

钢渣混凝土的研究进展

王林龙¹, 袁琪朝^{1*}, 黎建志¹, 文冲², 旦增顿云², 杨强¹

1. 招商局重庆公路工程检测中心有限公司, 重庆 400067

2. 西藏自治区交通运输综合行政执法总队, 西藏 拉萨 850000

DOI:10.61369/ERA.2026050038

摘 要 : 钢渣作骨料加入混凝土中, 不仅能大量利用废弃钢渣, 而且具备优异性能, 具有广阔的应用前景。在参考国内外大量文献的基础上, 从钢渣基本性质、钢渣混凝土工作性能、力学性能、耐久性能、钢渣预处理及工程应用等方面, 综述了钢渣混凝土研究进展, 为钢渣混凝土进一步深入研究和应用提供借鉴。

关 键 词 : 钢渣; 钢渣混凝土; 工作性能; 力学性能; 耐久性能

Research progress of steel slag concrete

Wang Linlong¹, Yuan Qichao^{1*}, Li Jianzhi¹, Wen Chong², Danzeng Dunyun², Yang Qiang¹

1.China Merchants Chongqing Testing Center for Highway Engineering Co., Ltd. Chongqing 400067

2.Comprehensive administrative law enforcement corps of transportation in Tibet Autonomous Region, Lhasa, Tibet 850000

Abstract : Steel slag as aggregate added to concrete, not only can use a lot of waste steel slag, but also has excellent performance, has broad application prospects. On the basis of referring to a large number of domestic and foreign literature, the research progress of steel slag concrete is summarized from the basic properties of steel slag concrete, working properties, mechanical properties, durability, pretreatment of steel slag and engineering applications. It provides reference for further research and application of steel slag concrete.

Keywords : steel slag; steel slag concrete; working properties; mechanical properties; durability

钢铁工业是我国经济发展的重要支柱和基础性产业, 随着钢铁产量逐年增加的同时, 废弃物钢渣的排放量也随之增加。据我国 2022 年报道废弃物钢渣的产量约 1.37 亿吨, 废弃物钢渣的堆积量已经达到 10 亿吨以上, 钢渣的“去存量”显得尤为迫切。一方面堆积钢渣将占用大量土地, 同时钢渣中的有害物质将对周围的空气、河流、土壤等造成污染, 另一方面钢渣作为一种固体废弃物得不到有效利用也是一种资源浪费, 因此, 有必要对钢渣进行资源化利用, 使其变废为宝。目前, 国内外学者针对钢渣的资源化利用问题进行了大量研究, 主要集中在建筑、农业、冶金等方面, 其中, 将钢渣作为骨料用于混凝土(钢渣混凝土)不仅是其资源化利用的有效途径, 而且可以减少天然骨料的开采, 减少碳排放, 具有突出的环境和经济意义。

现阶段, 钢渣混凝土的研究和应用取得了一些成果, 但对钢渣作骨料缺少系统性的总结归纳。本文在参考大量国内外相关文献的基础上, 结合钢渣组成成分对工作性、力学性能、耐久性能分析归纳, 探讨钢渣潜在问题(膨胀性)改善方法, 综合现阶段钢渣混凝土的应用现状以期对钢渣混凝土的进一步研究和应用提供参考。

一、钢渣的组成

钢渣是炼钢过程中产生的废渣, 主要来自炼钢时加入的石灰石、白云石和铁矿石等冶炼溶剂, 为调整钢材性质而加入的造渣材料, 以及高温下融化成的两个互不溶解的液相炉料中分离出来的杂质等。钢渣的密度一般在 3.3~3.6g/cm³ 之间, 从外观上看, 钢渣与天然砂石状态类似, 成松堆状态, 质地坚硬。钢渣的化学成分主要有 CaO、SiO₂、Fe₂O₃、MgO、Al₂O₃ 以及其他少量成分

组成, 但不同钢厂、不同炼钢工艺、不同原料产地所产生的钢渣废料的化学成分含量存在差异。朱航^[1] 研究了不同钢厂产出的钢渣化学成分, 结果如表 1 所示。钢渣中的主要矿物相包括橄榄石, 辉橄榄岩, C₃S, C₂S, C₄AF, C₂F。其矿物成分具有潜在的胶凝活性, 可发生水化反应生成 C-S-H 凝胶和 CH 晶体等水化产物。官少龙等^[2] 从工程物理化学性质的角度对钢渣骨料和石灰岩碎石骨料进行了对比研究, 研究表明, 钢渣骨料的吸水率大于石灰岩碎石, 洛杉矶磨耗损失值和压碎值均小于石灰岩碎石, 因此, 钢

第一作者: 王林龙 (1990.07-), 男, 重庆市人, 高级工程师, 硕士, 研究方向: 建筑材料与道路工程的研究和检测。

通讯作者: 袁琪朝 (1996.11-), 男, 研究方向: 道路工程与桥梁工程的研究和检测。

渣是一种有研究价值的骨料，但其存在的游离氧化钙 f-CaO、f-MgO 在水化作用下产生大量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ，引起混凝土体积膨胀。

表 1 不同钢厂钢渣的化学成分 (%)

种类	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	FeO	P ₂ O ₅	S
马钢	43.15	15.55	3.84	5.19	3.42	2.31	19.22	4.08	0.35
太钢	52.35	13.22	2.81	7.26	6.29	1.06	13.29	1.30	0.17
鞍钢	45.37	8.84	3.29	8.79	7.93	2.31	21.38	0.72	0.26
武钢	50.51	14.38	1.35	5.22	4.49	-	14.80	1.12	-
首钢	52.66	12.26	3.04	6.12	9.12	4.59	10.42	0.62	0.23
重钢	42.53	11.11	-	13.18	7.82	-	11.86	1.62	0.105

二、钢渣混凝土性能研究进展

(一) 钢渣混凝土工作性能研究进展

混凝土工作性主要包括流动性、黏聚性以及保水性。目前，已有大量学者对钢渣混凝土工作性进行了研究，研究表明钢渣作为骨料替代天然骨料均减小混凝土的流动性，并随着钢渣替代率的增加混凝土流动性逐渐减小，黏聚性和保水性目前仍有争议。王强等^[3]对掺有钢渣骨料的普通混凝土与高强混凝土的流动性进行分析，研究表明，钢渣作为粗骨料加入混凝土与普通混凝土的流动性差别较小，钢渣作为细骨料加入混凝土对混凝土的流动性有较大的不利影响。朱治国等^[4]通过钢渣按比例等质量替代粗集料进行钢渣混凝土工作性的研究，钢渣分别以 0%、20%、40%、60% 等质量替代粗集料，研究表明，随着钢渣掺量的增大，混凝土坍落度及 1h 经时坍落度均逐渐变小，钢渣替代量为 20%、40%、60% 时，混凝土坍落度比普通混凝土分别降低 6.82%、18.18%、25.00%，1h 经时坍落度分别降低 12.5%、22.50%、32.50%，钢渣作为粗骨料掺入混凝土影响混凝土的工作性能，需掺入减水剂来改善钢渣混凝土的工作性能。丁昕等^[5]研究了钢渣作为细骨料部分替代天然细骨料混凝土的工作性能，钢渣掺入量分别为 6%、12%、18%、24% 和 30% 等质量代替天然细骨料河砂，研究表明，钢渣掺入量为 0%、6%、12%、18%、24%、30% 分别对应的坍落度为 65mm、62.5mm、58mm、57mm、56.5mm、55mm，随着钢渣细集料掺量的增加，钢渣细集料混凝土的坍落度持续减少，但保水性和黏聚性较好。查坤鹏^[6]制作了 5 组混凝土强度为 C30 废弃钢渣混凝土，其试验参数为钢渣粗集料替代率，钢渣粗集料替代率为 0、30%、60%、100%，对其坍落度、体积稳定性进行试验研究，结果表明，新制备试件坍落度与标准混凝土相比较小，随着钢渣用量的增加，其粘结性和保水性变差。

钢渣作骨料将降低混凝土的工作性，随着掺量增加工作性降低越明显，究其原因，一方面是由于钢渣集料呈多孔结构，钢渣骨料吸水率较大，减少了混凝土中提供流动的自由水，另一方面，钢渣表面粗糙及突出的棱角不利于胶凝材料的包覆，导致内摩擦力增大，从而造成混凝土流动性变差。针对其不利因素，部分学者采取了相应措施，比如 Faleschini 等^[7]在相同水灰比条件下，水泥浆掺量增加 20% 左右，钢渣替代率为 100% 的混凝土坍

落度增加 5% 左右。

(二) 钢渣混凝土力学性能研究进展

混凝土力学性能包括钢渣混凝土抗压强度、抗折强度、弹性模量等，刘华山^[8]利用钢渣等质量替换混凝土粗集料（钢渣替代率为 10%、30% 和 50%）进行混凝土的力学性能研究，对其不同替代率钢渣混凝土分别养护至 7d、14d、28d，研究表明，随着龄期的增加，混凝土抗压强度、抗折强度逐渐增大；在相同龄期时，随着钢渣掺量的增加，混凝土抗压强度、抗折强度均表现为上升趋势。Hisham Qasrawi^[9]用废弃钢渣作为粗骨料代替天然骨料以及再生粗骨料砂掺入混凝土中，研究表明，当粗集料替代率为 67% 时，提升了再生混凝土的抗压强度，当天然骨料全被替换为废弃钢渣时，其抗压强度较普通混凝土提升 20% 左右。Subathra Devi^[10]利用 M20 级混凝土的配比，通过试验探讨了用钢渣替代粗集料和细集料对混凝土抗压强度的作用，从而来确定以钢渣代替细集料和粗集料的最佳配比，结果表明，用钢渣局部代替细、粗骨料可有效地改善混凝土的抗压强度。Anastasiou, E.^[11]利用建筑废料作细骨料和钢渣作粗骨料制备混凝土来进行抗压强度试验以及耐久性试验研究，结果表明，使用建筑废料替代细骨料降低了混凝土的强度和耐久性，主要由于废料中砖和沥青等杂质太多导致孔隙度明显降低，而掺入钢渣粗骨料改善了混凝土的强度损失，表现出良好的抗压强度。於林锋等^[12]利用钢渣作粗骨料替代砂石制备钢渣混凝土与普通混凝土进行抗折强度对比试验，研究发现钢渣混凝土抗折强度在龄期 28d、90d 与普通混凝土相比提升较为明显，28d 抗折强度提高约 30%。王晨霞等^[13]采用强度等级为 C30、C40，钢渣粗骨料替代率为 30%、60%、100% 混凝土进行弹性模量试验，结果表明，随着钢渣替代率的增大，钢渣混凝土弹性模量整体呈现上升趋势，替代率为 100% 时钢渣混凝土弹性模量约为普通混凝土的 1.2 倍。

钢渣骨料对混凝土抗压强度表现为正面影响，在扫描电镜下研究放大 1000 倍以及 3000 倍的钢渣混凝土微观结构，通过对比观察发现钢渣掺入混凝土后表面生成绒毛状 C-S-H 凝胶，改善了与天然骨料和水泥的过渡界面，从而使界面更密实，提高了混凝土抗压强度^[14]。

从宏观角度来讲，钢渣作粗骨料替代天然骨料的钢渣混凝土抗压强度、抗折强度、弹性模量表现均不弱于普通混凝土，满足工程上力学性能要求，可做进一步探索，钢渣作细骨料替代天然骨料的钢渣混凝土力学性能研究结果有限，并未有一致结论，可从钢渣特性、混凝土配合比、养护时间、外加剂等多个方面继续探索。从微观角度来讲，钢渣骨料的化学性质对混凝土强度有积极作用。综上所述，钢渣粗骨料可应用于混凝土中。

(三) 钢渣混凝土耐久性能研究进展

混凝土的耐久性包括抗酸碱盐侵蚀性、抗冻性、抗碳化性、抗渗性等，周方均等^[15]采用热闷工艺制造的钢渣砂、石取代天然砂、石制备 C30 钢渣混凝土，通过对比试验研究钢渣石混凝土与钢渣砂混凝土的抗碳化性能及抗氯离子渗透性能，钢渣砂级配为 0.3~1.18 mm 和 1.18~4.75 mm，比例为 7:3，钢渣石为块状钢渣，为 5~20 mm 连续级配，研究表明，钢渣砂、石混凝土随

碳化时间的增加,碳化深度呈现逐步加深变化,在碳化龄期不变的条件下,随着钢渣替代率的增加碳化深度均表现为先减小后增大,其抗碳化性能都呈现出先增强后减弱的趋势,其抗碳化性能均优于普通混凝土,取代率为50%时抗碳化性能最佳;钢渣取代率相同的条件下,钢渣砂混凝土抗氯离子渗透性能强于钢渣石混凝土,但二者的抗氯离子渗透性能均弱于普通混凝土。杨晨^[16]对钢渣混凝土耐久性(抗冻性、抗硫酸侵蚀性)以及耐久性影响机理进行试验研究并分析讨论,钢渣等质量替代天然粗骨料,替代率为0%、50%、100%,结果表明,钢渣的掺入使混凝土体系的孔隙结构改变,在经过50、100、150次冻融循环后钢渣替代率为50%的混凝土比普通混凝土的抗压强度显著增加,混合粗骨料抗压强度损失率表现最佳;钢渣内f-MgO在化学作用下产生的物质加重了混凝土的腐蚀,因此钢渣混凝土的抗硫酸侵蚀能力弱于普通混凝土。曹芙蓉等^[17]设置不同钢渣取代率、水灰比以及混凝土强度等级测试钢渣混凝土抗冻以及抗碳化性能,结果表明,随着钢渣替代率的增加,混凝土顶面与底面碳化深度差距变大,水灰比0.45、替代率100%的混凝土顶底面碳化差距最大,为53.4%;在冻融试验中,随着替代率的增加混凝土质量损失率、抗压强度损失率、动弹性模量损失率均有所降低。朱磊磊^[18]对钢渣粗骨料替代率为0%、25%、50%和75%的C30强度混凝土进行耐久性(抗硫酸盐侵蚀性)试验研究,采用专用混凝土硫酸盐设备进行抗硫酸盐侵蚀性能测试,干湿循环40次和80次,结果表明,随着钢渣替代率的增大混凝土抗侵蚀系数均表现为下降趋势,40次干湿循环下降幅度为36.5%,80次干湿循环下降幅度为46.9%,说明钢渣的掺入对混凝土抗硫酸盐侵蚀性不利。

多名学者研究成果表明掺入钢渣后混凝土的抗碳化性、抗冻性均表现良好,而在抗硫酸盐侵蚀性能、抗渗性两个指标较普通混凝土而言不满足施工技术要求,因此在硫酸盐、氯离子环境中是否满足施工技术要求以及如何处理其不良表现仍需进一步探究。

(四) 钢渣预处理方法研究进展

钢渣中存在的游离氧化钙和游离氧化镁在水化过程中会发生膨胀,造成混凝土安定性不良,因此钢渣需经过预处理来减小其膨胀性对混凝土的不利影响。钢渣预处理最常见的方法为自然陈化,但陈化时间较长影响施工进度,董从雷^[19]利用疏水涂料包裹钢渣形成连续致密疏水膜,降低钢渣吸水率从而抑制水化作用,明显降低了钢渣膨胀率,钢渣粒径为4.75~9.5mm、9.5~13.2,不同粒径钢渣改性前后浸水膨胀率变化如图1所示,4.75~9.5mm和9.5~13.2mm两种粒径改性后钢渣膨胀率分别降低了46.0%和21.2%。孙鹏飞^[20]利用CO₂对钢渣进行碳酸化预处理,钢渣中游离f-CaO和f-MgO与CO₂迅速反应形成稳定的CaCO₃和MgCO₃,在短时间内改善钢渣的体积安定性,碳酸化预处理对钢渣体积安定性随时间变化的影响如图2所示,钢渣膨胀率在碳酸化时间为3min、6min、10min和30min分别降低67.9%、76.7%、77.1和80.1%,且用替代率30%碳酸化钢渣制备水泥胶砂对28d抗压强度影响较小。Kumar P等^[21]利用蒸汽加速钢渣膨胀因素f-CaO和f-MgO的水化,使钢渣的膨胀率在7d内由3.5%降低至

1.5%以下,有效改善了钢渣混凝土体积安定性。

由上述可知,针对钢渣体积安定性不良问题有多种处理方式,但国家钢渣产出效率高,自然陈化周期长不能满足目前发展需要,疏水法、碳酸化法以及蒸汽法均能在极短时间内大幅降低钢渣膨胀性,利于钢渣的推广使用,推动钢渣混凝土实践应用。

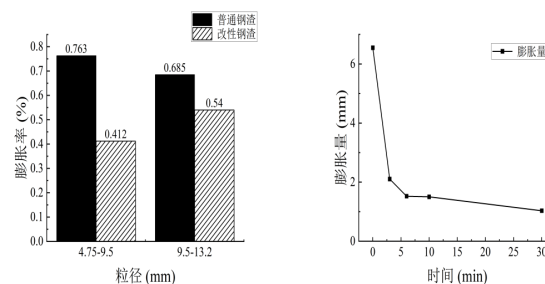


图1 不同粒径钢渣改性前后膨胀率对比图

图2 碳酸化预处理对钢渣体积安定性随时间变化的影响

三、钢渣混凝土的应用

目前,钢管混凝土组合结构已被广泛应用于框架结构中(如厂房和高层),随着钢渣混凝土的研究日趋成熟,钢渣混凝土已被大量学者用于钢管混凝土结构中进一步研究其应用价值。徐琳^[22]通过试验分析不同膨胀率的钢渣钢管混凝土构件(8个轴压构件、8个偏压构件)的承载力特性,对比构件为普通钢管混凝土构件,研究结果显示,在轴压试验中膨胀率为 2.8×10^{-4} 构件的极限承载力增加10%~23%,膨胀率为 -3.5×10^{-4} 构件的极限承载力未有明显变化,在偏心受压参数下钢渣混凝土对于钢管混凝土组合构件的极限承载力有正向作用。高奔浩^[23]设计了在不同钢渣替代率、长短轴比和荷载偏心率等因数下16根椭圆形钢管钢渣混凝土短柱,对其轴压、偏压特性展开试验研究,在构件破坏形态和试验数据两个方面研究其力学特性,结果表明,构件的延性系数均大于1.5,表现较好,该类构件在钢渣替代率增加下强度系数表现较为优越。

现阶段,针对钢渣类桩体应用在工程中的作用机制与加固机理国内学者进行了相关探索,钢渣混凝土与土体的物理化学反应对地基稳定性有增强作用。神亮等^[24]利用可视化试验装置模拟钢渣混凝土桩土间相互作用,研究结果表明桩体对土体有挤密作用,增强了桩土间作用力,桩体与周围土体的物理化学反应形成了致密的桩土交界层,CaCO₃与硅酸盐和土颗粒形成的桩土混合物增强了桩土间摩擦力。张伟等^[25]研究了钢渣桩复合地基在湿陷性黄土中承载力变化规律,对钢渣桩复合地基和石灰粉桩复合地基等进行了承载力特性对比分析,研究结果表明,钢渣桩复合地基承载力提升幅度较大,处理湿陷性黄土地基效果更显著。

在某隧道施工中,选取钢渣混凝土对某段仰拱进行浇筑,在保证其他材料基本相同的条件下,钻取芯样与普通混凝土进行抗压强度和抗渗性对比,试验结果见表2^[26],由表可以看出掺入钢渣后28d混凝土抗压强度明显提高,抗渗能力符合施工要求。

表2 混凝土材料参数对比

材料参数混凝土	抗压强度			28d 抗渗等级 (P)
	3d	7d	28d	
普通混凝土	14.7	19.9	27.6	> 13
钢渣混凝土	15.1	21.1	31.1	> 13

四、结语

钢渣选取适当比例作为骨料加入混凝土中，其力学性能与普通混凝土相近或提升，抗硫酸盐侵蚀性能、抗渗性两个指标低于

普通混凝土，后续着重探索其解决方法。疏水法、碳酸化法以及蒸汽法三种高效钢渣预处理方式助力钢渣推广使用。钢渣混凝土在钢管混凝土组合结构中的应用展现了较好的力学性能，后续应对钢管钢渣混凝土组合结构的耐久性等性能进一步研究分析，以及应用于桥梁结构中的可行性进行探讨，利用钢渣物理、化学特性可应用于地基中实现地基稳定性的提升。鉴于隧道钢渣混凝土浇筑试点试验结果，应在隧道施工中提高钢渣混凝土施工试点逐步验证其施工可行性。

参考文献

[1] 朱航. 钢渣矿粉的制备及其在水泥混凝土中的应用研究 [D]. 武汉理工大学, 2006.

[2] 官少龙, 毛志刚, 吴安耀, 等. 以钢渣为骨料的混凝土基本性能研究及应用 [J]. 西部交通科技, 2019, (07): 1-3+22.

[3] 王强, 曹丰泽, 于超, 王卫仑. 钢渣骨料对混凝土性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(4): 1004-1010.

[4] 朱治国, 李文凯. 不同比例钢渣替代粗集料对水泥混凝土性能影响 [J]. 河南科学, 2021, 39(02): 237-242.

[5] 丁昕, 张伟. 钢渣细集料掺量对混凝土力学性能及碳化性能影响研究 [J]. 中国新技术新产品, 2023, (07): 56-58.

[6] 查坤鹏. 全钢渣集料水泥混凝土及其体积变形性能研究 [D]. 安徽工业大学, 2013.

[7]FALESCHINI F, BRUNELLI K, ZANINI M A, et al. Electric arc furnace slag as coarse recycled aggregate for concrete production[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2016, 2(1): 44-50.

[8] 刘华山. 钢渣水泥混凝土力学性能及耐久性研究 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2019, 15(12): 84-86.

[9]QASRAWI H. The use of steel slag aggregate to enhance the mechanical properties of recycled aggregate concrete and retain the environment[J]. Construction and Building Materials, 2014, 54: 298-304.

[10]DEVI V S, GNANAVEL B K. Properties of concrete manufactured using steel slag[J]. Procedia Engineering, 2014, 97: 95-104.

[11]ANASTASIOU E, FILIKAS K G, STEFANIDOU M. Utilization of fine recycled aggregates in concrete with fly ash and steel slag[J]. Construction & Building Materials, 2014, 50: 154-161.

[12] 於林锋, 徐兵, 王琼, 等. 钢渣混凝土性能的试验研究及应用前景分析 [J]. 混凝土, 2014, (01): 79-81.

[13] 王晨霞, 刘军, 曹芙波, 等. 钢渣粗骨料混凝土单轴受压应力-应变试验 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2022, 38(06): 1096-1103.

[14]WANG G, CHEN X, DONG Q, et al. Mechanical performance study of pervious concrete using steel slag aggregate through laboratory tests and numerical simulation[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 262(2): 22-33.

[15] 周方均, 王帅, 马兵辉, 等. 粗细钢渣单掺对混凝土耐久性能的影响研究 [J]. 混凝土世界, 2022, (06): 28-31.

[16] 杨晨, 刘华伟. 钢渣粗骨料混凝土力学性能及耐久性研究 [J]. 混凝土, 2016(3): 102-105.

[17] 曹芙波, 杨珍, 王晨霞, 等. 不同取代率下钢渣混凝土力学特性及耐久性研究 [J]. 长江科学院院报, 2024, 41(02): 181-187+197.

[18] 涂传红, 李文海, 计煥, 等. 不同钢渣粉掺量对混凝土强度和体积安定性的影响研究 [J]. 江西建材, 2023, (11): 42-43+46.

[19] 董从雷. 钢渣表面疏水膨胀抑制机理及混合料性能 [D]. 东南大学, 2019.

[20] 孙鹏飞, 房延凤, 刘存顺, 等. 碳酸化预处理钢渣体积安定性和水化活性的影响 [J]. 混凝土, 2020, (09): 69-72.

[21]Kumar P, Kumar D S, Marutiram K, et al. Pilot-scale steamaging of steel slags[J]. Waste Management and Research theJournal of the International Solid Wastes and Public CleansingAssociation Iswa, 2017, 35(6): 602.

[22] 徐琳. 圆钢管钢渣混凝土柱静力性能试验研究与理论分析 [D]. 安徽工业大学, 2015.

[23] 高奔浩. 椭圆钢管钢渣混凝土短柱受压性能试验与设计方法研究 [D]. 合肥工业大学, 2021.

[24] 神亮, 张玉芝, 聂庆科, 等. 钢渣混凝土桩土相互作用机理试验研究 [J]. 石家庄铁道大学学报 (自然科学版), 2024, 37(02): 113-118.

[25] 张伟, 杜太生, 张彬, 黄涛. 钢渣桩在湿陷性黄土地基中的应用探讨 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(6): 698-702.

[26] 李慧. 钢渣混凝土在铁路隧道结构中的应用 [J]. 建筑机械化, 2019, 40(05): 18-21.