

高钛重矿渣纤维混凝土力学性能试验研究

杨 贺^{1,2,3}, 梁贺之¹, 迭 健^{1,2}, 陈 伟^{2,3}, 王 伟^{2,3}

(1. 西华大学土木建筑与环境学院, 四川 成都 610039; 2. 攀枝花学院土木与建筑工程学院, 四川 攀枝花 617000; 3. 四川省工业固态废弃物土木工程综合开发利用重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘 要: 考虑纤维掺量、水胶比和粉煤灰掺量 3 个主要因素, 采用正交试验设计 20 组高钛重矿渣纤维混凝土试件, 结合 SEM 分析研究纤维掺量、水胶比等因素对高钛重矿渣纤维混凝土力学性能的影响。试验结果表明: 水胶比对高钛重矿渣混凝土的抗折与抗压强度影响最大; 玄武岩纤维可以显著提高高钛重矿渣混凝土抗折强度, 塑钢纤维可以明显提高高钛重矿渣混凝土抗压强度。当水胶比为 0.32, 玄武岩纤维掺量 1 kg, 粉煤灰掺量 5% 时, 高钛重矿渣纤维混凝土抗折强度为 5.61 MPa, 比未掺纤维的高钛重矿渣混凝土提高 10%。当水胶比为 0.34, 塑钢纤维掺量 2 kg, 粉煤灰掺量 5% 时, 高钛重矿渣混凝土的抗压强度为 60.45 MPa, 达到 GB50010—2010《混凝土结构设计规范》规定的 C55 等级。

关键词: 高钛重矿渣; 混凝土; 力学性能; 玄武岩纤维; 钢纤维; 粉煤灰

中图分类号: X756, TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7638(2020)02-0069-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.02.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Mechanical Properties of High Titanium Heavy Slag Fiber-reinforced Concrete

Yang He^{1,2,3}, Liang Hezhi¹, Die Jian^{1,2}, Chen Wei^{2,3}, Wang Wei^{2,3}

(1. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan, China; 2. School of Civil and Architectural Engineering, Panzhihua University, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 3. Key Laboratory of Comprehensive Development and Utilization of Industrial Solid Wastes in Sichuan Province, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: Considering the three main factors of fiber content, water-binder ratio and fly ash content, 20 sets of high titanium heavy slag fiber-reinforced concrete specimens were designed using orthogonal experiments. The effect of fiber content, water-binder ratio and other factors on mechanical properties of titanium heavy slag fiber reinforced concrete were studied by SEM. The test results show that the water-binder ratio has the greatest impact on the flexural and compressive strength of the high titanium heavy slag concrete. Basalt fiber can significantly increase the flexural strength of the high titanium heavy slag concrete, and plastic steel fiber can significantly improve the compressive strength of the concrete. When the water-binder ratio is 0.32, the basalt fiber content is 1 kg, and the fly ash content is 5%, the flexural strength of the high titanium heavy slag fiber concrete reaches 5.61 MPa, which is 10% higher than that of the high titanium heavy slag concrete without fiber. At the water-binder ratio of 0.34, the plastic steel fiber content of 2 kg, and the fly ash content of 5%, the compressive strength of the high titanium heavy slag concrete reaches 60.45 MPa, satisfying the C55 level specified in Concrete Structure Design Code (GB50010—2010).

Key words: high titanium heavy slag, concrete, mechanical properties, basalt fiber, steel fiber, fly ash

收稿日期: 2019-10-11

基金项目: 四川省高等学校重点实验室项目(工业固态废弃物土木工程综合开发利用, SC-FQWLY201303, SC-FQWLY-2019-Y-08)。

作者简介: 杨 贺(1994—), 男, 河南永城人, 在读硕士研究生, 主要从事工业固体废弃物在建筑材料中的应用研究。E-mail: yanghe9406@163.com; 通讯作者: 陈伟, 教授, 硕士生导师, E-mail: 2233914335@qq.com。

0 引言

高钛重矿渣是钛精矿冶炼提取钛金属形成的多孔型块状废渣,攀钢集团冶炼产生的高钛重矿渣具有含钛量高、力学性能良好、抗冲击韧性、耐久性能好、无碱集料反应、抗渗性和干燥收缩小等特点^[1-3],但高钛重矿渣碎石多孔,吸水率较普通碎石高2%~4%。随着国家对工业固态废弃物利用的重视与开发,已有众多学者对高钛重矿渣的资源化利用进行了研究。陈伟^[4]等利用高钛重矿渣制作C40等级高钛重矿渣混凝土梁,试验结果显示能较好地满足现行混凝土极限承载力安全要求;孙金坤和陈伟^[4-5]等在高钛重矿渣混凝土加入HRB500E高强抗震钢筋制作抗震混凝土梁进行抗震裂缝试验,结果表明高钛重矿渣混凝土和钢筋能够形成较高的粘接性能;李小伟^[6]等通过模拟研究了高钛重矿渣混凝土柱的抗震性能等。但是单一的高钛重矿渣混凝土和普通混凝土一样具有脆性较大、抗拉强度较低等弱点,而钢纤维和玄武岩纤维对普通混凝土具有明显的增强和抗裂效应,可以改善普通混凝土的抗压、抗折与劈裂性能^[7-8],钢纤维和玄武岩纤维在普通混凝土中的应用已经比较广泛,但利用钢纤维和玄武岩纤维来提高高钛重矿渣混凝土的性能研究还比较少。由于应用在民用建筑和道路的高钛重矿渣混凝土强度等级主要在C40以下^[9],强度较低限制了高钛重矿渣混凝土应用的范围,为了推广应用高钛重矿渣混凝土,提高高钛重矿渣混凝土的抗折与

抗压强度,改善高钛重矿渣混凝土的抗劈裂性能,笔者所在课题组对高钛重矿渣混凝土掺加玄武岩纤维和钢纤维,采用正交试验和微观分析对高钛重矿渣纤维混凝土进行力学性能研究,制作出C55等级高钛重矿渣纤维混凝土,提出了一种利用高钛重矿渣、粉煤灰和钢纤维制作较高强度等级的高钛重矿渣混凝土方法,进一步提高高钛重矿渣的利用率,减轻高钛重矿渣堆积造成的环境危害,促进高钛重矿渣混凝土在攀西地区的使用与推广。

1 试验

1.1 试验材料

高钛重矿渣:取自攀钢集团公司。表观密度2840 kg/m³,堆积密度1350 kg/m³,吸水率6.2%,压碎指标值8%。化学组成见表1。玄武岩短切纤维和塑钢纤维,为市售,其物理力学指标见表2。水泥采用攀枝花生产的P.O.42.5普通硅酸盐水泥;细骨料为细度模数2.6的高钛重矿渣砂;粉煤灰采用攀枝花市利源粉煤灰制品有限公司的Ⅰ级粉煤灰;减水剂为液体均衡性聚羧酸系高性能减水剂,减水率为30%。

表1 高钛重矿渣化学组成
Table 1 Chemical compositions of high titanium heavy slag %

SiO ₂	CaO	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	SO ₃	TFe
23.26	25.59	21.32	12.66	8.12	1.91	0.54	1.39	5.21

表2 纤维物理力学性能
Table 2 Physical and mechanical properties of fibers

纤维	纤维直径/mm	长度/mm	密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa
玄武岩纤维	0.005~0.02	6~30	2.41	40	2 000~3 500
塑钢纤维	0.8~1.8	25~70	0.91	5	380~550

1.2 试验方法

按照GB50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》,以常用低水胶比为基础,同时加入粉煤灰和纤维改善高钛重矿渣混凝土的工作性能和强度,采用正交试验,选择水胶比(A)、粉煤灰(B)、纤维(C)三个因素进行试验,其因素—水平如表3所示。

每组纤维掺量以水泥质量为基数进行掺加,分别对应水泥质量的0.3%(1 kg)、0.6%(2 kg)0.9%(3 kg)。

表3 因素—水平
Table 3 Factor-level

	A: 水胶比	B: 粉煤灰掺量/%	C: 纤维掺量/kg
1	0.32	5	1
2	0.34	10	2
3	0.36	15	3

高钛重矿渣纤维混凝土砂率为38%,玄武岩高钛重矿渣纤维混凝土编号:X-1至X-9,塑钢高钛重矿渣纤维混凝土编号:S-1至S-9,并设置不掺纤维的对照组,每组制作100 mm立方体试块9

块,150 mm 立方体试块 3 块,100 mm×100 mm×400 mm 长方体试块 6 块,拆模后置于水中养护,28 d 测出高钛重矿渣纤维混凝土的抗压、抗折与

劈裂强度,最后采用 VEGA II XMH 扫描电镜对高钛重矿渣纤维混凝土进行微观分析。其试验配合比见表 4。

表 4 高钛重矿渣纤维混凝土配合比
Table 4 Mixture ratio of high titanium heavy slag fiber concrete

编号	A: 水胶比	水泥/kg	B: 粉煤灰/%	高钛重矿渣碎石/kg	高钛重矿渣砂/kg	C: 纤维掺量/kg
X-1	0.32	357	5	1 200	730	1
X-2	0.32	338	10	1 200	730	2
X-3	0.32	319	15	1 200	730	3
X-4	0.34	336	5	1 200	730	2
X-5	0.34	318	10	1 200	730	3
X-6	0.34	300	15	1 200	730	1
X-7	0.36	317	5	1 200	730	3
X-8	0.36	301	10	1 200	730	1
X-9	0.36	284	15	1 200	730	2
S-1	0.32	357	5	1 200	730	1
S-2	0.32	338	10	1 200	730	2
S-3	0.32	319	15	1 200	730	3
S-4	0.34	336	5	1 200	730	2
S-5	0.34	318	10	1 200	730	3
S-6	0.34	300	15	1 200	730	1
S-7	0.36	317	5	1 200	730	3
S-8	0.36	301	10	1 200	730	1
S-9	0.36	284	15	1 200	730	2

2 结果与讨论

2.1 高钛重矿渣玄武岩纤维混凝土强度及结果分析

从表 5 高钛重矿渣玄武岩纤维混凝土极差分析可得: $R_{1A} > R_{1B} > R_{1C}$; $R_{cA} > R_{cB} > R_{cC}$; $R_{1C} > R_{1A} > R_{1B}$ 。水胶比对高钛重矿渣纤维混凝土的抗折与抗压强度影响最大,其次是粉煤灰,而玄武岩纤维对高钛重矿渣纤维混凝土的抗折与抗压强度影响较小,但对高钛重矿渣纤维混凝土的劈裂强度影响最大。经过正交软件分析,玄武岩纤维对高钛重矿渣纤维混凝土:抗折

强度最优方案为水胶比 0.32、粉煤灰 5%、玄武岩纤维 3 kg。抗压强度最优方案为:水胶比 0.32、粉煤灰 10%、玄武岩纤维 1 kg,但不存在 9 组试验中,通过试验验证最优方案高钛重矿渣玄武岩纤维混凝土抗压强度为 59.34 MPa。劈裂强度最优方案为:水胶比 0.32、粉煤灰 10%、玄武岩纤维 3 kg,劈裂强度 4.01 MPa。水胶比较低时高钛重矿渣玄武岩纤维混凝土的抗折与抗压强度较高,当水胶比相同时,随着粉煤灰掺量的增加,高钛重矿渣玄武岩纤维混凝土的抗压强度降低。

表 5 高钛重矿渣玄武岩纤维混凝土强度
Table 5 Strength of high titanium heavy slag basalt fiber concrete

编号	A: 水胶比	B: 粉煤灰/%	C: 玄武岩纤维/kg	28 d 抗折强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa	28 d 劈裂强度/MPa
X-1	0.32	5	1	5.61	57.79	2.64
X-2	0.32	10	2	5.18	52.46	3.23
X-3	0.32	15	3	5.31	49.71	4.01
X-4	0.34	5	2	5.22	50.72	3.66
X-5	0.34	10	3	5.29	48.80	3.01
X-6	0.34	15	1	4.34	40.42	2.70
X-7	0.36	5	3	4.99	40.91	2.96
X-8	0.36	10	1	5.11	51.59	3.48
X-9	0.36	15	2	5.11	32.51	2.77
抗折极差 R_f	0.42	0.35	0.18			
抗压极差 R_c	11.65	10.07	4.70			
劈裂极差 R_t	0.22	0.15	0.39			

2.2 高钛重矿渣塑钢纤维混凝土强度及结果分析

从表6高钛重矿渣塑钢纤维混凝土极差分析可得: $R_{fC} > R_{fA} > R_{fB}$; $R_{cB} > R_{cA} > R_{cC}$; $R_{tC} > R_{tA} > R_{tB}$ 。塑钢纤维比高钛重矿渣纤维混凝土的抗折强度影响最大,其次是水胶比,而粉煤灰对高钛重矿渣纤维混凝土的抗折强度影响较小;粉煤灰和水胶比对高钛重矿渣纤维混凝土抗压强度影响都比较大,钢纤维对高钛重矿渣纤维混凝土抗压强度影响较小;但塑钢

纤维对高钛重矿渣纤维混凝土的劈裂强度影响较大,其次是水胶比,而粉煤灰对高钛重矿渣纤维混凝土的劈裂强度影响较小。经过正交软件分析,塑钢纤维对高钛重矿渣纤维混凝土:抗折强度最优方案为水胶比0.36、粉煤灰5%、玄武岩纤维1 kg。抗压强度最优方案为:水胶比0.34、粉煤灰5%、玄武岩纤维3 kg。劈裂强度最优方案为:水胶比0.32、粉煤灰10%、玄武岩纤维1 kg。

表6 高钛重矿渣塑钢纤维混凝土强度

Table 6 Strength of high titanium heavy slag black plastic steel fiber reinforced concrete

编号	A: 水胶比	B: 粉煤灰/%	C: 塑钢纤维/kg	28 d 抗折强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa	28 d 劈裂强度/MPa
S-1	0.32	5	1	5.36	49.18	3.72
S-2	0.32	10	2	5.27	45.21	4.18
S-3	0.32	15	3	5.31	55.62	3.14
S-4	0.34	5	2	5.38	60.45	3.53
S-5	0.34	10	3	4.98	44.97	3.29
S-6	0.34	15	1	5.35	48.34	3.94
S-7	0.36	5	3	5.38	48.06	2.73
S-8	0.36	10	1	5.53	42.87	3.73
S-9	0.36	15	2	5.15	39.75	2.45
抗折极差 R_f	0.12	0.11	0.19			
抗压极差 R_c	7.69	8.21	2.75			
劈裂极差 R_t	0.71	0.55	0.75			

2.3 不同纤维掺量下的高钛重矿渣混凝土强度及结果分析

从图1可知,当水胶比不变时,掺加玄武岩纤维、塑钢纤维以及玄武岩和塑钢纤维按1:1混掺后的高钛重矿渣纤维混凝土的抗折强度均有不同程度的提高,但单掺塑钢纤维及玄武岩和塑钢纤维按1:1混掺后的高钛重矿渣纤维混凝土的抗折强度比未掺纤维的高钛重矿渣混凝土提高2%~5%,抗折强度提高较小。当水胶比为0.32,玄武岩纤维掺量为1 kg时,高钛渣纤维混凝土抗折强度达到5.61 MPa,比未掺纤维的高钛重矿渣混凝土提高10%左右。主要原因是玄武岩纤维的弹性模量较大,抗拉强度较高,均匀分布在高钛重矿渣混凝土中的玄武岩纤维有效阻止了裂缝的发展,同时承担了部分抗折产生的拉应力,使高钛重矿渣混凝土的抗折能力增强。

从图2可知,玄武岩纤维及玄武岩和塑钢纤维按1:1混掺对高钛重矿渣混凝土的抗压强度几乎不产生影响。当水胶比较低时,塑钢纤维能和高钛重矿渣混凝土较好的工作,提高高钛重矿渣混凝土的抗压强度。当水胶比为0.34,塑钢纤维

掺量为2 kg时,高钛重矿渣混凝土的抗压强度达到60.45 MPa,比不掺纤维的高钛重矿渣混凝土抗压强度提高16.5%左右。主要原因是塑钢纤维硬度较大,直径较大,长度适中,均匀分布在高钛重矿渣混凝土中的塑钢纤维与高钛渣混凝土中的水泥浆较好的结合,塑钢纤维与高钛重矿渣混凝土一起工作,承担部分压力荷载,减缓高钛重矿渣混凝土裂缝的发展。

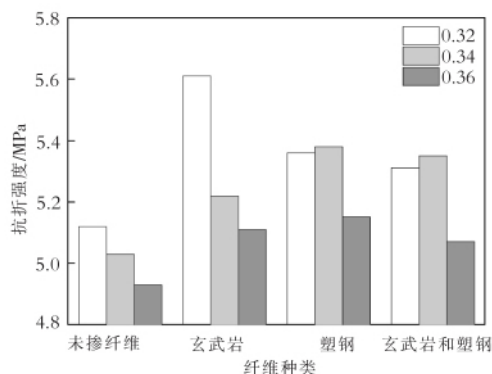


图1 不同纤维不同水胶比高钛重矿渣混凝土抗折强度

Fig.1 Flexural strength of high titanium heavy slag concrete with different fibers and water-to-gel ratios

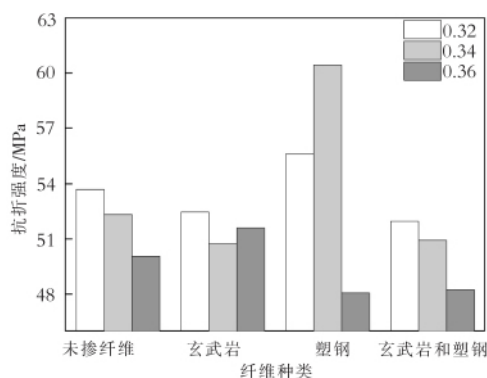


图2 不同纤维不同水胶比高钛渣混凝土抗压强度

Fig.2 Compressive strength of high titanium heavy slag concrete with different fibers and water-to-gel ratios

从图3可知,当水胶比不变时,高钛重矿渣混凝土的劈裂强度随着塑钢纤维的掺加劈裂强度降低;随着玄武岩纤维掺量的增加先增加后降低,当玄武岩纤维掺量为水泥质量的0.9%时,高钛重矿渣纤维混凝土的劈裂强度达到最大3.34 MPa,与未掺加纤维的高钛重矿渣混凝土劈裂强度(2.90 MPa)相比,塑钢纤维和玄武岩纤维在掺量为0.3%~0.9%时均可以提高高钛重矿渣混凝土劈裂强度。

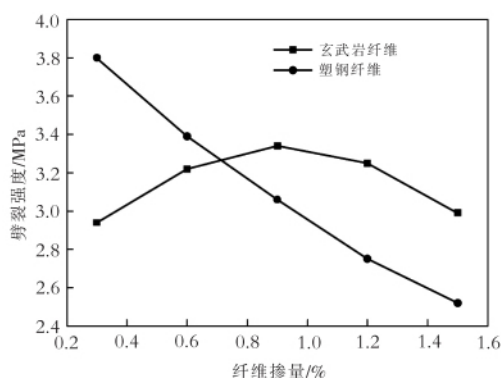


图3 不同纤维掺量时高钛渣纤维混凝土劈裂强度

Fig.3 Splitting strength of high titanium heavy slag fiber concrete with different fiber content

2.4 高钛重矿渣纤维混凝土微观分析

通过 VEGA II XMH 扫描电镜对高钛重矿渣纤维混凝土进行微观分析,得到不同放大倍数下高钛重矿渣塑钢纤维混凝土 SEM 形貌(图4)和高钛重矿渣玄武岩纤维混凝土 SEM 形貌(图5)。

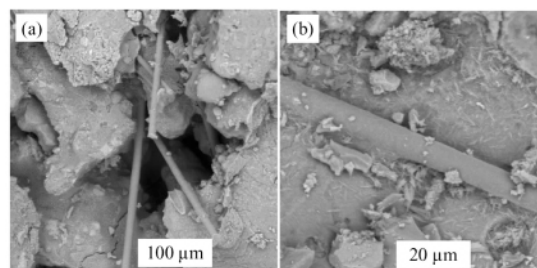


图4 不同放大倍数下高钛重矿渣塑钢纤维混凝土 SEM 形貌
Fig.4 SEM images of high titanium heavy slag plastic steel fiber reinforced concrete

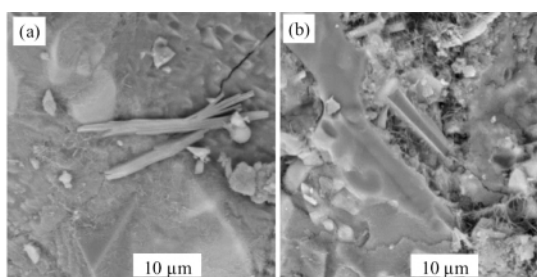


图5 不同放大倍数下高钛重矿渣玄武岩纤维混凝土 SEM 形貌

Fig.5 SEM images of high titanium heavy slag basalt fiber reinforced concrete

从图4(a)可以看出,当水泥浆较少时,塑钢纤维不能和高钛重矿渣混凝土充分结合,且容易发生塑钢纤维分散不均匀现象。当水胶比合适时,塑钢纤维分散均匀,图4(b)中的塑钢纤维与高钛重矿渣混凝土充分结合形成有机整体,有利于提高高钛重矿渣纤维混凝土的强度。从图4.5可得高钛重矿渣混凝土水化产物有 C-S-H、钙矾石和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体以及部分未水化的矿物,其中期胶结作用的水化产物较多^[1]。从图5(a)可以看出当玄武岩纤维太短时,不能与高钛重矿渣混凝土较好结合。图5(b)当玄武岩纤维均匀分布在高钛重矿渣混凝土中,形成网状的玄武岩纤维与水化产物 C-S-H 以及钙矾石能形成较好的整体,且玄武岩纤维分散较好,无团聚现象。另一方面,粉煤灰的掺加也改善了玄武岩纤维、塑钢纤维和高钛重矿渣骨料之间的粘接面,使玄武岩纤维、塑钢纤维和高钛重矿渣骨料之间产生较好的粘接性能^[1]。从微观分析来看也验证了玄武岩纤维容易和高钛重矿渣混凝土结合形成较大的有机整体来抵抗抗折,塑钢纤维和高钛重矿渣混凝土结合形成较高抗压强度的高钛重矿渣纤维混凝土。

综上所述,结合正交试验分析高钛重矿渣混凝土适宜添加塑钢纤维,在低水胶比时配合粉煤灰高钛重矿渣塑钢混凝土强度可以达到 60.45 MPa 达到 GB50010—2010《混凝土结构设计规范》规定的 C55 等级,可以显著提高高钛重矿渣混凝土的强度。

3 结论

1) 从正交试验结果分析,水胶比是影响高钛重矿渣纤维混凝土抗压强度的重要因素;玄武岩纤维对高钛重矿渣混凝土的抗折强度影响较大;塑钢纤维对高钛重矿渣混凝土抗压强度影响较大。

2) 当水胶比不变时,掺加玄武岩纤维、塑钢纤维以及玄武岩和塑钢纤维按 1:1 混掺后的高钛重矿渣纤维混凝土的抗折强度均有不同程度的提高,当水胶比为 0.32 时,玄武岩纤维掺量为 1 kg,

粉煤灰掺量 5% 时,高钛重矿渣纤维混凝土抗折强度达到 5.61 MPa,比未掺纤维的高钛重矿渣混凝土提高 10% 左右。当水胶比为 0.34,塑钢纤维掺量为 2 kg,粉煤灰掺量 5% 时,高钛重矿渣混凝土的抗压强度达到 60.45 MPa,比不掺纤维的高钛重矿渣混凝土抗压强度提高 16.5% 左右,并具有良好的抗劈裂性能。塑钢纤维和玄武岩纤维掺量为 0.3%~0.9% 时均可以提高高钛重矿渣混凝土劈裂强度。

3) 通过 SEM 分析,当粉煤灰掺量 5% 时,玄武岩纤维、塑钢纤维和高钛重矿渣骨料之间产生较好的粘接性能,使玄武岩纤维和骨料结合形成较大的有机整体提高高钛重矿渣混凝土的抗折强度,使塑钢纤维有助于提高高钛重矿渣混凝土的抗压强度。

参考文献

- [1] Huang Shuanghua, Chen Wei, Sun Jinkun, *et al.* Application of high titanium blast furnace slag in concrete materials [J]. New Building Materials, 2006(11): 71-73.
(黄双华, 陈伟, 孙金坤, 等. 高钛高炉渣在混凝土材料中的应用 [J]. 新型建筑材料, 2006(11): 71-73.)
- [2] Sun Jinkun. Fundamental research on application of complex high titanium heavy slag concrete [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
(孙金坤. 全高钛重矿渣混凝土应用基础研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2006.)
- [3] Chen Wei, Huang Shuanghua, Sun Jinkun, *et al.* Experiment research on flexural performance of RC beam by high titanium blast furnace slag [J]. Sichuan Building Science, 2009, 35(4): 51-53.
(陈伟, 黄双华, 孙金坤, 等. 高钛高炉渣钢筋混凝土梁正截面强度试验研究 [J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(4): 51-53.)
- [4] Sun Jinkun, Chen Wei, Wang Jie, *et al.* Experimental research on the cracks of HRB500E high-strength anti-seismic steel bar high-titanium heavy-slag concrete beams [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(3): 78-84, 91.
(孙金坤, 陈伟, 汪杰, 等. HRB500E 高强抗震钢筋高钛重矿渣混凝土梁裂缝试验研究 [J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(3): 78-84, 91.)
- [5] Sun Jinkun, Chen Wei, Li Yingmin, *et al.* Experiment and analysis of bond properties between complex high titanium heavy slag concrete (CHTHSC) and reinforcement [J]. Sichuan Building Science, 2010, 36(4): 216-219.
(孙金坤, 陈伟, 李英民, 等. 复高钛重矿渣混凝土与钢筋粘结性能试验研究 [J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(4): 216-219.)
- [6] Li Xiaowei, Chen Wei, Li Xuewei. Experimental study on seismic performance of high strength concrete columns with high titanium heavy slag as coarse and fine aggregates [J]. Building Structure, 2013, 43(9): 96-100.
(李小伟, 陈伟, 李学伟. 高钛重渣骨料高强混凝土柱抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2013, 43(9): 96-100.)
- [7] Li Weimin, Xu Jinyu. Strengthening and toughening in basalt fiber-reinforced concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008(4): 476-481, 486.
(李为民, 许金余. 玄武岩纤维对混凝土的增强和增韧效应 [J]. 硅酸盐学报, 2008(4): 476-481, 486.)
- [8] Bai Min, Niu Ditao, Jiang Lei, *et al.* Research on improving the mechanical properties and microstructure of concrete with steel fiber [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(10): 2084-2089.
(白敏, 牛荻涛, 姜磊, 等. 钢纤维改善混凝土力学性能和微观结构的研究 [J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(10): 2084-2089.)
- [9] Wang Jun, Wang Hao, Jiang Zhongyou, *et al.* Uniaxial compression failure test and numerical simulation of high titanium blast furnace slag pervious concrete [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020, 41(1): 82-87.
(王军, 王浩, 蒋中友, 等. 高钛高炉渣透水混凝土单轴压缩破坏试验及数值模拟 [J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(1): 82-87.)
- [10] Niu Ditao, Jiang Lei, Bai Min. Experimental analysis on the frost resistance of steel fiber reinforced concrete [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(4): 80-84, 98.
(牛荻涛, 姜磊, 白敏. 钢纤维混凝土抗冻性能试验研究 [J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(4): 80-84, 98.)
- [11] Zhang Lanfang, Yin Yulong, Liu Jingwei, *et al.* Mechanical properties study on basalt fiber reinforced concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(11): 2834-2837.
(张兰芳, 尹玉龙, 刘晶伟, 等. 玄武岩纤维增强混凝土力学性能的研究 [J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(11): 2834-2837.)

编辑 杨冬梅