

钢渣在沥青混合料中的理化性能及工程性能研究

韩雷雷

中冶南方城市建设工程技术有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年7月16日; 录用日期: 2023年8月6日; 发布日期: 2023年8月16日

摘要

为了探究钢渣是否可以作为集料在路面中得到更加广泛的应用, 本研究从钢渣的外观、化学组成及性质还有力学性能出发, 逐渐深入的研究了钢渣的各项性质。首先, 通过扫描电子显微镜探究了钢渣表面的纹理结构, 进而通过针片状含量测试明确了粗钢渣的形状特性。随后通过X射线荧光光谱试验以及X射线衍射试验确定了钢渣的元素构成以及化合物构成。并且研究了钢渣的高温稳定性, 最后, 研究了钢渣的抗压性能以及耐磨性。研究表明, 钢渣在干燥常温下具有稳定的化学性质, 并且抗压耐磨性也与优质天然集料相差无几。本研究为钢渣在工程中的应用奠定了理论及试验基础。

关键词

道路工程, 钢渣, 扫描电子显微镜, 化学性能, 工程特性

Physical and Chemical Properties and Engineering Properties of Steel Slag in Asphalt Mixture

Leilei Han

WISDRI City Construction Engineering & Research Incorporation Ltd., Wuhan Hubei

Received: Jul. 16th, 2023; accepted: Aug. 6th, 2023; published: Aug. 16th, 2023

Abstract

In order to explore the potential wider application of steel slag as aggregate in road pavement, this study starts with the examination of steel slag's appearance, chemical composition, properties,

and mechanical performance. Gradually, a thorough investigation of various properties of steel slag was conducted. Firstly, the texture structure of the steel slag surface was explored by scanning electron microscopy, and then the shape characteristics of the crude steel slag were clarified by the needle flake content test. Subsequently, the element composition and compound composition of the steel slag were determined by X-ray fluorescence spectroscopy and X-ray diffraction tests, and the high-temperature stability of the steel slag was studied. Finally, the compressive properties and wear resistance of steel slag were studied. The research results show that the steel slag has stable chemical properties at the normal temperature, and the compressive wear resistance is almost the same as that of high-quality natural aggregates. This study lays a theoretical and experimental basis for the application of steel slag in engineering.

Keywords

Road Engineering, Steel Slag, Scanning Electron Microscope, Chemical Properties, Engineering Characteristics

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

随着经济的迅猛发展,我国每年会产生大量的钢渣[1] [2]。但是其综合利用率偏低,这就导致了大规模钢渣的堆存。堆存的钢渣不仅占有了土地,而且可能对环境造成一定的污染[3] [4]。因此,许多研究人员对钢渣的多方面应用展开了研究[5] [6] [7] [8] [9]。在路面材料应用领域,钢渣也更是得到了广泛的研究。

何亮[10]研究了钢渣沥青混合料的生态、社会及经济效益,介绍了国内外的工程应用。并指出了目前应用存在的问题。向阳开[11]研究了钢渣沥青混合料微波加热自愈合性能,通过试验研究表明,钢渣的掺入大大提高了沥青混合料的微波加热性能,说明钢渣的掺入较好地提高了沥青混合料的自愈合性能。张彩利[12]研究了钢渣沥青混合料的水稳定性,浸水作用下钢渣生成的结晶物质使得钢渣表面积和表面粗糙度增大,从而提高钢渣沥青混合料的内摩阻力和黏聚力,钢渣沥青混合料动稳定性和残留稳定性具有可成长性。杨泓全[13]研究了不同钢渣代替率下沥青混合料的高低温性能以及水稳定性。最终建议钢渣的代替率为100%。Malathy [14]研究了矿渣混凝土的抗压强度、氯离子渗透性以及嵌入混凝土中的钢筋腐蚀风险评估,结果表明,钢渣的表面改性使钢渣混凝土达到高腐蚀电位所需的时间更长,从而提高了钢渣混凝土的耐腐蚀性。Li [15]通过高温动态剪切流变仪研究了钢渣作为填料的可行性,以及钢渣填料对沥青玛蹄脂流变性能的影响。结果表明,所有钢渣填料都表现出优异的流变性能。以上研究表明,钢渣在路面材料中的应用具有一定的潜力,但是对其性能还需要进一步的研究。Xu [16]探讨钢渣在感应加热沥青混凝土中取代粗骨料和细骨料的可行性。对钢渣沥青混合料的水敏感性、动态稳定性、力学性能和愈合性能进行了评价。结果表明钢渣有潜力替代天然骨料用于感应加热自愈合沥青混凝土。

2. 试验材料与试验过程

2.1. 原材料

本论文中所研究的钢渣取自武汉何家湖钢渣厂,钢渣的粒径范围从0.075 mm~13.5 mm,钢渣的颜色

呈灰白色，所取得的部分钢渣样本如图 1 所示。



Figure 1. Fine particle size steel slag
图 1. 细钢渣

2.2. 扫描电镜试验(SEM)

首先，为了明确钢渣作为沥青混合料集料时表面的特点，从微观尺度上研究钢渣的表面特性，本研究采用 SEM 试验对钢渣试样进行了分析。在试验中，逐步扩大 SEM 的放大倍数，通过不同的放大尺度观察钢渣试样的表面结构特性。

2.3. 针片状含量测试

针片状含量反映了粗集料的抗压能力，因此，通过粗集料的针片状含量测试可以反映钢渣作为粗集料时的抗压适用能力。此外，在大孔隙沥青混合料中，粗集料占比更大，因而更要保证粗集料的抗压能力。本文参照规范 JTG E42-2005 中 T0312 的方法[17]，对钢渣试样进行了针片状含量测试。

2.4. X 射线荧光光谱分析实验和 X 光衍射图谱分析实验

通过测出某种物质的 X 射线荧光谱线波长，就能够确定元素的种类，再进一步与标准样品作比较，就可以确定该元素的含量。基于这一原理，通过 X 射线荧光光谱分析实验就可以获得钢渣的化学成分构成。为了从物质构成的角度进一步探究本试验中钢渣的化学成分构成，本研究进一步通过 X 光衍射图谱分析试验，分析了所用钢渣的物相。从而可得到钢渣的化学成分构成及化合物构成。

2.5. 同步热分析试验

集料往往需要在 170℃左右的高温下与沥青拌和，经过摊铺碾压形成路面结构，因此，要求集料具有足够的高温稳定性。本研究采用同步热分析仪对试样钢渣进行了测试。对钢渣磨细形成粉末，得到试样。

2.6. 同步热分析试验

为了探究钢渣的抗压性能和耐磨性能，本研究参照规范 JTG E42-2005 中 T0316 的试验方法[17]，对粗钢渣进行了压碎值和磨耗值试验。

3. 试验测试结果及分析

3.1. SEM 试验结果分析

如图 2 所示为钢渣的扫描电镜试验结果。由图 2(a)是放大 500 倍后的图像，从图中可以看出，钢渣

的表面非常粗糙，凹凸不平，表面呈现明显的坑洼结构。若进一步放大，如图 2(b)所示，是放大 1000 倍后的图像。可以看出，钢渣表面呈现出细密的多孔结构。此外，在一定的深度范围内，还存在一些空洞。沥青作为结合料，依靠自身的粘结性将集料粘结成为一个整体，因此，沥青与集料表面接触的界面是影响混合料是否有足够整体性的重要因素。从以上对钢渣表面的深入分析可知，沥青这些空洞可以使沥青与钢渣更好的结合成为一个整体，具有更好的整体结构性。但是较多的空洞可能会造成沥青使用量的增加，最终造成成本增加，在使用的过程中，需要进一步综合考虑道路用材的经济性。

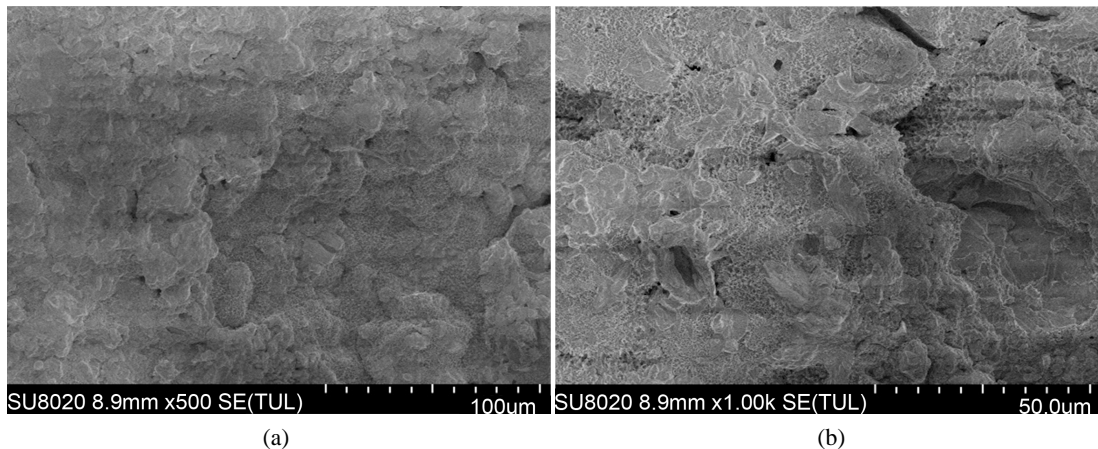


Figure 2. Scanning electron microscope test results
图 2. 扫描电子显微镜试验结果

3.2. 针片状含量试验结果分析

如表 1 所示为钢渣的针片状含量测试结果。为了对比分析，本实验还对工程中常用的玄武岩集料进行了测试。

Table 1. Needle sheet content of basalt and steel slag
表 1. 玄武岩、钢渣的针片状含量

集料类型	粒径(mm)	玄武岩	钢渣	技术要求(%)
针片状含量(%)	4.75~9.5	8.9	8.0	≤18
	9.5~13.2	6.7	7.3	≤12
	13.2~16	6.9	7.4	≤12

通过表 1 的数据可知，首先两种集料的针片状含量均满足规范的总体要求。此外，对于粒径为 4.75 mm~9.5 mm 的钢渣，其针片状含量要比玄武岩集料低。而对于 9.5 mm~16 mm 的集料，钢渣的针片状含量要比玄武岩集料偏高。这表明对于粒径比较大的钢渣，针片状含量略高于玄武岩，但也远小于规范的最低要求。通过试验分析结果可知，本次试验所选的钢渣符合针片状含量最低规范要求，所采用的钢渣破碎方法可以作为路面集料的破碎方法使用。

3.3. X 射线荧光光谱试验与 X 光衍射图谱分析实验分析

如图 3 所示为本试验所用钢渣的 X 射线荧光光谱试验结果。从图中可知，其占比最多的几种元素大多为金属元素，按照占比数量排序，则有如下排序结果：钙、铁、镁、硅、铝。占比分别达到了 52.98%、

20.31%、9.89%、8.16%、3.13%。

如图 4 为钢渣试样的 X 光衍射图谱分析实验的分析结果。通过识别出的晶体结果可知，本次试样钢渣中的化合物主要有硅酸三钙、硅酸二钙、黑巧铁矿、RO 相、氧化镁以及钙镁橄榄石等。上述化合物在化学性质上均属惰性物质，常温干燥环境下不易发生化学反应。由此可知，当采用钢渣作为路面集料时，沥青混合料制作方法对钢渣的化学性质不会产生明显改变，但需要注意水侵蚀对钢渣体积变化的影响。

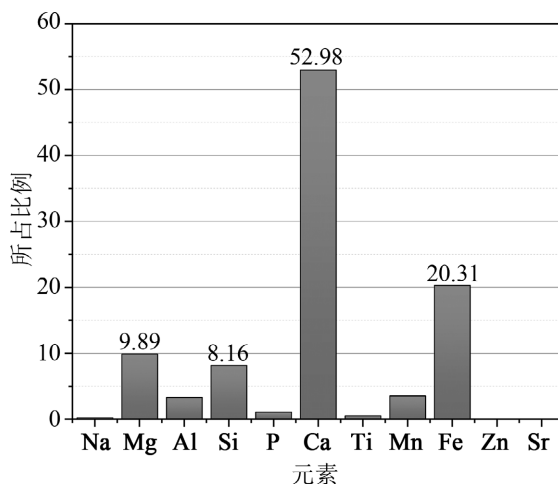


Figure 3. Proportion of main elements in steel slag

图 3. 钢渣主要元素占比

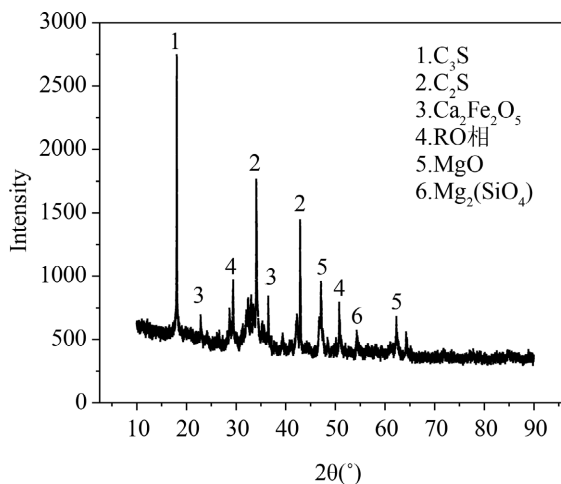


Figure 4. Main compounds in steel slag

图 4. 钢渣中主要化合物

3.4. 同步热分析试验结果分析

如图 5 所示为试样钢渣的同步热分析试验结果曲线。当从试验开始后一直持续到 167℃时，热重曲线(TG)反映出的质量变化不明显，而示差扫描量热(DSC)曲线出现了放热峰。这是由于试件内部的少量水分逐渐蒸发导致的。当试验温度达到 424℃时，钢渣试样又出现了一个明显的质量减小，并伴随了一个放热峰的出现。这是试件的结晶水分解导致的，也表明了钢渣具有良好的高温稳定性，沥青混合料的拌合温度下通常不会高于 180℃，运输和压实温度更低，在这个温度下，钢渣会保持充分的高温稳定性，不会发生剧烈的化学反应。

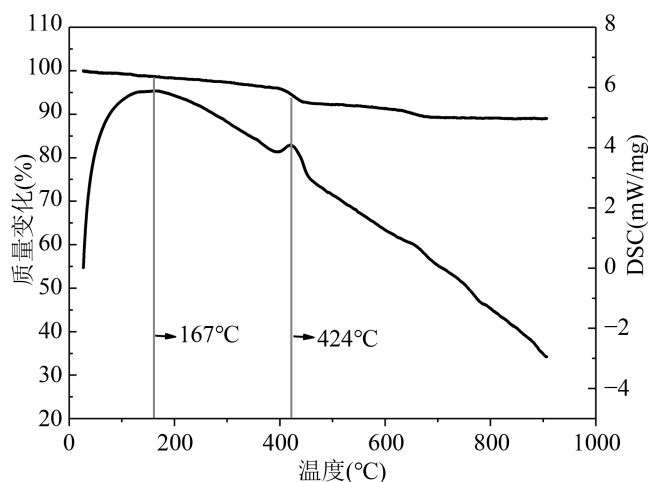


Figure 5. TG-DSC curve
图 5. TG-DSC 曲线

3.5. 压碎值和磨耗值实验分析

如表 2 为压碎值和磨耗值的试验结果。从试验结果可以看出，钢渣的压碎值和磨耗值均满足规范中的要求，可以作为路面的集料使用。

具体地，钢渣的压碎值为 13.56%，略小于玄武岩集料的压碎值。钢渣的磨耗值为 12.78%，其与玄武岩的磨耗值基本相当。这表明钢渣的抗压强度要优于玄武岩集料，而其表面耐磨性能与普通玄武岩集料相差无几。因此，通过钢渣的力学性能试验的分析结果可知，钢渣具有比玄武岩集料更好的强度，并且也拥有足够的抗磨性能。

Table 2. Crushing value and wear value of steel slag
表 2. 钢渣的压碎值和磨耗值

性能指标	钢渣	玄武岩	技术标准(%)
压碎值(%)	13.56	14.59	≤26
磨耗值(%)	12.78	12.30	≤28

4. 结论

本文针对钢渣的各项性能进行了深入研究，首先采用 SEM 电子显微镜研究了钢渣的微观表面形态，通过针片状含量试验对粗钢渣的形状进行了研究；在物化性能方面，研究了钢渣的化学组成；最后，针对钢渣作为集料的工程特性，对其抗压性、耐磨性进行了研究。通过相关试验结果的分析可以得出以下结论：

- 1) 在微观层面上，钢渣的表面呈现出明显的坑洞形态，这与沥青有很好的粘结效果提供了界面基础。但也会增加沥青用量。此外，本研究中钢渣的颗粒形状良好，针片状含量少。
- 2) 本研究中钢渣前 5 种元素占比由高到低依次为钙、铁、镁、硅、铝。占比分别达到了 52.98%、20.31%、9.89%、8.16%、3.13%。从化合物的层面上分析，钢渣的主要成分分别为硅酸三钙、硅酸二钙、黑巧铁矿、RO 相、氧化镁以及钙镁橄榄石等，钢渣的化学性质稳定，不易产生化学反应，但要注意避免长期水的侵蚀作用。
- 3) 钢渣在高温的条件下也有足够的化学稳定性，拌合、摊铺、碾压过程中不会产生化学反应。

4) 钢渣的压碎值和磨耗值与玄武岩较为接近, 并远小于规范中的相关要求, 具有良好的抗压耐磨性。从工程力学性能的角度考虑, 钢渣可以代替天然集料用于沥青混合料。

参考文献

- [1] 王雪. 钢渣碳化潜能评估及脱硫石膏激发钢渣碳化建材的制备[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2022.
- [2] 俞平展. 半刚性钢渣路面基层抗裂机理及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北科技大学, 2021.
- [3] 徐东, 倪文, 汪群慧, 等. 碱渣复合胶凝材料制备无熟料混凝土[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(8): 151-160.
- [4] 张浩, 高青, 韩祥祥, 等. 基于XRF和XRD的热闷渣改性活性炭降解甲醛机理分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(5): 1447-1451.
- [5] 杜吉智. 炼钢炉渣促进焦炉煤气转化制富氢气体的机理探索[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2019.
- [6] 李松, 张彩利, 丁维哲, 王犇, 李天豪. 钢渣-沥青界面黏附特性研究[J]. 大连理工大学学报, 2022, 62(3): 254-262.
- [7] Liu, S.H. and Li, L.H. (2014) Influence of Fineness on the Cementitious Properties of Steel Slag. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **117**, 629-634. <https://doi.org/10.1007/s10973-014-3789-0>
- [8] Weng, Y.N., Liu, Y.C. and Liu, J.X. (2021) Study on Mathematical Model of Hydration Expansion of Steel Slag-Cement Composite Cementitious Material. *Environmental Technology*, **42**, 2776-2783. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1713906>
- [9] Ye, Y., Wu, S.P. and Li, C. (2019) Morphological Discrepancy of Various Basic Oxygen Furnace Steel Slags and Road Performance of Corresponding Asphalt Mixtures. *Materials*, **12**, Article No. 2322. <https://doi.org/10.3390/ma12142322>
- [10] 何亮, 詹程阳, 吕松涛, 等. 钢渣沥青混合料应用现状[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(2): 15-33.
- [11] 向阳开, 刘威震, 赵毅, 张庆宇, 张艳娟. 钢渣沥青混合料微波加热自愈合性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(2): 667-677.
- [12] 张彩利, 王超, 李松, 丁维哲, 唐秀明. 钢渣沥青混合料水稳定性研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(1): 207-214.
- [13] 杨泓全, 王龙林, 王祺顺, 王文盛. 季冻区钢渣沥青混合料路用性能和冻融耐久性[J]. 公路工程, 2022, 47(1): 123-129.
- [14] Malathy, R., Arivoli, M., Chung, I.M. and Prabakaran, M. (2021) Effect of Surface-Treated Energy Optimized Furnace Steel Slag as Coarse Aggregate in the Performance of Concrete under Corrosive Environment. *Construction and Building Materials*, **284**, Article ID: 122840. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122840>
- [15] Li, C., Chen, Z.W. and Wu, S.P. (2017) Effects of Steel Slag Fillers on the Rheological Properties of Asphalt Mastic. *Construction and Building Materials*, **145**, 383-391. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.034>
- [16] Xu, H.Q., Wu, S.P. and Li, H.C. (2020) Study on Recycling of Steel Slags Used as Coarse and Fine Aggregates in Induction Healing Asphalt Concretes. *Materials*, **13**, 889. <https://doi.org/10.3390/ma13040889>
- [17] 中华人民共和国交通运输部. JTG E20-2011. 公路工程集料及沥青混合料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.