

# 旧混凝土板粒石化再生骨料吸水特性研究

郑春乐<sup>1</sup>, 拾方治<sup>2</sup>, 李秀君<sup>1</sup>

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 嘉兴市高新交通技术测评研究院, 嘉兴 314001)

**摘要:** 为了揭示旧混凝土板粒石化再生骨料吸水率的特性, 根据粒径和砂浆裹附量对粒石化再生粗骨料进行分类, 首先从粒石化再生骨料颗粒角度探讨粒石化再生骨料颗粒的吸水规律和影响因素, 通过 SEM (扫描电子显微镜) 电镜扫描试验分析其原因, 然后根据粒石化再生分类骨料与粒石化再生粗骨料的数量关系, 通过数学演绎推导的方法进一步探讨粒石化再生粗骨料的吸水规律和影响因素。研究表明: 砂浆裹附量和级配对粒石化再生骨料吸水率产生重要影响, 裹附砂浆造成了再生骨料复杂多孔的表面结构, 从而使得再生骨料具有独特的吸水特性。同时由于不同破碎工艺对旧水泥混凝土的破碎和砂浆处理程度不同, 证明了破碎工艺的重要性。

**关键词:** 道路工程; 旧混凝土板粒石化再生; 吸水率; 砂浆裹附量; SEM 微观分析; 破碎工艺  
**中图分类号:** U 418.6 **文献标志码:** A

## Water Absorbing Characteristics of Granulated Petrochemical Recycled Aggregate of Old Concrete Slabs

ZHENG Chunle<sup>1</sup>, SHI Fangzhi<sup>2</sup>, LI Xiujun<sup>1</sup>

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;  
2. Jiaxing Hi-tech Communication Evaluation Institute, Jiaxing 314001, China)

**Abstract:** In order to reveal the water absorption characteristics of recycled aggregate of old concrete slabs, the granulated petrochemical recycled coarse aggregate was classified according to the particle size and mortar content. Firstly, the water absorption regularity and influencing factors of granulated petrochemical recycled aggregate particles were discussed from the point of view of grain granules, and the reason was analyzed by using the scanning electron microscopy. Then, according to the quantitative relationship between granulated petrochemical recycled aggregate and granulated petrochemical recycled coarse aggregate, the water absorption property and influencing factors of granulated petrochemical recycled coarse aggregate were further discussed by means of mathematical deduction. The results show that the mortar content and the gradation have important effects on the water

收稿日期: 2017-11-07

基金项目: 浙江省公路科技计划项目 (2016-2-21)

第一作者: 郑春乐 (1992-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 旧水泥混凝土路面材料再生. E-mail: 294533854@qq.com

通信作者: 李秀君 (1976-), 女, 副教授. 研究方向: 沥青路面结构与路面材料、沥青路面冷再生技术.

E-mail: junzixiu@163.com

absorption of granulated petrochemical recycled aggregate. Because the mortar content makes the recycled aggregate surface complex and of porous structure, the recycled aggregate has unique water absorption characteristics. Considering that the crushing method affects the degree of crushing of the old cement concrete and the degree of mortar handling, the importance of the crushing technological process was also illustrated.

**Keywords:** road engineering; granulated petrochemical recycled aggregate of old concrete slab; water absorption; mortar content; SEM microanalysis; breaking craft

中国是世界上水泥混凝土路面里程数最多的国家，由于长时间的使用和车辆超载等原因，大量的水泥板路面出现了结构性病害<sup>[1]</sup>，所以,对于废旧混凝土破碎所产生的固体垃圾的处理利用研究十分必要<sup>[2-3]</sup>。旧水泥混凝土路面粒石化再生技术是一种环保节约型路面养护改造方法，相对于传统的挖除旧混凝土板后新建路面和碎石化等方法<sup>[4]</sup>，具有环保、节约能耗及较彻底清除原路面病害等诸多优点，在水泥混凝土路面大中修养护工程中得到越来越广泛的应用<sup>[5-6]</sup>。但是，粒石化再生骨料表面裹附有硬化的水泥砂浆，国内外众多学者的研究表明，粒石化再生骨料的表观密度、堆积密度、强度和吸水率与天然骨料有较大区别<sup>[3,7]</sup>。混合料中骨料颗粒的基本特性直接影响着混合料的整体性能，骨料的吸失水特性对混合料的最佳含水量、最大干密度、强度及干缩等主要指标都会产生较大影响，为了充分利用旧水泥混凝土板的再生价值，有必要深入研究包裹有硬化水泥砂浆的粒石化再生骨料的吸水特性。

表 2 天然骨料和粒石化再生骨料的各项技术指标对比

Tab.2 Comparison of technical indicators between natural aggregate and recycled aggregate

| 骨料种类 | 表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 空隙率/% | 吸水率/% | 针片状含量/% | 压碎指标/% |
|------|----------------------------|----------------------------|-------|-------|---------|--------|
| 天然   | 2 665                      | 1 540                      | 33.7  | 0.60  | 6.24    | 6.3    |
| 再生   | 2 098                      | 1 345                      | 42.1  | 5.58  | 1.95    | 25.1   |

由表 1 和表 2 可知，本次试验采用的通过颚式破碎工艺得到的粒石化再生骨料级配偏粗，19 mm 和 4.75 mm 两档上的骨料很多。粒石化再生骨料针片状含量很少，存在一定的优势，但是，表观密度等其他基本性能均比天然骨料差，尤其是在吸水率和压碎值这两个方面。

1 试 验

1.1 试验原材料

粒石化再生骨料来自某省道面层水泥板，采取工厂集中粒石化破碎工艺，粒石化再生骨料公称粒径为 5.0~26.5 mm。再生骨料的级配和各项技术指标如表 1 和表 2 所示。各项技术指标测定方法参照 JTG E42-2005《公路工程集料试验规范》<sup>[8]</sup>，JTG/T F20-2015《公路路面基层施工技术细则》<sup>[9]</sup>。

表 1 粒石化再生骨料级配表  
Tab.1 Gradation of recycled aggregate

| 筛孔尺寸/mm | 通过百分率/% | 筛孔尺寸/mm | 通过百分率/% |
|---------|---------|---------|---------|
| 26.5    | 90.1    | 2.36    | 6.4     |
| 19.0    | 63.4    | 1.18    | 5.9     |
| 16.0    | 53.8    | 0.60    | 5.3     |
| 13.2    | 43.6    | 0.30    | 4.1     |
| 9.5     | 28.6    | 0.15    | 3.1     |
| 4.75    | 7.9     | 0.075   | 2.2     |

1.2 试验方法

首先对粒石化再生骨料进行水洗筛分并去除细骨料。根据粒石化再生骨料表面砂浆裹覆量的多少将粒石化再生粗骨料分为 1，2，3 这 3 类，其中，第 1 类粒石化再生骨料基本不含有砂浆，第 3 类粒石化再生骨料表面全部裹附砂浆，第

2 类粒石化再生骨料表面砂浆裹附量处于第 1 类和第 3 类之间, 如图 1 和图 2 所示。然后将粒石化再生分类骨料放入 20 ℃ 恒温水箱中, 进行 5, 10, 20, 30 min, 1, 2 h 等不同时间的浸泡处理。根据 JTG/T E42-2005《公路工程集料试验规程》中的“粗集料密度及吸水率试验(网篮法)”, 对粒石化再生分类骨料的吸水率进行测定。



图 1 不同粒径的粒石化再生骨料  
Fig.1 Different particle sizes of recycled aggregate



图 2 不同砂浆裹覆量的粒石化再生骨料  
Fig.2 Different mortar content of recycled aggregate

根据以上分类和试验结果, 对第 1 类和第 3 类粒石化再生分类骨料的表面分别进行 SEM(扫描电

子显微镜)试验, 从微观角度分析粒石化再生骨料和天然骨料性能差异的原因。

2 试验结果与分析

2.1 粒石化再生分类骨料吸水率变化规律及原因分析

2.1.1 粒石化再生分类骨料吸水率变化规律

粒石化再生分类骨料的吸水率变化规律如图 3~5 所示(见下页)。图 3 表明, 不同粒径且不同砂浆裹附量的粒石化再生分类骨料在 1 h 左右的时间内就都能够吸水饱和, 达到饱和的时间基本一致并且较短, 所以, 时间对粒石化再生分类骨料吸水率的影响相对最小。但是, 它们的吸水率之间存在较大差异, 并且存在一定的变化梯度: 第 1 类骨料吸水速率最小; 第 3 类骨料吸水速率最高; 第 2 类骨料吸水速率处于第 1, 3 类料之间。如图 4 所示, 在仅根据砂浆裹附量分类的粒石化再生分类骨料中, 第 3 类粒石化再生分类骨料的吸水率大约是第 1 类的 23 倍, 第 2 类粒石化再生分类骨料大约是第 1 类的 10 倍, 满足骨料中砂浆含量越多, 吸水率越大的结论<sup>[10]</sup>。图 3 表明第 1, 2 和 3 类骨料的吸水率都随着粒径的增大呈现出减小的趋势, 说明在同样的砂浆裹覆量情况下, 粒石化再生骨料的粒径越大, 吸水率越小, 但是, 骨料达到饱和时, 第 1, 2 和 3 类粒石化再生分类骨料吸水率减小的幅度不同, 第 1 类减小幅度最小, 第 3 类最大, 吸水率变化量分别为 0.8% 和 4.5% 左右, 说明骨料粒径变化量相同的情况下, 砂浆裹覆量越大, 对吸水率变化的影响越大, 也说明粒石化再

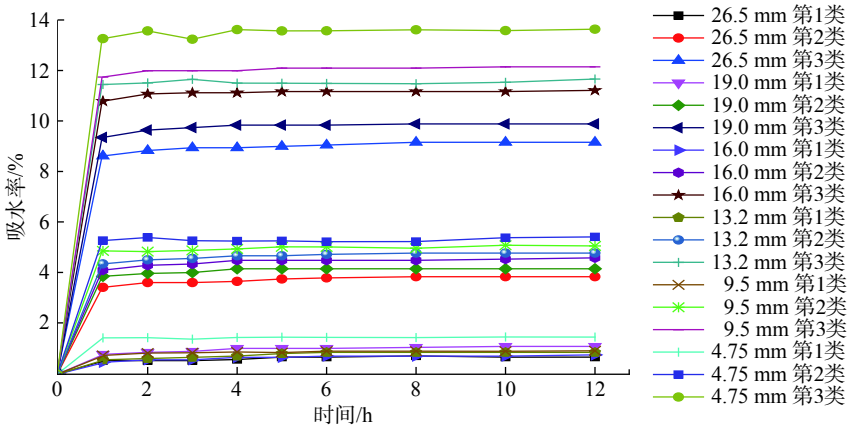


图 3 不同粒径且不同砂浆裹附量的粒石化再生骨料吸水率  
Fig.3 Water absorption rate of recycled aggregate with different particle sizes and different mortar content

生骨料砂浆裹覆量对骨料吸水率的影响要大于粒径对骨料吸水率的影响。所以，在骨料颗粒层面，对粒石化再生骨料吸水率产生影响的因素主要有3个：时间、粒径、砂浆裹覆量。在粒径和砂浆裹覆量一定的情况下，吸水率随着时间的增加先增大而后不变；在时间和砂浆裹覆量一定的情况下，吸水率随着粒径的增大而减小；在时间和粒径一定的情况下，吸水率随着砂浆裹覆量的增大而增大。同样也说明了粒径大小是影响第1类这种基本上无砂浆裹覆骨料的吸水率的主要因素；砂浆裹覆量是影响第2,3类这种有砂浆裹覆的骨料的吸水率的主要因素。对粒石化再生骨料吸水率的影响程度由大到小的因素依次是砂浆裹覆量、粒径、时间。

2.1.2 粒石化再生分类骨料吸水特性原因分析

粒石化再生分类骨料具有较大吸水率的宏观

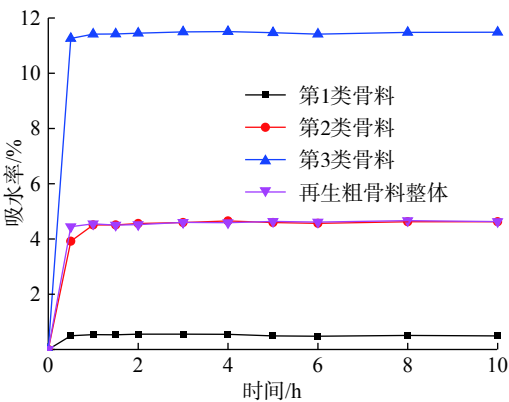


图4 不同砂浆裹附量的再生骨料吸水率

Fig. 4 Water absorption rate of recycled aggregate with different mortar content

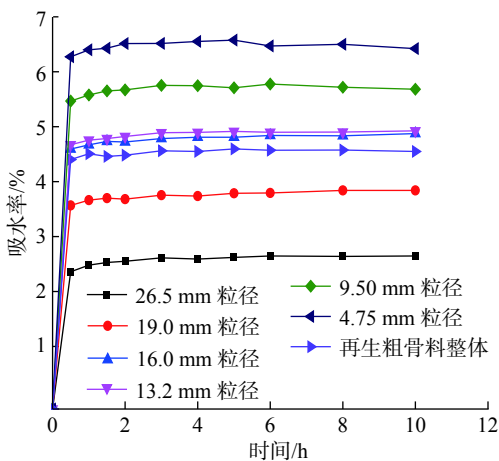


图5 不同粒径的再生骨料吸水率

Fig. 5 Water absorption rate of recycled aggregate with different particle sizes

现象正是其复杂的微观结构的反应<sup>[11]</sup>。针对第1, 2和3类骨料的特点，本文只对第1和第3类骨料进行了电镜扫描试验，如图6和图7所示，从微观角度分析粒石化再生骨料具有较高吸水率的原因。

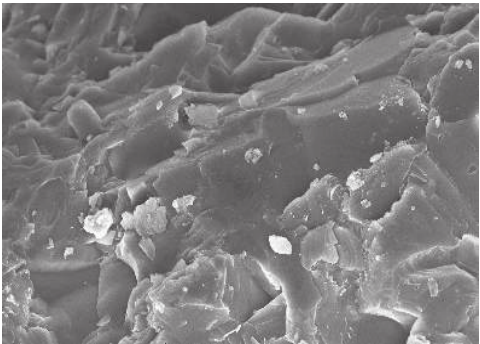


图6 第1类骨料表面微观图像

Fig.6 Surface microscopic image of the first type aggregate

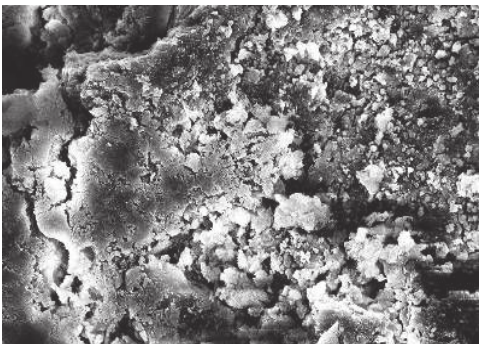


图7 第3类骨料表面微观图像

Fig.7 Surface microscopic image of the third type aggregate

从图6和图7的图像对比中可以看到，第1类骨料和第3类骨料拥有不同的表面孔洞结构特征。对于第1类粒石化骨料而言，其表面不仅光滑整齐，而且断面规则致密；而对于第3类粒石化再生骨料而言，其表面粗糙、疏松，结构杂乱多孔，并且存在一定的微裂缝。正是这样的微观结构使得第1类这种与天然新料表面状况近似的粒石化再生骨料的强度较高、吸水率较小，与天然骨料并无太大差异。第3类骨料复杂的表面结构会使得它在孔隙率、孔型态及孔径分布等表面结构比第1类骨料复杂得多。所以，第3类骨料与第1类骨料在吸失水性能上产生极大的差异，进而也影响到整个再生骨料的吸水性能。同时，如此复杂脆弱的表面结构对再生骨料的强度也会产生一定的影响。所以，粒石化再生骨料中含有

砂浆是导致再生骨料性能弱化的一个重要因素, 尤其是对吸水率和压碎值这 2 个性能指标。

## 2.2 粒石化再生粗骨料吸水率变化规律及主要原因分析

### 2.2.1 粒石化再生粗骨料吸水率变化规律

将粒石化再生粗骨料和仅根据砂浆裹附量和骨料粒径大小进行分类的粒石化再生分类骨料进行对比, 如图 4 和图 5 所示。粒石化再生粗骨料的吸水率的变化规律和粒石化再生分类骨料的变化趋势基本相同。粒石化再生粗骨料的吸水率接近第 2 类骨料和中间粒径骨料的吸水率。

### 2.2.2 粒石化再生粗骨料和各分类骨料的关系

a. 粒石化再生粗骨料和粒石化再生分类骨料的占比关系。

对于旧混凝土粒石化再生材料而言, 不同的破碎工艺会对粒石化再生骨料级配、骨料棱角和表面砂浆剥离程度产生不同的影响。针对此次试验所采用的通过颚式破碎工艺得到的再生粗骨料的级配和砂浆占比情况进行分析, 如表 3 所示。

| 表 3 粒石化再生骨料占比                            |       |      |      |      |     |      |
|------------------------------------------|-------|------|------|------|-----|------|
| Tab.3 Proportion of recycled aggregate % |       |      |      |      |     |      |
| 骨料种类                                     | 粒径/mm |      |      |      |     |      |
|                                          | 26.5  | 19.0 | 16.0 | 13.2 | 9.5 | 4.75 |
| 再生粗骨料                                    | 17    | 33   | 14   | 12   | 15  | 9    |
| 第 1 类骨料                                  | 54    | 47   | 42   | 46   | 46  | 44   |
| 第 2 类骨料                                  | 28    | 29   | 25   | 25   | 16  | 15   |
| 第 3 类骨料                                  | 18    | 24   | 33   | 29   | 38  | 41   |

从表 3 各分类骨料的占比中可以得到, 大粒径骨料中第 1 类骨料占比较大, 随着粒径的减小, 第 3 类骨料占比增大, 第 1 类骨料占比减小。分析其原因主要是由于试验所用材料是由旧混凝土板破碎得到, 并且颚式破碎工艺得到的骨料偏粗, 使得大粒径骨料所占比例较大, 又因为大粒径中第 1 类骨料所占比例较大, 导致第 1 类骨料在骨料整体中所占比例最大。对于大粒径骨料而言, 砂浆强度比碎石集料低, 破碎的过程中大粒径的第 3 类骨料更容易被破碎成小粒径, 所以, 所占比例小。而对于小粒径而言, 大粒径中的第 3 类骨料被破碎成了小粒径, 同时由于再生骨料整体偏粗, 小粒径的砂浆颗粒更容易留存下来, 所以, 再生骨料中小粒径的第 3 类骨料占比更大。因此, 会出现随着粒径的减小, 第 3 类骨

料占比增大, 第 1 类骨料占比减小的情况。

b. 粒石化再生分类骨料和粒石化粗骨料吸水率的关系。

粒石化再生粗骨料、不同粒径粒石化再生粗骨料、不同粒径且不同砂浆裹附量的粒石化再生分类骨料的吸水率和占比已经得到, 同时发现三种分类集料的吸水率存在一定关系, 通过下面的公式作进一步分析。

吸水率

$$y_i = a_{i1}x_{i1} + b_{i2}x_{i2} + c_{i3}x_{i3} \tag{1}$$

式中:  $y$  为各档再生分类骨料的吸水率;  $a, b, c$  为不同砂浆裹附量的再生骨料在各档粒径中所占的比例;  $x$  为不同粒径且不同砂浆裹附量再生骨料的吸水率,  $i=26.5, 19, 16, 13.2, 9.5, 4.75$  分别是 6 档粗骨料的粒径。

通过式(1)计算得到各档骨料的吸水率后, 按照式(2)进行粒石化再生粗骨料的吸水率计算。

$$Y = A_{26.5}y_{26.5} + A_{19}y_{19} + A_{16}y_{16} + A_{13.2}y_{13.2} + A_{9.5}y_{9.5} + A_{4.75}y_{4.75} \tag{2}$$

式中:  $Y$  为粒石化再生粗骨料的吸水率;  $A$  为各粒径骨料在粗骨料中的占比。

粗骨料和各分类骨料的占比和吸水率代表值如表 3 和表 4 所示。

| 表 4 粒石化再生各分类骨料吸水率                                                      |       |      |       |       |       |       |
|------------------------------------------------------------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| Tab.4 Water absorption rate of various classified recycled aggregate % |       |      |       |       |       |       |
| 骨料种类                                                                   | 粒径/mm |      |       |       |       |       |
|                                                                        | 26.5  | 19.0 | 16.0  | 13.2  | 9.5   | 4.75  |
| 第 1 类骨科                                                                | 0.64  | 1.07 | 0.73  | 0.84  | 0.90  | 1.44  |
| 第 2 类骨科                                                                | 3.83  | 4.14 | 4.58  | 4.77  | 5.05  | 5.41  |
| 第 3 类骨科                                                                | 9.15  | 9.88 | 11.21 | 11.66 | 12.14 | 13.64 |

通过计算得到粒石化再生骨料的吸水率为 4.69%, 而实测值为 4.61%, 计算值和实际值十分接近。因此, 粒石化再生粗骨料中各粒径占比情况也是对粒石化再生骨料整体吸水率产生影响的又一个主要因素, 而破碎工艺是对粒石化再生骨料的级配和骨料砂浆裹附量产生影响的主要因素。所以, 这也证明了破碎工艺对粒石化再生骨料性能会产生重要影响。同时, 计算值和实测值有较高的契合度, 这也能说明没有其他主要因素会对粒石化再生骨料吸水率产生较大的影响。

3 结 论

- a. 对粒石化再生骨料颗粒的吸水率产生影响的因素主要有 3 个，且根据影响程度由大到小的因素依次是砂浆裹覆量、粒径和时间。
- b. 粒石化再生粗骨料的吸水率的变化规律和粒石化再生骨料颗粒的变化趋势基本相同，除了砂浆裹附量、粒径和时间这 3 个影响因素之外，粒石化再生粗骨料的级配对粒石化再生骨料整体的吸水率也会产生重要的影响。计算值和实测值有较高的契合度，说明除了砂浆裹附量和粒石化材料级配，没有其他主要因素会对粒石化再生骨料的吸水率产生较大的影响，所以，级配和骨料砂浆裹附量是对粒石化再生材料产生影响的 2 个主要因素。
- c. 通过微观分析发现，裹附砂浆的骨料表面粗糙疏松、杂乱无章，存在较多孔洞，并且存在因再生破碎而产生的微裂缝，微观结构的差异是粒石化再生骨料与天然骨料在吸水 and 强度性能上产生极大差异的原因。
- d. 破碎工艺会对粒石化再生骨料的级配和骨料砂浆裹附量产生重要的影响，所以，不同的破碎工艺也极大地影响着粒石化再生骨料的性能。

参考文献：

[1] 张超. 废弃混凝土路面板在道路改建中的再利用[J]. 交通运输工程学报, 2003(4): 5-9.

[2] 王智威. 废弃混凝土再生利用的经济性分析及产业链构造[J]. 混凝土, 2007(4): 103-106.

[3] 邓寿昌, 张学兵, 罗迎社. 废弃混凝土再生利用的现状分析与研究展望[J]. 混凝土, 2006(11): 20-24.

[4] 徐柱杰, 凌建明, 黄琴龙. 旧水泥混凝土路面共振碎石化效果研究[J]. 中国公路学报, 2008, 21(5): 26-32.

[5] 美国国家科学研究院. 水泥混凝土公路技术——实践与展望[M]. 王嫵, 译. 北京: 人民交通出版社, 2000: 55-60.

[6] 吴春波, 周关怀, 张宏. 公路建设中废弃混凝土再生利用的经济效应[J]. 路基工程, 2008(5): 173-174.

[7] 涂桂荣. 再生骨料混凝土应用研究综述[C]//第十六届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 2016: 1449-1454.

[8] 沈金安, 李福普, 牛开民, 等. JTG/T E42-2005 公路工程集料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.

[9] 沙爱民, 张蕾, 周兴业, 等. JTG/T F20-2015 公路路面基层施工技术细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.

[10] 李雯霞, 张雄, 刘昕. 再生混凝土中再生骨料取代率、浆含量、表观密度和吸水率的关系探讨[J]. 混凝土, 2009(10): 60-63.

[11] 朱纪磊, 汤慧萍, 奚正平, 等. 多孔结构分形分析及其在材料性能预报中的应用[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(12): 2106-2110.

(编辑：石 瑛)