

Analysis and Calculation Method of Specific Surface Area on Irregular Particles-Mineral Aggregate

Weigang Sun^{1,2}, Lun Ji², Jun Li², Haiquan Liu², Wendong He^{2,3}

¹Heilongjiang Ba-da Road & Bridge Construction Co., Ltd., Harbin Heilongjiang

²School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang

³Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan Shanxi

Email: jilunhit@126.com

Received: Mar. 7th, 2018; accepted: Mar. 21st, 2018; published: Mar. 28th, 2018

Abstract

Specific surface area of irregular particle is an important indicator for studying physical properties, performance of composite materials and interaction. This research took aggregate in civil construction materials as an example, and used a method combining theoretical analysis with test study to propose a geometric model, which can use coefficient S to characterize specific surface area. The effects of density, geometric shape factor and their combined action on calculation results of specific surface area were studied. The calculation results of specific surface area obtained through modified method is larger by 30% than AI method. The maximum specific surface area coefficient difference among different aggregates can reach 2.5 times. The effect of surface texture structure on calculation of specific surface area was analyzed, and correction factor K_w of texture structure and relative correction method were proposed through characterizing surface structure feature of aggregate. The surface analysis and calculation method of specific surface area based on density, geometric shape and surface structure were proposed.

Keywords

Irregular Particles, Calculation Method of Specific Surface Area, Multi-Factor Analysis of Specific Surface Area, Shape Coefficient, Correction Factor

不规则颗粒 - 集料的比表面积分析

孙维刚^{1,2}, 纪 伦², 李 俊², 刘海权², 贺文栋^{2,3}

¹黑龙江省八达路桥建设有限公司, 黑龙江 哈尔滨

²哈尔滨工业大学, 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨

³山西省交通科学研究院, 山西 太原

Email: jilunhit@126.com

收稿日期: 2018年3月7日; 录用日期: 2018年3月21日; 发布日期: 2018年3月28日

摘要

不规则颗粒比表面积是分析材料的物理性质、研究混合材料性能和组成材料的交互作用能力的重要指标。本文以土木建筑材料中的集料为例,采用理论分析与试验研究相结合的方法,分析提出了使用形状系数 S 来描述比表面积分析过程的几何模型;分析了密度、几何形状因素,以及耦合因素影响下的不规则颗粒比表面积计算结果的响应规律;对修正方法与AI方法的比表面积进行了比较;形状不同的集料,其比表面积系数相差最高可达到2.5倍;提出了基于密度和几何形状多因素的比表面积分析和计算方法。

关键词

不规则颗粒, 比表面积计算方法, 多因素比表面积分析, 形状系数

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

集料作为一种普通材料,在土木建筑中被广泛使用,在材料的研究和分析中,无论是沥青混合料还是水泥混凝土,以及其它混合材料,集料的比表面积指标对于研究混合材料性能和组成材料的交互作用能力的重要指标,具有重要的应用价值;作为典型的不规则颗粒,其比表面积的计算难度大,计算方法一直备受关注[1]-[8]。美国沥青协会(AI)计算集料表面积的方法是依据维姆(Hveem)于上世纪40~50年代提出的维姆法。我国《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40-2004)中引用美国沥青学会和澳大利亚沥青路面设计手册的方法,分别对于密级配沥青混合料和OGFC混合料集料比表面积进行计算。

对于普遍使用的建筑材料——集料来说,其指标复杂多变,因此,如何合理构建分析模型,全面考虑各种因素,准确地计算出材料的比表面积,是重要的技术问题,也是一个科学问题。而面对多因素变化,准确预见混合料集料比表面积状况,对于材料性能分析和质量控制具有极其重要的意义。

2. 不规则颗粒比表面积计算面对的问题

集料是典型的不规则颗粒,它的比表面积是指单位质量集料颗粒的表观面积。集料的表面积作为与混合料中胶结材料交互作用的接触面,其与胶结材料交互作用的模式,是决定分析和计算的基础。但是,囿于集料的外形和表面构造、纹理的复杂性和简化分析计算的需要,一般的计算忽略表面纹理和构造组成,并且对集料的外形作以粗糙的假设。合理分析表面纹理和构造,选择合理的、接近实际形状的模式对于计算的准确性十分重要。此外,对于比表面积分析中涉及的因素作以过多的假设和忽略(例如,密度因素),势必影响计算的准确性,而对于多种因素及其耦合影响,在相关的计算方法中没有合理的解决,

甚至有错误的计算误解，因而有必要进行分析和说明，以便提高比表面积计算的准确性。

3. 不规则颗粒 - 集料比表面积的计算

3.1. 集料比表面积的计算原理分析

对于一个具备一定级配组成的集料来说，分析其总的比表面积，最理想的办法，是能够分析每一个颗粒的比表面积，然后把它们累加起来，得到总的比表面积。就目前的测试分析技术来看，是很难做到的，是不客观的。但这一阐述是分析集料比表面积计算的基础。

为了便于理解修正方法的原理，下面来简要分析说明比表面积的计算思路、方法和步骤：

1) 分组

将不规则颗粒 - 集料按照筛分的结果进行分组(假设有 n 组)。按照粒径组成由小到大的顺序，各组分分别是： $0 \sim d_1$, $d_1 \sim d_2$, $d_2 \sim d_3 \cdots d_{i-1} \sim d_i \cdots d_{n-1} \sim d_n$, d_i 为第 i 个筛孔的尺寸。

2) 颗粒形状描述

而对于颗粒来说，其比表面积的计算涉及到其外形几何尺寸的大小和比例，对于集料这种不规则的颗粒来说，描述其颗粒形状是很难的，因而也就有了各种假设。维姆法(Hveem)的主要思想就是假设集料都是球体。

3) 计算每一组集料的比表面积系数 FA_i

设集料总质量为 m (单位, kg)。计算一组集料总的表观体积，根据该组集料的质量 m_i (单位, kg) 和密度 ρ_i (单位, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)，计算该组集料的总的表观体积 V_i (单位, m^3)。

$$V_i = \frac{m_i}{\rho_i} \quad (1)$$

计算颗粒数量 s_i ，假设代表颗粒的体积为 v_i (单位, m^3)。

$$s_i = \frac{V_i}{v_i} \quad (2)$$

在此，假设颗粒为球体。那么对于第 d_i 筛孔的分组粒径范围为 $d_i \sim d_{i+1}$ 的集料可以取 $\frac{d_i + d_{i+1}}{2}$ 作为代表直径，记为 D_i 。当然对于 D_i 的确定还可以采用加权平均的方法。则，每个颗粒的体积 v_i 和表面积 A_i (单位, m^2) 为：

$$V_i = \frac{4}{3} \pi D_i^3 \quad (3)$$

$$A_i = 4\pi \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \quad (4)$$

该组集料总的比表面积为：

$$SA_i = s_i \times A_i = \frac{V_i}{v_i} \times A_i = \frac{m_i}{\frac{4}{3} \pi D_i^3} \times 4\pi \left(\frac{D_i}{2} \right)^2,$$

即，

$$SA_i = \frac{12m_i}{\rho_i D_i} \quad (5)$$

则,

$$FA_i = \frac{12}{\rho_i D_i} \quad (6)$$

实际上对于不同的颗粒形状的假设模型, 公式(6)中只是常数不同, 将常数用 S 代替。则公式(6)可以改写为:

$$FA_i = \frac{S}{\rho_i D_i} \quad (7)$$

4) 计算质量为 m 的集料比表面积 SA

$$SA = \sum_1^n SA_i = \sum_1^n FA_i \times m_i \quad (8)$$

3.2. 美国沥青协会(AI)比表面积计算方法

AI 的方法中各个筛孔的表面积系数, 即

$$FA_i = \frac{C}{G_a d} \quad (9)$$

其中, FA_i 为表面积系数; C 为常数, (文献中, 说明其值“一般为 5~7”); d 为筛孔尺寸(mm); G_a 为集料表观密度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)。

美国沥青协会(AI)给出各筛孔的表面积系数(表 1)。有关资料中说明: 该“经验”系数(指的 C)是以密度 $G_a = 2.65 \text{ g/cm}^3$ 算出, 当筛孔尺寸大于 4.75 mm 时, 集料的表面积系数以 0.41 计算。

根据表 1 中所列各修正表面积系数, AI 给出计算集料比表面积方法如下:

$$SA = \sum_{i=1}^n (P_i \times FA_i) \quad (10)$$

式中, 各参数意义如下:

SA 为集料的总表面积(单位, $\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$);

P_i 为集料在各个筛孔的分计筛余百分数(% , 有的资料[9]将该参数定义为通过率);

FA_i 为各个筛孔的修正表面积系数(单位, $\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)。

Table 1. AI special surface areas coefficient of each sieve

表 1. 美国沥青协会各筛孔的比表面积系数

C	筛孔尺寸/(mm)	比表面积系数 $F_{ai}/(\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1})$
5.16	≥ 4.75	0.41
5.13	4.75	0.41
5.13	2.36	0.82
4.56	1.18	1.64
4.88	0.6	2.87
4.89	0.3	6.14
6.51	0.15	12.29
5.16	0.075	32.77

4. 不规则颗粒比表面积计算原理

4.1. 集料比表面积的计算原理分析

可见, 对于常数 S (见公式 7), 其数值表征集料的几何尺寸比例和形状, 可以将其定义为不规则颗粒的形状系数。若能够将该系数分析清楚势必减少 AI 法的计算假设, 提高比表面积分析的准确性。

根据维姆法的原理, 按照公式(3)~(7)分析不同模型下表面积系数 FA_i 的形状系数 S 。

以正方体模型为例, 正方体的边长为 a_i , 根据其尺寸, 分析其对应的筛孔, $a_i = D_i$, 则:

$$v_i = a_i^3 \quad (11)$$

$$A_i = 6a_i^2 \quad (12)$$

正方体模型下该组集料总的比表面积为: $SA_i = S_i \times A_i = \frac{V_i}{v_i} \times A_i = \frac{\rho_i}{a_i^3} \times 6a_i^2$, 即,

$$SA_i = \frac{6m_i}{\rho_i D_i} \quad (13)$$

则,

$$FA_i = \frac{6}{\rho_i D_i} \quad (14)$$

可知, 正方体的形状系数 $S_{cube} = 6$ 。

对于长方体模型, 设高为 h , 长 $L = kh$, 宽 $b = mh$ (令, $k \geq m \geq 1$)。注意, 宜取该分析模型的 $D_i = mh$ 。进行分析, 分析过程略, 可得长方体的形状系数 S_{cubo} :

$$S_{cubo} = 2 \times \left(1 + m + \frac{m}{k} \right) \quad (15)$$

当 $k = m = 1$ 时, 即为正方体模型。该模型可以描述集料长方体形状, 而更加重要的是, 采用该模型可以描述和分析混合料中的针片状。表 2 列出了不同模型分析所得的形状系数 S 。

上表分析可见, 基于不同模型的 S 值, 存在较大差别。实际工程中应用的碎石介于长方体与球体之间。可通过取样测试其外形尺寸, 来确定其适用的模型[10] [11] [12]。

根据长方体的计算模型, 区分不同的边长比例, 计算的比表面积形状系数 S 值如表 3。

由 A、B、C 和 D、E、G、H 可见, 其它因素确定的情况下, 保持宽度和厚度比例不变时, 粒料变长时, S 值变小, 针状集料比表面积系数将减小; 而由 C、E、F 和 H、I、J 组可见, 片状集料边长比例增大, 比表面积系数将增大。可见, 按照上述针片状的讨论, 集料的形状系数的分布大约介于 4~14 之间。也就是说, 密度相同时, 同一粒径组的、形状不同的集料, 其比表面积系数相差最高可达到 2.5 倍。表 4 和图 1 的相关数据也可说明这一差别。

4.2. 集料的密度影响修正

由表面积系数公式(9)可见, 材料的密度也直接影响计算结果。与形状系数 S 分析的目的相同, 也是为减少 AI 方法的假设条件, 使得分析的结果更有实际意义。

表 4 列出球体模型情况下, 按照修正方法计算密度 $2.75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $2.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $2.55 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的比表面积系数的结果、AI 方法对密度进行的修正结果, 以及比表面积。

AI 方法对密度进行的修正, 即, 按照密度的比例关系进行的修正。

计算比表面积系数差别显著，根据某实体工程 AC-16 级配按照不同方式获得的比表面积系数进行比表面积计算，比表面积的比较如图 1 所示。

可见，随着密度的增加，集料计算比表面积减小，修正方法的比表面积较 AI 方法密度修正的比表面积计算结果大近 30%。

4.3. 集料的密度及形状耦合因素影响的修正

可见，在计算表面系数时基于模型的 S 值和密度“ G_a ” (修正方法中的 ρ_i) 值的取值对于计算结果有显著影响。表 5 列出不同形状(不同形状系数)和密度变化情形下的表面积系数、比表面积分析结果。

可见，AI (默认密度 $2.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 和针片状(1:2:3, 密度 $2.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 比较可知，与球体比较，长方体(以及，针片状)的比表面积大；相同形状系数情况下，随着密度的减小，比表面积增大；随着片状趋势的增大(形状由 1:2:3 变化到 1:4:5)，比表面积增大。

Table 2. The shape factor (S) in different shape model coefficient of mineral aggregates

表 2. 不同集料形状模型下的比表面积形状系数 S

模型	球体 S_{sph}	正方体 S_{cube}	长方体 S_{cubo} (长 $L = kh$, 宽 $b = mh$, 高为 h 。)	针片状(各边比例 $h:b:L = 1:2:3$)
S 值	6	6	$2 \times (1 + m + m/k)$	7.3

Table 3. The shape factor (S) of cuboid model

表 3. 长方体模型的形状系数 S 值

编号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
边长比例 $h:b:L$	1:1:1	1:1:2	1:1:3	1:2:2	1:2:3	1:3:3	1:2:4	1:2:5	1:3:5	1:4:5
S 值	6.0	5.0	4.7	8.0	7.3	10.0	7.0	6.8	9.2	11.6

Table 4. The specific surface areas coefficient/($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$) and the specific area/($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$) considering density

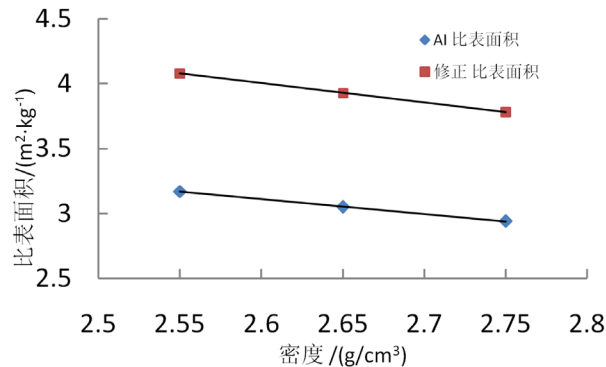
表 4. 考虑密度的比表面积系数/($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)和比表面积/($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)

筛孔/mm	AC-16 级配 (通过率, %)	AI(通过率)	AI	AI 方法的密度修正			修正法	
				2.75/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2.55/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2.75/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2.65/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2.55/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
26.5	100	0.41	0.41	0.40	0.43	0.15	0.16	0.16
19	99.4	0.41	0.41	0.40	0.43	0.19	0.20	0.21
16	94.3	0.39	0.41	0.40	0.43	0.25	0.26	0.27
13.2	86.6	0.36	0.41	0.40	0.43	0.30	0.31	0.32
9.5	77.6	0.32	0.41	0.40	0.43	0.38	0.40	0.41
4.75	36	0.15	0.41	0.40	0.43	0.61	0.64	0.66
2.36	24.7	0.20	0.82	0.79	0.85	1.23	1.27	1.32
1.18	18.5	0.30	1.64	1.58	1.70	2.47	2.56	2.66
0.6	13.9	0.40	2.87	2.77	2.98	4.90	5.09	5.29
0.3	11.1	0.68	6.14	5.92	6.38	9.70	10.06	10.46
0.15	8.8	1.08	12.29	11.84	12.77	19.39	20.13	20.92
0.075	6.4	2.10	32.77	31.58	34.06	38.79	40.25	41.83
比表面积/($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)	--	6.79	3.05	2.94	3.17	3.78	3.93	4.08

注：对于 0.075 mm 粒径材料，在沥青混合料中为磨制的矿粉，认为其适用于球体模型，采用球体模型的形状系数。表 5 的分析同此。

Table 5. The specific surface areas coefficient/($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) and the specific surface areas/($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) considering the mutual coupling effects between density and shape**表 5.** 考虑密度和形状耦合影响的比表面积系数/($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)和比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)

筛孔尺寸/mm	AC-16 级配 (通过率, %)	针片状(1:2:3)—— 密度 $2.75 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	针片状(1:2:3)—— 密度 $2.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	针片状(1:2:3)—— 密度 $2.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	针片状(1:4:5)—— 密度 $2.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
26.5	100	0.09	0.10	0.10	0.16
19	99.4	0.12	0.12	0.13	0.20
16	94.3	0.15	0.16	0.16	0.26
13.2	86.6	0.18	0.19	0.20	0.31
9.5	77.6	0.24	0.24	0.25	0.40
4.75	36	0.38	0.39	0.40	0.64
2.36	24.7	0.75	0.77	0.81	1.28
1.18	18.5	1.51	1.56	1.62	2.57
0.6	13.9	3.00	3.10	3.22	5.11
0.3	11.1	5.94	6.12	6.36	10.11
0.15	8.8	11.88	12.24	12.72	20.22
0.075	6.4	39.07	40.25	41.83	41.83
比表面积 ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	--	3.29	3.39	3.52	4.02

**Figure 1.** Specific surface areas considering density by various calculation methods**图 1.** 不同计算方法的考虑密度修正的比表面积

5. 不规则颗粒比表面积分析方法

对于不同粒径组成的不规则颗粒分析比表面积时, 首先, 进行分析其颗粒组成的形状特征, 以便确定选择何种几何分析模型, 可以选择的有球体和立方体、长方体, 当然, 也可以采用多个分析模型, 但要区分出每个分析模型所代表的颗粒数量(分计筛余百分数或质量); 分析模型下的材料和其数量, 组成分析单元。分析测试各分析单元的密度和表面纹理和构造。按照密度和几何形状的修正方法计算各分析单元的比表面积系数, 根据公式(8)计算比表面积 SA_g 。

6. 结论

本文通过对不规则颗粒比表面积的计算原理和步骤的系统分析, 说明了有关计算方法的问题, 阐明

了比表面积分析计算的基本原理。

结合实际材料密度和形状变化的情况,并考虑密度、形状因素,以及二者耦合作用对比表面积计算的影响机制,本文提出了比表面积分析中描述集料几何形状的形状系数 S ,提出考虑密度变异和矿料分形特性的比表面积计算的修正原理和方法。

研究认为,为准确分析和计算不规则颗粒比表面积,必须合理地考虑材料密度和形状的影响。

参考文献

- [1] 周云麟. 混凝土骨料比表面积的测定与计算[J]. 混凝土及加筋混凝土, 1984(2): 50-53.
- [2] Kademli, M. (2013) Comparison of Subsieving Techniques Based on the Relation of Particle Size and Specific Surface Area in Mineral Processing. *Particulate Science and Technology*, **31**, 326-331. <https://doi.org/10.1080/02726351.2012.736457>
- [3] 王海峰, 国冬花, 刘树平. 基于颗粒特征的沥青膜厚度计算法概述[J]. 交通世界, 2009(z1): 192-193.
- [4] 郑玉. 集料比表面积计算方法探讨[J]. 交通运输研究, 2008(21): 95-97.
- [5] 吕得保, 刘寒冰, 关长禄. 沥青混合料的集料比表面积确定方法的研究[J]. 公路交通科技, 2011, 28(5): 28-32.
- [6] Joseph, K. Anochie-Boateng, J.K. and Tutumluer, E. (2012) Aggregate Surface Areas Quantified through Laser Measurements for South African Asphalt Mixtures. *Journal of Transportation Engineering*, **2012**, 1006-1015.
- [7] Bhasin, A. and Little, D.N. (2006) Characterizing Surface Properties of Aggregates Used in Hot Mix Asphalt. Texas Transportation Institute Texas A&M University, College Station, 10-18.
- [8] Lee, D.-Y., Guinn, J.A., Khandhal, P.S. and Robert, L. (1996) Absorption of Asphalt into Porous Aggregates. SHRP-A/UIR-90-009. Strategic Highway Research Program National Research Council, Washington DC.
- [9] 李福普, 沈金安. JTG F40-2004 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 88-89.
- [10] Fernlund, J.M.R. (2005) 3-D Image Analysis Size and Shape Method Applied to the Evaluation of the Los Angeles Test. *Engineering Geology*, **77**, 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.08.002>
- [11] Garboczi, E.J., Cheok, G.S. and Stone, W.C. (2006) Using LADAR to Characterize the 3-D Shape of Aggregates: Preliminary Results. *Cement and Concrete Research*, **36**, 1072-1075. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.017>
- [12] 陈杰, 李红杰, 万成. 基于数字图像技术的集料针片状量测方法[J]. 中国公路, 2013(8): 124-125.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org