

气凝胶在稠油热采井水泥浆中的应用

李宇^{1*}, 谢海英¹, 王佳², 杨汉元¹, 唐建军¹

(1. 湖南省工程地质矿山地质调查监测所, 湖南长沙 410014;

2. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆钻井总公司, 陕西西安 710000)

摘要:随着稠油油气资源不断勘探开发,稠油黏度升高。在热采过程中,由于热量散发大,油气温度很低,导致流动性变差,甚至出现凝固,降低了稠油产量。针对这一问题,以SiO₂气凝胶为原料,采用正辛烷溶剂对其进行改性制得了具有良好分散特点的纳米亲水性气凝胶HYA-1。研究表明,加入2%亲水气凝胶HYA-1,水泥石养护14 d后抗压强度衰减不明显,抗折强度提高了1.09倍,具有良好的力学性能,渗透率降低了97%,水泥石导热系数降低了91%,实现了二氧化硅气凝胶低导热的属性。HYA-1应用到旅大热采固井中,显著降低了热采固井水泥浆的导热系数,固井质量优秀,解决了渤海辽东湾海域热采井热量损失大的问题,满足了正常热采固井水泥浆的隔热和保温需求。

关键词:亲水气凝胶;稠油热采井;低导热;高强度

中图分类号:TE256

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)S2-0241-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S2.043

Application of aerogel in cement slurry for thermally recovering heavy oil well

LI Yu^{1*}, XIE Hai-ying¹, WANG Jia², YANG Han-yuan¹, TANG Jian-jun¹

(1. Hunan Engineering Geology and Mining Geological Survey and Monitoring Institute, Changsha 410014, China;

2. Changqing Drilling Co., Ltd., CNPC Chuangqing Drilling Engineering Company Limited, Xi'an 710000, China)

Abstract: With the continuous exploration and development of heavy oil and gas resources, the viscosity of heavy oil becomes high. During thermal recovery process, oil and gas temperature is very low due to large heat dissipation, resulting in poor fluidity and even solidification, which reduces the production of heavy oil. In order to solve this problem, HYA-1, a nano hydrophilic aerogel with good dispersion characteristics, is prepared from SiO₂ aerogel through modifying it with n-octane solvent in laboratory. Research shows that after curing for 14 days with 2% HYA-1, the compressive strength of the cement paste does not decline significantly, the flexural strength increases by 1.09 times, showing good mechanical properties. The permeability and thermal conductivity of the cement paste declines by 97% and 91%, respectively, realizing the low thermal conductivity of silica aerogel. As HYA-1 is applied to the thermal recovery cementing well in Luda, the thermal conductivity of the thermal recovery cementing slurry reduces significantly. The cementing quality is excellent, solving the problem of large heat loss in thermal recovery wells in the Liaodong Bay area of Bohai Sea, and meeting the thermal insulation requirements of normal thermal recovery cementing slurry.

Key words: hydrophilic aerogel; thermally recovering heavy oil well; low thermal conductivity; high strength

稠油是一种高黏度、高密度的原油,随着全球油气资源的不断开采,特超稠油资源开发对于保障国家能源安全意义重大。据统计,全球已探明的稠油资源储量超过 3×10^{11} t,稠油黏度虽高,但对温度极为敏感,每增加10℃黏度即下降约一半^[1-2]。由于在稠油热采过程中井筒及水泥环的导热性好,油气运移至井口时热量散失快,导致原油黏度增大,甚至失去流动性,为稠油热采增加了难度和开采成本^[3]。目前采用的低导热材料主要有超轻憎永微孔硅酸钙、玻璃微珠、低导热微球、气凝胶等,这些材料对水泥浆的导热性有一定的降低作用,但是在水

泥浆中加入低导热材料,会造成浆体不稳定、水泥石强度差等问题。因此,为了降低稠油热采井过程中热量的散失和确保固井质量,很多学者对各种低导热材料和工艺设计进行了研究。杨维丽等^[4-5]在注气管线中优选气凝胶,由于气凝胶材料导热系数低,降低了稠油热采井口的散热损失75.04%,取得了一定的效果,但是这种方法仅局限于井口保温,对于长时间油气运移过程中的热量散失没有作用,且气凝胶的亲水性差,其对水泥浆性能没有研究。徐可军等^[6-7]利用低密度泡沫固井水泥浆工艺达到了保温效果,从一定程度上减缓降低稠油的温度,可是该

收稿日期:2024-04-03;修回日期:2024-08-07

基金项目:页岩气压裂井井筒重建二次固井环空密封完整性保障方法研究(UOG2024-14)

作者简介:李宇(1990-),男,本科,工程师,主要从事石油工程固井技术工作,通讯联系人,729720098@qq.com

技术形成的水泥石材料抗压强度降低,现场流程工艺复杂,不能满足现场作业要求。冯凯等^[8]结合河北雄县地质背景,采用对水泥浆发泡技术改善水泥浆的保温效果,利用微硅具有粒径小可以提高水泥石致密性的作用和高岭土可以促进水化反应,两者协同作用对水泥石的抗压强度、抗腐蚀能力均有提高作用,构建了一套河北雄县地热井的耐腐蚀泡沫保温水泥浆,但是掺合料对耐腐蚀水泥浆的应用有待进一步研究,且该低导热水泥浆研究也比较少。王永洪等^[9](CN112094091A)利用微硅、玻璃微珠、珍珠岩、膨润土等材料研发了一种低导热材料,并通过相关添加剂研制了一套长封固段固井用的大温差低导热水泥浆,虽然水泥浆有一定的低导热系数,但是该水泥浆并在理论上对长封固段固井开展研究,对于深部温度高达 300℃ 以上温度稠油并不具有参考意义。王菲等^[10]阐述了 SiO₂ 气凝胶具备低导热、超低密度及高孔隙度等优良特点,提出了将其应用于建筑具备良好保温隔热的作用,但气凝胶价格贵且生产工艺需要优化。张志华等^[11-12]介绍了溶胶-凝胶方法研制 SiO₂ 气凝胶,并从 SiO₂ 气凝胶的热学及疏水性等方面开展了论述,肯定了 SiO₂ 气凝胶应用于水泥建筑等方面具有良好的低导热效果,但是对于气凝胶疏水性工艺需要优化。这些研究表明,国内用的最多的就是玻璃微珠低导热材料,其对水泥浆导热性有一定的降低作用,但是由于水泥和玻璃微珠之间依然存在明显的孔隙,导致水泥石的导热系数降低幅度有限,并且该玻璃微珠对于水泥浆强度和浆体稳定性有一定的影响。气凝胶应用于建筑及航空等领域具有明显低导热作用和性价比高的特点,但是气凝胶作为良好低导热材料应用于稠油热采井固井水泥浆中研究很少,一方面由于气凝胶生产工艺复杂,国内对这块技术研究比较少;另一方面气凝胶含有 SiO₂,分散性差,对于水泥浆的强度及性能会有影响,在国内没有广泛应用。

为了在稠油热采井水泥浆中获得超低导热系数的性能,室内研制了一种亲水型气凝胶 HYA-1,该纳米气凝胶在提升水泥石隔热保温效果的同时,其纳米结构孔隙充填方式还显著降低水泥石的渗透率,提高水泥石的力学性能。通过在研制过程中对反应温度和 pH 值的调控,采用正辛烷溶剂对二氧化硅气凝胶进行改性,研制了一种亲水型气凝胶 HYA-1,其具有良好的分散性,并开展了亲水型气凝胶 HYA-1 特征及其对稠油热采井固井水泥浆(石)的影响研究。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

G 级油井水泥,嘉华水泥厂;淡水(自来水);二氧化硅气凝胶、氨水、正辛烷溶剂、硅粉(300 目)、玻璃微珠、抗高温稳定剂、MT358 分散剂、H21L 缓凝剂、膨胀剂,荆州嘉华科技有限公司;FLO-S 降失水剂、纳米亲水气凝胶 HYA-1,自制。

DFC-0708 恒速搅拌机、FC-0712C 型高温高压稠化仪,沈阳金欧科石油仪器技术开发有限公司;TG-3060 六速旋转黏度计、TG-71 高温高压失水仪,沈阳泰格石油仪器设备制造有限公司;YJ-2001 匀加荷压力试验机,青岛森欣机电设备有限公司;55XA-UVSN 显微镜,上海光学仪器厂;LDY50-180 高温高压岩心流动试验仪,苏州拓测仪器设备有限公司;HY-20080 微机控制电子万能材料试验仪,上海衡翼精密仪器有限公司。

1.2 实验方法

(1) 亲水气凝胶 HYA-1 的制备。首先将二氧化硅气凝胶加入去离子水中搅拌,反应过程中加入适量的氨水,使得混合液 pH 控制在 7.5~10 之间,此过程反应温度在 50℃ 左右老化 5 h。然后在得到的凝胶中加入正辛烷溶剂反应进行改性,然后在 120℃ 条件下加热置换出水,再采用常压法在 135℃ 条件下加热去除水和正辛烷溶剂,在常温下冷凝即得改性后亲水气凝胶 HYA-1,该亲水型气凝胶 HYA-1 在水中的分散性好。

(2) HYA-1 的物性特征测试。将亲水型气凝胶 HYA-1 进行水浴加热,使其凝胶颗粒液化,然后在常温下待其水分挥发,将干燥的 HYA-1 采用 SU8010 冷场发射扫描电子显微镜观察其物性特征。

(3) 水泥石渗透率的测定。参照国家标准 GB/T 19139—2012《油井水泥试验方法》的标准制模养护,采用高温高压岩心流动试验仪测定水泥石渗透率。

(4) 水泥浆性能评价。按照国家标准 GB/T 19139—2012《油井水泥试验方法》评价水泥浆的性能^[13]。水泥浆基础配方为:100% G 级水泥+41% 淡水+32% 硅粉(300 目)+10% 玻璃微珠+9.4% 抗高温稳定剂+2.5% FLO-S 降失水剂+2% 膨胀剂+1% MT358 分散剂+1.1% H21L 缓凝剂,在基础配方中加入 0、1%、2%、3% HYA-1 的水泥浆,编号分别为 D1、D2、D3、D4。

(5) 水泥石抗压强度测试。按照国家标准

GB/T 19139—2012《油井水泥试验方法》,将气凝胶水泥浆制作成直径 10 mm、高 25 mm 的圆柱体标准模块,利用抗压强度实验仪进行水泥石模块的抗压强度测试。

(6)水泥石导热系数测试:将水泥石岩样制作成平板形状,然后在不同温度下开展热传导测试,根据岩样的厚度、温度差和热传导时间来推导出导热系数。

(7)水泥石微观结构评价。将水泥石试样在 350℃ 养护一定时间,然后将水泥石试样在烘箱内干燥,取样品研磨成粉,用压片机压片,利用电子显微镜对 D1 和 D3 试样进行微观分析。

2 结果与讨论

2.1 HYA-1 物性特点

HYA-1 物性测试结果表明,HYA-1 具有大量的纳米球粒骨架结构,可以加长固体导热的路径;其表面还有团絮状 C-S-H 凝胶的交叉攀附,HYA-1 pH 大于 7,在碱性环境下促进水化产物交联,形成一个三维空间牢固、结合较密实的屏蔽体,大大减少了热辐射,达到隔热和保温效果,同时使水泥石在硬化后显著提高水泥石强度。由扫描电镜照片(如图 1)可以看出,气凝胶粒径为 20~50 nm 的水分散相,这是由于正辛烷溶剂改性了气凝胶,可以很好分散于水泥颗粒间,通过孔隙充填方式显著降低水泥石的渗透率。

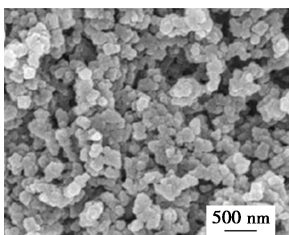


图 1 HYA-1 的扫描电镜照片

2.2 HYA-1 对水泥浆性能的影响

2.2.1 对水泥浆施工基本性能的影响

水泥浆基本性能主要有流变性、稠化时间及失量的评价。水泥浆的流变性对于施工注水泥流动摩阻的计算及提高顶替效率有着重要的关系,降低水泥浆的滤失量,能防止因渗透地层的滤失作用而引起施工事故和油气层的损害^[14]。在注水泥施工中,由于水泥颗粒的不断水化,水泥浆的黏度将逐渐增加,直至增稠至不能流动。为了保证注水泥作业的施工安全,必须事先测定水泥浆稠化时间确保施

工作业时间。因此室内针对气凝胶 HYA-1 对水泥浆的流变性、失水量和稠化时间开展了研究,如表 1 所示。从表 1 不难发现,加入了气凝胶 HYA-1 的水泥浆流变性较好,满足流性指数(n)大于 0.5,稠度系数(K)小于 $0.7 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ 泵送流变性标准,随着气凝胶 HYA-1 气凝胶加量的增加,稠化时间缩短,但是在 180~300 min 可调;失水整体呈降低趋势,失水量均小于 50 mL,并且当 HYA-1 加量为 2% 时,失水量小于 30 mL,流变性更好,结合热采井固井作业情况,推荐 HYA-1 的加量为 2%。

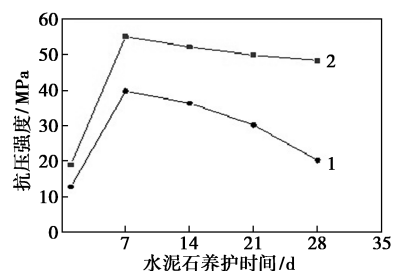
表 1 HYA-1 加量对水泥浆常规性能的影响

水泥浆 试样编号	HYA-1 加量/%	n	$K/(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	失水量/ mL	稠化时间/ min
D1	0	0.90	0.47	60	355
D2	1	0.83	0.66	41	300
D3	2	0.80	0.59	28	289
D4	3	0.71	0.69	48	261

2.2.2 对水泥石力学性能的影响

(1)水泥石抗压强度

选择 D1、D3 配方开展水泥石 1、7、14、21 d 和 28 d 抗压强度评价,实验温度为 350℃ 条件养护。不同养护时间下 HYA-1 对水泥浆抗压强度的影响见图 2。由图 2 可以看出,不含 HYA-1 水泥浆 1、7、14、21 d 和 28 d 抗压强度分别为 12.8、39.7、36.4、30.2 MPa 和 20.3 MPa, HYA-1 的加量为 2% 水泥浆 1、7、14、21 d 和 28 d 抗压强度分别为 19、55、52.1、49.8 MPa 和 48.3 MPa。由此表明,含 2% 水泥石抗压强度明显高于不含 HYA-1 的水泥浆,并且当养护 14 d 后,未加 HYA-1 (仅含玻璃微珠导热材料)的水泥浆抗压强度衰减快,加入了 HYA-1 抗压强度基本没有衰减,这是由于加入的玻璃微珠导热材料与水泥之间依然存在明显的孔隙,而 HYA-1 具有纳米胶粒可以很好分散于水泥颗粒间,通过孔



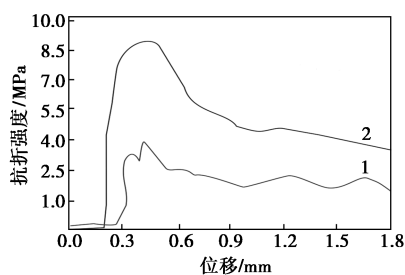
1—HYA-1 加量为 0; 2—HYA-1 加量为 2%

图 2 不同养护时间下 HYA-1 对水泥浆抗压强度的影响

隙充填方式显著降低水泥石的渗透率,增加了水泥石的致密性,提高了水泥石的抗压强度。

(2) 水泥石抗折强度

水泥环对于套管有支撑作用,在外界压力或压裂环境作用下,水泥环会出现裂缝及破碎现象。抗折强度为水泥石单位面积承受弯矩时的极限折断应力,即水泥石材料受到弯曲负荷的作用而破坏时的极限应力和抗断强度^[15]。因此水泥环需要有较强的抗折强度来抵抗冲击,才能有效地避免射孔冲击造成的水泥环裂缝现象发生,保证固井作业安全。由图 3 可以看出,在相同外力作用下,加入 HYA-1 的水泥石抗折强度明显高于未加 HYA-1 的水泥石,抗折强度最高达到了 8.6 MPa,与未加 HYA-1 的水泥石相比,抗折强度提高了 1.09 倍,这是由于 HYA-1 的晶体粒径达到纳米级后,其抗折性能得到极大改善,将其添加于水泥浆中可明显提高材料的力学性能,满足现场固井需求。



1—HYA-1 加量为 0; 2—HYA-1 加量为 2%

图 3 水泥石抗折强度曲线

2.2.3 对水泥石渗透率的影响

渗透率为在一定压差下,水泥石允许流体通过的能力。由于水泥石自身结构存在一定空隙,而水泥石渗透率降低对于抵抗流体窜流和抗腐蚀都有关键的作用。参照国家标准 GB/T 19139—2003 制模养护,采用高温高压岩心流动试验仪测定水泥石的渗透率^[13],实验结果如图 4 所示。不加 HYA-1 水泥石的渗透率为 0.024 mD,随着 HYA-1 加量的增加,水泥石渗透率逐渐减小,加入 1%、2%、3% HYA-1 水泥石的渗透率分别为 0.008 2 mD、

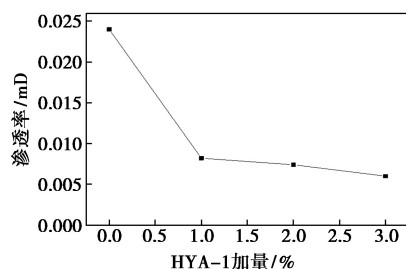


图 4 不同加量 HYA-1 对水泥石渗透率的影响

0.007 4 mD、0.006 0 mD。由此表明,由正辛烷溶剂改性的气凝胶,纳米胶粒可以很好分散于水泥颗粒间,通过孔隙充填方式提高水泥石的密实性,使颗粒之间的空隙越小,显著降低水泥石的渗透率,使水泥浆表现为优良特性,这对于导热系数降低有明显的促进作用。

2.2.4 对水泥石导热性的影响

固井热传导是通过水泥石作为介质将热量传递,水泥石导热系数是评估水泥石保温效果的关键性能之一,水泥石导热系数越低,水泥石保温性越好,对于稠油热采井采收率的提高起着至关重要的作用。室内采用平板法测试水泥石的导热系数,结果见图 5。由图 5 可见,当气凝胶加量增加,水泥石导热系数降低,当 HYA-1 加量为 2% 和 3% 时,导热系数分别为 0.486 W/(m·K) 和 0.308 W/(m·K),导热系数分别降低了 91% 和 95%。由此可见,亲水气凝胶 HYA-1 的加入,由于 HYA-1 具有大量的纳米球粒骨架结构,可以加长固体导热的路径,再加上其表面团絮状 C-S-H 凝胶促进水化产物交联形成较密实屏蔽体,明显降低了水泥石的导热系数,保温效果好。

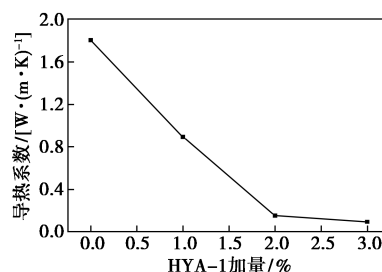
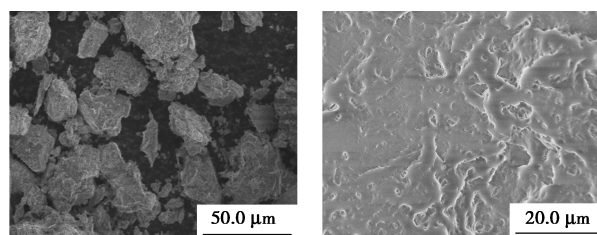


图 5 不同加量 HYA-1 对水泥石导热系数的影响

2.2.5 对水泥石微观形貌的影响

利用电子显微镜对未加 HYA-1 的水泥石与加入 2% HYA-1 的水泥石开展微观结构分析,见图 6。由图 6 可以看出,没有添加 HYA-1 的水泥石颗粒间有很大空隙,孔隙率大。加入了纳米气凝胶 HYA-1 后表面似胶状物质交联紧密,形成一个三维



(a) 未加 HYA-1

(b) 加入 2% 的 HYA-1

图 6 加入 HYA-1 前后水泥石电镜扫描图

空间牢固结合较密实屏蔽体,大大减少了热辐射,降低导热系数,达到隔热和保温效果,除此之外表面还有球状纳米颗粒,能够均匀分散于水泥颗粒中,填充于更细微的孔隙中,形成致密非渗透结构,可以显著提升整个水泥石的力学性能。

3 现场试验

渤海辽东湾海域某油田前期热采井作业情况显示,水泥机体在高温作用下水泥石孔隙增大,水泥石强度衰退,密封失效。旅大油田为首个海上特超稠油规模热采工程,对于热采井及深井勘探有着重大意义。旅大某区块地质特征为粉砂质板岩夹绢云母板岩,孔隙率大,且热采过程热损失大,使稠油流动性降低,降低采油效率。为了降低热采固井水泥浆的热传导,要求对水泥浆配方进行改进。在热采井固井水泥浆配方中加入了2%纳米亲水气凝胶HYA-1,显著提高了水泥石的抗压强度,降低水泥石的渗透率,显著降低了水泥浆的导热系数,据测井解释成果,全井段水泥胶结以优为主(94.15%),相对幅值小于15%,固井质量优秀,满足后续热采测试要求。

4 结论

采用正辛烷溶剂对二氧化硅气凝胶进行改性研制的气凝胶具有高强和低导热性能的纳米亲水气凝胶HYA-1材料,粒径为20~50 nm,分散性好。该气凝胶加入到水泥浆具有良好的流变性和稠化性能。在水泥浆中加入2%亲水气凝胶HYA-1,水泥石养护7 d抗压强度达到55 MPa,抗折强度提高了1.09倍,渗透率降低97%,导热系数降低了91%,具有良好的力学性能。在海上旅大热采井固井现场作业时,在热采井固井水泥浆配方中加入2%纳米亲水气凝胶HYA-1,显著提高了水泥石的抗压强度,

降低水泥石的渗透率,增加水泥石的致密性,显著降低了水泥浆的导热系数,固井质量优秀。HYA-1的成功应用对渤海辽东湾海域的热采有着重大的研究意义。

参考文献

- [1] 张水,李国忠,姜葱葱,等.粉煤灰在水泥发泡轻质保温材料中的应用研究[J].粉煤灰,2011,(6):3-5.
- [2] 刘慧卿,东晓虎.稠油热复合开发提高采收率技术现状与趋势[J].石油科技通报,2022,7(2):174-184.
- [3] 李钊.地热资源评价方法的探讨[J].城市地质,2014,(9):25-29.
- [4] 杨维丽.稠油热采注汽管线及井口保温技术研究及应用[J].南方能源观察,2023,(4):1-2.
- [5] 柴丽娟,李珠,刘元珍,等.玻化微珠发泡保温板水泥发泡试验研究[J].混凝土,2015(8):153-155,160.
- [6] 徐可军,王新征,何育荣,等.稠油热采井中泡沫水泥浆的固井技术[J].石油钻采工艺,2002,24(6):30-31.
- [7] 郭晓煜,张光磊,赵霄云,等.气凝胶在建筑节能领域的应用形式与效果[J].硅酸盐通报,2015,34(2):444-449,455.
- [8] 冯凯.河北雄县地热井耐腐蚀保温水泥浆体系研究与应用[D].青岛:中国石油大学(华东),2020.
- [9] 王永洪,候金三,李璞,等.一种适用于长封固段固井用的大温差低导热水泥浆:CN202011196209.1[P].2020-12-18.
- [10] 王非,陈晓红,胡子君,等.疏水SiO₂气凝胶的制备及表征[J].硅酸盐通报,2008,27(6):1235-1239.
- [11] 张志华,倪星元,沈军,等.SiO₂气凝胶表面特性对其吸附性能的影响[J].材料导报,2005,19(7):115-117.
- [12] 倪星元,张志华,黄耀东,等.纳米多孔SiO₂气凝胶的常压制备及应用[C].第五届中国功能材料及其应用技术学术会议.北京:2004.
- [13] 王晓亮,许明标,杨晓榕,等.纳米溶胶在水泥浆中的应用[J].油田化学,2021,38(3):412-416.
- [14] 戴勤友.新型粘土气凝胶对水泥砂浆性能的影响[J].硅酸盐通报,2020,39(9):3014-3022.
- [15] 张磊,周长灵,徐鸿照,等.一种亲水型气凝胶的制备方法:CN202111490536.2[P].2022-08-02.
- [16] Talebi Z, Soltani P, Habibi N, et al. Silica aerogel/polyester blankets for efficient sound absorption in buildings[J]. Construction and Building Materials, 2019, 220(9): 76-89. ■
- [17] Li D, Liang X, Wu C. Characteristics of nitrogen removal and extracellular polymeric substances of a novel salt-tolerant denitrifying bacterium, *Pseudomonas* sp. DN-23 [J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 335.
- [18] Zheng Z, Li W, Huang X, et al. Effect of trace elements and optimization of their composition for the nitrification of a heterotrophic nitrifying bacterium, *Acinetobacter harbinensis* HITLi7T, at low temperature [J]. Annals of Microbiology, 2017, 67(11): 715-725.
- [19] Zhang Y, Li J, Pang Y, et al. Systematic investigation of simultaneous copper biosorption and nitrogen removal from wastewater by an aerobic denitrifying bacterium of auto-aggregation [J]. Environmental Research, 2023, 235: 116602. ■

(上接第240页)

- [34] Fan Y, Su J, Zheng Z, et al. Denitrification performance and mechanism of a novel isolated *Acinetobacter* sp. FYF8 in oligotrophic ecosystem [J]. Bioresource Technology, 2021, 320: 124280.
- [35] Chen G, Huang J, Tian X, et al. Response of extracellular polymeric substances to high load shock in an aerobic granular sludge reactor performing simultaneous heterotrophic nitrification-aerobic denitrification [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2023, 235(1): 41.
- [36] Li O, Lu C, Liu A, et al. Optimization and characterization of polysaccharide-based biofloculant produced by B69 and its application in wastewater treatment [J]. Bioresource Technology, 2013, 134: 87-93.