灰炉渣混合材料具有凝聚结构的特征, 较脆硬, 不易压密, 当含水率控制在最优含水率的湿侧时(即含水率

大于最优含水率),石灰炉渣混合材料具有分散结构的特征,适应变形的能力强。特别是混合料配合比为4:6,含水率高于最优含水率时,该混合材料具有明显的分散结构特征,可塑性明显,不易击实,在击实过程中会有泥状颗粒溅出击实筒。

## 2.2 石灰炉渣无侧限抗压性能

石灰炉渣混合料的力学性能没有专门的试验规范,参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》<sup>[8]</sup>进行试件的制作、养护和无侧限抗压强度试验。

试验采用圆柱形试件,规范<sup>[8]</sup>建议试件高度和直径的比值采用1:1,有些科研单位建议采用径高比为1:1.5或1:2试件,以消除圆柱形试件受压过程中容易产生的顶端应力紊乱现象,本次试验试件尺寸为直径×高=50 mm×68 mm,高度和直径的比值为1:1.36。试件根据密度和压实度成型,即根据击实试验得到的最大干密度,在体积一定的情况下计算出每个试件的质量,然后按照计算值称取混合料利用特制模具制作压实成型。试件的制作在2 d内完成,第一天进行试料准备,包括闷料,第二天进行压实成型,脱模,称量。试件制成长后按照标准养护方法规定的温度和湿度环境下养护7 d,其中最后一天将试件浸水。

无侧限抗压试验在配有数据采集系统的压力机上进行,该系统可自动记录试验过程中试件的压力和变形,试验加载速率为1 mm/min。

图2所示是试件无侧限抗压强度试验得到的典型的应力-应变曲线,应力先是随应变弹性增长,达到最大应力,最大应力非常明显,然后应力迅速下降,直至破坏。破坏过程中首先出现竖向裂纹,达到最大竖向应力时的试件有明显的竖向裂纹,化学作用形成的硬壳层剥离试件表面,甚至脱落,如图1所示,最终破坏的试件的破坏面为两个对顶的圆锥形,如图3所示,残余强度约为最大值的0.3~0.4倍。

试验后将试件破坏,取试件中心部位材料测试其含水率。为了研究最后一天浸水对试件强度的影响,

对最后一天不浸水,其余条件与标准养护方法相同的试件进行了试验,结果如表2所示。

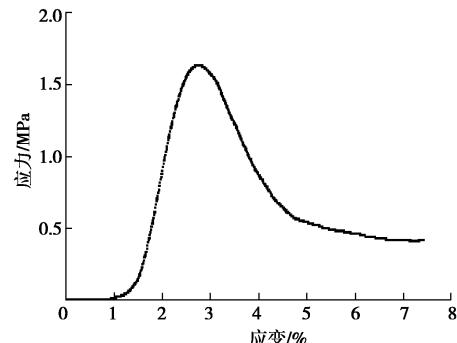
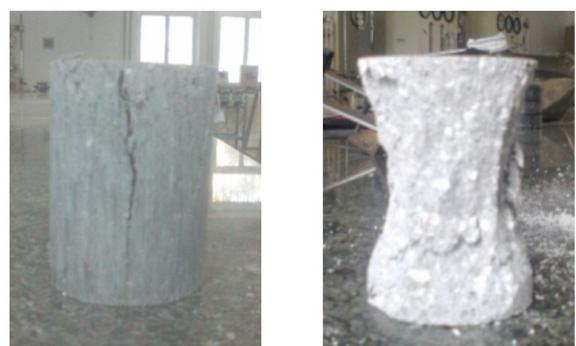


图2 典型的应力-应变曲线

Fig. 2 A typical stress-strain curve



(a) 首先出现竖向裂缝

(b) 最终呈对顶的圆锥形

图3 试件的破坏

Fig. 3 Failure modes of specimens

## 2.3 试件无侧限抗压强度随养护龄期的提高

将试件按照标准方法养护至第15天和第28天,最后一天分别浸水养护和不浸水养护,测试其无侧限抗压强度,结果如图4所示。

由图可知,试件最后一天浸水对其强度影响很大,四种配比的混合料最后一天浸水强度明显低于最后一天不浸水强度。此外,试件在第15天和第28天的测试强度与第7天相比又有明显提高,其中最后一天不浸水养护强度在第15天至第28天强度增长放缓,最后一天浸水强度在第15天至第28天强度增长仍然很快。

表2 试件养护7 d时无侧限抗压强度试验结果

Table 2 Unconfined compressive strength test results of specimens cured for 7 days

石灰:炉渣	第7天不浸水				第7天浸水			
	强度/kPa	应变/%	干密度/(10 <sup>3</sup> kg·m <sup>-3</sup> )	含水率/%	强度/kPa	应变/%	干密度/(10 <sup>3</sup> kg·m <sup>-3</sup> )	含水率/%
5:5	1112.809	1.87	1.180	25.02	515.115	1.70	1.196	32.23
4:6	701.129	1.99	1.168	23.74	394.703	2.40	1.154	33.15
3:7	621.339	2.69	1.113	31.16	338.681	2.32	1.120	36.51
2:8	397.250	2.60	1.056	31.77	297.973	2.72	1.058	40.20



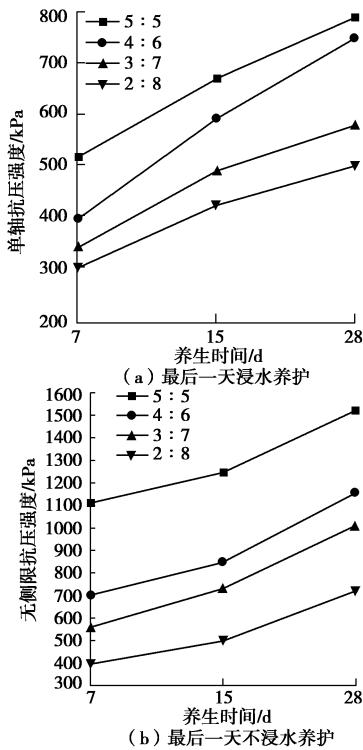


图 4 试件无侧限抗压强度随养护龄期的提高

Fig. 4 Improvement of unconfined compressive strength with curing period

## 2.4 试件养护期间体积的膨胀

试件制作完成后用 50 分度游标卡尺精确测量试件的直径和高, 按照标准方法养护至第 28 天, 最后一天浸水, 养护完成后用吸水的干布小心将试件表面的水吸干, 测量养护后试件的直径和高度, 如表 3 所示。

表 3 试件养护 28 d 后直径和高度的变化

Table 3 Variation of diameter and height of specimens after cured for 28 days

体积比	养护前直		浸水后直		增长率为%		养护前高	浸水后高		增长率为%	
	径/mm	径/mm	径/mm	径/mm	度/mm	度/mm		度/mm	度/mm	度/mm	度/mm
5:5	50.31	50.48	0.34	67.55	67.81	0.38					
4:6	50.30	50.42	0.24	69.02	69.21	0.28					
3:7	50.37	50.49	0.24	68.06	68.13	0.10					
2:8	50.39	50.57	0.36	68.44	68.51	0.10					

## 3 试验结论和建议

通过对不同比例石灰炉渣混合料进行地基处理的相关试验, 得到以下结论:

(1) 不同配比的石灰炉渣混合料密度均较轻, 明显低于土的密度, 这对于减小附加应力效果明显。

(2) 不同配比的石灰炉渣混合料最优含水率约为 35.4%~38.0%, 最大干密度约为 1030~1080 kg/m<sup>3</sup>, 变化范围均不大。由于炉渣的密度比石灰更低, 所以随混合料中炉渣所占体积比的增大, 炉渣所占的质量比反而减小, 混合料的最大干密度总体上呈略微上升

的趋势。

(3) 由无侧限抗压强度试验结果可知, 石灰炉渣混合料的抗压强度与混合料的配比密切相关, 混合料中石灰所占比例越高, 试件强度越高。

(4) 养护方法对无侧限抗压强度影响很大, 除最后一天不浸水, 其余按照标准方法养护试件的无侧限抗压强度与试件中石灰比例呈正相关, 石灰含量越高, 无侧限抗压强度越高, 但配合比为 3:7 和 4:6 试件差别不大, 养护 28 d 时, 强度基本一致。

(5) 混合料加水拌和均匀后密封静置, 24 h 后制作试件, 试件在养护期间体积变化不大, 28 d 时测试其直径和高度的增长率均不足 1%。

针对以上试验结论, 对采用石灰炉渣混合材料处理地基工程提出以下建议:

(1) 根据地基处理欲达到的强度值和工程水文地质环境, 选用合理的配比, 如在最后一天浸水养护环境中配合比为 4:6 和 3:7 的试件强度差别不大, 选用合理的配比可以在达到提高承载力效果的同时降低造价。

(2) 根据工程的实际情况, 选用相对安全的设计值, 如处于地下水位以下时强度相对长期干燥环境强度值偏低, 选用最后一天浸水养护强度指标更安全。

(3) 石灰炉渣混合材料试件养护期间体积膨胀不明显, 如用作桩基形成复合地基, 该种桩基的挤土效果不明显, 对桩间土的加强作用不应过高估计。

## 4 某码头工程应用实例

某矿石码头工程堆场<sup>[9]</sup>场地原始地基为浅海及滩涂, 通过吹填外海海底粉细砂土形成陆域, 场地地下水位较高, 一般埋深在 1.5 m 左右, 最高处理深仅 0.4 m, 整个工程场地吹填土平均厚度约 10 m 左右, 以粉细砂为主, 夹淤泥质黏土薄层, 局部黏性土呈层状或与粉细砂呈互层状分布, 地基承载力特征值为 110 kPa。该工程拟采用强夯法, 强夯对粉细砂土地基的加固效果是显著的, 但对存在黏土夹层的地层加固效果有限, 甚至有可能因强夯扰动而造成软黏土层的强度降低。

以本工程为背景, 采用石灰炉渣轻质混合料桩法进行地基处理, 混合料配合比石灰:炉渣=5:5, 桩基直径 800 mm, 桩长 8 m, 桩位按等边三角形布置, 桩中心距 2 m, 如图 5 所示, 对采用该地基处理方法的效果进行估算和评价。

原地基土的平均重度为 18.50 kN/m<sup>3</sup>, 地下水位以下土体采用浮重度, 则表面下 8 m 处平面的自重应力为 83 kPa。

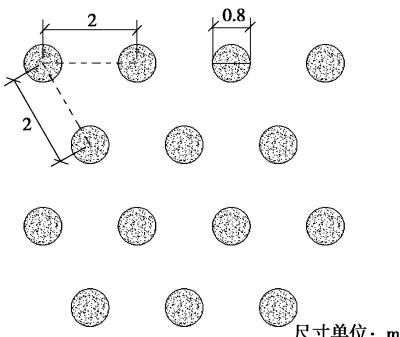


图 5 石灰炉渣轻质混合料桩布置图

Fig. 5 Arrangement of piles

采用上述方法进行地基处理，控制桩体密实度为  $1079 \text{ kg/m}^3$ ，按照建筑地基处理技术规范，单根桩分担的处理地基面积的等效圆直径为

$$d_e = 1.05s = 1.05 \times 2 = 2.10 \text{ m}.$$

桩土面积置换率为

$$m = d^2 / d_e^2 = 0.8 / 2.10 = 0.38.$$

地基处理深度范围内土体平均重度为

$$\gamma = m \cdot \gamma_p + (1 - m) \gamma_s = 15.57 \text{ kN/m}^3.$$

经处理后表面下 8 m 处平面的平均自重应力为

$$p = 1.5 \text{ m} \times 15.57 \text{ kN/m}^3 + 6.5 \times 5.57 \text{ kN/m}^3$$

$$= 59.56 \text{ kN/m}^2.$$

由计算结果可见，采用石灰炉渣轻质材料桩处理地基，处理深度范围下表面位置土层的自重应力为处理前的 72%，进而可以显著减小地基承受荷载时土体内的附加应力。

桩体承载力特征值宜通过单桩荷载试验确定，施工 30 后进行单桩现场载荷试验，测定桩体承载力特征值约为 750 kPa，接近试件养护 28 d 的浸水强度。则处理后的地基承载力特征值为

$$f_{spk} = mf_{pk} + (1 - m)f_{sk}$$

$$= 0.38 \times 750 + 0.62 \times 110 = 353 \text{ kPa}.$$

由计算结果可知，处理后地基承载力超过处理前的 3 倍，可以起到较明显的地基加固效果。

## 5 结语

石灰和炉渣均为轻质材料，且来源丰富，两者混合组成混合料用于地基处理在减小地基附加应力方面有很大优势，而且可大量利用工业废料，经济环保。

对石灰炉渣混合材料强度形成的化学机理和物理机理进行了分析，并分别对石灰：炉渣配合比为 5:5, 4:6, 3:7 和 2:8 的混合料进行了相关实验，通过击实试验得到不同配合比混合料的最优含水率和最大干密度，通过无侧限抗压强度试验得到不同养护条件下试件的无侧限抗压强度。

结合一则矿石码头工程堆场工程实例，采用石灰炉渣轻质混合材料桩进行地基处理，综合试验和计算结果，结果表明该方法可显著减小地基附加应力，且满足地基承载力的设计要求。

## 参考文献：

- [1] AHMARUZZAMAN M. A review on the utilization of fly ash[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2010(36): 327 – 363.
- [2] 姚芝茂, 徐成, 赵丽娜. 铅冶炼工业综合固体废物管理研究[J]. 中国有色金属, 2010(6): 40 – 45. (YAO Zhi-mao, XU Cheng, ZHAO Li-na. Study on integrated management of solid wastes in lead smelting industry[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2010(6): 40 – 45. (in Chinese))
- [3] DERMATAS Dimitris, MENG Xiao-guang. Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils[J]. Engineering Geology, 2003(70): 377 – 394.
- [4] JGJ 79—2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (JGJ 79—2002 Technical code for ground treatment and buildings[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese))
- [5] 汪稔, 陈善雄. 用石灰桩加固软弱地基[J]. 岩土力学, 1994, 15(3): 19 – 25. (WANG Ren, CHEN Shan-xiong. Stabilizing soft foundation with quicklime piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 1994, 15(3): 19 – 25. (in Chinese))
- [6] 龚晓南. 广义复合地基理论及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 1 – 13. (GONG Xiao-nan. Generalized composite foundation theory and engineering application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 1 – 13. (in Chinese))
- [7] SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (in Chinese))
- [8] JTGE51—2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009. (JTGE51—2009 Test methods of materials stabilized with inorganic binders for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese))
- [9] 郭玉彬, 李虹. 曹妃甸吹填砂土地基强夯施工工艺试验研究[J]. 中国港湾建设, 2014(1): 57 – 84. (GUO Yu-bin, LI Hong. Experimental study on dynamic consolidation technology in Caofeidian dredger fill sandy soil foundation[J]. China Harbour Engineering, 2014(1): 57 – 84. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)