

# ASR与冻融耦合作用下掺锂渣混凝土损伤研究\*

秦拥军, 谢旂, 张亚斌

(新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 本文主要研究了掺锂渣混凝土在冻融循环和碱硅酸反应耦合作用下的损伤规律. 试验结果表明: 混凝土先经碱硅酸反应后进行冻融循环作用时, 碱硅酸反应对冻融循环有一定促进作用; 混凝土先经冻融循环后进行碱硅酸反应作用时, 冻融循环促进了碱硅酸反应的进行, 随着冻融循环次数的增加, 促进作用增强, 加剧了试件的损伤; 在耦合作用下, 适量的锂渣掺入可以减弱混凝土在耦合作用下的损伤, 掺量20%效果最佳.

**关键词:** 锂渣; 碱硅酸反应; 冻融循环

**DOI:** 10.13568/j.cnki.651094.651316.2020.11.27.0004

**中图分类号:** TU528.1; TU502<sup>+.4</sup> **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2021)06-0730-09

**引文格式:** 秦拥军, 谢旂, 张亚斌. ASR与冻融耦合作用下掺锂渣混凝土损伤研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2021, 38(6): 730-738.

**英文引文格式:** QIN Y J, XIE Y, ZHANG Y B. Study on damage of concrete with lithium slag mixed by ASR and freeze-thaw coupling[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2021, 38(6): 730-738.

## Study on Damage of Concrete with Lithium Slag Mixed by ASR and Freeze-Thaw Coupling

QIN Yongjun, XIE Yi, ZHANG Yabin

(School of Architecture and Civil Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830047, China)

**Abstract:** This paper mainly studies the damage law of concrete with lithium slag under the action of freeze-thaw cycle and alkali silicate reaction(ASR) coupling. The experimental results show that the alkali silicate reaction can promote the freeze-thaw cycle of concrete. When the concrete is subjected to the alkali silicate reaction after the freeze-thaw cycle, the freeze-thaw cycle promotes the alkali silicate reaction. With the increase of the number of freezing-thawing cycles, the promotion effect was enhanced, which aggravated the damage of the specimen. Under the coupling action, the damage of concrete can be weakened by the addition of proper amount of lithium slag, and the content of 20% is the best.

**Key words:** lithium slag; alkaline silicic acid reaction; freeze-thaw cycle

## 0 引言

混凝土耐久性问题由来已久,许多工程未达到设计使用年限因耐久性不足而劣化破坏.由于混凝土所处的工作环境相当复杂,导致混凝土耐久性破坏的原因往往是多种因素共同作用的结果,其中包括冻融循环、碱集料反应、碳化、硫酸盐腐蚀等.现阶段,学者对混凝土耐久性问题的研究主要集中于硫酸盐、盐碱与冻融循环耦合作用<sup>[1-5]</sup>.对于碱硅酸反应与冻融循环耦合作用的研究较少.我国西北寒冷地区的混凝土耐久性问题,特别是冻融循环和碱骨料反应问题尤为突出,其中,碱骨料反应中碱硅酸反应是最常见的类型.因此,有必要对冻融循环与碱硅酸反应(alkali silicate reaction, ASR)耦合作用进行试验探究.

对于抑制混凝土碱骨料反应,在实际工程中应用最广泛、最经济有效的是掺入矿物掺和料,学者们对此进行了比较深入的研究<sup>[6-10]</sup>.作为锂盐成产过程中排出的工业废料,锂渣是具有一定火山灰活性矿物掺合料.研究表明混凝土中掺入适量锂盐可以较好地抑制碱骨料反应,其抑制机理主要是在集料周围形成了含锂盐的非膨胀性产物,阻止碱对活性骨料的进一步侵蚀<sup>[11-16]</sup>.因为矿物掺合料具有火山灰效应和填充效应,能够改善混凝土

\* 收稿日期: 2020-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51668061).

作者简介: 秦拥军(1970-),男,硕士,教授,主要从事建筑材料的研究, E-mail: 470993227@qq.com.

土的内部微观结构,提高混凝土的密实性.而针对掺入锂渣的混凝土在冻融循环与碱骨料反应耦合作用下的研究尚不多见.基于此,本文对掺入锂渣的混凝土进行冻融循环与ASR协同作用下的试验,探究混凝土在协同作用下的损伤规律与特点,为正确评估混凝土在冻融循环与ASR耦合作用下的耐久性提供依据.

## 1 试验设计

### 1.1 原材料

采用天山牌P·42.5R普通硅酸盐水泥;矿物掺合料采用锂渣粉,锂渣及水泥化学成分见表1;骨料为当地的天然砂和天然卵石,使用鄂式破碎机将骨料破碎成10 mm以下粒径,然后再筛分成规范要求的级配;试剂采用分析纯KOH和NaOH;水采用实验室自来水,符合JGJ3—2006混凝土拌合用水标准的规定.

表 1 锂渣和水泥化学成分(%)

Tab 1 Chemical composition analysis of lithium slag and cement (%)

材料	CaO	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
锂渣	22.02	0.33	1.24	0.54	18.10	15.14	41.72	0.14	0.37
基准水泥	64.65	-	3.45	2.36	4.49	2.44	21.88	0.51	-

### 1.2 试验方案设计

采用C30的普通混凝土基准配合比,以锂渣掺量(0%、10%、20%、30%,锂渣掺量等质量替代水泥)为变量(见表2),以混凝土试件的膨胀率、相对动弹性模量和质量损失率三个指标来探究ASR与冻融耦合作用下混凝土的损伤效应.

表 2 混凝土配合比(kg·m<sup>-3</sup>)

Tab 2 Proportions of concrete mix concrete composition (kg·m<sup>-3</sup>)

编号	水泥	锂渣	砂	石	水
JZ	438	0	547	897	219
L10%	394.2	43.8	547	897	219
L20%	350.4	87.6	547	897	219
L30%	306.6	131.4	547	897	219

注: JZ代表基准组, L10%、L20%、L30%分别代表锂渣掺量10%、20%、30%.

### 1.3 试验内容

#### 1.3.1 先进行碱硅酸反应再进行冻融循环

试验试件成型后先放入80 °C、1 mol/L NaOH溶液中养护28 d进行碱硅酸反应,测量试件的基准长度、初始横向基频以及试件的初始质量,并测量其7 d、14 d、21 d、28 d的膨胀率、相对动弹性模量和质量损失率.膨胀率根据SL352—2020《水工混凝土试验规程》中骨料碱活性检验(砂浆棒快速法)测定;相对动弹性模量采用北京首瑞大同测控技术有限公司生产的DT-60型动弹性模量测定仪进行测定;质量损失率参照GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》<sup>[17]</sup>中规定的测试方法进行测定.测量完成后开始进行冻融循环,根据GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》的相关内容,采用快冻法,为了保证试件不被破坏,本试验冻融循环次数为20次和40次.每进行20次冻融循环,测量试件的膨胀率、相对动弹性模量和质量损失率,测量完毕后,将试件上下颠倒重新放入试件盒中,继续进行冻融试验.并对耦合作用和单一作用进行对比分析,探究前期ASR对后期冻融循环的影响.

#### 1.3.2 先进行冻融循环再进行碱硅酸反应

根据GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》的相关内容,采用快冻法,试验试件成型后先标准养护28 d再放入快速冻融机内进行20次和40次冻融循环,每进行20次冻融循环,测量试件的膨胀率、相对动弹性模量和质量损失率,测量完毕后,将试件上下颠倒重新放入试件盒继续进行冻融试验.冻融循环后再放入80 °C 1 mol/L NaOH溶液中养护28 d进行碱硅酸反应,分别测量其7 d、14 d、21 d、28 d的膨胀率、相对动弹性模量和质量损失率.并对其耦合作用和单一作用对比分析,探究前期冻融循环对后期ASR的影响.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 试验现象

图1为试件在80 °C 1 mol/L NaOH溶液中养护28 d外观,由图1可以看出试件经历28 d的ASR后,表面开始出现泛白以及点蚀,说明试件发生了碱硅酸反应,但由于养护时间较短,试件表面的损伤并不明显.图2为试件冻融40次的形貌,试件表面开始出现脱落,尤其是混凝土的浇筑面最为明显,主要原因为混凝土在成型振动时,有效的水灰比被改变,在冻融时易发生剥离现象.另外试件中掺入适量的锂渣可以有效改善混凝土的抗冻性,减少混凝土表面脱落.图3为ASR和冻融40次耦合作用下试件形貌,由图3可以看出经历过ASR和冻融耦合作用的试件表面出现了大量的网状裂纹,混凝土浇筑面表层大量脱落,相对于单一ASR和单一冻融来说,耦合作用下混凝土的损伤更加严重.

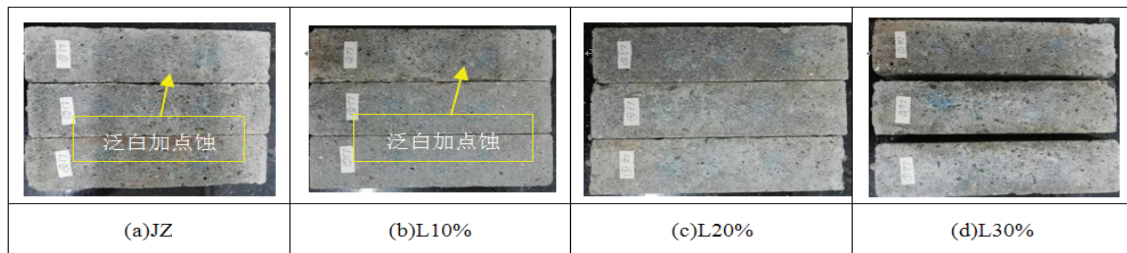


图 1 ASR 28 d试件外观

Fig 1 Appearance of the specimen for ASR 28 d

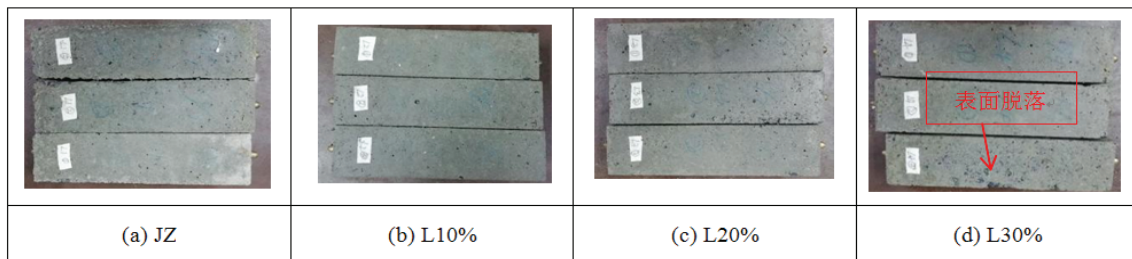


图 2 冻融40次试件外观

Fig 2 Appearance of the specimen for 40 freeze-thaw cycles

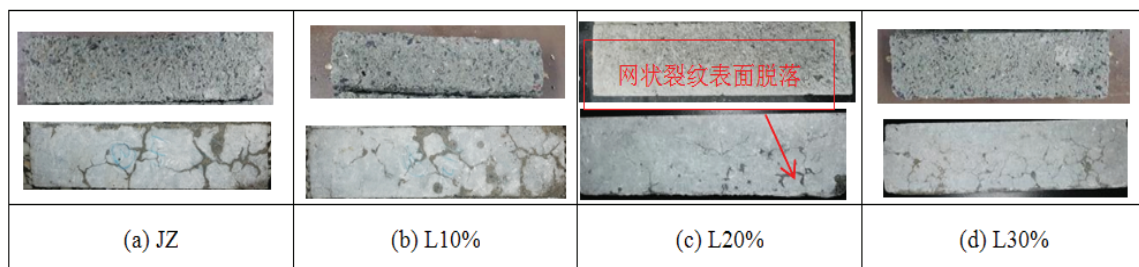


图 3 ASR+冻融40次耦合作用试件外观

Fig 3 Appearance of the specimen for ASR and 40 freeze-thaw cycles

### 2.2 先ASR再冻融循环耦合损伤效应

#### 2.2.1 相对动弹性模量

图4(a)为试件在不同锂渣掺量下相对动弹性模量的变化. ASR前期,试件的相对动弹性模量下降较为缓慢,冻融循环后相对动弹性模量迅速下降,随着冻融循环次数的增加,下降速率增大;结合表3试验数据分析,相较于单一冻融循环20次和40次,前期经过ASR作用的试件,相对动弹性模量下降地更多. 锂渣掺量20%时,单一ASR与单一冻融循环20次,40次相对动弹性模量分别为94.87%, 97.69%, 89.24%; ASR-冻融循环耦合作用下相对动弹性模量分别为90.51%, 81.22%, 分别下降了7.18%, 8.02%,说明前期ASR对混凝土造成了损伤,加剧了后期冻融循环的破坏,并且随着冻融循环次数的增加,混凝土的损伤越严重,普通混凝土的相对动弹性模量变化与掺锂渣混凝土变化一致.

图4(b)表明, 在ASR-冻融循环耦合作用下, 试件相对动弹性模量随锂渣掺量的增加, 呈现出先上升后下降的趋势, 掺量20%时最优, 主要原因是锂渣中活性SiO<sub>2</sub>先于集料中的活性SiO<sub>2</sub>和Ca(OH)<sub>2</sub>发生反应, 形成致密的硅酸钙, 起到了弥补水泥浆与骨料之间界面过渡区微裂缝的作用, 进而提高了试件的相对动弹性模量, 但掺入量过多使得混凝土水化不完全, 反应需要的Ca(OH)<sub>2</sub>增加, 导致反应速率缓慢, 进而造成混凝土试件的损伤.

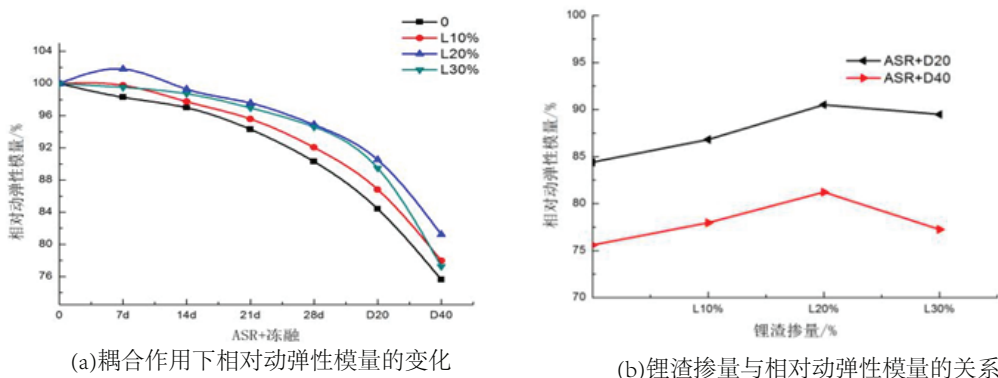


图 4 ASR-冻融循环耦合作用下相对动弹性模量

Fig 4 Relative dynamic modulus under the combined action of ASR- freeze-thaw cycle

表 3 单一冻融循环作用下试验结果

Tab 3 Test results under single freeze-thaw cycle

编号	膨胀率(%)		相对动弹性模量(%)		质量损失率(%)	
	D20	D40	D20	D40	D20	D40
0	0.118	0.233	95.05	85.95	0.233	0.384
L10%	0.091	0.205	96.52	86.78	0.178	0.341
L20%	0.069	0.170	97.69	89.24	0.139	0.316
L30%	0.113	0.256	94.60	85.61	0.275	0.510

2.2.2 膨胀率

图5(a)为试件膨胀率的变化, 在ASR作用下, 试件膨胀率随龄期的增长缓慢增大, 但后期进行冻融循环时, 其膨胀率随冻融次数的增加迅速增大. 结合表3试验数据分析可以发现, 试件前期经过ASR, 后期再进行冻融循环20次和40次的膨胀率均大于单一冻融循环以及单一ASR与单一冻融循环作用下之和的膨胀率, 说明前期ASR对混凝土造成了一定程度的损伤, 并且ASR-冻融循环双重因素作用下对混凝土造成的损伤不是二者单一作用效应的简单叠加, 而是表现为一种超叠加效应. 主要原因是前期ASR作用下, 混凝土中碱与骨料中活性SiO<sub>2</sub>发生化学反应, 生成碱硅酸凝胶吸水, 使得混凝土膨胀, 受到一定的损伤, 在后期进行冻融循环时, 水分通过ASR形成的微小裂缝渗透进混凝土内部, 温度较低时结冰, 增大了混凝土的膨胀, 随着冻融次数的增加, 混凝土的破坏加剧.

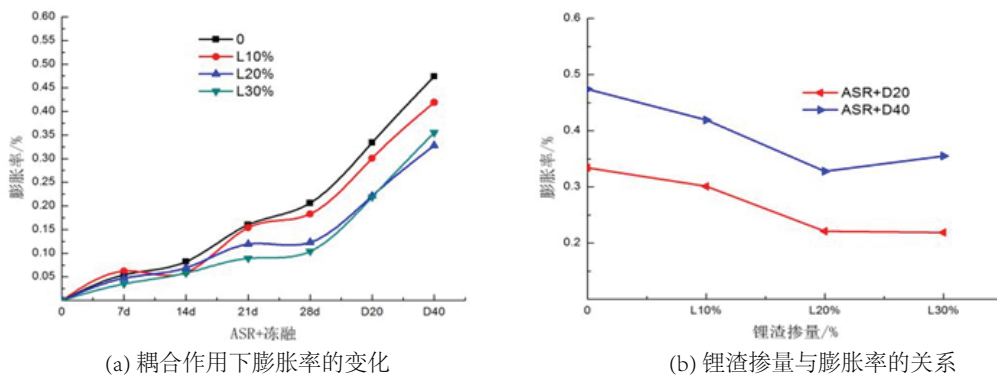


图 5 ASR-冻融循环耦合作用下的膨胀率

Fig 5 Expansion rate under the combined action of ASR- freeze-thaw cycle

由图5(b)可见,在不同冻融循环次数的耦合作用下试件膨胀率随锂渣掺量的增加,大致呈现出先降低后升高的趋势,并且均小于对照组,掺量为20%时最优.

### 2.2.3 质量损失率

图6(a)为试件质量损失率的变化,在进行ASR前期,试件的质量损失率表现为不同程度的负增长,随着ASR的进行,试件的质量损失增长缓慢;后期进行冻融循环时,试件的质量损失率快速增加.试件质量增加的主要原因是混凝土中的碱与骨料中的活性 $\text{SiO}_2$ 发生化学反应,生成碱硅酸凝胶吸水膨胀.在试验后期随着冻融循环次数的增加,试件的质量损失快速增长.其变化规律与膨胀率类似.

由图6(b)可知,随着锂渣掺量的增加,质量损失率表现为先减小后增加,掺量20%时,试件质量损失率最小,与相对动弹性模量与膨胀率指标规律一致,说明掺入适量的锂渣对ASR-冻融耦合作用下混凝土损伤有一定的抑制作用.

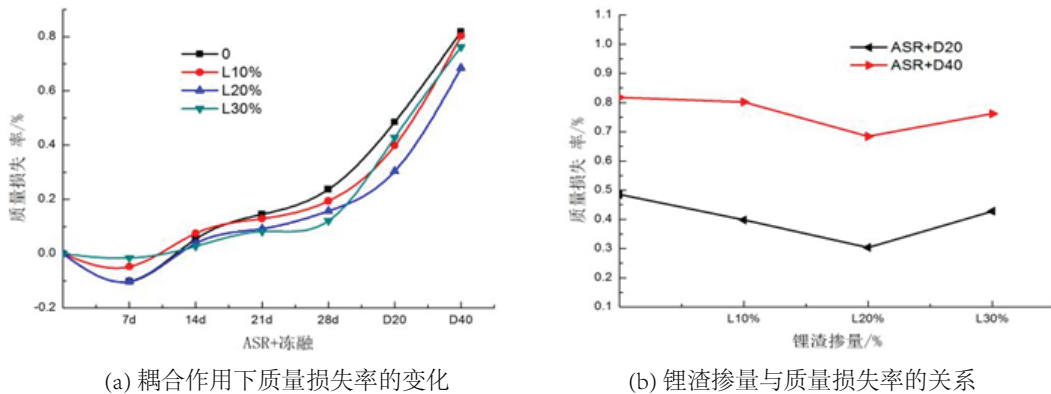


图 6 ASR-冻融循环耦合作用下的质量损失率

Fig 6 Mass loss rate under the coupling action of ASR-freeze-thaw cycle

## 2.3 先冻融循环再ASR耦合损伤效应

### 2.3.1 膨胀率

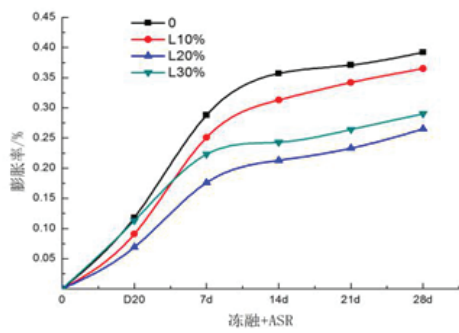
图7(a)、图7(c)为试件在D20+ASR, D40+ASR耦合作用下膨胀率的变化,冻融阶段,试件的膨胀率变化速率很快,进行ASR后,膨胀率变化逐渐缓慢;随着冻融循环次数的增加,试件ASR前期的膨胀率变化速率增大,说明冻融循环次数越大,对试件造成的损伤越大,主要原因是早期冻融循环次数越多,可能使得碱的迁移和富集更严重,进而加速了试件在ASR下的破坏;结合表4数据分析,锂渣掺量20%混凝土试件单一冻融20次,40次与ASR 28 d膨胀率分别为0.069%, 0.170%, 0.123%,冻融20次+ASR 28 d膨胀率为0.265%,冻融40次+ASR 28 d膨胀率为0.388%,D20与28 d ASR反应的各自膨胀率之和为0.192%,比经过20次冻融循环再进行28 d ASR作用反应的膨胀率小0.073%;D40与28 d ASR反应的各自膨胀率之和为0.293%,比经过40次冻融循环再进行28 d ASR反应的膨胀率小0.095%,这说明冻融循环促进了ASR进行,并随着冻融次数的增加,其促进作用加强;在冻融循环+ASR耦合作用下,试件的膨胀率均大于单一作用下膨胀率之和,与先ASR后冻融循环耦合作用对比,冻融-ASR耦合作用下试件的膨胀率更大,说明试件在冻融-ASR作用下劣化程度更大.

由图7(b)、图7(d)可知,锂渣的掺入对混凝土在不同冻融循环次数+ASR耦合作用下的劣化有一定的抑制作用,表现为随着锂渣掺量的增多,试件的膨胀率呈先下降后上升的趋势,且均小于对照组,在掺量为20%时,其膨胀率最小.

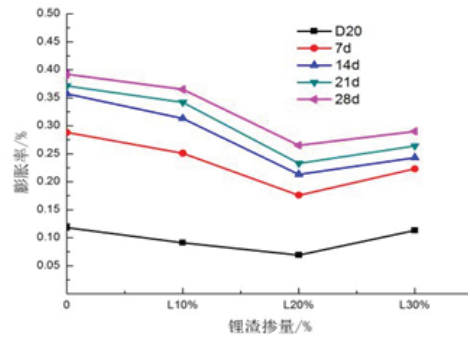
表 4 ASR单一作用下试验结果

Tab 4 Test results under single ASR action

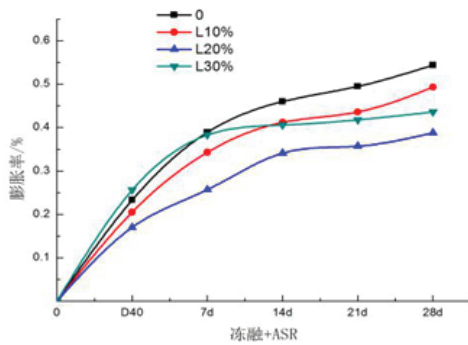
编号	膨胀率(%)				相对动弹性模量(%)				质量损失率(%)			
	7 d	14 d	21 d	28 d	7 d	14 d	21 d	28 d	7 d	14 d	21 d	28 d
0	0.054	0.082	0.160	0.206	98.29	96.99	94.30	90.30	-0.102	0.054	0.145	0.237
L10%	0.062	0.059	0.154	0.183	99.78	97.75	95.59	92.05	-0.048	0.075	0.129	0.194
L20%	0.047	0.069	0.119	0.123	101.79	99.29	97.57	94.87	-0.103	0.038	0.092	0.157
L30%	0.035	0.058	0.089	0.104	99.52	98.73	96.97	94.60	-0.016	0.027	0.082	0.121



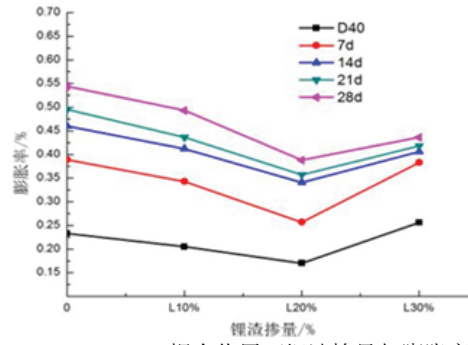
(a)D20+ASR耦合作用下膨胀率的变化



(b)D20+ASR耦合作用下锂渣掺量与膨胀率的关系



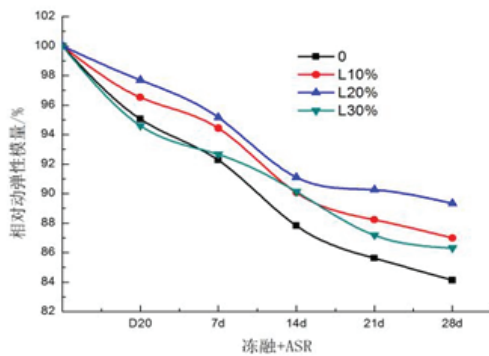
(c)D40+ASR耦合作用下膨胀率的变化



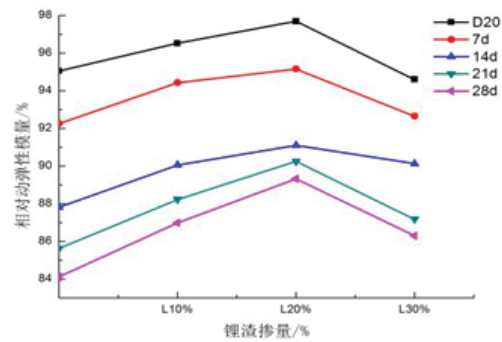
(d)D40+ASR耦合作用下锂渣掺量与膨胀率的关系

图 7 冻融循环+ASR耦合作用下的膨胀率

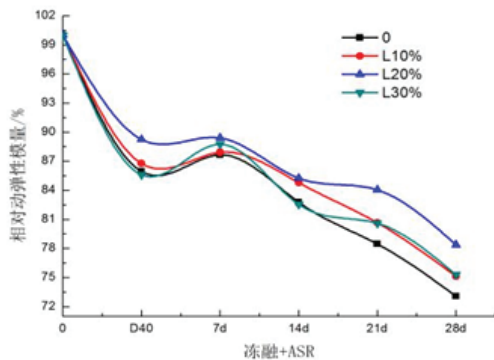
Fig 7 The expansion rate under the combined action of freeze-thaw cycle and ASR



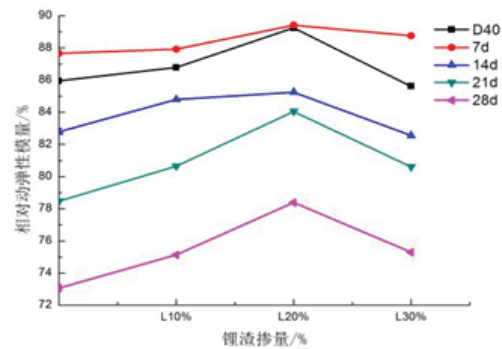
(a)D20+ASR耦合作用下相对动弹性模量的变化



(b)D20+ASR耦合作用下锂渣掺量与相对动弹性模量的关系



(c)D40+ASR耦合作用下相对动弹性模量的变化



(d)D40+ASR耦合作用下锂渣掺量与相对动弹性模量的关系

图 8 冻融循环+ASR耦合作用下的相对动弹性模量

Fig 8 The relative dynamic elastic modulus under the combined action of freeze-thaw cycle and ASR

### 2.3.2 相对动弹性模量

图8(a)、图8(c)为D20+ASR, D40+ASR耦合作用下试件的相对动弹性模量变化, D20+ASR作用下, 试件的相对动弹性模量前期下降比较缓慢, 随着龄期的增加, 试件的相对动弹性模量平稳下降; D40+ASR作用下, 试件的相对动弹性模量下降速率很快, 在ASR前期, 相对动弹性模量有增加的趋势, 随着ASR的进行, 试件的相对动弹性模量下降, 其下降速率大于D20+ASR作用下, 说明冻融循环次数增加, 加剧了试件的内部损伤, 其变化规律与膨胀率一致.

由图8(b)、图8(d)分析可知, 锂渣对混凝土在冻融+ASR耦合作用下的损伤有一定的抑制作用, 随着锂渣掺量的增加其相对动弹性模量表现为先增加后减小, 并且均大于对照组, 锂渣掺量为20%时最优, 试件的相对动弹性模量损失最小, 与膨胀率变化规律一致. 图8(d)中, 试件经过7 d ASR, 其相对动弹性模量高于冻融循环40次, 出现这种现象可能是由于冻融40次给混凝土造成了较大的损伤, 冻融破坏会使混凝土形成一些裂缝, 早期ASR生成的碱硅酸凝胶, 可以填充前期冻融破坏产生的裂缝和孔隙, 增强混凝土的密实度, 在一定程度上提高了混凝土的动弹性模量.

### 2.3.3 质量损失率

图9(a)、图9(c)为试件在D20+ASR, D40+ASR耦合作用下质量损失率的变化, 前期冻融循环阶段, 随着冻融循环次数的增加, 试件质量损失速率增加; 试验进入ASR阶段, 试件质量损失率增长比较缓慢, 随着ASR反应的进行, 试件质量损失率逐渐增加, 这是由于前期冻融循环阶段对混凝土造成一定损伤, 产生一些小裂缝, 当进入到ASR阶段时, 养护液中的碱会经过裂缝渗透进混凝土内部发生ASR, 早期ASR生成的一部分碱硅酸凝胶会填充到混凝土裂缝中, 减少混凝土的质量损失, 但随着ASR不断加剧, 膨胀越来越大, 损伤也越来越大, 混凝土表面出现网状裂纹, 生成的一部分碱硅酸凝胶也可能通过裂缝流出, 表皮砂浆也开始继续脱落, 其质量损失逐渐增大.

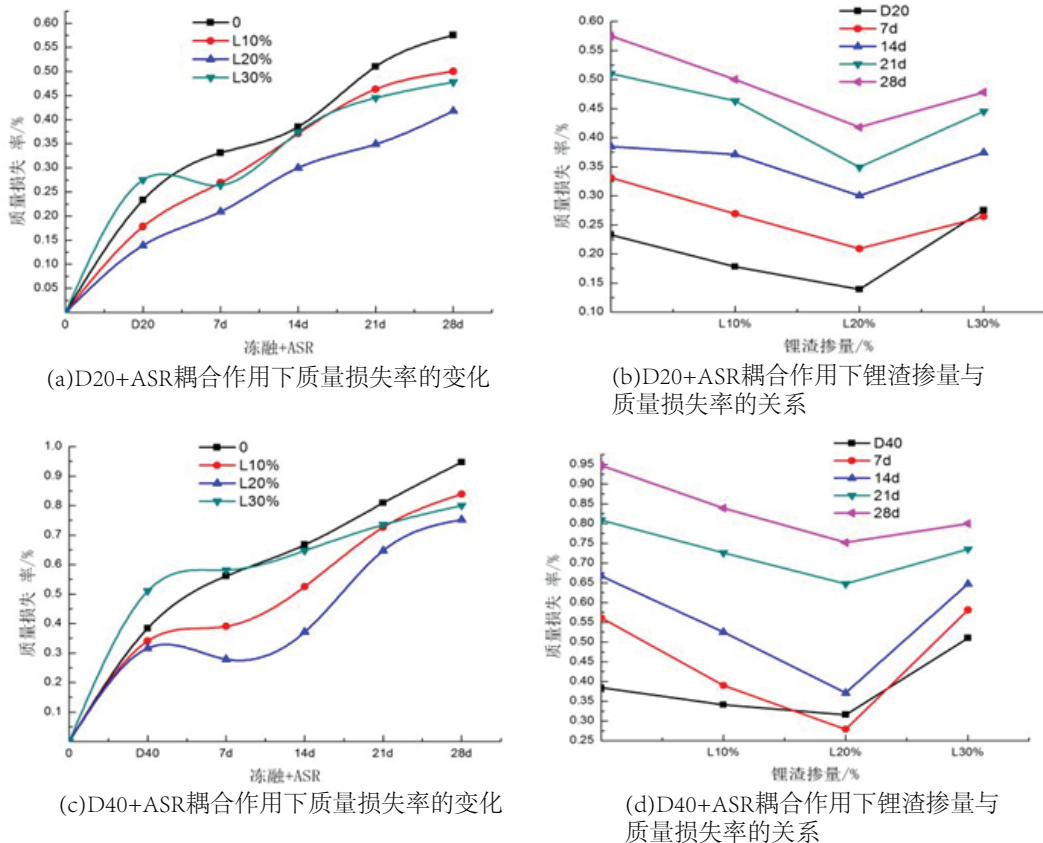


图9 冻融循环+ASR耦合作用下的质量损失率

Fig 9 Mass loss rate under the coupling action of freeze-thaw cycle and ASR

由图9(b)、图9(d)可知,冻融+ASR耦合作用的试件在掺入锂渣后,其质量损失率呈现为先减小后增加的趋势,并且均小于普通混凝土,说明锂渣对冻融+ASR耦合作用的损伤有抑制作用,锂渣掺量为20%时,抑制效果最优;图9(d)中锂渣掺量为20%在7 d ASR下的质量损失率最小,主要原因是锂渣中活性 $\text{SiO}_2$ 先于集料中的活性 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应,形成致密的硅酸钙,起到弥补水泥浆与骨料之间界面过渡区微裂缝的作用,减少试件质量损失。

### 3 ASR与冻融耦合作用破坏机理分析

通过对ASR和冻融循环耦合作用下的膨胀率、相对动弹性模量以及质量损失率三个指标进行分析,发现耦合作用对混凝土的破坏程度大于其单一作用的破坏程度。碱集料反应和冻融循环都会使混凝土产生膨胀开裂。开裂对混凝土渗透性及混凝土劣化是一个链锁反应,裂纹为渗透通道互相连通创造了条件进而提高混凝土的渗透性,水和一些侵蚀性离子就会渗入混凝土内部,易使混凝土劣化。当混凝土遭受冻融时,内部孔隙水会冻结膨胀,使混凝土内部产生细微裂缝,外界的水分、碱离子就会沿着细微裂缝渗透进混凝土内部,促进混凝土ASR的进行,生成更多的碱硅酸凝胶,吸水膨胀,形成更多更大的裂缝,当混凝土再受到冰冻作用时,裂缝中的冰又加深裂缝的发展,如此循环加速了混凝土破坏;另外,冻融循环过程中会导致碱集料迁移和富集,也会促进ASR的进行。所以,当具有潜在ASR的混凝土结构处在冻融交替循环的环境中时,ASR与冻融破坏作用相互提供了损伤条件,表现为协同破坏。

### 4 结论

(1)混凝土先经ASR后进行冻融循环作用时,ASR对冻融循环有一定促进作用。随着ASR程度加大,混凝土会形成微裂纹,对混凝土造成一定程度损伤,从而降低混凝土的抗冻性;

(2)混凝土先经冻融循环后进行ASR时,冻融循环对ASR有促进作用,前期在冻融条件下,混凝土表皮脱落开裂,加剧了外界的碱和水分渗透进混凝土内部,加速ASR的发生,进而加剧了混凝土的损伤;

(3)锂渣的加入对混凝土在ASR与冻融循环耦合作用下的损伤有抑制作用,最佳掺量为20%;

(4)混凝土试件在ASR与冻融循环耦合作用下,其劣化值均大于单一ASR与单一冻融作用下劣化值,甚至超过两者单一作用下劣化值之和,即ASR与冻融循环对混凝土的破坏为协同破坏,且表现为超叠加效应。

### 参考文献:

- [1] 姜磊,牛荻涛. 硫酸盐与冻融环境下混凝土损伤破坏准则研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(1): 148-153.  
JIANG L, NIU D T. Study on damage criterion of concrete under sulphate and freezing-thawing[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(1): 148-153. (in Chinese)
- [2] 苑立冬,牛荻涛,姜磊,等. 硫酸盐侵蚀与冻融循环共同作用下混凝土损伤研究[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(6): 1171-1176.  
YUAN L D, NIU D T, JIANG L, et al. Study on concrete damage under the action of sulfate erosion and freeze-thaw cycle[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(6): 1171-1176. (in Chinese)
- [3] 王志伟,马福. 硫酸盐侵蚀与冻融耦合作用下混凝土损伤研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 11: 40-43.  
WANG Z W, MA F. Study on concrete damage under the combined action of sulfate erosion and freeze-thaw[J]. New Building Materials, 2017, 11: 40-43. (in Chinese)
- [4] 肖前慧,曹志远,关斌,等. 冻融与硫酸盐侵蚀耦合作用下再生混凝土劣化规律[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(2): 352-358.  
XIAO Q H, CAO Z Y, GUAN X, et al. Degradation of recycled concrete under the combined action of freeze-thaw and sulfate erosion[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(2): 352-358. (in Chinese)
- [5] 王晨霞,郭磊,曹芙蓉. 盐碱与冻融耦合作用下再生混凝土耐久性试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(1): 10-16.  
WANG C X, GUO L, CAO F B. Experimental study on durability of recycled concrete under the combined action of saline-alkali and freeze-thaw[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(1): 10-16. (in Chinese)
- [6] 冯琦,王宇斌. 硫酸盐冻融耦合环境下粉煤灰再生混凝土的耐久性研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020, 8: 87-90.  
FENG Q, WANG Y B. Study on durability of fly ash recycled concrete in sulfate-freeze-thaw coupling environment[J]. China Concrete and Cement Products, 2020, 8: 87-90. (in Chinese)
- [7] NAYIR S, ERDOGDU S, KURBETCI S. Effectiveness of mineral additives in mitigating alkali-silica reaction in mortar[J]. Computers and Concrete, 2017, 20(6): 705-710.

- [8] MUNIR M J, KAZMI S M, SWU Y F. Efficiency of waste marble powder in controlling alkali-silica reaction of concrete: a sustainable approach[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 154: 590-599
- [9] 徐文, 钱春香, 庄园. 粉煤灰对混凝土AAR有效碱的影响及机理[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(2): 380-384.  
XU W, QIAN C X, ZHUANG Y. Effect of fly ash on AAR effective alkali and its mechanism[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2010, 40(2): 380-384. (in Chinese)
- [10] 于洋, 李国忠. 硅灰及锂盐对碱集料反应抑制效果的研究[J]. *建筑材料学报*, 2008, 11(4): 475-480.  
YU Y, LI G Z. Study on the inhibitory effect of silica fume and lithium salts on alkali aggregate reaction[J]. *Journal of Building Materials*, 2008, 11(4): 475-480. (in Chinese)
- [11] 梅来宝, 卢都友, 邓敏, 等. LiOH抑制碱硅酸反应膨胀及其应用研究[J]. *硅酸盐学报*, 2005, 24(5): 609-614.  
MEI L B, LU D Y, DENG M, et al. Inhibition of alkali silicate reaction expansion by LiOH and its application[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2005, 24(5): 609-614. (in Chinese)
- [12] 俞琛捷, 莫祥银, 邓敏, 等. 锂离子在混凝土碱集料反应过程中的作用[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2009, 39(1): 127-130.  
YU C J, MO X Y, DENG M, et al. The role of lithium ion in concrete alkali aggregate reaction[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2009, 39(1): 127-130. (in Chinese)
- [13] 王志磊, 斯纪平, 王玉富, 等. 养护温度对LiNO<sub>3</sub>抑制碱硅酸反应及其膨胀的影响[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(33): 291-296.  
WANG Z L, SI J P, WANG Y F, et al. Effect of curing temperature on LiNO<sub>3</sub> inhibition of alkali silicate reaction and its expansion[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(33): 291-296. (in Chinese)
- [14] 严文龙, 于江, 秦拥军, 等. 掺锂渣再生混凝土劈裂抗拉强度试验研究[J]. *新疆大学学报(自然科学版)*, 2015, 32(3): 362-367.  
YAN W L, YU J, QIN Y J, et al. The experimental study on the splitting tensile strength of recycled concrete incorporated lithium slag[J]. *Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition)*, 2015, 32(3): 362-367. (in Chinese)
- [15] 秦拥军, 卢义, 许富威, 等. 掺锂渣再生混凝土与钢筋粘结性能的试验研究[J]. *新型建筑材料*, 2020, 11: 98-102.  
QIN Y J, LU Y, XU F W, et al. Experimental study on bond properties between recycled concrete incorporated lithium slag and rebars[J]. *New Building Materials*, 2020, 11: 98-102. (in Chinese)
- [16] 陈洁静, 秦拥军, 肖建庄, 等. 基于CT技术的掺锂渣再生混凝土孔隙特征研究[J/OL]. *建筑材料学报*, 2020, 10: 1-15.  
CHEN J J, QIN Y J, XIAO J Z, et al. Study on pore structure characteristics of recycled concrete with lithium slag based on CT technology[J/OL]. *Journal of Building Materials*, 2020, 10: 1-15. (in Chinese)
- [17] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
China Academy of Building Research. Standard method of test for long term and durability of ordinary concrete: GB/T 50082—2009[S]. Beijing: China Building Industry Press. (in Chinese)

责任编辑: 赵新科