

文章编号:1007-9629(2022)03-0228-07

过硫磷石膏矿渣水泥路面基层材料微观结构及力学性能

徐 方¹, 李 恒¹, 孙 涛^{2,3,*}, 聂于涛¹, 丁 超²

(1. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉理工大学 硅酸盐建筑材料国家重点实验室, 湖北 武汉 430070; 3. 中山市武汉理工大学先进工程技术研究院, 广东 中山 528437)

摘要:在以大掺量湿磨改性磷石膏浆体、粒化高炉矿渣粉为主要原料制备过硫磷石膏矿渣水泥 (PPSC) 的基础上, 以力学性能为导向, 设计制备了过硫磷石膏矿渣水泥路面基层材料 (PGBM), 并对其微观结构及力学性能进行了研究. 结果发现: PPSC 含有矿物相石英 (α - SiO_2)、二水石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 和水化产物钙矾石 (Ettringite) 3 种主要矿物成分; PPSC 的矿物成分和微观结构特点影响着 PGBM 的无侧限抗压强度, 进而影响 PGBM 的水稳性, 但 PGBM 与 PPSC 的无侧限抗压强度增长率保持一致, 且 PGBM 的抗冲刷能力与其无侧限抗压强度发展规律也具有的一致性; 不同配比的各组基层试件水稳性较好, 其软化系数均大于 90%; PPSC 掺量为 5% 时, PGBM 的 7 d 无侧限抗压强度即可满足路面基层强度的规范要求, 而 PPSC 掺量为 15% 的 PGBM 在 28 d 龄期时出现无侧限抗压强度下降和冲刷量升高现象, 分析原因是由于 PPSC 内部过量钙矾石的形成导致试件膨胀开裂所致.

关键词:过硫磷石膏矿渣水泥; 路面基层材料; 微观结构; 力学性能; 水稳性

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2022.03.002

Microstructure and Mechanical Properties of Excess-Sulfate Phosphogypsum Slag Cementitious Road Base Material

XU Fang¹, LI Heng¹, SUN Tao^{2,3,*}, NIE Yutao¹, DING Chao²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Wuhan University of Technology Advanced Engineering Technology Research Institute of Zhongshan City, Zhongshan 528437, China)

Abstract: Based on the preparation of excess-sulfate phosphogypsum slag cement (PPSC) with a large amount of wet grinding modified phosphogypsum paste and granulated blast furnace slag powder as the main raw materials, the excess-sulfate phosphogypsum slag cementitious road base material (PGBM) was designed and prepared based on mechanical properties, and its microstructure and mechanical properties were studied. The results show that the PPSC contains three main mineral components: mineral phase quartz (SiO_2), dihydrate gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) and hydrate product ettringite, and the mineral phase and microstructure affect the unconfined compressive strength and then affect the water stability of PGBM, but the growth rate of the unconfined compressive strength of the PGBM is consistent with the excess-sulfate phosphogypsum slag cement, and the erosion resistance of PGBM is also

收稿日期: 2020-11-24; 修订日期: 2021-01-05

基金项目: 2020 年度中山市第三批科技发展专项资金资助项目 (2020-18); 中山市武汉理工大学先进工程技术研究院科研项目 (WUT202011); 湖北省交通运输厅科技项目 (2020-2-1-10)

第一作者: 徐 方 (1982—), 男, 湖北鄂州人, 中国地质大学(武汉) 副教授, 硕士生导师, 博士. E-mail: xufang@cug.edu.cn

通讯作者: 孙 涛 (1980—), 男, 湖北潜江人, 武汉理工大学副研究员, 博士生导师, 博士. E-mail: sunt@whut.edu.cn

consistent with the development of its unconfined compressive strength. The base specimens of different proportions have good water stability, and their softening coefficients are all greater than 90%; when the content of PPSC is 5%, the 7 d unconfined compressive strength of PGBM can meet the specification requirements of pavement base strength; while the 15% PPSC content of PGBM shows a decrease in strength and increase in scour capacity at 28 d curing age. The reason is that the formation of excessive ettringite inside the PPSC causes the specimen to expand and crack.

Key words: excess-sulfate phosphogypsum slag cement (PPSC); road base material; microstructure; mechanical property; water stability

磷石膏是磷酸工业生产中副产的成分复杂的固体废弃物,其主要矿物成分为二水硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),还含有机杂质磷、氟化物以及重金属等有害物质^[1-4].农业需求的增加和磷酸工业的加速发展使得磷石膏成为排量最大的副产石膏^[5].截至2018年,中国磷石膏累计堆存量已达到2.5亿t^[1],如此巨大的堆存量不仅污染环境,还占用了大量宝贵的土地资源.因此如何促进磷石膏的合理规模化消耗,推动磷石膏的资源化利用引起了国内外学者的广泛关注.

目前磷石膏主要应用于硅酸盐水泥缓凝剂、硫酸生产、土壤改良剂、建筑材料等各方面^[6-10].由于磷石膏本身强度较低,且水稳性能不良,故极少将其直接作为胶凝材料使用,但磷石膏与其他活性混合材料复合水化时,其力学性能及水稳性能可得到大幅提升.在此情况下,林宗寿等^[11]制备了一种磷石膏基免烧水泥,这是一种采用质量分数为40%~50%的磷石膏、40%~50%的矿渣、2%的钢渣和约4%的硅酸盐水泥熟料经混合、粉磨制成的新型水硬性胶凝材料(PPSC).中国公路里程巨大,将PPSC用作筑路材料是现阶段大量消耗磷石膏的有效手段,不仅能大量消纳磷石膏,减少水泥用量,而且磷石膏具有微膨胀性,能够补偿收缩,与水泥稳定碎石基层相比,能有效缓解路面基层因收缩开裂而引起的路面反射裂缝,因此,大量学者对磷石膏在道路基层中的应用进行了研究.李玉华^[12]通过试验发现,在二灰路面基层材料中掺入适量磷石膏可以激发粉煤灰活性;杨波^[13]在碱性添加剂作用下发现磷石膏有利于基层强度的形成;董满生等^[14]研究发现,磷石膏在水泥和矿粉等活性材料作用下,水化产物钙矾石(Ettringite)的生成使路面基层形成了一定的强度;沈卫国等^[15-16]研究了磷石膏在二灰路面基层材料中的配合比设计方法和磷石膏筑路材料的水稳性、柔韧性、抗裂性等路用性能;周明凯等^[17-19]研究发现,磷石膏筑路材料的水稳性较好,制备的路面基层材料韧

性和抗裂性都优于普通水泥稳定碎石;李志清等^[20]用2%~4%的硅酸钠溶液改性水泥基稳定磷石膏,以更有效地改善水泥基稳定磷石膏材料的抗压强度与水稳性能;Shen等^[21-22]利用磷石膏、石灰、钢渣和粉煤灰制备的路面基层材料在工程应用方面具有优良的性能.

以上研究主要集中于磷石膏水泥基路面基层材料的路用性能,并未将磷石膏作为无机结合料的主要成分用于路面基层研究,也未对其强度发展规律和形成机理从微观结构进行探讨.基于此,本文以磷石膏为主要成分制备过硫磷石膏矿渣水泥(PPSC),在此基础上制备过硫磷石膏矿渣水泥路面基层材料(PGBM);同时采用X射线衍射(XRD)和扫描电镜(SEM),分析PPSC在不同龄期下的矿物成分及其微观形貌,从微观角度探究过硫磷石膏矿渣水泥掺量对PGBM力学性能的影响及发展规律.

1 试验

1.1 原材料

灰色颗粒状磷石膏(PG),过0.2 mm筛的筛余量¹⁾为8.6%;P·O 42.5普通硅酸盐水泥(C),过0.08 mm筛的筛余量为7.4%;S95级粒化高炉矿渣粉(GBFS),过0.045 mm筛的筛余量为2.3%;集料均采用宜昌市龙泉砂石厂生产的级配碎石,经室内筛分试验确定集料配合比为1#(19~26.5 mm):2#(9.5~19 mm):3#(4.75~9.5 mm):4#(0~4.75 mm)=15%:35%:10%:40%.磷石膏、水泥和高炉矿渣粉的化学组成见表1.

1.2 试验方法

林宗寿等^[23]研究发现,将磷石膏与高炉矿渣粉、水泥按质量比45:1:2混合,经过研磨并陈化24 h后得到的改性磷石膏浆体性能较好.本试验将磷石膏与高炉矿渣粉、水泥按质量比45:1:2混合,在0.427水灰比下,用规格为WZM(20 L)的球磨机湿磨60 min,

1) 本文涉及的筛余量、掺量、比值等均为质量分数或质量比.

表1 无机结合料各组分的化学组成
Table 1 Chemical compositions of each component of inorganic binder

Material	w/%												
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	SO ₃	Ti ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Na ₂ O	MnO	IL
PG	2.26	0.40	0.38	38.89	0.06	0.24	49.38	0.35	0.43				7.47
C	19.14	5.11	3.74	59.03	1.96	1.26	4.42	0.33					4.26
GGBS	34.74	16.45	1.77	33.55	6.42	0.57	3.62			1.75	0.49	0.23	

制成湿磨改性磷石膏浆体(MPG),静置陈化24 h后,再将其与高炉矿渣粉、水泥按表2所示组成设计在标准稠度下配制成过硫磷石膏矿渣水泥(PPSC),并按GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法》制作成40 mm×40 mm×160 mm净浆试件进行7、28 d无侧限抗压强度试验。另外,分别采用X射线衍射(XRD)及扫描电镜(SEM)观察PPSC的矿物成分和微观形貌。

根据PPSC净浆试件无侧限抗压强度试验结果,优选过硫磷石膏矿渣水泥组成设计,然后以不同过硫磷石膏矿渣水泥掺量,按照JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》制作尺寸为 $\phi 150 \times 150$ mm的PGBM试件,并以标准养护(BY)和先标准养护再浸水养护(SY)2种养护方式养护。按JTG E51—2009进行PGBM试件的无侧限抗压强度和抗冲刷试验,以其浸水前后的强度损失和冲刷量来分析过硫磷石膏矿渣水泥路面基层材料的水稳性能。

2 结果与讨论

2.1 过硫磷石膏矿渣水泥组成设计

PPSC净浆试件(编号为JN1、JN2、JN3)的无侧限抗压强度试验结果见表2。由表2可知,相比于净浆试件JN1和JN2,JN3的力学性能较差,其28 d无侧限抗压强度不足25 MPa,不宜用作无机结合料。净浆试件JN1和JN2的28 d无侧限抗压强度基本一致,但JN1的早期强度明显优于JN2,因此优选JN1作为路面基层材料所用无机结合料配合比。

表2 过硫磷石膏矿渣水泥(PPSC)组成设计及无侧限抗压强度
Table 2 Composition design and unconfined compressive strength of excess-sulfate phosphogypsum slag cement (PPSC)

Sample code	w/%			Unconfined compressive strength/MPa	
	MPG	GGBS	C	7 d	28 d
JN1	50	45	5	22.8	35.0
JN2	60	35	5	13.9	34.7
JN3	70	25	5	11.1	23.7

2.2 过硫磷石膏矿渣水泥路面基层材料的无侧限抗压强度

以表2中JN1的组成作为路面基层材料所用无机结合料配合比,制备过硫磷石膏矿渣水泥路面基层材料(PGBM)试件,其中PPSC以外掺形式掺入,掺量分别为5%、10%、15%;然后以标准养护和先标准养护再浸水养护这2种养护方式将试件养护至待测龄期。测试时,用BY1、BY2、BY3表示PPSC掺量分别为5%、10%、15%的标准养护试件;用SY1、SY2、SY3分别表示PPSC掺量为5%、先标养4 d再水养3 d,PPSC掺量为10%、先标养9 d再水养5 d,PPSC掺量为15%、先标养21 d再水养7 d的浸水养护试件。

PGBM试件的无侧限抗压强度试验结果如图1所示。

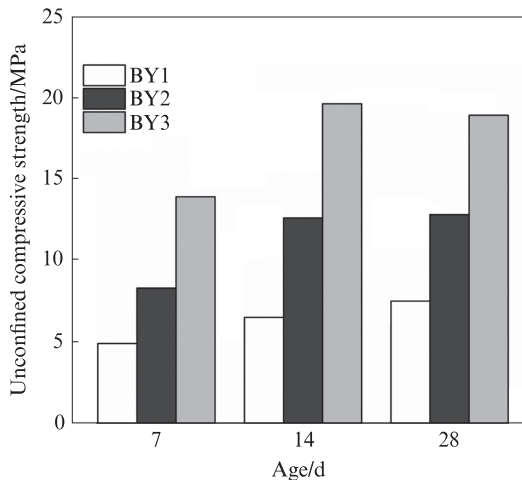
由图1可见:无论是标养还是先标养再水养,PGBM试件的无侧限抗压强度均随着PPSC掺量的增加而增长,但标准养护更有利于其后期强度的发展;在5%、10%的PPSC掺量下,随着龄期的延长,PGBM试件的无侧限抗压强度也随之增长,但14 d后增速放缓;PPSC掺量为5%的PGBM试件(BY1和SY1)7 d无侧限抗压强度即可以满足JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》的要求;随着养护龄期的延长,PPSC掺量为10%的PGBM试件(BY2和SY2)的无侧限抗压强度逐渐趋于稳定;PPSC掺量为15%的PGBM试件(BY3和SY3)14 d无侧限抗压强度最高,而后随着龄期的延长而降低,且试件SY3比BY3发生了更明显的强度倒缩现象。这可能是因为5%的PPSC掺量较低,养护后期因水化产物不足而导致强度提升缓慢;10%的PPSC掺量最为合适,可能是由于养护至14 d龄期时水化反应进程已经充分且强度已经形成,后期因水化产物不再生成从而使强度保持稳定;当PPSC掺量达到15%时,PGBM试件在14 d后的无侧限抗压强度有明显下降的趋势,这可能是因为PPSC掺量过多时,因养护后期水化反应继续进行而生成了过多的水化产物,而过量的水化矿物成分并不利于强度的提升。由此可见,PGBM试件中的PPSC掺量不宜超过10%。

2.3 过硫磷石膏矿渣水泥路面基层材料的水稳性

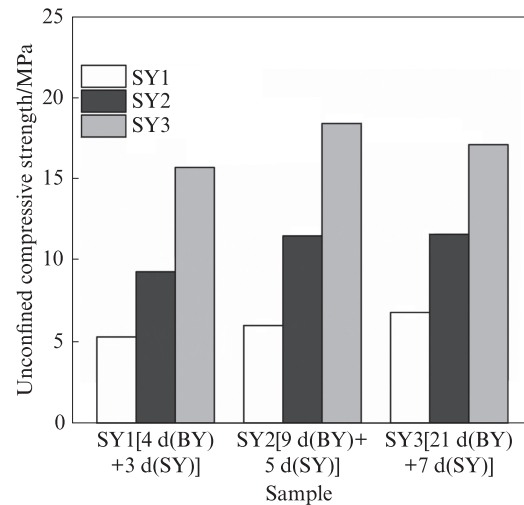
采用先标准养护再浸水养护(SY)和标准养护(BY)PGBM试件的无侧限抗压强度之比(称为软化系数),以及不同龄期下PGBM试件的冲刷量来分析PGBM的水稳性.图2为PGBM水稳性试验结果.

由图2(a)可见:7 d龄期时,PGBM试件的软化

系数均大于1,说明在养护初期,浸水可以加快材料内部的水化反应,有利于试件7 d强度的增长;SY组试件的14、28 d强度均小于相应的BY组试件,说明随着浸水养护龄期的延长,试件强度出现下降,但其软化系数都在90%以上,仍满足JTG/T F20—2015对于路面基层无侧限抗压强度的要求.



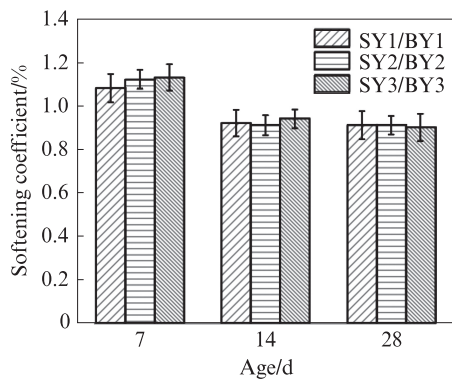
(a) Unconfined compressive strength under standard curing conditions



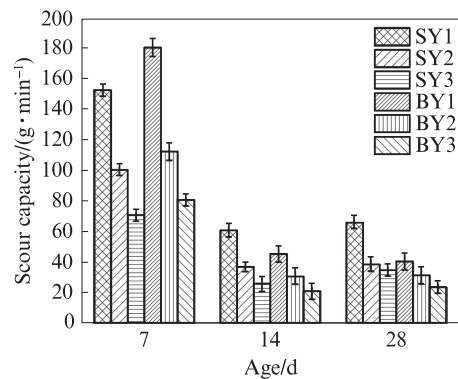
(b) Unconfined compressive strength under submerged curing conditions

图1 PGBM试件的无侧限抗压强度

Fig. 1 Unconfined compressive strength of excess-sulfate phosphogypsum slag cementitious road base material(PGBM)



(a) Softening coefficient of PGBM



(b) Scour capacity of PGBM

图2 PGBM水稳性试验结果

Fig. 2 Test results of water stability of PGBM

由图2(b)可见:PPSC掺量越高、养护时间越长,则冲刷量越低;28 d与14 d相比,冲刷量并无明显增高,表明14 d龄期时PGBM的水化已较为充分,强度趋于稳定,已经具有一定的水稳性;7 d龄期时,SY组试件的冲刷量均低于相应的BY组试件,但其余龄期时则相反,且试件SY3冲刷量的后期增长率高于试件BY3.这表明先标养再水养虽然能加速PGBM的水化,但标准养护更有利于其后期的稳定性,同时表明PGBM的抗冲刷能力与其强度发展具有一致性.

为探究PGBM强度形成与PPSC的关系,对比了编号为JN1的PPSC净浆试件和以其配合比配制而成的PGBM试件BY1、BY2的7~28 d无侧限抗压强度增长率.分析可知,PPSC净浆试件JN1、PGBM试件BY1和BY2的7~28 d无侧限抗压强度增长率分别为53.5%、53.1%和54.2%,即PGBM与PPSC的无侧限抗压强度具有相同的增长幅度,两者发展趋势一致.由此推断,PGBM的力学性能受过硫磷石膏矿渣水泥的影响,且过硫磷石膏矿渣水泥可能

是PGBM强度形成的主要来源,因此本文从过硫磷石膏矿渣水泥的微观结构形貌和矿物成分进行分析.

2.4 过硫磷石膏矿渣水泥微观分析

JN1和JN3这2组PPSC材料的XRD图见图3,同时采用Jade软件对其主要矿物成分的主衍射峰强度进行分析,分析数据见表3.由图3和表3可知,JN1和JN3的主要矿物成分为二水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、

石英($\alpha\text{-SiO}_2$)以及水化生成的钙矾石(Ettringite);7 d龄期时,JN1的钙矾石衍射峰强度高于JN3,而 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 衍射峰强度远低于JN3;28 d龄期时,JN1、JN3有了更多的矿物相,JN1的钙矾石衍射峰强度明显高于JN3,同时有更多的磷石膏参与水化产物的生成,导致其 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 衍射峰强度降低.高峰强的钙矾石和低峰强的 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 导致JN1的力学性能优于JN3.

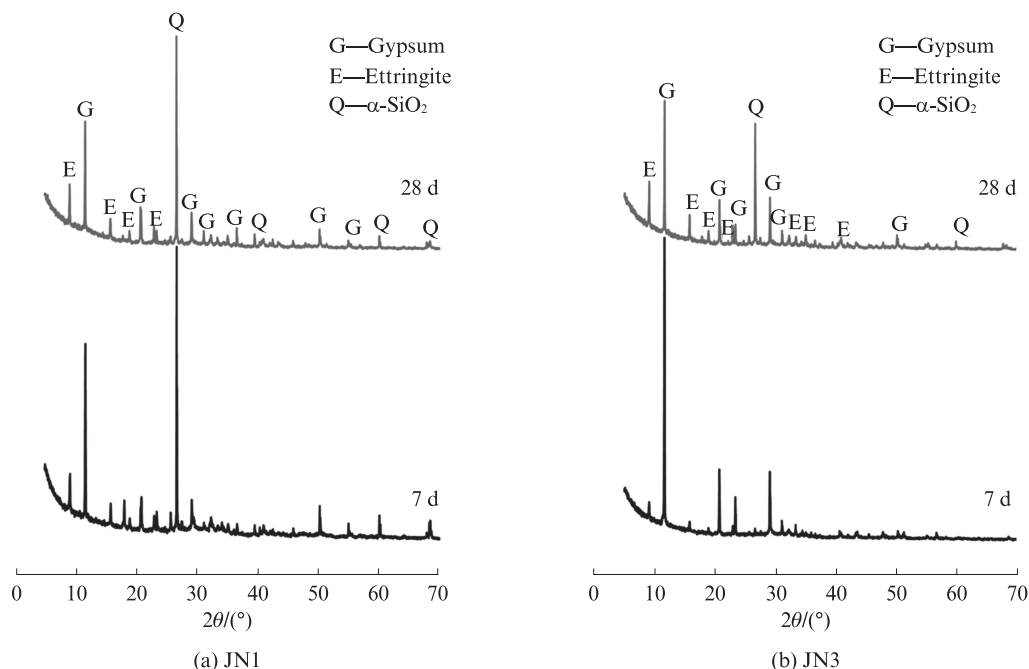


图3 JN1和JN3的XRD图谱
Fig. 3 XRD patterns of JN1 and JN3

表3 PPSC的主要矿物成分主衍射峰强度值分析
Table 3 Analysis of main diffraction peak intensity value of main mineral composition of PPSC

Mineral composition	7 d		28 d	
	JN1	JN3	JN1	JN3
Ettringite	1 216	733	1 332	1 212
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	3 689	5 652	2 383	2 820
$\alpha\text{-SiO}_2$	5 452		4 015	2 393

JN1和JN3这2组PPSC材料的7、28 d微观结构形貌见图4.由图4可见:7 d龄期时,两者体系内都产生了较多的针状钙矾石,但JN3结构疏松,有大量孔隙,JN1结构较JN3稍致密;28 d龄期时,两者结构都发展得很致密,同时也存在着微观裂缝,JN3结构尚有孔隙存在且有比JN1更多的裂缝,导致其力学性能劣于JN1,这可能也是PGBM材料后期强度开始下降的原因.

由XRD图谱可知PPSC的矿物相含有大量钙矾

石,表明磷石膏参与了水化产物钙矾石的形成;石英和 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 则存在于PPSC各个龄期.由SEM照片可以清晰地看到针棒状钙矾石穿插其中并胶结起来形成致密结构,但在后期却观察不到磷石膏颗粒,这说明磷石膏除参与水化反应外,还有大量残余.但由PPSC净浆试件无侧限抗压强度的试验结果可知,其后期强度仍然较高,表明大量残余的磷石膏不会造成整体结构松散,而是在水泥熟料碱性激发环境下,具有较高活性的矿渣逐渐水解,其中的化学成分 SiO_2 被慢慢释放出来,呈酸性的磷石膏在碱性环境下表现活跃并参与水化反应进程,随着致密性的石英和水化产物钙矾石逐渐增多聚集,残余的磷石膏被紧紧包裹起来,形成具有水硬性的稳定结构,从而使过硫磷石膏矿渣水泥体系可以大量消纳磷石膏.

图5为PGBM的强度发展示意图,4档集料在PPSC材料JN1的胶结作用下连接形成整体骨架,PPSC材料水化产物以及残余的磷石膏填充于骨架

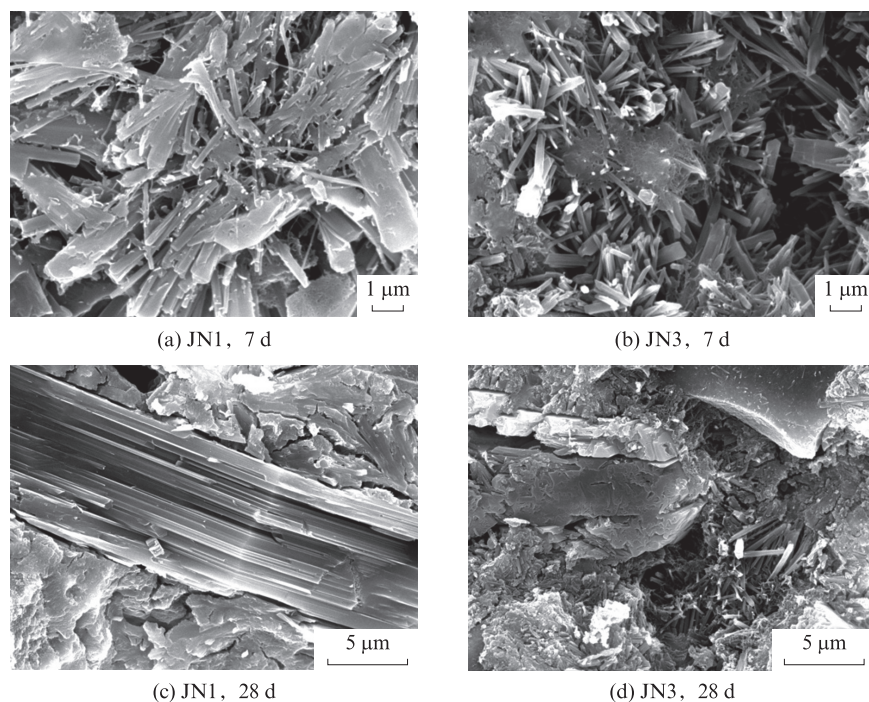


图4 JN1和JN3的SEM照片
Fig. 4 SEM images of JN1 and JN3

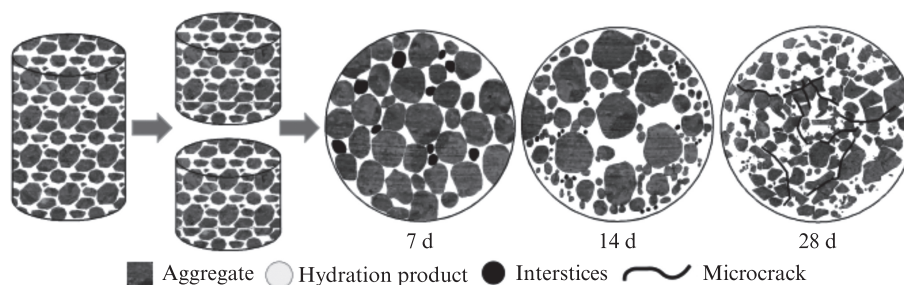


图5 过硫磷石膏矿渣水泥路面基层材料(PGBM)强度发展微观结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of microstructure of strength development of excess-sulfate phosphogypsum slag cementitious road base material(PGBM)

孔隙之间,使结构趋于密实.7 d龄期时,PGBM内部水化产物不充足,造成结构骨架孔隙较多,胶结作用弱,致使其早期强度较低而冲刷量较高;14 d龄期时,PPSC材料水化反应比较充分,水化产物充足,整体结构密实;28 d龄期时,矿物相石英和水化产物钙矾石含量较高,尤其是PPSC掺量为15%的PGBM,因水化产物钙矾石产出过剩,产生反向积压应力而造成结构内部形成微裂缝,致使其后期无侧限抗压强度稍有下降.

3 结论

(1)PPSC掺量为5%的PGBM试件7 d无侧限抗压强度即可满足路面基层强度的规范要求.随着养护龄期的不断延长,PPSC掺量为10%的PGBM试件无侧限抗压强度逐渐趋于稳定,而PPSC掺量为

15%的PGBM试件无侧限抗压强度呈下降趋势.因此,PGBM中的PPSC掺量不宜超过10%.

(2)PGBM与PPSC的无侧限抗压强度发展规律具有一致性,标准养护比先标准养护再浸水养护更有利于PGBM后期强度发展和水稳性.

(3)矿物相石英、二水石膏和水化产物钙矾石的含量是影响PGBM强度的重要因素.当PPSC掺量超过10%时,随着PPSC掺量增加和养护龄期的延长,矿物相石英与水化产物钙矾石不断聚集而导致结构内部膨胀、微裂缝生长,由此造成PGBM后期强度下降.

参考文献:

- [1] 许彦明,蒙海宁,敖林,等.我国工业固体废弃物磷石膏预处理及综合利用综述[J].商品混凝土,2020(1/2):33-36.
XU Yanming, MENG Haining, AO Lin, et al. Review on

- pretreatment and comprehensive utilization of industrial solid waste phosphogypsum in China[J]. Ready-Mixed Concrete, 2020(1/2):33-36. (in Chinese)
- [2] CONTRERAS M, PEREZ-LOPEZ R, GÁZQUEZ M J, et al. Fractionation and fluxes of metals and radionuclides during the recycling process of phosphogypsum wastes applied to mineral CO₂ sequestration[J]. Waste Management, 2015(45):412-419.
- [3] MAZZILLI B P, SAUEIA C H R, JACOMINO V M F, et al. Natural radionuclides and metals intake into soya, corn and lettuce grown on soil amended with phosphogypsum[J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2012, 92(14): 1574-1586.
- [4] SHEN W G, GAN G J, DONG R, et al. Utilization of solidified phosphogypsum as Portland cement retarder[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2012(14):228-233.
- [5] 朱伟, 何东升, 陈飞, 等. 磷石膏预处理与综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(4):19-25.
- ZHU Wei, HE Dongsheng, CHEN Fei, et al. Research progress on pretreatment and comprehensive utilization of phosphogypsum[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(4):19-25. (in Chinese)
- [6] 潘伟, 吴帅, 曾庆友. 磷石膏的资源化利用进展[J]. 云南化工, 2019, 46(4):16-22.
- PAN Wei, WU Shuai, ZENG Qingyou. Progress in resource utilization of phosphogypsum[J]. Yunnan Chemical Technology, 2019, 46(4):16-22. (in Chinese)
- [7] 张利珍, 张永兴, 张秀峰, 等. 中国磷石膏资源化综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2019(4):14-18.
- ZHANG Lizhen, ZHANG Yongxing, ZHANG Xiufeng, et al. Research progress on resource utilization of phosphogypsum in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019(4):14-18. (in Chinese)
- [8] 何晓强, 丁哨兵, 朱士荣, 等. 磷石膏在建材行业应用的研究进展[J]. 山东化工, 2015, 44(3):50-54.
- HE Xiaoqiang, DING Shaobing, ZHU Shirong, et al. Application research progress of phosphogypsum in the building materials industry[J]. Shandong Chemical Industry, 2015, 44(3): 50-54. (in Chinese)
- [9] 廖若博, 徐晓燕, 纪罗军, 等. 我国磷石膏资源化应用的现状及前景[J]. 硫酸工业, 2012(3):1-7.
- LIAO Ruobo, XU Xiaoyan, JI Luojun, et al. Situation and prospects of China's the phosphogypsum resources applications[J]. Sulphuric Acid Industry, 2012(3):1-7. (in Chinese)
- [10] 汪家铭. 磷石膏综合利用技术现状与前景展望[J]. 硫磷设计与粉体工程, 2013(1):7-12.
- WANG Jiaming. Current status and prospect of phosphogypsum comprehensive utilization technology[J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering, 2013(1):7-12. (in Chinese)
- [11] 林宗寿, 黄赞. 磷石膏基免煅烧水泥的开发研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(4):53-55.
- LIN Zongshou, HUANG Yun. Investigation on phosphogypsum-base non-calcined cement[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(4):53-55. (in Chinese)
- [12] 李玉华. 磷石膏在二灰基层中的应用试验研究[J]. 江苏建材, 1999, 76(4):8-10.
- LI Yuhua. Experimental study on application of phosphogypsum in lime-fly ash base course[J]. Jiangsu Building Materials, 1999, 76(4):8-10. (in Chinese)
- [13] 杨波. 磷石膏在改良潮土和筑路中的应用试验[J]. 陕西化工, 1991(3):21-27.
- YANG Bo. Application of phosphogypsum in the improvement of fluvo-aquic soil and road construction[J]. Shanxi Chemical Industry, 1991(3):21-27. (in Chinese)
- [14] 董满生, 凌天清, 徐基立, 等. 磷石膏对半刚性基层材料的作用机理[J]. 中国公路学报, 2002, 15(2):11-15.
- DONG Mansheng, LING Tianqing, XU Jili, et al. Mechanism on the phosphogypsum-improved semi-rigid basecourse[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(2):11-15. (in Chinese)
- [15] 沈卫国, 周明凯, 赵青林, 等. 粉煤灰磷石膏高早强路面基层材料的研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2001(2):31-32.
- SHEN Weiguo, ZHOU Mingkai, ZHAO Qinglin, et al. Study on the base material of high early strength pavement with fly ash and phosphogypsum[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2001(2):31-32. (in Chinese)
- [16] 沈卫国, 周明凯, 余崇峻, 等. 磷石膏改性二灰路面基层材料的性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(10):34-37.
- SHEN Weiguo, ZHOU Mingkai, YU Chongjun, et al. Study on the properties of phosphogypsum modified lime-fly ash road base course materials[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003, 25(10):34-37. (in Chinese)
- [17] 周明凯, 张晓乔, 陈潇, 等. 水泥磷石膏稳定碎石路面基层材料性能研究[J]. 公路, 2016(4):186-189.
- ZHOU Mingkai, ZHANG Xiaoqiao, CHEN Xiao, et al. Research on properties of phosphogypsum cement stabilized gravel road base materials[J]. Highway, 2016(4):186-189. (in Chinese)
- [18] 杜婷婷, 李志清, 周应新, 等. 水泥磷石膏稳定材料用于路面基层的探究[J]. 公路, 2018(2):189-195.
- DU Tingting, LI Zhiqing, ZHOU Yingxin, et al. A study on the application of cement phosphogypsum stabilized material in pavement base[J]. Highway, 2018(2):189-195. (in Chinese)
- [19] 陈洁, 董江峰, 薛佼, 等. 磷石膏基水泥稳定碎石材料性能研究[J]. 建材与装饰, 2020(19):52-53.
- CHEN Jie, DONG Jiangfeng, XUE Jiao, et al. Study on properties of phosphogypsum-based cement stabilized crushed stone[J]. Construction Materials & Decoration, 2020(19):52-53. (in Chinese)
- [20] 李志清, 沈鑫. 硅酸钠改良水泥基稳定磷石膏在路面基层中的试验研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(1):80-87.
- LI Zhiqing, SHEN Xin. Experimental study on cement-based stabilized phosphogypsum modified by sodium silicate in pavement base[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(1):80-87. (in Chinese)