

钼尾矿在混凝土中应用的研究进展

魏毋忧, 王炜, 陈桂明, 袁健, 于素慧, 马坤, 杨佳男

(火箭军工程大学作战保障学院, 陕西 西安 710025)

摘要: 钼尾矿作为全球开采钼矿产资源产生的固体废弃物之一, 将其替代混凝土细骨料或水泥既可解决环境污染, 还可弥补天然砂资源短缺的现状, 是钼尾矿最经济、最环保的资源化利用方式之一, 符合绿色可持续发展的战略要求。本文综述了钼尾矿在混凝土中应用的研究进展, 分析了钼尾矿的理化特性, 探讨了钼尾矿混凝土的工作性能、力学性能及耐久性能, 提出了钼尾矿在混凝土应用中现存的主要问题。以期为实现钼尾矿在混凝土中的广泛应用打下基础。

关键词: 钼尾矿; 骨料; 水泥; 混凝土; 工作性能; 力学性能; 耐久性能

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.01.021

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2023)01-0155-07

我国是世界上少数几个矿种齐全、矿产资源总量丰富的大国之一^[1], 大量的非金属矿和金属矿在采集和加工过程中伴随产生约占 20% 总量的尾矿^[2]。部分统计数据表明, 目前我国累计产生的尾矿量高达 59.7 亿 t^[3], 大量尾矿长期搁置, 造成土地侵占、环境污染, 其资源优化利用迫在眉睫。经研究发现, 不同磨细尾矿在替代混凝土骨料及水泥方面具有一定的作用和潜力^[4-5], 其中最有效的途径之一是将作为制备混凝土的骨料, 这样不仅使采矿废料得到有效利用, 而且节约了混凝土的制备成本。常见的有非金属尾矿煤矸石^[6]和金属尾矿铁尾矿^[7], 它们均在替代混凝土骨料方面发挥了良好的性能。

钼作为一种常见金属, 具有强度高、熔点高、耐腐蚀和耐磨研等性质^[8]。我国钼资源储量为 840 万 t, 位居世界首位^[9], 产生了大量的钼尾矿。作为常见的金属尾矿之一, 虽然相关研究表明钼尾矿作为混凝土的骨料具有节能、降耗等优点^[10], 但由于缺乏成熟的利用技术, 使得当前钼尾矿综合利用率不足 5%^[11]。不仅如此, 由于不同

地区钼尾矿物体现出明显的物理化学性质差异性, 如何处理利用优质钼尾矿骨料还需系统性地研究。为此, 本文基于现有的一些研究报道^[10,12-22], 从钼尾矿的物理化学特性及其作为骨料、水泥替代物制备混凝土的工艺, 到钼尾矿混凝土的工作性能、力学性能及耐久性能尝试性的进行归纳和总结, 并提出当前钼尾矿在混凝土应用方面存在的问题, 以期钼尾矿混凝土的研究及应用打下基础。

1 钼尾矿特性

1.1 物理特性

我国河南省钼矿资源储量最大, 占全国总储量的 29.9% 左右, 陕西、吉林次之^[23]。由于钼尾矿中有价组分的回收要求, 钼矿石需经多次破碎精选, 最终产生极细的钼尾矿颗粒。这些处理的钼尾矿中含有很多杂质, 呈现的颜色较为混杂。经 0.3 mm 标准方孔筛分后的钼尾矿, 颗粒表观较天然河砂各级颗粒的长宽比大, 即针棒状颗粒, 颗粒表面凹槽多。放大后主要观察到的是透明状的石英以及非透明的黑云母^[12]。钼尾矿表面体现

收稿日期: 2021-01-13

基金项目: 2019 年陕西省自然科学基金: 钼尾矿骨料钢管混凝土短柱轴压力学性能及尺寸效应研究 (XJKFJJ201803); 2019 年火箭军工程大学青年基金: 新型装配式蜂窝状薄壁型钢-轻骨料混凝土组合结构力学性能研究 (2019QNJJ005)

作者简介: 魏毋忧 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事国防工程建筑材料的研究。

通信作者: 王炜 (1979-), 男, 博士, 副教授。主要从事国防工程建筑材料的研究。

出的不规则及其具有的粗糙性，可以预示其作为骨料能够提高混凝土拌合物内部的粘结强度。

通过测定获得钼尾矿的表观密度在 2.55~2.61 g/cm³ 之间，堆积密度变化范围为 1.35~1.45 g/cm³，含水率在 0.5% 左右^[13,15-17]，其表观密度与天然砂的表观密度 2.645 g/cm³^[15] 近乎相似。钼尾矿的细度模数为 0.8~1.3，属于细砂，小于天然砂细度模数 2.45^[15-17]。由此，钼尾矿的物理特性表明了其作为混凝土细骨料的可行性^[4]。

1.2 化学特性

通过对比钼尾矿砂与天然砂的主要化学成分（见表 1），可以得到钼尾矿主要化学成分是

SiO₂、Fe₂O₃、Al₂O₃，而其他成分主要为氧化铁、氧化铝、氧化钾等金属氧化物，且含量较低。对于有害成分如重金属含量的研究，韩国学者 Salman^[4] 对钼尾矿中的重金属含量进行了测试，结果表明其含量远低于美国联邦法规^[24] 中提到的限值，对于国内文献关于此方面的研究未见有明确报道。不仅如此，由于地域的区别与矿产资源的的不同，造成钼尾矿的化学成分也不同，例如陕西省商洛市九龙钼矿^[17] 产出的钼尾矿 SiO₂ 含量占 72.38%，与天然砂 SiO₂ 含量 71.34% 最为接近，其余成分与天然砂也近乎相似。由此，钼尾矿的化学特性进一步表明了其具有替代天然砂的潜力。

表 1 钼尾矿砂与天然砂的主要化学成分/%^[16,18,25-27]

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	SO ₃	烧失量
钼尾矿	44.85~72.38	3.48~9.12	9.19~15.57	1.08~6.57	2.25~19.71	0.27~1.77	1.06~1.93	1.06~5.89	0.13~0.65	0.22~7.36	0.04~5.00	1.10~2.56
天然砂	71.34	8.89	5.73	1.16	5.49	1.56	1.66	-	-	-	-	-

1.3 矿物相组成

钼矿床中钼品位普遍较低，并且伴生矿物种类多，造成了钼尾矿的化学组成及矿物组成也较为复杂，钼矿床的成因和特性不同使钼尾矿呈现出明显的地域性^[9]。钼尾矿中不仅存在有价金属钨、钼外，还含有如铜矿物、铁矿物、金红石和长石等其他有价金属组分及非金属组分，其组成成分主要为方解石和白云石^[9,11,13]。

通过 XRD 衍射图谱确定钼尾矿中的各种矿物相。在 Salman^[4] 的报道中可以观察到，韩国堤川市钼尾矿的主要矿物成分以石英、金红石和透辉石为主。

在刘世昌^[19] 的报道中得出，陕西省洛南县的钼尾矿主要矿物成分以石英为主，且含有少量的正长石、金云母和角闪石等，其中石英以非活性 SiO₂ 形式存在。综上所述，钼尾矿矿物成分受地域影响，但经对比发现，钼尾矿大部分矿物成分均以稳定的氧化物形式存在，所以其化学活性相对稳定。

2 钼尾矿混凝土试块制备

高山等^[12] 利用陕西省商洛钼尾矿替代混凝土细骨料，经预处理后采用 4 种替代率：0%、25%、50% 和 100%，分别制备了 C40 和 C50 等级的钼尾矿混凝土，其配合比见表 2。

表 2 1 m³ 的钼尾矿混凝土配合比^[12]

Table 2 Concrete mix ratio of 1 m ³							
混凝土 强度 等级	替代率/ %	混合比例/(kg·m ⁻³)					
		42.5R级 配水泥	水	天然石灰 岩砾石	天然砂	钼尾矿	增塑剂
C40	0	476	200	1155	569	0	0
	25	476	200	1155	427	142	0
	50	476	200	1155	285	284	0
	100	476	200	1155	0	569	0
C50	0	550	170	1245	484	0	5.5
	25	550	170	1245	363	121	5.5
	50	550	170	1245	242	242	5.5
	100	550	170	1245	0	484	5.5

曹晓润等^[13] 使用洛阳栾川钼尾矿和天然砂、P.O 42.5、5~25 mm 碎石、高效减水剂进行了 C40 钼尾矿混凝土的制备（见表 3）。钼尾矿作为细骨料的替代率分别为 0%、20%、30%、40% 和 50%。

刘世昌使用钼尾矿、河砂、石子、外加剂和水等原料按照一定的配合比（见表 4），采用单卧轴强制式混凝土搅拌机搅拌均匀，浇筑后振动成型，置于标准条件下养护并进行了相关的力学性能实验^[19]。

崔孝炜等使用钼尾矿、P.Q 32.5 水泥和减水剂进行混凝土的制备。其中，将钼尾矿和水泥的质量比选取 4:6、4.5:5.5 和 5:5 作为实验条件。减

水剂替代率占水泥的比例分别选取 0.3%、0.4% 和 0.5%，水灰比分别选取 0.23、0.25 和 0.27。充分搅拌均匀后将浆体倒入模具，振动成型，在标准养护完成后进行实验^[10]。

表 3 1 m³ 的钼尾矿混凝土配合比^[13]
Table 3 Concrete mix ratio of 1 m³

混凝土 强度等级	砂率/%	水灰比	混合比例/(kg·m ⁻³)					
			水泥	水	石子	天然砂	钼尾矿	减水剂
C40	0.38	0.39	435	170	1113	682	0	4.0
	0.38	0.39	435	170	1113	546	136	4.35
	0.38	0.39	435	170	1113	477	205	4.35
	0.38	0.39	435	170	1113	409	273	4.35
	0.38	0.39	435	170	1113	341	341	4.35

表 4 1 m³ 的钼尾矿混凝土配合比^[19]
Table 4 Concrete mix ratio of 1 m³

混凝土 强度等级	水胶比	混合比例/(kg·m ⁻³)					
		胶凝材料	水	石子	河砂	钼尾矿	替代率(%)
C60	0.26	550	143	1387	463	0	0
	0.26	550	143	1387	370	136	20
	0.26	550	143	1387	278	205	40
	0.26	550	143	1387	185	273	60
	0.26	550	143	1387	93	341	80
	0.26	550	143	1387	0	463	100

胡家兵等人使用杭州余杭区钼尾矿、P.O 42.5、粉煤灰、天然河砂、碎石及高效泵送剂进行了钼尾矿混凝土的制备。他们采用固定混凝土配合比（见表 5），通过磨细钼尾矿粉分别替代水泥和粉煤灰进行磨细钼尾矿对混凝土工作性及强度的研究^[18]。

表 5 1 m³ 钼尾矿混凝土配合比^[18]
Table 5 Concrete mix ratio of 1 m³

钼尾矿 替代率/%	水胶比	混合比例/(kg·m ⁻³)						
		水泥	水	石	砂	粉煤灰	钼尾矿	高效泵 送剂
基准:0	0.38	380	175	1030	760	80	0	4.6
粉煤灰:100	0.38	380	175	1030	760	0	80	4.6
水泥:5	0.38	361	175	1030	760	80	19	4.6
水泥:10	0.38	342	175	1030	760	80	38	4.6
水泥:15	0.38	323	175	1030	760	80	57	4.6
水泥:20	0.38	304	175	1030	760	80	76	4.6

在上述基础上，崔孝炜等^[15]筛选+0.16 mm 粒级的钼尾矿用作细骨料，-0.16 mm 粒级钼尾矿用于制备胶凝材料。首先将-0.16 mm 粒级钼尾矿、

矿渣、水泥熟料和石膏单独粉磨，然后按质量比 4:3:2:1 混合均匀，制得胶凝材料。随后，以石子为粗骨料，+0.16 mm 粒级钼尾矿为细骨料，减水剂与胶凝材料的质量比为 0.4%，水胶比为 0.26。

3 钼尾矿混凝土特性

3.1 钼尾矿混凝土的工作性能

根据研究报道^[13,28]总结得出了不同强度等级、不同替代率钼尾矿骨料混凝土与坍落度的关系（见图 1）。随着钼尾矿替代率的增加，钼尾矿骨料混凝土的坍落度及扩展度逐渐降低，和易性良好，无泌水现象^[13]。由图 1 可知，在钼尾矿替代率为 100% 时，C60 钼尾矿骨料混凝土坍落度降低近 60%。可能因为钼尾矿的增加使得其粗糙的表面与水泥浆体界面结合更为密实，且钼尾矿在混合过程中吸水较多增加了水泥浆体的粘接强度所致。从钼尾矿骨料高强混凝土工作性能来看，钼尾矿骨料高强混凝土各项工作性能比普通高强混凝土表现优良，钼尾矿骨料高强混凝土的各项和易性的指标符合高强混凝土对和易性的要求^[19]。

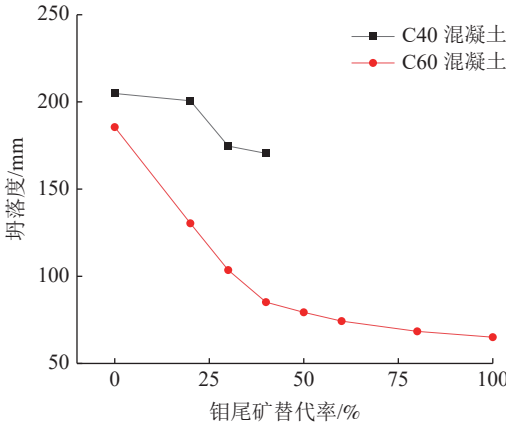


图 1 不同强度等级不同替代率钼尾矿混凝土对坍落度的影响^[13,28]

Fig.1 Effect of different strength grade and content of MoT concrete on slump^[13,28]

3.2 钼尾矿混凝土的力学性能

根据研究报道^[13]总结得出不同强度等级、不同替代率钼尾矿骨料混凝土与抗压强度的关系（见图 2）。由图 2 可知，强度等级为 C40 的钼尾矿骨料混凝土抗压强度随钼尾矿替代率的增加呈线性下降趋势。在钼尾矿替代率小于 40% 时，随钼尾矿替代率的增加，C60 较 C40 强度等级钼尾矿骨料混凝土的抗压强度随钼尾矿替代率的增加

下降明显。这可能因为强度等级较大的钼尾矿骨料混凝土抗压强度受钼尾矿替代率的影响较为明显,钼尾矿中的粉末起到了团聚的作用,降低了水化物形成所需的能量,并加速了水化物的结晶过程。在钼尾矿替代率大于 40% 时, C60 强度等级钼尾矿骨料混凝土抗压强度随钼尾矿替代率的增加而增大。与 0% 替代率混凝土相比, 100% 替代率钼尾矿骨料混凝土的抗压强度下降了约 10%。由此判断,就抗压强度而言,在合适的钼尾矿替代率下,使用钼尾矿作为混凝土细骨料是可行的。

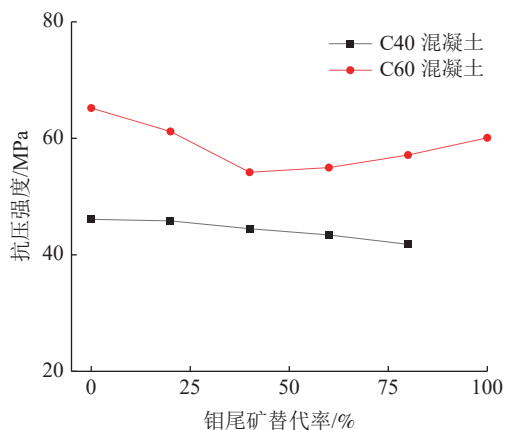


图2 不同强度等级不同替代率钼尾矿混凝土对抗压强度的影响^[13]

Fig.2 Effect of different strength grades and content of MoT concrete on compressive strength

若钼尾矿的砂率过大,则钼尾矿骨料混凝土内部孔隙增大,会造成钼尾矿骨料混凝土抗压强度降低(见图3)。由图3可知,在砂率为 0.35, 养护 28 d 的钼尾矿骨料混凝土的抗压强度最佳。当钼尾矿替代率超过 35% 时,钼尾矿骨料混凝土养护 7 d 和 28 d 的抗压强度呈现下降趋势。这可能是由于钼尾矿活性较低,不能参与到水化反应中,同时钼尾矿细度过大,对整体混合材料的黏结性和强度作用不明显所导致。由此判断,当钼尾矿骨料混凝土砂率为 0.40 时,养护 28 d 的钼尾矿骨料混凝土强度既能保证强度要求,又能较多地利用钼尾矿^[15]。

在其他力学性能方面,钼尾矿骨料混凝土养护 28 d 的劈裂抗拉强度变化趋势与同条件下钼尾矿骨料混凝土抗压强度的变化趋势相似。无论钼尾矿骨料混凝土强度等级多大,较高的钼尾矿替代率都会导致其劈裂抗拉强度大幅度降低。同时,钼尾矿替代率的增加还会使钼尾矿骨料混凝土

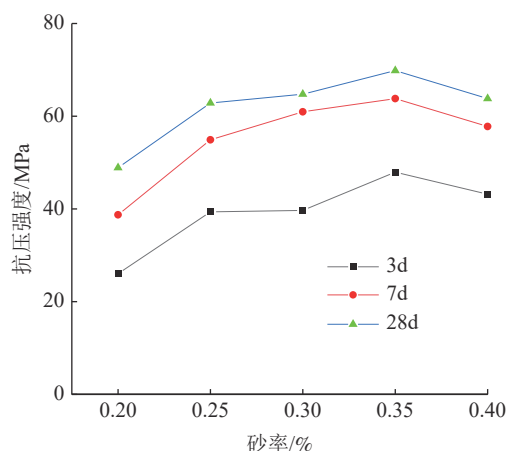


图3 砂率对钼尾矿混凝土抗压强度的影响^[15]

Fig.3 Effect of sand ratio on compressive strength of MoT concrete test blocks

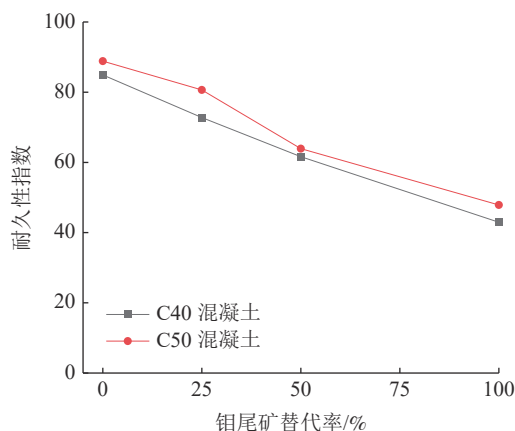


图4 不同取代率下钼尾矿混凝土的耐久性系数^[12]

Fig.4 Durability factor for MoT concrete with different replacement ratio

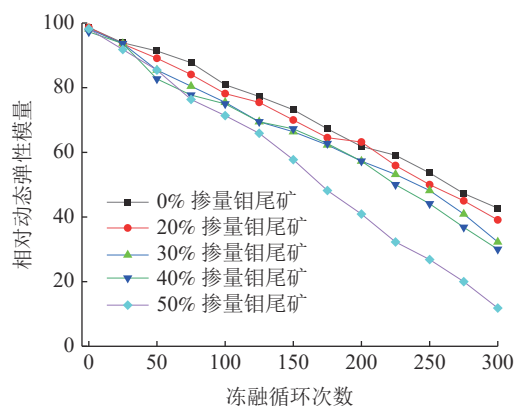


图5 不同替代率钼尾矿混凝土对冻融循环下相对弹性模量的影响^[13]

Fig.5 Effect of concrete with ground MoT on relative dynamic modulus of elasticity under freeze-thaw resistance^[13]

土的弹性模量呈缓慢下降趋势^[12]。钼尾矿骨料高强混凝土养护 3 d 的力学性能均比普通高强混凝土

要低,但养护 28 d 的钼尾矿骨料高强混凝土力学性能得到了极大改善,其抗压强度、抗折强度和劈裂抗拉强度都已超过普通高强混凝土,仅弹性模量比普通高强混凝土要低,但整体差异不大。这体现了钼尾矿骨料高强混凝土较普通高强混凝土具有更高的韧性,且其脆性较普通高强混凝土更好^[19]。由此判断,钼尾矿骨料混凝土的力学性能受钼尾矿替代率、砂率和养护条件的大小等因素影响。

3.3 钼尾矿混凝土的耐久性能

3.3.1 钼尾矿混凝土抗冻融性能

钼尾矿骨料混凝土的耐久性指数为推荐标准的 60^[12]。当 100% 替代率的 C40 和 C50 钼尾矿骨料混凝土在大约 225 次和 250 次冻融循环后的耐久性系数均小于 60。但是随着使用更细的骨料,钼尾矿骨料混凝土的抗冻融性能会降低。因为使用更细的骨料会增加混凝土的总孔隙率,降低混凝土的抗拉强度。由图 4 可知,除 50%~100% 替代率的钼尾矿骨料混凝土外,C40 和 C50 强度等级的钼尾矿骨料混凝土在其余替代率下均符合耐久性标准。

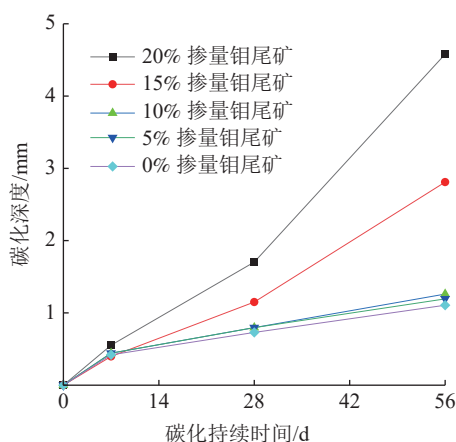


图6 不同替代率钼尾矿混凝土对碳化深度的影响^[18]

Fig.6 Effect on carbonization depth of concrete with ground MoT^[18]

随着钼尾矿替代率的增加,在相同的冻融循环次数下,钼尾矿骨料混凝土的相对动态弹性模量均有下降。由此判断,冻融循环下钼尾矿骨料混凝土的相对动态弹性模量可以满足要求。由图 5 所示,当钼尾矿替代率为 40% 时,与未添加钼尾矿的混凝土相对动态弹性模量接近,这样既能满足耐久性能要求,又能较大程度地利用钼尾矿资源。

3.3.2 钼尾矿混凝土抗碳化性能

少量钼尾矿替代水泥可以提高混凝土的抗碳化性能。因为钼尾矿的掺入可以降低混凝土的孔隙率,提高混凝土内部的结合,并减缓碳化。由图 6 可知,当钼尾矿替代率小于 10% 时,混凝土的抗碳化性几乎没有受到影响。当钼尾矿替代率大于 10% 时,随着钼尾矿替代率的增加,钼尾矿混凝土碳化深度呈线性增加,抗碳化性能随碳化持续时间的增加下降较大。因为大量的钼尾矿使混凝土碱性下降,促进了碳化反应的进行,导致钼尾矿混凝土的抗碳化性降低^[18]。

4 钼尾矿混凝土研究存在的问题

(1) 目前国内针对钼尾矿的研究主要集中在有价值组分回收工艺和建筑材料的应用等方面。关于钼尾矿主要化学成分中的有害成分(如重金属)XRD 测试及其对混凝土制品的影响,这一点对于钼尾矿在混凝土中的应用起关键作用,但在此方面的研究未见明确报道,还需重点关注。

(2) 国内外对于不同强度等级的钼尾矿混凝土性能的研究尚未完全开展,特别是钼尾矿高强混凝土的制备方面还未有系统报道,目前的研究文献只报道了 C40、C50 和 C60 强度等级的钼尾矿混凝土,这是下一步需要系统开展的研究工作。

(3) 不同地域的钼尾矿在混凝土中的替代率到底多大才能保证混凝土各项性能指标达到最优,还需要进一步地研究。

(4) 特殊环境下,例如考虑高温、冻融和盐雾等多种耦合条件,不同强度等级、不同替代率的钼尾矿混凝土的工作性能、力学性能及耐久性能是以后良好的研究方向。

5 结 论

(1) 钼尾矿的密度、细度模数、结构及化学组成与天然河砂相近,这些特征表明钼尾矿替代混凝土细骨料和水泥具有可行性。

(2) 钼尾矿骨料混凝土力学性能受钼尾矿替代率、砂率及养护条件等因素影响。钼尾矿替代率对混凝土抗压强度影响较小,在合适的砂率及养护条件下,钼尾矿可以作为混凝土制备中的细骨料。

(3) 当钼尾矿骨料替代率为 40% 时, 钼尾矿骨料混凝土能满足混凝土耐久性能要求, 同时也能较大程度地利用钼尾矿资源。当钼尾矿替代水泥的替代率小于 10% 时, 混凝土的抗碳化性几乎不受影响。当钼尾矿替代水泥的替代率大于 10% 时, 随着钼尾矿替代率的增加, 钼尾矿混凝土碳化深度呈线性增加, 抗碳化性能随碳化持续时间的增加下降较大。

参考文献:

- [1] 中国矿产资源报告 (2019)[R]. 自然资源部, 2019.
China mineral resources report (2019)[R]. Ministry of Natural Resources, 2019.
- [2] 张萌. 尾矿砂在混凝土中的应用试验研究[J]. 商品混凝土, 2020(8):74-75.
ZHANG M. Experimental study on the application of tailings sand in concrete[J]. Commercial Concrete, 2020(8):74-75.
- [3] 徐航, 刘诗竹. 我国尾矿综合利用发展现状及前景展望[J]. 农家参谋, 2019, 625(14):206-206.
XU H, LIU S Z. Development status and prospects of comprehensive utilization of tailings in China[J]. Farm Staff, 2019, 625(14):206-206.
- [4] Siddique S, Jang J G. Assessment of molybdenum mine tailings as filler in cement mortar[J]. Journal of Building Engineering, 2020:101322.
- [5] 周文娟, 林松. 尾矿细砂砂浆试验研究[J]. 混凝土, 2013(7):108-109+123.
ZHOU W J, LIN S. Experimental study of fine tailing sand mortar[J]. Concrete, 2013(7):108-109+123.
- [6] 王爱国, 朱愿愿, 徐海燕, 等. 混凝土用煤矸石骨料的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7):2076-2086.
WANG A G, ZHU Y Y, XU H Y, et al. Research progress on coal gangue aggregate for concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(7):2076-2086.
- [7] 崔孝炜, 邓惋心, 赵雨曦, 等. 利用铁尾矿作为混凝土掺和料的基础研究[J]. 非金属矿, 2020, 43(4):88-91.
CUI X W, DENG W X, ZHAO Y X, et al. Basic research on the preparation of mineral admixtures with iron ore tailings[J]. Non-Metallic Mines, 2020, 43(4):88-91.
- [8] 李峰, 崔孝炜, 刘璇, 等. 钼尾矿在建筑材料中的二次利用研究进展[J]. 矿产综合利用, 2021(3):132-139.
LI F, CUI X W, LIU X, et al. Research progress on secondary utilization of molybdenum tailings in building materials[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(3):132-139.
- [9] 伍红强, 刘诚, 陈延飞. 我国钼尾矿资源综合利用研究进展[J]. 金属矿山, 2018(8):169-174.
WU H Q, LIU C, CHEN Y F. Research progress of and comprehensive utilized on Molybdenum Tailings Resources in China[J]. Metal Mine, 2018(8):169-174.
- [10] 崔孝炜, 狄燕清, 南宁, 等. 钼尾矿骨料混凝土的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2016(8):84-87.
CUI X W, DI Y Q, NAN N. Experimental research on molybdenum tailings aggregate concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2016(8):84-87.
- [11] 席晓光, 张金良. 浅谈钼尾矿综合利用[J]. 矿业工程, 2013, 11(5):62-64.
XI X G, ZHANG J L. Introduction to Molybdenum Tailings Comprehensive Utilization[J]. Mining Engineering, 2013, 11(5):62-64.
- [12] Gao S, Kang S B. Sustainable applications for utilizing molybdenum tailings in concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 266:122020.
- [13] 曹晓润, 刘冬, 李建伟, 等. 利用钼尾矿配制混凝土的可行性研究[J]. 河南建材, 2016(4):268-270.
CAO X R, LIU D, LI J W, et al. Feasibility study of using molybdenum tailings to prepare concrete[J]. Henan Building Materials, 2016(4):268-270.
- [14] 崔孝炜, 狄燕清, 刘璇, 等. 利用商洛钼尾矿制备混凝土[J]. 矿产综合利用, 2017(4):102-106.
CUI X W, DI Y Q, LIU X. Preparation of high performance concrete with molybdenum tailings of Shangluo[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017(4):102-106.
- [15] 崔孝炜, 狄燕清, 庞华, 等. 用某钼尾矿制备高性能混凝土的试验[J]. 金属矿山, 2017(7):193-196.
CUI X W, DI Y Q, PANG H. Research on preparation of high performance concrete with molybdenum tailings[J]. Metal Mine, 2017(7):193-196.
- [16] 李春, 王恩峰, 崔乐, 等. 钼尾矿免蒸压加气混凝土的试验研究[J]. 矿产综合利用, 2017(5):80-84.
LI C, WANG E F, CUI L, et al. Experimental study on non-autoclaved aerated concrete from molybdenum tailings[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017(5):80-84.
- [17] 崔孝炜, 狄燕清, 南宁, 等. 掺钼尾矿高性能混凝土的制备[J]. 金属矿山, 2017(1):192-196.
CUI X W, DI Y Q, NAN N, et al. Preparation of high performance concrete with molybdenum tailings[J]. Metal Mine, 2017(1):192-196.
- [18] 胡家兵, 朱领, 张伟. 磨细钼尾矿粉用作混凝土掺合料的性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2016(12):88-91.

- HU J B, ZHU L, ZHANG W. Study on the performance of ground molybdenum tailings powder as concrete admixture[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2016(12):88-91.
- [19] 刘世昌. 极细颗粒钼尾矿制备高强混凝土的研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2017.
- LIU S C. Study on preparation of high strength concrete by ultrafine particle molybdenum tailings[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2017.
- [20] 张亮, 杨卉芑, 冯安生. 全球钼矿资源现状及市场分析[J]. *矿产综合利用*, 2019(3):11-16.
- ZHANG L, YANG H P, FENG A S. Study on general situation and analysis of supply and demand of global molybdenum resource[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(3):11-16.
- [21] 郭家林, 王之宇, 刘明宝. 铝粉增强钼尾矿发泡水泥力学性能研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(4):167-171.
- GUO J L, WANG Z Y, LIU M B. Study on reinforced mechanical properties of molybdenum tailings foam cement by aluminum powder[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(4):167-171.
- [22] 杨凯志, 陈红兵, 胡真, 等. 广东某铜钼多金属硫化矿混合精矿中钼的高效分离[J]. *矿产综合利用*, 2020(2):44-48.
- YANG K Z, CHEN H B, HU Z, et al. Research on efficient separation Mo for Cu-Mo mixed concentrate from Guangdong copper-molybdenum polymetallic sulfide ore[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(2):44-48.
- [23] 胡贵生, 章超, 钱晨阳, 等. 钼尾矿资源综合利用最新研究进展概述[J]. *材料导报*, 2019, 33(Z2):233-238.
- HU G S, ZHANG C, QIAN C Y, et al. Recent research progress of comprehensive utilization of molybdenum tailings resources[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(Z2):233-238.
- [24] Code of Federal Regulations(CFR), National Archives and Records Administration, US Government Printing Office, Washington.
- [25] 李建涛, 崔杰, 王之宇. 利用商洛钼尾矿制备混凝土保温砌块的试验研究[J]. *新型建筑材料*, 2015, 42(3):80-83.
- LI J T, CUI J, WANG Z Y. Experimental study on the preparation of heat-insulating concrete block using Shangluo molybdenum tailings[J]. *New Building Materials*, 2015, 42(3):80-83.
- [26] 聂琪, 戈保梁, 张晋禄, 等. 微波助磨技术处理某钼矿[J]. *矿产综合利用*, 2019(1):39-43.
- NIE Q, GE B L, ZHANG J L, et al. Microwave-assisted grinding of a molybdenum ore[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(1):39-43.
- [27] 简胜, 胡岳华, 孙伟. 西藏某低品位铜钼矿选矿工艺研究[J]. *矿产综合利用*, 2019(5):32-36.
- JIAN S, HU Y H, SUN W. Process study on a low-grade mineral copper-molybdenum ore in Tibet[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(5):32-36.
- [28] Bai Z Y, Li K, Ma X P, et al. Preparation and characterization of molybdenum tailings-based water storage material[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2019, 236:121791.

Research Progress on Application of Molybdenum Tailings in Concrete

Wei Wuyou, Wang Wei, Chen Guiming, Yuan Jian, Yu Suhui, Ma Kun, Yang Jianan
(Combat Support College of Rocket Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi, China)

Abstract: Molybdenum tailings, as one of the solid wastes which are produced by the exploitation of molybdenum mineral resources in the world, can not only solve the environmental pollution, but also make up for the shortage of natural sand resources by replacing concrete fine aggregate or cement with molybdenum tailings. It is one of the most economically and environmentally friendly resource utilization method of molybdenum tailings, due to it can able to meet the strategic requirements of green and sustainable development. In this paper, the research progress of application of molybdenum tailings in concrete is summarized. Firstly, the physical and chemical properties of molybdenum tailings are analyzed, and secondly, the working performance, mechanical performance and durability performance of molybdenum tailings concrete are discussed, finally the main problems existing in application of molybdenum tailings in concrete are suggested. This work is expected to be useful for the wide application of molybdenum tailings in concrete.

Keywords: Molybdenum tailings; Aggregate; Cement; Concrete; Workability; Mechanical properties; Durability