

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1915

尾砂胶结含盐冻结充填体力学特性研究

吴再海^{1,2}, 纪洪广¹, 姜海强^{2,3}, 齐兆军², 寇云鹏²

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院 城市地下空间工程北京市重点实验室, 北京 100083;

2. 山东黄金矿业科技有限公司 充填工程实验室, 山东 莱州 261441;

3. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 矿山充填开采正逐步向寒区甚至永久冻土区发展, 这些区域含盐地下水分布非常广泛。同时, 极端寒冷条件下往往需要向充填材料中加入一些防冻盐以防止料浆在输送过程中发生冻结。通过室内测试分析了 -6°C 环境下不同盐分(NaCl)膏体充填体力学特性(强度和初始弹性模量)随时间演化特征。利用单轴压力机测得了龄期为 7、28、90 d 膏体充填体的强度和初始弹性模量, 结果表明 NaCl 的加入会降低冻结充填体的强度, 其影响程度取决于胶结料类型。试样的强度随着养护时间的增加而增大。此外, 不论盐分浓度、养护时间和胶结料类型, 试样的强度与初始弹性模量之间存在显著的线性关系。该研究结果可以为寒区含盐膏体充填技术的开展提供一些依据。

关 键 词: 含盐膏体; 冻结; 强度; 初始弹性模量

中图分类号: TD 853

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2020)06-1874-07

Study of mechanical properties of frozen saline cemented tailings backfill

WU Zai-hai^{1,2}, JI Hong-guang¹, JIANG Hai-qiang^{2,3}, QI Zhao-jun², KOU Yun-peng²

(1. Beijing Key Laboratory of Urban Underground Space Engineering, School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Backfill Engineering Laboratory, Shandong Gold Mining Co., Ltd., Laizhou, Shandong 261441, China;

3. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: Backfill mining operations are increasingly being performed in cold regions or even permafrost areas. The water available for the preparation of mine backfill is often naturally saline. Further, in some extremely cold regions, anti-freezing agents are often used to avoid the freezing of the paste during the pipeline transportation. This study, the time-dependent evolution of uniaxial compressive strength and initial elastic modulus of cemented paste backfill (CPB) with different saline concentrations (NaCl) at -6°C was experimentally investigated. Uniaxial compressive tests were conducted on various CPB samples for different curing times (7, 28 and 90 days). The results show that the strength of CPB decreases with the addition of NaCl. All of samples experience an increase in strength with increasing curing time, due to the ongoing cement hydration. Moreover, there exists an obvious linear relationship between the uniaxial compressive strength and the initial elastic modulus, regardless of salinity, curing time and binder type. The results of this investigation could provide some technical information for the implications for backfill practices in cold regions.

Keywords: saline cemented tailings backfill; freezing; strength; initial elastic modulus

1 引 言

在过去的 30 年,尾砂胶结膏体充填技术在世界范围内得到了广泛的推广和应用^[1-2]。该技术不仅能够大规模处理尾矿废弃物,降低环境污染,还能够显著改善井下采场的稳定性,增加矿产资源的回收

率^[3-4]。膏体充填材料是由尾砂(70%~85%)、拌和水(地下水或者矿井水)和胶结料(通常 3%~7%)组成的工程混合料^[5-6]。

随着温带和热带矿产资源的逐步降低,矿山充填开采正逐步向寒区发展^[7-8]。作为国家公共安全保障的重大战略需求之一,“高海拔高寒地区金属矿山

收稿日期: 2019-11-08

修回日期: 2019-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(No.51804063); 国家自然科学基金重点项目(No.51534002)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51804063) and the Key Program of National Natural Science Foundation of China (51534002).

第一作者简介: 吴再海,男,1984 年生,博士研究生,高级工程师,主要从事岩土工程、充填工艺方面研究工作。E-mail: 59270708@qq.com

开采安全技术与装备研究”已被正式列入 2018 年国家重点研发计划“公共安全风险防控与应急技术装备”重点专项，其重点研究内容包括高海拔高寒地区矿山采选固废安全处置技术。目前，国内外的学者、工程师们也已经开展了寒区矿山充填领域的研究^[9-13]。

据统计，我国寒冷地区矿产资源储量占总储量的 50% 以上，且这些区域含盐地下水分布非常广泛。加拿大冻土区域范围达到总面积的 50% 左右，Yukon、Yellowknife、Nunavut 等矿区都位于寒冷地区，地下水天然含有一定的盐分，且盐度变化范围较大^[14]。为了降低使用淡水带来的高昂成本，矿山往往采用这些含盐地下水制备膏体充填材料。另外，在一些极寒地区，为了避免膏体料浆管输中发生冻结堵管，需要加入防冻盐来延长料浆服务时间。然而，盐分的掺入必然会影响膏体充填体的力学特性。

国内外相关学者针对膏体充填体力学性能开展了大量深入的研究，极大地促进了膏体充填技术的发展^[15-19]。然而，上述绝大部分研究是在 0 °C 以上或不含盐条件下进行的，低温（0 °C 以下）含盐膏体充填体强度演化特性研究鲜有涉及。因此，本文针对寒冷环境下含盐膏体充填体的力学特性开展较为系统的测试分析工作，研究不同胶结料种类含盐膏体充填体力学特性演化规律，以期为寒区含盐膏体充填的配比和充填体结构设计提供一定理论依据。

2 试验程序

2.1 试验材料

2.1.1 尾砂

本试验中使用的尾砂为人工尾砂（美国 Sillco 公司生产的粉磨石英砂），其 99.8% 成分为惰性 SiO₂。该尾砂中-20 μm 颗粒含量 43.7%，属于中等粒径大小尾砂。不均匀系数为 16.6，曲率系数为 1.3，级配良好。选用人工尾砂的目的在于：人工尾砂往往含有一些能够与胶结料发生反应的活性成分，进而影响试验结果的分析，而惰性 SiO₂ 不参与反应，能够消除试验结果的不确定性^[18]。此外，本试验使用的人工尾砂与 9 个矿金属矿尾砂的级配相近，因此，试验结果具有一定的普遍性。人工尾砂的主要物理参数见表 1。

2.1.2 胶结料

金属矿山充填使用最为普遍的胶结料为普硅水泥。然而，单独使用水泥时的成本可达充填总成本 75%^[20]，因此，为了降低充填成本，不少矿井利用

表 1 人工尾砂的主要物理特性

Table 1 Main physical characters of artificial tailing							
名称	D_{10} /μm	D_{30} /μm	D_{60} /μm	C_u	C_c	颗粒相对密度	比表面积 /(cm ² ·g ⁻¹)
人工尾砂	1.9	9.0	31.5	16.6	1.3	2.7	3 600
9 矿均值	1.8	9.1	30.8	17.1	1.7	—	—

炉渣、粉煤灰等廉价火山灰材料部分替代水泥，取得了良好的应用效果。因此，在试验中使用了以下两种胶结料：水泥（型号 ASTM Type I）、炉渣-水泥混合料（各占 50%），如图 1 所示。水泥和炉渣的主要化学物理特性见表 2。

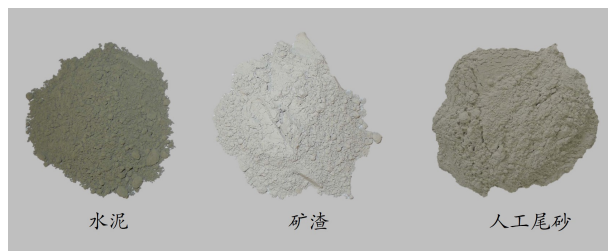


图 1 试验使用的胶结料和尾砂

Fig.1 Photos of binders and artificial tailing

表 2 水泥和炉渣的主要物理化学性质

Table 2 Main physical characters of artificial tailing							
材料名称	各组分含量/%						比表面积 /(cm ² ·g ⁻¹)
	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	
水泥	3.82	2.70	4.53	18.03	62.82	2.65	1 300
炉渣	3.87	—	9.54	34.32	41.14	10.98	2 100

2.1.3 拌和水

为消除拌和水中不确定因素的影响，采用蒸馏水作为试验用水。将特定质量的 NaCl 加入到蒸馏水中配备得到浓度分别为 0、5、35、100 g/L 的 NaCl 溶液，作为试验组拌和水。

2.2 试验方案、试样制备与养护

2.2.1 试验方案

所有膏体试样的水灰比（水与胶结料的比例）和水泥（质量）含量保持不变，分别为 7.35 和 4.5%。试验方案按照胶结料类型分为水泥型和炉渣型两类，试样配比方案详见表 3。

2.2.2 试样制备与养护

首先将称量好的尾砂和胶结料均匀混合，然后再加入特定盐分浓度的拌和水进行搅拌，搅拌时间为均为 7 min。在本试验中，所有试样的初始温度控制在 0 °C 左右。料浆搅拌均匀后，倒入圆柱形养护模具（直径×高度 = 5 cm×10 cm）中，密封后放入-6 °C 养护箱进行恒温养护。

表 3 试样配比方案
Table 3 Mix proportions of CPB samples

类型	名称	胶结料组成/%		NaCl 浓度 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)
		水泥	炉渣	
水泥型	水泥-0 g/L	100	0	0
	水泥-5 g/L	100	0	5
	水泥-35 g/L	100	0	35
	水泥-100 g/L	100	0	100
炉渣型	炉渣-0 g/L	50	50	0
	炉渣-5 g/L	50	50	5
	炉渣-35 g/L	50	50	35
	炉渣-100 g/L	50	50	100

2.3 测试方法

2.3.1 单轴抗压强度测试

本试验采用 ELE International 计算机控制压力机对养护龄期为 7、28、90 d 充填体试样的强度进行测试, 测试程序依据 ASTM C39 圆柱形混凝土试件抗压强度的标准试验方法。测试时压力机的加载速率设定为 1 mm/min。测试前 1 d 对试样进行脱模, 然后对其端面进行打磨, 保证端面互相平行且垂直于试样轴线。为了保证试验结果的准确性, 在压力机上安装了一个小型温控室, 其温度保持在 -6°C 。

2.3.2 微观孔隙结构分析

利用 Micromeritics' AutoPore III 9420 型压汞仪, 对特定试样的孔隙结构(孔隙大小分布和累计孔隙体积)进行了分析, 测试压力范围是从一个标准大气压到 414 MPa。实测前, 将待测膏体试样放入上述真空干燥箱(40°C)进行烘干, 直至重量不再变化。

3 试验结果与分析

3.1 单轴抗压强度

图 2 为 -6°C 养护温度下不同 NaCl 浓度(0、5、35、100 g/L)和不同胶结料类型膏体典型应力-应变曲线。对于应力-应变关系为应变软化的试样, 选取 12% 应变所对应的应力作为其单轴抗压强度。不同盐度膏体充填体强度随时间演化特征如图 3 所示。

由图 3 可知, 所有(含盐和非含盐)膏体试样的强度均随着龄期的增加而增长。分析认为, 随着养护时间的增加, 膏体硬化主要固结相——胶结料水化产物(C-S-H、CH 等)数量逐渐增加, 因此, 颗粒间的黏结强度增加。此外, 随着养护时间的增加, 膏体中毛细孔内水分子在分子力作用下会向形成的冰晶迁移, 促使冰晶增长^[21], 进而提高了冰的

强度以及颗粒-冰间的联结力^[8]。

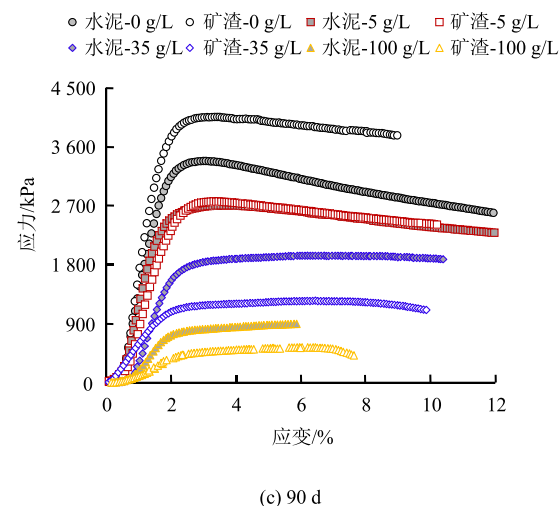
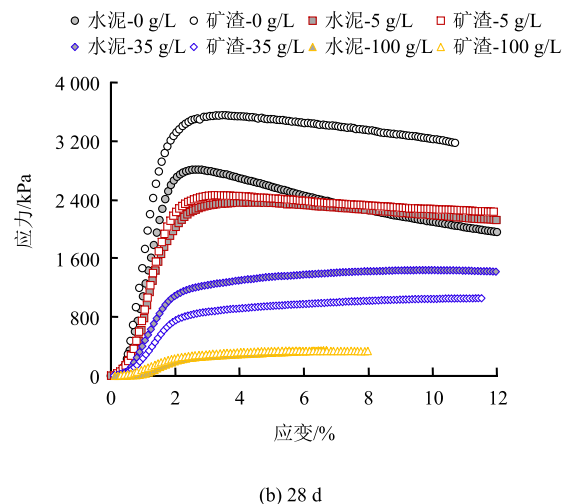
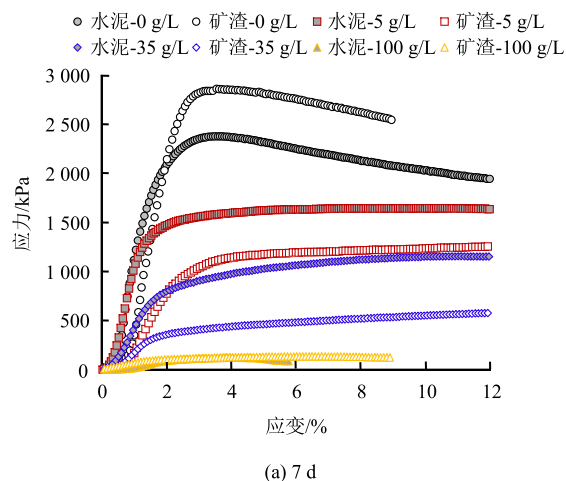
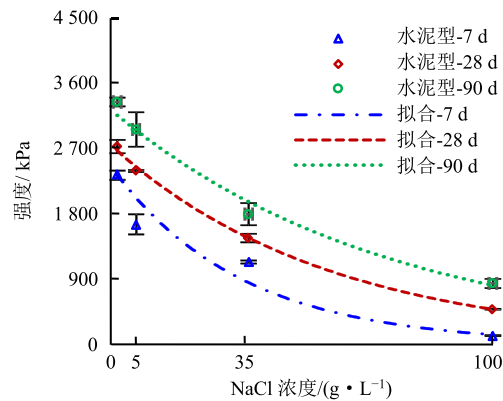
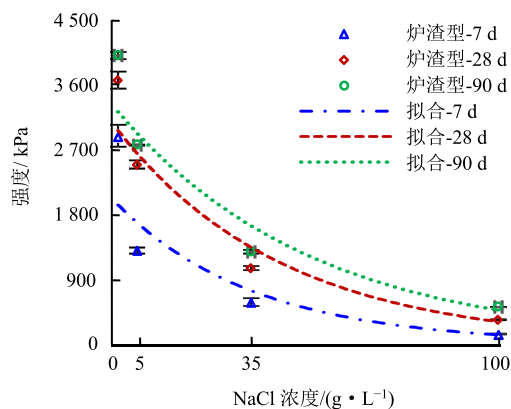


图 2 不同盐度膏体充填体典型应力-应变曲线
Fig.2 Typical stress-strain curves of CPBs with various salinities

由图 3 中的强度与 NaCl 浓度曲线可知, 盐的掺入强烈影响着膏体充填体的强度, 即两种类型膏体试样的强度均随着盐度的增加而降低。这是因为:



(a) 水泥型膏体



(b) 炉渣型膏体

图 3 不同盐度膏体充填体强度随时间演化特征
Fig.3 Strength development of CPBs with different salinities

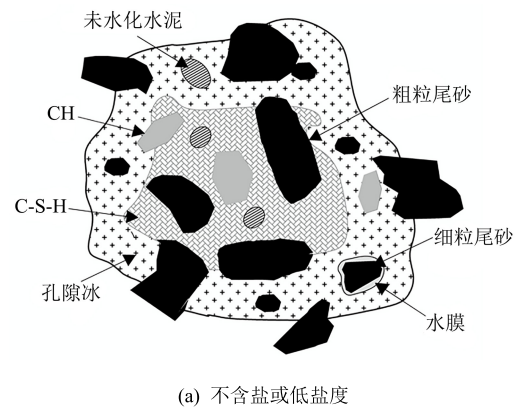
盐分的掺入会降低孔隙液的凝结点，引起膏体中孔隙冰数量减少、未冻水含量升高，进而导致膏体强度下降。在不含盐或盐含量较低时，孔隙冰含量较多，其能够与颗粒间黏结形成较高强度的骨架结构（如图 4(a)所示）；随着盐度的继续增加，试样中孔隙冰数量降低，孤立地“漂浮”在孔隙水中，形成不了连续的骨架结构（如图 4(b)所示），因此试样的黏聚力下降，强度出现退化。

此外，对强度与 NaCl 浓度数据进行了拟合（如图 3 所示），结果表明，任意养护龄期膏体试样的强度与 NaCl 浓度间存在比较明显的指数变化关系，指数形式见式（1）和表 4。

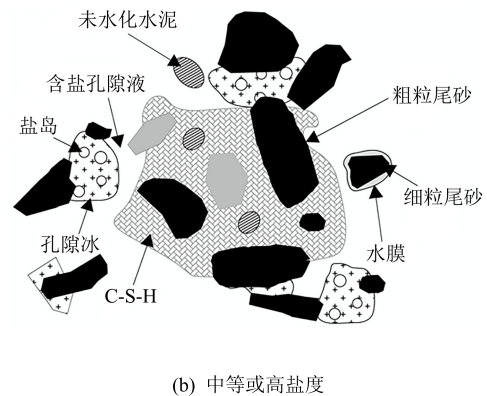
$$\sigma = ce^{d\omega} \quad (1)$$

式中： σ 为试样的强度（kPa）； ω 为试样的初始盐度（g/L）； c 、 d 为与养护龄期相关的常量。

对比表中不同龄期试样强度与 NaCl 浓度指数拟合方程可知， c 和 d 为与养护时间相关的常数，且其值随养护龄期的增加而增大。此外，相较于水



(a) 不含盐或低盐度



(b) 中等或高盐度

图 4 冻结膏体组分结构示意图

Fig.4 Distribution of component in frozen saline CPBs

表 4 试样强度与 NaCl 浓度拟合结果

Table 4 Fitting results of the strength vs. NaCl concentration of CPBs

名称	拟合方程	拟合度 R^2
水泥型-7 d	$\sigma = 2\,325.2e^{-0.029\omega}$	0.975 5
水泥型-28 d	$\sigma = 2\,658.3e^{-0.017\omega}$	0.999 4
水泥型-90 d	$\sigma = 3\,150.3e^{-0.014\omega}$	0.989 6
炉渣型-7 d	$\sigma = 1\,930.4e^{-0.028\omega}$	0.941 1
炉渣型-28 d	$\sigma = 2\,968.7e^{-0.023\omega}$	0.966 4
炉渣型-90 d	$\sigma = 3\,230.2e^{-0.019\omega}$	0.951 7

泥型膏体，炉渣型膏体的指数关系拟合度较低，这主要因为水泥和炉渣成分不同，因此，NaCl 加入后的影响程度存在差别。

对比图 3(a)和图 3(b)可知，在不含盐情况下，炉渣型膏体试样强度始终高于纯水泥型试样。分析认为，炉渣颗粒细小（见表 1，炉渣颗粒比表面积明显高于水泥），能够填充尾砂颗粒间的孔隙，使膏体微观结构更加致密。上述论述可由压汞试验结果佐证，如图 5 所示，图 5(a)为孔隙直径分布，图 5(b)为累计孔隙体积随孔径的变化。从图 5(a)可以看出，采用炉渣替换部分水泥引起孔隙直径分布向左偏移，即孔隙直径减小。图 5(b)表明矿渣的掺入使得试样的累计孔隙体积明显降低。由上述分析可知炉

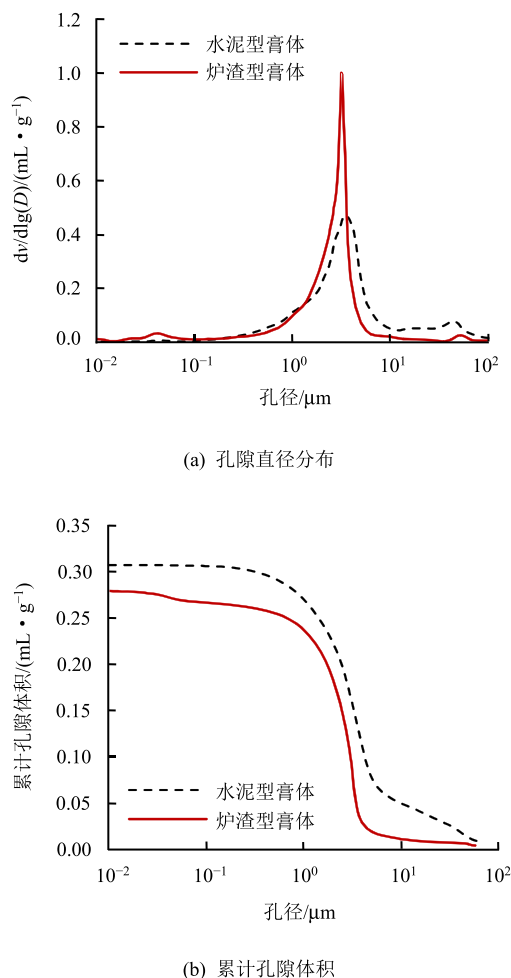


图5 90 d 不含盐水泥型与炉渣型膏体孔隙结构
Fig.5 Pore size distribution of Portland cement type I (PCI)-CPB vs. slag-CPB after 90 days of curing

渣型膏体的孔隙结构较水泥型膏体更加致密。此外，矿粉颗粒不规则且表面粗糙，因而可以提高孔隙冰-固体颗粒间接触面的强度，从而提高试样的整体强度。Fall 等^[15]在研究养护温度（常温以上）对膏体强度影响时也得到了相似的结果。

然而，炉渣型膏体试样较水泥型试样对 NaCl 盐的加入更加敏感。例如，掺入 5、35、100 g/L NaCl 后，水泥型膏体强度分别降低了 41.8%、52.2%和 95.2%，而相应的炉渣型膏体强度退化了 58.9%、82.6%和 95.6%，如图 6 所示。这也导致在相同盐度情况下，所有含盐炉渣型膏体（除 28 d 的 5 g/L 试样）的强度均低于相应盐度的水泥型膏体。出现上述现象的原因在于含盐炉渣型膏体中未冻结水含量更高。的确，未冻水的含量主要由颗粒级配、比表面积、矿物与化学成分、密度、溶质浓度以及孔隙液的成分等决定^[22-23]。相较于水泥，炉渣颗粒更加细小、表面积较大（颗粒大小和比表面积决定着毛细作用力和吸附力），因此，其表面和孔隙会吸附更

多的自由水，导致相同盐度下炉渣型膏体中自由水（未冻水）含量较水泥型膏体更高。前人^[24-25]在研究土等多孔材料的冻结特性时同样发现未冻水的含量随着颗粒粒径的减小而升高。此外，炉渣和水泥在矿物和化学成分上差别较大，因而会导致二者孔隙液凝固点的不同。

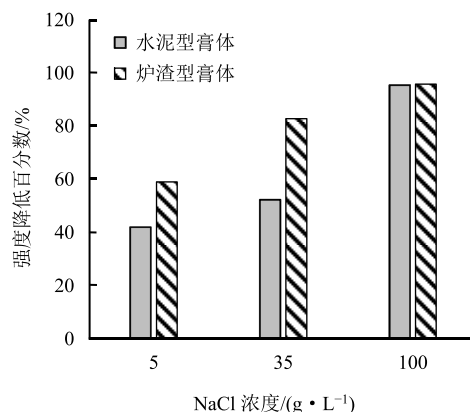


图6 含盐膏体较不含盐膏体强度下降百分比
Fig.6 Percent loss in strength of saline CPBs in comparison with non-saline CPBs

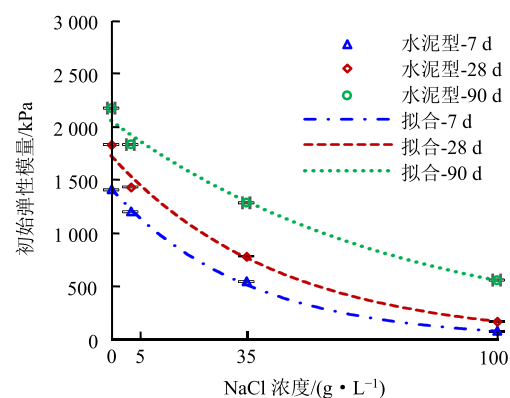
3.2 初始弹性模量

冻结膏体是一种非线性弹性材料，为了描述其压缩变形特性，采用初始弹性模量，即初始压缩线弹性阶段的模量，来表征冻结膏体的变形。不同养护时期膏体的初始弹性模量与 NaCl 浓度关系曲线如图 7 所示。由图可知，与强度与 NaCl 浓度关系类似，两种膏体的初始弹性模量均随着养护龄期的增加而升高，而随着 NaCl 浓度升高而降低；弹性模量与 NaCl 浓度拟合结果表明，两种膏体的弹性模量与 NaCl 浓度之间具有较为显著的指数关系（见图 7 和表 5）。在不含盐条件下，所有龄期的炉渣型膏体的初始弹性模量要高于水泥型试样，而在含盐情况下，水泥型膏体试样强度退化程度要低于炉渣型膏体。

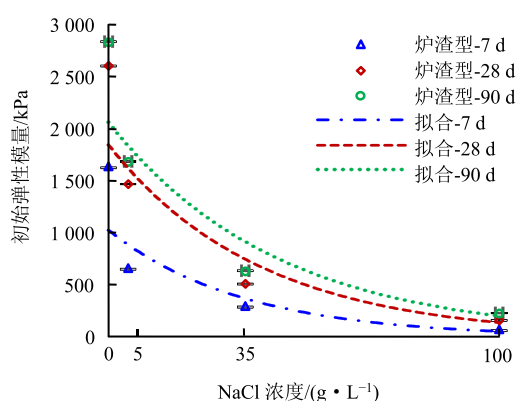
为了探索膏体强度与其初始弹性模量间的关系，本文整理汇总了所有膏体试样的强度和相应的弹性模量数据，绘制得到膏体单轴抗压强度和弹性模量关系，如图 8 所示。采用线性关系对图 8 中的数据进行了拟合，结果表明：不论养护龄期、盐度以及胶结料类型，膏体的单轴抗压强度与弹性模量之间存在较为显著的线性关系^[26]：

$$E_0 = 1.564\sigma \quad (2)$$

式中： E_0 为试样的初始弹性模量； σ 为试样相对应



(a) 水泥型膏体



(b) 炉渣型膏体

图7 冻结膏体初始弹性模量随时间演化特征
Fig.7 Initial elastic modulus evolution of frozen CPBs

表5 初始弹性模量与 NaCl 浓度拟合结果

Table 5 Fitting results of the initial elastic modulus vs. NaCl concentration of CPBs

名称	拟合方程	拟合度 R^2
水泥型-7 d	$E_0 = 1420.5e^{-0.029\omega}$	0.999 4
水泥型-28 d	$E_0 = 1729.0e^{-0.023\omega}$	0.997 4
水泥型-90 d	$E_0 = 2058.0e^{-0.013\omega}$	0.994 7
炉渣型-7 d	$E_0 = 1029.9e^{-0.029\omega}$	0.933 9
炉渣型-28 d	$E_0 = 1848.9e^{-0.026\omega}$	0.935 0
炉渣型-90 d	$E_0 = 2066.5e^{-0.023\omega}$	0.929 7

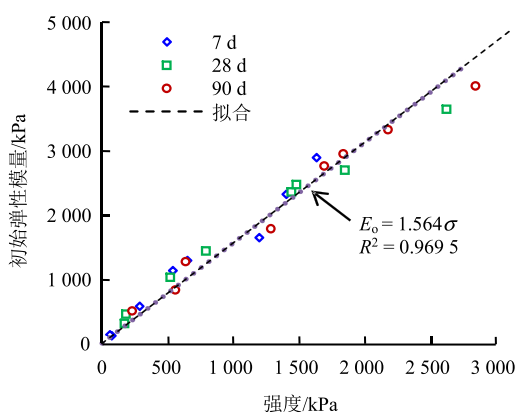


图8 所有试样的初始弹性模量与强度的关系
Fig.8 Plotting of the initial elastic modulus versus strength of all samples

的强度。

4 结 论

本文分析研究了 NaCl 盐浓度对-6 °C养护环境下不同胶结料种类的膏体的力学特性（单轴抗压强度和初始弹性模量）的影响，得到主要结论如下：

（1）不论养护龄期长短，不含盐炉渣型膏体的强度始终高于相应龄期的不含盐水泥型膏体。掺入相同的盐分，炉渣型试样强度较水泥型试样退化更加严重。

（2）两种类型膏体的强度均随着龄期的增加而增大，而随着盐度的升高呈较为显著的指数形式下降，水泥型试样的拟合度要高于炉渣型。

（3）任意养护龄期、盐度以及胶结料种类条件下，冻结膏体单轴抗压强度和其弹性模量间存在较为显著的线性关系。

参 考 文 献

- [1] TARIQ A, YANFUL E K. A review of binders used in cemented paste tailings for underground and surface disposal practices[J]. **Journal of Environmental Management**, 2013, 131: 138-149.
- [2] BENZAAZOUA M, BELEM T, BUSSIÈRE B. Chemical factors that influence the performance of mine sulphidic paste backfill[J]. **Cement & Concrete Research**, 2002, 32(7): 1133-1144.
- [3] KLEIN K, SIMON D. Effect of specimen composition on the strength development in cemented[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2006, 43(3): 310-324.
- [4] ERCIKDI B, KESIMAL A, CIHANGIR F, et al. Cemented paste backfill of sulphide-rich tailings: importance of binder type and dosage[J]. **Cement & Concrete Composites**, 2009, 31(4): 268-274.
- [5] POKHAREL M, FALL M. Combined influence of sulphate and temperature on the saturated hydraulic conductivity of hardened cemented paste backfill[J]. **Cement & Concrete Composites**, 2013, 38(4): 21-28.
- [6] WU A, WANG Y, WANG H, et al. Coupled effects of cement type and water quality on the properties of cemented paste backfill[J]. **International Journal of Mineral Processing**, 2015, 143: 65-71.
- [7] 古德生. 创新驱动金属矿业的转型升级[C]//全国黄金(有色金属)矿山生产新技术、新产品学术交流会. 北海: [出版社不详], 2014.

- GU De-sheng. Innovation drives the transformation and upgrading of metal mining industry[C]//National Symposium on New Technologies and Products for Gold (Non Ferrous) Mine Production. Beihai: [s. n.], 2014.
- [8] JIANG H Q, FALL M, CUI L. Freezing behaviour of cemented paste backfill material in column experiments[J]. **Construction & Building Materials**, 2017, 147: 837-846.
- [9] JIANG H Q, FALL M, CUI L. Yield stress of cemented paste backfill in sub-zero environments: experimental results[J]. **Minerals Engineering**, 2016, 92: 141-150.
- [10] JIANG H Q, FALL M. Yield stress and strength of saline cemented tailings in sub-zero environments: Portland cement paste backfill[J]. **International Journal of Mineral Processing**, 2017, 160: 68-75.
- [11] 刘超, 韩斌, 孙伟, 等. 高寒地区废石破碎胶结充填体强度特性试验研究与工业应用[J]. **岩石力学与工程学报**, 2015, 34(1): 139-147.
- LIU Chao, HAN Bin, SUN Wei, et al. Experimental study of strength of backfillings of cemented rock debris and its application under low temperature condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(1): 139-147.
- [12] 赵国彦, 马举, 彭康, 等. 基于响应面法的高寒矿山充填配比优化[J]. **北京科技大学学报**, 2013, 35(5): 559-565.
- ZHAO Guo-yan, MA Ju, PENG Kang, et al. Mix ratio optimization of alpine mine backfill based on the response surface method[J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2013, 35(5): 559-565.
- [13] CLUFF D L, KAZAKIDIS V N. Opportunities and constraints of engineering frozen backfill for underground mining applications in permafrost[C]//International Symposium on Cold Regions Development. Alaska: [s. n.], 2013: 175-190.
- [14] HIVON E G. Behaviour of saline frozen soils[D]. Alberta: University of Alberta, 1991.
- [15] FALL M, CÉLESTIN J C, POKHAREL M, et al. A contribution to understanding the effects of curing temperature on the mechanical properties of mine cemented tailings backfill[J]. **Engineering Geology**, 2010, 114(3): 397-413.
- [16] FALL M, POKHAREL M. Coupled effects of sulphate and temperature on the strength development of cemented tailings backfills: Portland cement-paste backfill[J]. **Cement and Concrete Composites**, 2010, 32(10): 819-828.
- [17] BELEM T, BENZAAZOUA M. Design and application of underground mine paste backfill technology[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2007, 26(2): 147-174.
- [18] BENZAAZOUA M, FALL M, BELEM T. A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill[J]. **Minerals Engineering**, 2004, 17(2): 141-152.
- [19] YILMAZ E, BELEM T, BENZAAZOUA M. Specimen size effect on strength behavior of cemented paste backfills subjected to different placement conditions[J]. **Engineering Geology**, 2015: 185: 52-62.
- [20] GRICE T. Recent mine developments in Australia[C]//Proceeding of the 7th International Symposium on Mining with Backfill. Seattle: [s. n.], 2001: 351-357.
- [21] REMPEL A W. Formation of ice lenses and frost heave[J]. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, 2007, 112(F2): 237-254.
- [22] ANDERSON D M, TICE A R. Predicting unfrozen water contents in frozen soils from surface area measurements[J]. **Highway Research Record**, 1972, 393: 12-18.
- [23] PATTERSON D E, SMITH M W. Unfrozen water content in saline soils: results using time-domain reflectometry[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1985, 22(1): 95-101.
- [24] HIVON E G, SEGO D C. Strength of frozen saline soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1995, 32(2): 336-354.
- [25] WATANABE K, MIZOGUCHI M. Amount of unfrozen water in frozen porous media saturated with solution[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2002, 34(2): 103-110.
- [26] 姜海强. 低温环境下膏体材料流动与力学特性实验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- JIANG Hai-qiang. Flowability and mechanical properties of cemented paste backfill in sub-zero environments[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.