DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.01.006
宁逢伟, 丁建彤, 白银, 等. 纳米级掺合料和粗合成纤维对湿喷混凝土回弹率的影响[J]. 水利水运工程学报, 2019(1): 42-49. (NING Fengwei, DING Jiantong, BAI Yin, et al. Effect of nanometer scale admixture and macro synthetic fiber on the rebound rate of wet mix shotcrete[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(1): 42-49. (in Chinese))

纳米级掺合料和粗合成纤维对湿喷混凝土回弹率的影响

宁逢伟[1], 丁建彤[2], 白　银[1], 杨　森[2], 雷英强[2]

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京　210029; 2. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都　611730)

摘要: 降低喷射混凝土回弹率可提高支护效率、降低地下空间的坍塌及岩爆风险。为分析纳米级掺合料、粗合成纤维对喷射混凝土回弹率的影响,基于湿喷工艺对比了纳米级掺合料与同掺量硅灰在改善湿喷混凝土回弹率方面的差异;比较了不同纳米级掺合料掺量、细度条件下各湿喷混凝土的回弹率区别;研究了粗合成纤维掺量、长径比、混杂方式等对回弹率的影响。结果表明:应用纳米级掺合料有助于降低湿喷混凝土的回弹率;与同掺量硅灰相比,纳米级掺合料湿喷混凝土的回弹率降低了 17% ~25%,且回弹率随纳米级掺合料掺量提高、细度增加而降低。粗合成纤维可降低湿喷混凝土的回弹率,但受材质影响较小,存在较低回弹率的最佳长径比和掺量,分别为 38 和 10 kg/m^3。长径比 76 和长径比 30 的 2 种粗合成纤维混杂使用时,可进一步降低回弹率。

关　键　词: 湿喷混凝土; 回弹率; 纳米级掺合料; 粗合成纤维

中图分类号: TU528　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-640X(2019)01-0042-08

使用纳米级掺合料和粗合成纤维制备的湿喷混凝土凝结速度快、早期强度高,支护效率明显优于传统湿喷混凝土,尤其在高地应力、大埋深、高外水压等复杂地质条件下,它能够更早地发挥围岩的自稳能力,更大程度地降低坍塌、岩爆等工程灾害发生的风险。喷射混凝土的支护效率除了受强度发展速度的影响之外,还与喷层厚度的增长速率密切相关,即喷层越厚,支护能力越强,结构越安全。降低回弹率是加快喷层厚度增长的重要手段之一,它可提高施工效率,在较短的时间内实现预期喷射厚度,及早地控制围岩不利变形。可见,研究如何降低湿喷混凝土的回弹率具有重要的工程意义。

纳米级掺合料为一种市售矿物外加剂,兼具减水和高强特性,目前尚无相关技术规范可对其进行精确定义。与普通湿喷混凝土相比,纳米级掺合料湿喷混凝土具有一定的低回弹优势。但其与硅灰湿喷混凝土回弹性能有何差异,其掺量和细度对回弹率有何影响,是否仍可进一步优化,均需进一步研究。

与素喷射混凝土相比,无论是粗合成纤维[1]、微合成纤维[2]还是钢纤维[3]湿喷混凝土均具有较低的回弹率。当前,钢纤维湿喷混凝土堵管问题突出[4],采用粗合成纤维取代钢纤维制备纤维增韧喷射混凝土已成为一种趋势。研究粗合成纤维品质(例如掺量、长径比等因素)对湿喷混凝土回弹率的影响,将有助于提高粗合成纤维的应用技术水平。

针对上述问题,对比了纳米级掺合料和同掺量硅灰对湿喷混凝土回弹率的影响,考察了纳米级掺合料掺量、细度对回弹率的影响。此外,还比较了不同的粗合成纤维材质、长径比、掺量、混杂方式等条件下的湿喷混凝土回弹率。

收稿日期: 2017-12-14

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0401610);国家自然科学基金资助项目(51739008);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(Y418008);中国水利水电第七工程局有限公司项目(2015-458-20)

作者简介: 宁逢伟(1986—), 男,吉林长春人, 工程师, 博士研究生, 主要从事混凝土病害诊断、修复与后效评估技术研究。E-mail: fwning@nhri.cn

1　原材料及试验方案

1.1　原材料

水泥品种为 P · O 42.5R，密度为 3.11 g/cm^3，比表面积 340 m^2/kg，初凝和终凝时间分别为 140 和 215 min，3 d 和 28 d 抗折强度为 6.7 和 8.4 MPa，抗压强度为 30.3 和 53.0 MPa。除特别说明外，纳米级掺合料为南京水利科学研究院专利产品（专利号：201210343040.7），编号为 NM1。另外 2 种纳米级掺合料为市售产品，编号分别为 NM2 和 NM3。纳米级掺合料主要由高含量的 SiO_2 和高效减水组分组成，减水率在 25% 左右。3 种纳米级掺合料与硅灰的物理力学性能见表 1。细骨料为大理岩人工砂，细度模数 2.8，石粉含量 12.5%，饱和面干吸水率 1.3%；粗骨料为 5 ~15 mm 的大理岩人工碎石；纤维采用了丙纶、腈纶、涤纶等材质的粗合成纤维或微合成纤维和 1 种钢纤维，其物理性能见表 2；减水剂为市售聚羧酸系高效减水剂，1.0% 掺量时减水率达 20%；速凝剂为市售无碱液体速凝剂，8% 掺量时 JC 477 检测初、终凝时间分别为 3.3 和 8.5 min。

表 1　纳米级掺合料和硅灰的物理力学性能

Tab. 1　Physical and mechanical properties of NSA and silica fume

品种	体积平均粒径 $D_{(4,3)}$/nm	SiO_2 含量/%	减水率/%	活性指数/%		
				3 d	7 d	28 d
硅灰	168	92	/	151	154	181
NM1	128	82	24	156	155	173
NM2	137	84	26	157	162	180
NM3	147	84	25	159	162	150

注：3 种纳米级掺合料减水率测试时，掺量为 10%。

表 2　纤维物理性能

Tab. 2　Physical properties of fiber

编号	纤维材质	公称长度/mm	当量直径/mm	长径比	密度/(kg · m^{-3})
BF30	丙纶（粗纤维）	24	0.80	30	0.91
DF31	涤纶（粗纤维）	31	1.00	31	1.38
JF30	腈纶（粗纤维）	24	0.80	30	1.18
BF38	丙纶（粗纤维）	38	1.00	38	0.91
BF50	丙纶（粗纤维）	50	1.00	50	0.91
BF56	丙纶（粗纤维）	45	0.80	56	0.91
BF76	丙纶（粗纤维）	38	0.50	76	0.91
BFW	丙纶（微纤维）	12	0.02	600	0.91
G	钢（钢纤维）	35	0.55	65	7.85

1.2　试验方案

共配制了 21 种湿喷混凝土，具体如表 3 所示。各湿喷混凝土的水胶比（水/（水泥 + 纳米级掺合料或硅灰））均为 0.437，坍落度均为 180 ~220 mm。

表 3 编号中："N"，"S"分别表示掺加纳米级掺合料和硅灰的混凝土，例如，"N10"，"S10"分别代表纳米级掺合料和硅灰的掺量为 10%，编号中未对此明确时，均看成 N10，在纳米级掺合料品种方面，除了 NM2 和 NM3 的纳米级掺合料品种不同外，其余混凝土中均为 NM1；"F"，"G"分别表示合成纤维和钢纤维，例如"F8"，"G40"分别表示合成纤维掺量为 8 kg/m^3 和钢纤维掺量为 40 kg/m^3。表 3 中的 N10F8，NM1，BF30 和 LD30 为同一配合比。HZ1，HZ2，HZ3 和 HZ4 为 4 种混杂合成纤维方案。纤维组成是：HZ1 为 8 kg/m^3 BF30 +

0.91 kg/m^3 BFW;HZ2 为 4 kg/m^3 BF30 + 4 kg/m^3 BF56;HZ3 为 4 kg/m^3 BF30 + 4 kg/m^3 BF76;HZ4 为 4 kg/m^3 BF30 + 4 kg/m^3 BF56 + 0.91 kg/m^3 BFW。HZ1 代表粗细混杂,即粗合成纤维和微纤维混杂;HZ2 和 HZ3 代表长短混杂,即两种不同长径比的粗合成纤维混杂;HZ4 代表粗细混杂 + 长短混杂。

表 3 湿喷混凝土配合比

Tab. 3 Mix proportion of WMS (kg · m^{-3})

编号	水泥	纳米级掺合料	硅灰	砂	石	水	纤维	纤维掺料
S10F8	419	0	41.9	1 006	670	201	8	丙纶粗纤维 BF30
N10F8	419	41.9	0	1 006	670	201	8	丙纶粗纤维 BF30
S10G40	419	0	41.9	1 006	670	201	40	钢纤维 G
N10G40	419	41.9	0	1 006	670	201	40	钢纤维 G
N07F8	419	31.4	0	1 006	670	201	8	丙纶粗纤维 BF30
N12F8	419	52.4	0	1 006	670	201	8	丙纶粗纤维 BF30
NM1	419	41.9	0	1 006	670	201	8	(N10F8)
NM2	419	41.9	0	1 006	670	201	8	丙纶粗纤维 BF30
NM3	419	41.9	0	1 006	670	201	8	丙纶粗纤维 BF30
BF30	419	41.9	0	1 006	670	201	8	(N10F8)
DF31	419	41.9	0	1 006	670	201	8	涤纶粗纤维 DF31
JF30	419	41.9	0	1 006	670	201	8	腈纶粗纤维 JF30
LD30	419	41.9	0	1 006	670	201	8	(N10F8)
LD38	419	41.9	0	1 006	670	201	8	丙纶粗纤维 BF38
LD50	419	41.9	0	1 006	670	201	8	丙纶粗纤维 BF50
LD56	419	41.9	0	1 006	670	201	8	丙纶粗纤维 BF56
LD76	419	41.9	0	1 006	670	201	8	丙纶粗纤维 BF76
N10F6	419	41.9	0	1 006	670	201	6	丙纶粗纤维 BF30
N10F10	419	41.9	0	1 006	670	201	10	丙纶粗纤维 BF30
N10F12	419	41.9	0	1 006	670	201	12	丙纶粗纤维 BF30
HZ1	419	41.9	0	1 006	670	201	8.91	纤维混杂
HZ2	419	41.9	0	1 006	670	201	8	纤维混杂
HZ3	419	41.9	0	1 006	670	201	8	纤维混杂
HZ4	419	41.9	0	1 006	670	201	8.91	纤维混杂

2 回弹率测试方法

2.1 边墙回弹率

边墙回弹率在南京水利科学研究院铁心桥试验基地进行。混凝土采用 500 L 双卧轴强制式搅拌机搅拌。喷射采用国产小型湿喷机,生产能力 6 m^3/h,配套空压机送风压力 0.5 MPa。混凝土搅拌出机直接注入湿喷机料仓。喷射过程中,试模倾斜放置,与水平面夹角 80°。喷射角度为直角,喷射距离为 0.8 ~1.0 m,喷嘴做 20 ~50 cm 直径的螺旋线运动。回弹率测试时,在受喷面下方铺设塑料苫布,喷射结束后收集回弹物料,计算回弹率。实测速凝剂用量为胶凝材料的 6% ~7%。

2.2 综合回弹率

综合回弹率在四川某引水隧洞施工现场进行。混凝土搅拌采用出料容量 1.5 m^3 的双卧轴强制式搅拌机。混凝土出机后用罐车运至现场,在混凝土进入湿喷机料斗前,罐车快速旋转 1 min。施工采用进口大型混凝土湿喷机,其实际生产能力可达 25 m^3/h,配套空压机送风压力 0.7 MPa。喷头到受喷面的距离为:边墙 1.2 ~1.5 m,顶拱 1.8 ~2.2 m。一个工作面分 3 次连续喷射完成,总的喷层厚度约 10 cm,每次喷 3 cm 左右,每次间隔时间 8 ~10 min。喷头以绕螺旋方式扫射,喷到受喷面时的覆盖直径约为:顶拱每个点 1 m,边

墙每个点 0.8 m。每个点每次的喷射时间约 1 ~ 3 s。收集回弹物料,计算回弹率。速凝剂用量约为胶凝材料总量的 8%。

3　结果与讨论

3.1　纳米级掺合料对湿喷混凝土回弹率的影响

3.1.1　纳米级掺合料与硅灰的对比　4 种湿喷混凝土的回弹率如图 1 所示。可见,各湿喷混凝土的边墙回弹率均低于其综合回弹率。这一方面是因为综合回弹率中的回弹物料同时包含了顶拱和边墙的回弹量,受喷射手的经验和重力作用所限,顶拱的回弹率通常大于边墙回弹率,故与单一的边墙回弹率相比,综合回弹率测值稍高。另一方面,边墙回弹率测试时,以模板作为边墙,其一次喷射厚度大,有助于降低回弹率[5]。

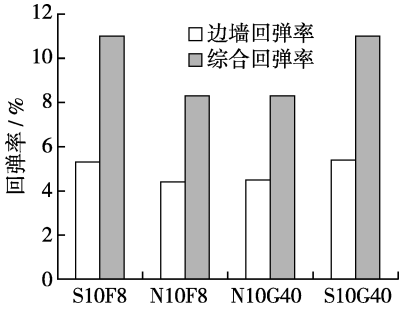

图 1　纳米级掺合料与硅灰混凝土回弹率

Fig. 1　Rebound rate of WMS with NSA or silica fume

从配合比角度来看,两种纳米级掺合料纤维湿喷混凝土的回弹率比较接近,边墙回弹率均在 4.5% 左右,综合回弹率均在 8.0% 左右。两种硅灰纤维湿喷混凝土的回弹率也比较接近,边墙回弹率均在 5.4% 左右,综合回弹率均在 11.0% 左右。

对比 4 种混凝土的回弹率发现,无论掺加硅灰还是纳米级掺合料,粗合成纤维和钢纤维在影响湿喷混凝土回弹率方面差异不大,这表明纤维品种对回弹率的影响不明显。但与硅灰粗合成纤维或钢纤维湿喷混凝土相比,纳米级掺合料湿喷混凝土的边墙回弹率和综合回弹率分别下降了 17% 和 25%,表明纳米级掺合料有助于降低湿喷混凝土回弹率。这一方面是因为纳米级掺合料中含一定量的有机增稠剂,可增加混凝土稠度,降低回弹率。另一方面主要由于纳米级掺合料的无机增稠作用,其颗粒粒径小[6],具有较大的比表面积,对水分的吸附量大,增稠效果好,可改善混凝土的黏聚性,提高与围岩的附着力;同时颗粒尺寸小还能够提高材料的化学反应活性,加速早期附着力发展。TANG Ming 等[7]曾对硅灰、超细粉煤灰、煤矸石、高岭石和蒙脱石等 5 种不同细度、活性的掺合料进行湿喷混凝土回弹率研究,结果见图 2 所示。可见,与纯水泥混凝土相比,各掺合料湿喷混凝土的回弹率均有明显降低。并且对比各掺合料之间的差异发现,回弹率随掺合料比表面积的增加而降低。这是因为混凝土料束自喷头运动到受喷面的过程中容易发散,胶凝材料细度增加可提高混凝土稠度和内聚力,改善运动过程中的整体性。同时,稠度增加后混凝土与受喷面碰撞回弹所需能量也会增加,这均有助于降低回弹率。

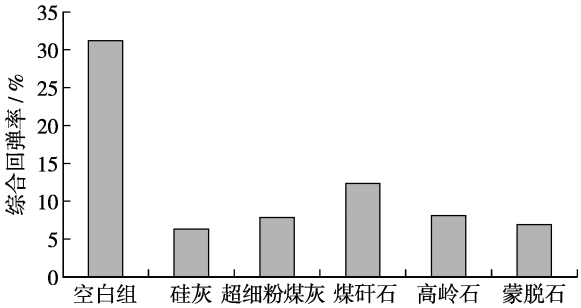

图 2　掺合料品种对回弹率的影响[7]

Fig. 2　Influence of sorts of admixture on rebound rate[7]

3.1.2　纳米级掺合料掺量的优化　3 种湿喷混凝土的回弹率如图 3 所示。如前所述,对于同一种湿喷混凝土而言,综合回弹率均大于其边墙回弹率。但无论是综合回弹率还是边墙回弹率,均随纳米级掺合料掺量的增加而降低。与掺 7.5% 纳米级掺合料时相比,掺 10.0% 和 12.5% 纳米级掺合料湿喷混凝土的边墙回弹率分别降低了 12% 和 20%、综合回弹率分别降低了 8% 和 13%。

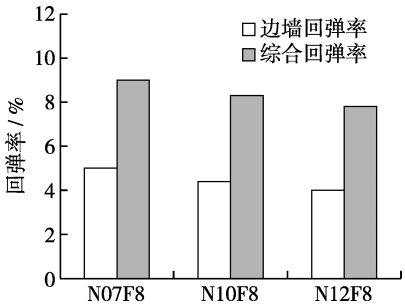

图 3　纳米级掺合料掺量对湿喷混凝土回弹率的影响

Fig. 3　Influence of NSA content on rebound rate of WMS

且 12.5% 掺量时,纳米级掺合料湿喷混凝土的综合回弹率为 7.8%,在 8.0% 以内。表明提高纳米级掺合料有助于降低湿喷混凝土的回弹率。这是因为纳米级掺合料掺量增加,胶凝材料体系的总比表面积增加,对水分的吸附、对其他组分的包裹能力增强,进一步改善了湿喷混凝土的黏聚性,增加了混凝土的稠度,降低了回弹率[8]。在这一点上,Markus 等[9]得到的结论比较相似,并指出混凝土稠度在 20 ~ 180 N · mm(扭转力矩)范围内,回弹率随稠度的增加而降低。

3.1.3 纳米级掺合料细度的对比 为进一步验证回弹率随掺合料细度增加而降低的猜想,配制了 NM1,NM2 和 NM3 共 3 种湿喷混凝土,其中 NM1,NM2 和 NM3 三种纳米级掺合料的体积平均粒径 $D_{(4,3)}$ 分别为 128,137 和 147 nm。回弹率测试结果如图 4 所示。可见,3 种纳米级掺合料湿喷混凝土的边墙回弹率和综合回弹率均存在微弱的变化趋势,即 NM3 > NM2 > NM1,表明回弹率随纳米级掺合料粒径的减小而降低。但三者之间的回弹率相差幅度并不显著。如前所述,硅质纳米级掺合料与硅灰之间之所以存在回弹率差异主要有两个原因:一是含一定量的增稠组分;二是颗粒的大小。而 3 种材料同为纳米级掺合料,无论在细度上还是在增稠组分含量上差异均不会过大。

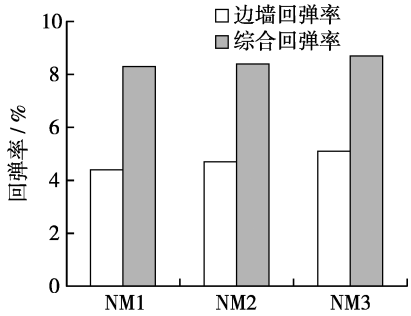

图 4 纳米级掺合料细度对湿喷混凝土回弹率的影响

Fig. 4 Influence of fineness of NSA on rebound rate of WMS

3.2 粗合成纤维对湿喷混凝土回弹率的影响

3.2.1 粗合成纤维材质的对比 粗合成纤维材质对湿喷混凝土回弹率的影响见图 5。可见,无论是边墙回弹率还是综合回弹率,丙纶、涤纶和腈纶配制的湿喷混凝土回弹率均相差不大。3 种湿喷混凝土的边墙回弹率、综合回弹率分别在 4.5% 和 8.2% 左右。表明同掺量条件下,纤维材质对湿喷混凝土回弹率的影响不大。这是因为纤维材质差异主要体现在力学性能方面,以断裂强度为例,丙纶、涤纶和腈纶的断裂强度分别为 490,710 和 620 MPa。而湿喷混凝土的喷射与回弹均在瞬时发生,其回弹率的大小更依赖于自身的整体性和黏聚性。而纤维的力学性质对此贡献较小。

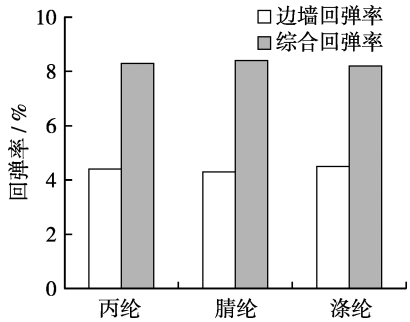

图 5 粗合成纤维材质对湿喷混凝土回弹率的影响

Fig. 5 Influence of MSF nature on rebound rate of WMS

3.2.2 粗合成纤维长径比的优选 在粗合成纤维长径比对比时,回弹率仅测试了边墙回弹率,结果见图 6。可见,5 种湿喷混凝土的边墙回弹率总体上在 3.8% ~4.8%。并且在 30 ~ 76 的粗合成纤维长径比范围内,回弹率随长径比的增加先降低后增加。长径比为 38 时回弹率最低,为 3.8%。同掺量条件下,粗合成纤维长径比不同在混凝土内部主要体现为纤维的长度或数量差异,纤维弯曲、搭接、缠绕概率的区别。这会导致纤维在搅拌、喷射过程中结团程度不同,进而影响到纤维在混凝土基体内分散的均匀性和包裹性。换言之,纤维长径比对湿喷混凝土回弹率的影响,在一定程度上体现的是纤维的分散均匀性。参照 GB/T 21120—2007《水泥混凝土和砂浆用合成纤维》中 6.4.1 规定,进行纤维洗涤、烘干及质量测试,计算分散性结果见图 7。由此可见,长径比为 38 时混凝土中实测纤维含量与理论掺量偏差最小,即分散性最好,这与回弹率测试得出的最优长径比是一致的。其余长径比对应纤维的分散性与回弹率的趋势也基本一致。这与钱桂枫等[10]采用 PVA 纤维得到的结论类似,即过大的长径比必然导致合成纤维在混凝土中的分散性变差。

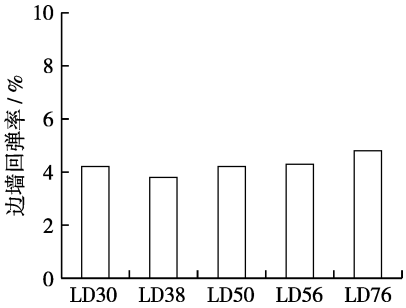

图 6　长径比对湿喷混凝土回弹率的影响

Fig. 6　Influence of aspect ratio on rebound rate of WMS

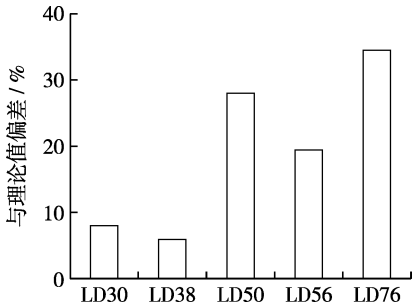

图 7　长径比对粗合成纤维分散性的影响

Fig. 7　Influence of aspect ratio on dispersion of MSF

3.2.3　粗合成纤维掺量的优选　不同粗合成纤维掺量下湿喷混凝土回弹率的测试结果见图 8。可见，4 种湿喷混凝土的边墙回弹率为 3.5% ~4.6%，综合回弹率为 7.7% ~8.5%，前者整体上小于后者，原因不再赘述。

6 ~12 kg/m^{3}的粗合成纤维掺量范围内，无论是边墙回弹率还是综合回弹率均随纤维掺量的提高先降低后增加。10 kg/m^{3}时回弹率最低，边墙回弹率和综合回弹率分别为 3.5% 和 7.7%。由纤维间距理论[11]可知，对于同一种粗合成纤维，掺量提高，单位体积上的混凝土截面纤维根数增加，纤维平均间距减小，混凝土黏聚性改善，整体性增强。这有助于降低回弹率。但当纤维掺量过高后，将会影响其在混凝土内部的分散均匀性，纤维间搭接、结团作用加剧，不利于纤维与基体的粘结，会加剧混凝土的回弹。

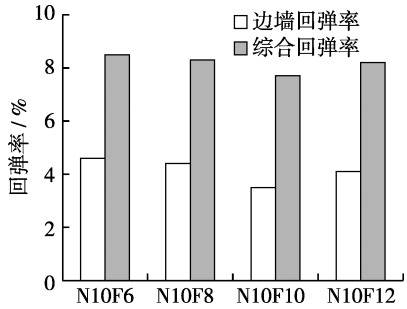

图 8　粗合成纤维掺量对湿喷混凝土回弹率的影响

Fig. 8　Influence of MSF content on rebound rate of WMS

3.2.4　合成纤维的混杂使用方式对比　合成纤维混杂使用方式下湿喷混凝土边墙回弹率测试结果如图 9 所示。可见，边墙回弹率总体上为 3.3% ~4.3%，均低于单一粗合成纤维条件下的湿喷混凝土（N10F8）边墙回弹率（4.4%）。表明纤维混杂使用有助于降低湿喷混凝土的回弹率。这主要由于多尺度的纤维混杂，能使其在混凝土内部的结构层次上发挥各种纤维的尺度效应[12-13]，从尺度上逐渐提高混凝土内部的黏聚性、改善整体性、降低回弹率。

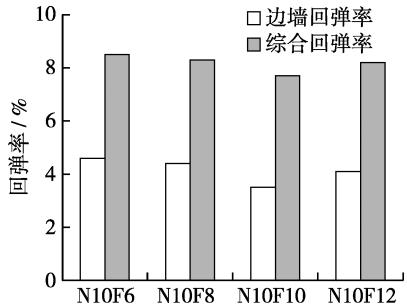

图 9　合成纤维混杂方式对湿喷混凝土回弹率的影响

Fig. 9　Influence of hybrid ways of synthetic fiber on rebound rate of WMS

与 HZ1 和 HZ4 相比，HZ2 和 HZ3 两种湿喷混凝土的回弹率稍低，这可能是因为 HZ1 和 HZ4 中掺加的微纤维没有均匀分散所致，受微纤维自身的材质影响较大。4 种纤维混杂方式中，使用长径比 76 和长径比 30 的两种粗合成纤维进行混杂的方式回弹率最低，为 3.3%。与单一长径比情况下的回弹率测试结果相比，长短混杂（较大长径比与较小长径比的纤维混杂）既发挥了纤维长度在改善混凝土整体性方面的技术优势，又在一定程度上避免了较大长径比纤维掺量过高对分散性的不利影响。

4　结　语

（1）纳米级掺合料有助于降低湿喷混凝土的回弹率，并且颗粒尺寸越小，降低效果越明显；与同掺量的硅灰湿喷混凝土相比，纳米级掺合料湿喷混凝土回弹率可降低 17% ~25%。

(2)提高纳米级掺合料掺量有助于降低回弹率,7.5% ~12.5% 掺量范围内,回弹率随纳米级掺合料掺量的增加而降低。与 7.5% 掺量时相比,掺 10.0% 和 12.5% 纳米级掺合料湿喷混凝土的边墙回弹率分别降低了 12% 和 20% ,综合回弹率分别降低了 8% 和 13% 。

(3)掺加合成纤维或钢纤维均有助于降低湿喷混凝土的回弹率,但回弹率受纤维材质(钢、腈纶、丙纶、涤纶等)的影响不大。

(4)适宜长径比有助于降低湿喷混凝土回弹率,30 ~76 长径比变化范围内,38 为最佳长径比。

(5)优化纤维掺量有助于降低回弹率,10 kg/m^{3}是 6 kg/m^3 ~12 kg/m^{3}纤维掺量范围内的最佳掺量。

(6)与单一纤维长径比条件下湿喷混凝土回弹率的测试结果相比,长径比 76 和长径比 30 的 2 种粗合成纤维混杂使用可进一步降低回弹率。

参 考 文 献:

[1] 张俊儒, 杨位中, 欧小强, 等. 基于复合胶凝材的喷射混凝土抗渗性能研究[J]. 混凝土, 2015(5): 1-4. (ZHANG Junru, YANG Weizhong, OU Xiaoqiang, et al. Research on the impermeability of shotcrete with composite cementitious materials [J]. Concrete, 2015(5): 1-4. (in Chinese))

[2] 刘涛. 太行山隧道进口工程湿喷微纤维混凝土的选择与施工[J]. 混凝土, 2007(2): 94-95. (LIU Tao. Selection and construction of wet basting microfibrils concrete in Taihang mountain tunnel entrance project[J]. Concrete, 2007(2): 94- 95. (in Chinese))

[3] 漫玉见, 余文胜, 霍海平. 湿喷钢纤维混凝土在公伯峡水电站导流洞工程中的应用[J]. 水力发电, 2002(8): 52-55. (MAN Yujian, YU Wensheng, HUO Haiping. Application of wet-spraying steel fiber concrete in the diversion tunnel project of Gongboxia Hydropower Station[J]. Water Power, 2002(8): 52-55. (in Chinese))

[4] 陈晓东. 钢纤维喷射混凝土在隧洞加固处理中的应用[J]. 建筑技术, 2003, 34(6): 440-441. (CHEN Xiaodong. The application of steel fiber sprayed concrete in the reinforcement of tunnel[J]. Architecture Technology, 2003, 34(6): 440-441. (in Chinese))

[5] 何文敏. 高含气量湿喷混凝土性能与组成设计方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2014: 78. (HE Wenmin. Study of properties and mix design of wet-mix shotcrete with high air content[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014: 78. (in Chinese))

[6] BINDIGANAVILE V, BANTHIA N. Rebound in dry-mix shotcrete: influence of type of mineral admixture[J]. ACI Materials Journal, 2000, 97(2): 115-119.

[7] TANG Ming, TONG Yu. Research on high-performance spray concrete[J]. Journal of Shangdong institute of Building Materials, 1998, 12(Suppl1): 149-153.

[8] PICKELMANN J, PLANK J. A mechanistic study explaining the synergistic viscosity increase obtained from polyethylene oxide (PEO) and β-naphthalene sulfonate(BNS) in shotcrete[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(42): 1409-1416.

[9] MARKUS P, WOLFGANG K. Rheology and rebound behaviour of dry-mix shotcrete[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(11): 1619-1625.

[10] 钱桂枫, 高祥彪, 钱春香. PVA 纤维对混凝土力学性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2010(3): 52-54. (QIAN Guifeng, GAO Xiangbiao, QIAN Chunxiang. Effects of PVA fiber on mechanical properties of concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2010(3): 52-54. (in Chinese))

[11] 蒋林华. 混凝土材料学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2006: 400-402. (JIANG Linhua. Concrete materials science[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2006: 400-402. (in Chinese))

[12] 梅国栋, 李继祥, 刘肖凡, 等. 混杂纤维混凝土增强机理研究综述[J]. 建材世界, 2009, 30(3): 10- 14. (MEI Guodong, LI Jixiang, LIU Xiaofan, et al. Review of the research and application about hybrid fiber reinforced concrete[J]. The World of Building Materials, 2009, 30(3): 10-14. (in Chinese))

[13] 谢京辉, 彭刚, 陈灯红, 等. 不同初始孔隙水压力下混凝土动态力学特性[J]. 水利水运工程学报, 2017(3): 100-107. (XIE Jinghui, PENG Gang, CHEN Denghong, et al. Dynamic properties of concrete under different initial pore water pressure [J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(3): 100-107. (in Chinese))

Effect of nanometer scale admixture and macro synthetic fiber on the rebound rate of wet mix shotcrete

NING Fengwei[1], DING Jiantong[2], BAI Yin[1], YANG Sen[2], LEI Yingqiang[2]

(1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering*, *Nanjing Hydraulic Research Institute*, *Nanjing* 210029, *China*; 2. *Sinohydro Bureau* 7 *Corporation Limited*, *Chengdu* 611730, *China*)

Abstract: Reducing the rebound rate of shotcrete can promote the efficiency of support and reduce the risks of collapse and rock burst for underground openings. To evaluate the effect of nanometer scale admixture (NSA) and macro synthetic fiber (MSF) on the rebound rate of wet – mix shotcrete (WMS), rebound rates were compared with each other based on wet sprayed technology among WMS with different cementing compositions such as introducing NSA or silica fume. The contents and fineness of NSA were also investigated when taking rebound rate as the main subject. Contents, aspect ratios and hybrid ways of MSF were discussed, too. The results indicated that NSA could reduce the rebound rate of shotcrete. The rebound rate of WMS could be reduced by about 17% to 25% when silica fume was replaced by NSA totally. Besides, the rebound rate of WMS would further decrease with the increment of contents or fineness of NSA. Macro synthetic fiber had a part in reducing rebound rate. Although fiber nature had little effect on rebound rate, the aspect ratio and content of MSF couldn't be ignored, and its best values were 38 and 10 kg/m^3, respectively. In addition, the rebound rate could be further reduced when WMS was optimized with hybrid MSF consisting of two kinds of fibers, whose aspect ratios were 76 and 30.

Key words: wet-mix shotcrete; rebound rate; nanometer scale admixture; macro synthetic fiber