

中文引用格式:郭鑫,鲁义,施式亮,等.高流态封孔注浆材料力学性能及水化机制[J].中国安全科学学报,2024,34(2):168-175.

英文引用格式:GUO Xin, LU Yi, SHI Shiliang, et al. Mechanical properties and hydration mechanism of high-flow sealing hole grouting material [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(2): 168-175.

高流态封孔注浆材料力学性能及水化机制*

郭鑫¹讲师,鲁义^{**1,2}教授,施式亮¹教授,李贺¹副教授,李大芳¹

(1 湖南科技大学资源环境与安全工程学院,湖南湘潭411201; 2 湖南科技大学南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室,湖南湘潭411201)

中图分类号:X936 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.02.0710

基金项目:国家重大人才工程青年项目(2022QB06801);湖南省杰出青年基金资助(2022JJ10026);湖南省青年基金资助(2023JJ40284)。

【摘要】 为提高深部矿井煤层气抽采效率,针对目前常见的封孔注浆材料存在的高分子封孔材料价格昂贵易燃、普通水泥材料渗透性差、粉煤灰等膏体材料强度不足等问题,采用超细水泥为基料研发一种高流态封孔注浆材料。通过对高流态封孔注浆材料开展力学性能试验研究、结合扫描电镜(SEM)、X射线衍射(XRD)等一系列试验的结果,揭示新型高流态封孔注浆材料水化机制。结果表明:高流态封孔注浆材料在水化初期就生成大量的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶和钙矾石(Af_t)晶体;随着水化反应的持续,水化产物的凝胶粒子充填材料中的孔隙。与普通水泥封孔注浆材料相比,材料的水化反应更迅速、更充分、整体结构致密,比普通水泥封孔注浆材料抗压强度提高3.68%,更有利于保持瓦斯抽采钻孔的稳定性,提高瓦斯抽采效率。

【关键词】 高流态封孔; 注浆材料; 抽采钻孔; 水化反应; 水化产物

Mechanical properties and hydration mechanism of high-flow sealing hole grouting material

GUO Xin¹, LU Yi^{1,2}, SHI Shiliang¹, LI He¹, LI Dafang¹

(1 School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China; 2 Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China)

Abstract: To improve coalbed methane extraction efficiency in deep mines, a high-flow sealing hole grouting material was developed using superfine cement as the base material to overcome issues of commonly used high polymer sealed materials such as high cost and flammable, low permeability of ordinary cement materials, and insufficient strength of paste materials such as fly ash. The hydration mechanism of the developed high-flow sealing grouting material was explored by an experimental study on the material's mechanical properties, combined with the measurements by scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction (XRD). The results indicated that a large amount of calcium silicate hydrate

* 文章编号:1003-3033(2024)02-0168-08; 收稿日期:2023-08-16; 修稿日期:2023-11-18

** 通信作者:鲁义(1986—),男,江西新干人,博士,教授,主要从事火灾科学与技术、煤自燃与瓦斯复合灾害防治等方面的研究。E-mail: luyijx@163.com.

(C-S-H) gel and ettringite (AFt) crystals were generated in the high-flow sealing grouting material during the initial phase of hydration. Furthermore, the gel particles of hydration products filled the pores of the material with the hydration reaction. Compared to commonly used cement sealing grouting material, the hydration reaction of the developed material was much faster and more complete, and the overall structure was more denser. Moreover, the compressive strength was increased by 3.68%. Therefore, the developed high-flow sealing hole grouting material can maintain the stability of gas extraction boreholes and improve gas extraction efficiency.

Keywords: high-flow sealing; grouting material; drainage borehole; hydration reaction; hydration product

0 引言

中共二十大报告中指出,要加快构建新型能源体系,我国煤层气资源丰富,煤层气作为一种清洁能源,对满足民生和生产用能需求有重大意义^[1]。遗憾的是,我国60%以上的抽采钻孔使用有效期小于一个月,导致矿井煤层气抽采效率不高,因此,迫切需要提高煤层气抽采钻孔的封孔质量^[2]。

封孔注浆材料的性质决定了抽采钻孔的封孔质量,封孔注浆材料本身具有一定的强度,能够有效防止钻孔变形破坏,提高煤矿煤层气抽采率^[3]。关于封孔材料研制方面,国内外众多学者开展了大量的研究,并取得了丰富的研究成果,如李树刚等^[4-5]改性处理了普通硅酸盐水泥,通过加入铝粉等材料,组成一种新型膨胀水泥,优化了普通水泥材料的膨胀性能和流动性;王志明等^[6]以普通硅酸盐水泥为基料,与膨胀剂复配研发了一种能够二次膨胀的封孔注浆材料;HOGANCAMP等^[7]将碳纳米纤维加入到硅酸盐水泥中,降低了水泥材料开裂性能;孙文标等^[8]以无水硫铝酸钙等无机材料开发了封孔注浆材料,并测定十二烷基硫酸钠(Sodium Dodecyl Sulfate, SDS)对该材料的性能影响特征;曹明莉等^[9]

研究了聚乙烯醇纤维及钢纤维对水泥砂浆流变性能的影响;王慧涛等^[10]研究了煤矸石注浆材料的配制。但随着我国煤炭资源开采深度的增加,煤体所受应力增加,钻孔周围的煤体更易碎裂,从而影响钻孔的稳定性^[11-12]。因此,需要通过注浆加固碎裂煤体,提高碎裂煤体的力学性能^[13]。

鉴于此,笔者拟针对深部矿井岩体力学强度低、抽采钻孔易变形的特点,以超细水泥为基料研制出一种高流态封孔注浆材料,并研究高流态封孔注浆材料的力学性能与水化机制,增加瓦斯抽采钻孔使用寿命,以期提高瓦斯抽采率。

1 高流态封孔注浆材料制备

1.1 原材料

新型高流态封孔注浆材料以超细硅酸盐水泥为基料,原材料化学组成见表1。试验所用的膨胀剂为氧化钙-硫酸钙复合膨胀剂(High Performance Calcium Sulpho Aluminate, HCSA),外观为灰白色粉末,化学组成见表1。试验所用聚羧酸减水剂为白色粉末状,易溶于水,减水率为20%~35%。试验所用的缓凝剂为海菜粉,外观为白色粉末,在使用时,将缓凝剂和水按照1:130的质量比配制成溶液。

表1 高流态封孔材料化学组成

Tab. 1 Chemical compositions of high flow sealing material

化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	损失量	共计
HCSA 膨胀剂	4.96	8.52	0.99	64.18	2.67	16.97	1.19	99.48
超细硅酸盐水泥	20.57	9.89	3.08	57.65	2	2.7	2.6	98.49

1.2 试验参数与过程

试验时,准备模具(70.7×70.7×70.7),按照表2的配比计算外加剂的质量及水的质量,将缓凝剂提前配置成溶液,再按照水灰比1.0,缓凝剂0.04%、减水剂0.5%、膨胀剂8%称取超细水泥、膨胀剂和减水剂,加入提前配置好的缓凝剂,与水进行

充分的搅拌后倒入模具,放入养护箱进行养护,养护不同时间后脱模。使用压力机,测试高流态封孔注浆材料的抗压强度;采用同步热分析仪分析不同材料水化产物及自由水、结晶水等物质质量的变化,初始温度0℃,终止温度800℃,升温速度10℃/min。保护气体为氮气;使用X射线衍射(X-Ray Diffraction,

XRD)仪进行物相分析,试验扫描速度为 8°/min,扫描范围 θ 为 5~90°,测试温度为常温;采用环境扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM),观察不同

封孔注浆材料的微观形貌;同时使用热重分析仪(Thermogravimetric Analysis, TGA),研究材料的热稳定性和组分;材料制备与试验流程如图 1 所示。

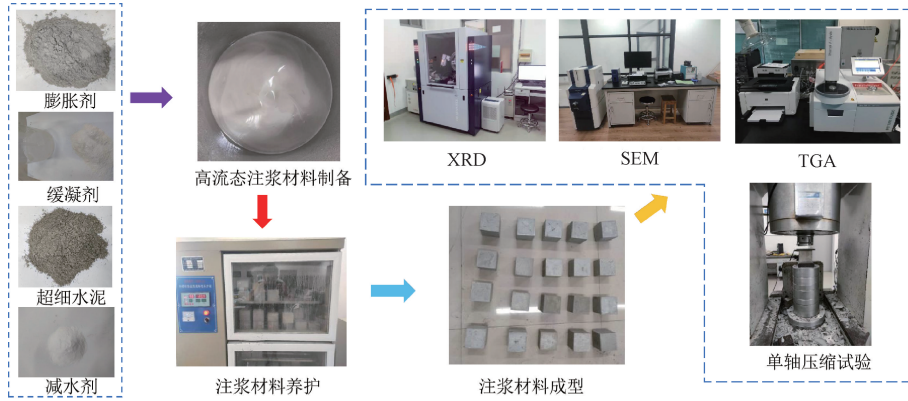


图 1 材料制备与试验流程

Fig. 1 Material preparation and test protocol

2 高流态封孔注浆材料力学性能

高流态封孔注浆材料与普通水泥封孔注浆材料的抗压强度变化如图 2 所示。由图 2 可知:高流态封孔注浆材料与普通水泥封孔注浆材料的抗压强度随着养护期龄的增加而增加,在养护前期,高流态封孔注浆材料的抗压强度明显高于普通水泥封孔注浆材料的抗压强度,养护期龄为 3 天时,2 种材料抗压强度分别为 14.377 和 28.511 MPa,新型高流态封孔注浆材料抗压强度是普通水泥封孔注浆材料抗压强度的 2 倍;当养护期龄达到 7 天时,2 种材料抗压强度分别为 19.013 和 32.026 MPa,新型高流态封孔注浆材料抗压强度提高 68.4%;养护期龄为 28 天时,2 种材料抗压强度分别为 28.785 和 40.213

MPa,新型高流态封孔注浆材料抗压强度提高 39.7%。

3 高流态封孔注浆材料水化机制

3.1 高流态封孔注浆材料微观形貌

利用 SEM 观察普通水泥封孔注浆材料以及新型高流态封孔注浆材料的微观形貌随时间的变化。普通水泥封孔注浆材料水化后的 SEM 结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,在养护前期,普通水泥封孔注浆材料的水化产物之间存在较多的空隙,结构较为疏松,这也导致普通水泥封孔注浆材料的抗压强度较低;随着水化反应的进行,水化产物中出现了越来越多的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶以及钙矾石(Aft)晶体,这些凝胶相和晶体填充了水泥颗粒之间的空隙,结构更加致密,提升了材料的抗压强度;在养护后期,生成了大量的 Aft 晶体,这些晶体为材料提供了更高的抗压强度。新型高流态封孔注浆材料水化产物的 SEM 结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,在养护的前期,新型高流态封孔注浆材料就生成了大量的 C-S-H 凝胶和氢氧化钙(Ca(OH)₂),C-S-H 凝胶相互交织,填充了水泥颗粒之间的空隙,使得材料的整体结构致密,以及高流态封孔注浆材料在早期就能有较大的抗压强度;随着水化反应的持续进行,水化产物中出现了更多的 C-S-H 凝胶以及 Aft 晶体,微观结构更加致密,为高流态封孔注浆材料在养护中期提供了较大的抗压强度;在养护后期,高流态封孔注浆材料继续水化反应,水化产物之间相互作用生成单硫型水化硫铝酸钙等,C-S-H

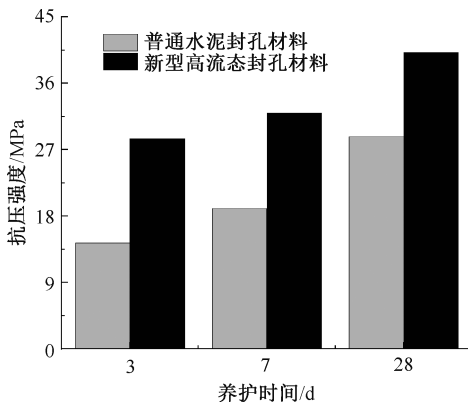


图 2 高流态封孔注浆材料与普通水泥封孔注浆材料抗压强度变化

Fig. 2 Changes in compressive strength for high flow and commonly used cement sealing grouting materials

凝胶的数量越来越多,与前期生成的 AFt 等胶凝物质结合在一起提高了高流态封孔注浆材料在养护后期的抗压强度^[14]。

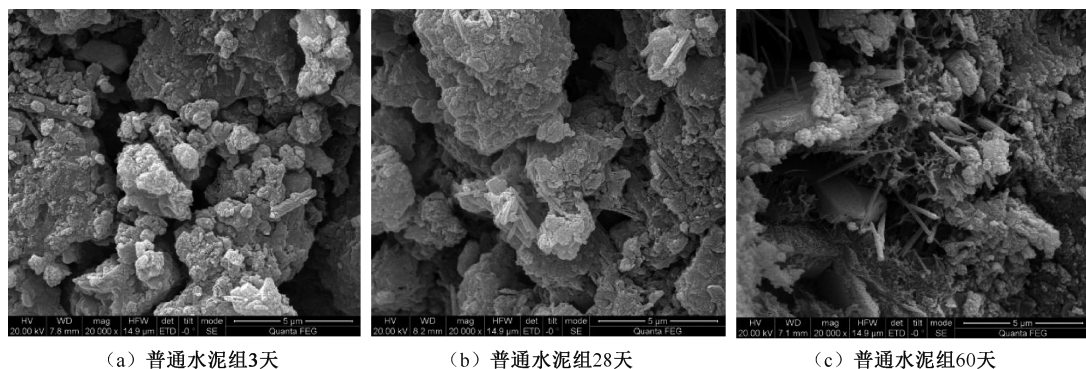


图 3 普通水泥封孔注浆材料不同养护期龄的微观形貌

Fig. 3 Micromorphology of commonly used cement sealing grouting material at different curing ages

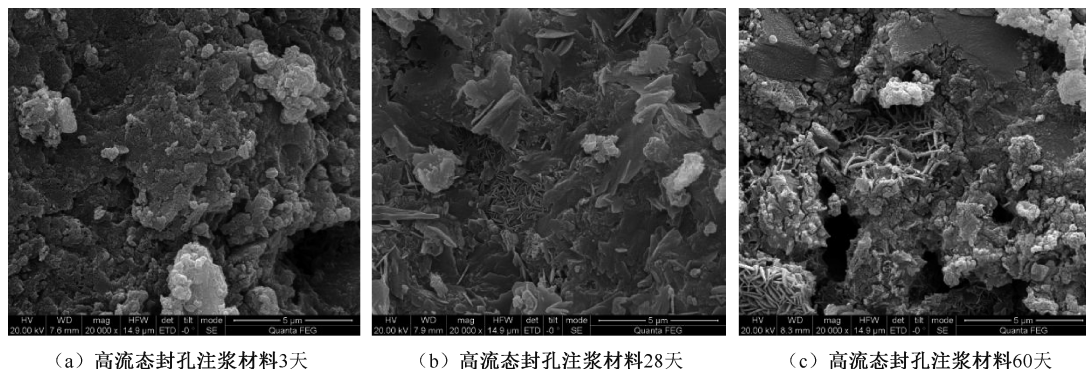


图 4 新型高流态封孔注浆材料不同养护期龄的微观形貌

Fig. 4 Micromorphology of newly developed high flow sealing grouting material at different curing ages

3.2 高流态封孔注浆材料水化产物的 XRD 分析

水化 3 天 XRD 结果如图 5 所示。由图 5 可知:在水化 3 天时,高流态封孔注浆材料水化产物的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰明显高于普通水泥封孔注浆材料,说明高流态封孔注浆材料水化产物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 钙的含量较高,与高流态封孔注浆材料微观形貌展现的特征相同。此外,高流态封孔注浆材料水化体系与普通水泥封孔注浆材料相比还存在 AFt 衍射峰,说明此时高流态封孔注浆材料水化反应产生了钙矾石。表明高流态封孔注浆材料的水化更加充分,而普通水泥封孔注浆材料水化产生了少量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 C-S-H 凝胶,矿物并未充分反应,导致普通水泥封孔注浆材料的抗压强度较低^[15]。

水化 7 天 XRD 结果如图 6 所示。由图 6 可知:在水化 7 天时,高流态封孔注浆材料水化产物的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 C-S-H 的衍射峰逐渐降低,而普通水泥封孔注浆材料的水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 C-S-H 的衍射峰逐渐增大,表明随着水化反应的进行,普通水泥封

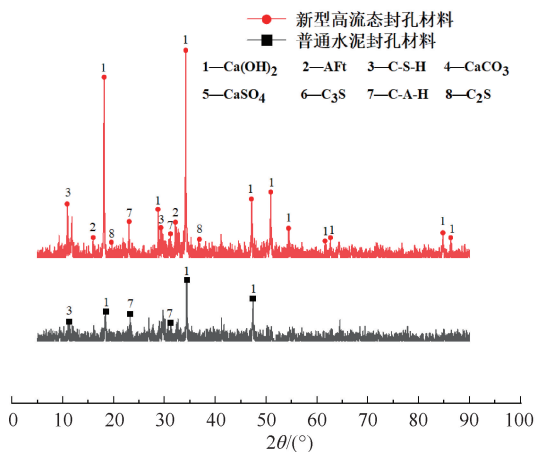


图 5 水化 3 天 XRD

Fig. 5 XRD after hydration of 3 days

孔注浆材料的矿物持续反应,水化产物中生成大量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$;而高流态封孔注浆材料在前期充分反应,导致产物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 C-S-H 的含量降低,另外水泥颗粒中存在铝酸三钙(C_3A),其与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应生成水化铝酸钙(C-A-H),进

而消耗流态封孔注浆材料水化产物中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，同时生成的 C-S-H 和 (C-A-H) 会覆盖在水泥颗粒表面，阻碍了水泥熟料的进一步水化。

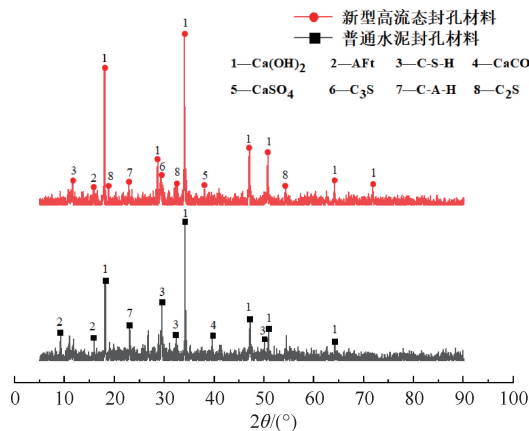


图 6 水化 7 天 XRD

Fig. 6 XRD after hydration of 7 days

水化 28 天 XRD 结果如图 7 所示。由图 7 可知：在水化 28 天时，随着 C-S-H 的持续消耗，高流态封孔注浆材料的水化反应加强，水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的特征衍射峰强度不断增加。与普通水泥封孔注浆材料相比，高流态封孔注浆材料水化产物的图谱中 C-A-H 凝胶相衍射峰值更大，这说明高流态封孔注浆材料内部的 C_3A 水化反应更充分，生成更为致密的凝胶相，这与抗压强度测试和微观形貌的结果相吻合。

3.3 高流态封孔注浆材料水化产物的 TGA

由前期研究结果可知：水泥材料存在 3 个质量损失峰，第 1 个阶段 (50~100℃) 是样品中游离水蒸发、水化产物脱水过程造成质量损失；第 2 个质量损失峰 (400~450℃) 是由 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体失稳造成的

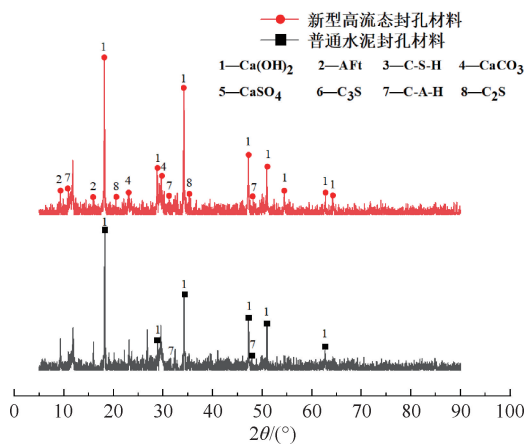
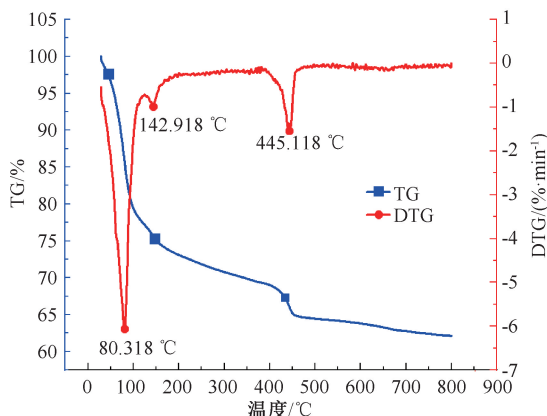


图 7 水化 28 天 XRD

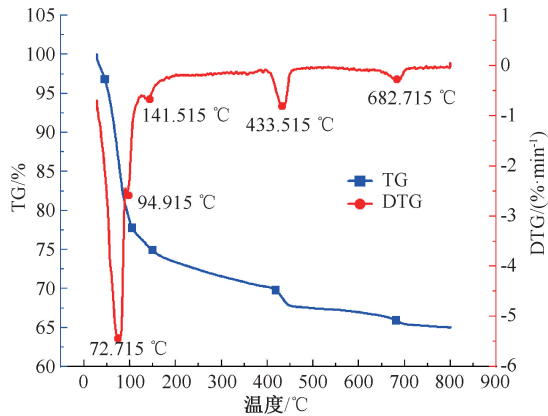
Fig. 7 XRD after hydration of 28 days

质量损失；第 3 个质量损失峰是由碳化生成 CaCO_3 分解生成造成的质量损失。不同材料水化 3 天的热重 (Thermogravimetric, TG) 及微商热重 (Differential Thermogravimetry, DTG) 曲线如图 8 所示。从图 8a 中可以看出，高流态封孔注浆材料的 TG-DTG 曲线有 3 个明显的吸热峰，在高流态封孔注浆材料水化早期，水泥颗粒与水发生反应，生成 C-S-H 凝胶和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，此时水化产物中存在一些游离水，因此，高流态封孔注浆材料 TG-DTG 曲线的第一个吸热峰代表水化产物脱去游离水；随着加热温度的升高，水化产物中的 C-S-H 凝胶和 AFt 开始发生脱水反应，因此，高流态封孔注浆材料 TGA 曲线的第 2 个吸热峰代表 C-S-H 凝胶和 AFt 脱水；在 400~500℃ 左右新型高流态封孔注浆材料有明显的失重，为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 脱水反应的吸热峰^[16-17]。

从图 8b 可以看出，有 5 个明显的吸热峰，前 3 个吸热峰分别代表普通水泥封孔注浆材料水化产物



(a) 高流态封孔注浆材料



(b) 普通水泥封孔注浆材料

图 8 不同材料水化 3 天的 TG-DTG 曲线

Fig. 8 TG-DTG curves of different materials after hydration of 3 days

游离水脱水、C-S-H 凝胶和 AFt 脱水反应、Ca(OH)₂ 脱水反应;当温度到达 680℃ 附近时,出现的吸热峰为碳酸钙分解的吸热峰。从对应的 DTG 曲线中可以看出,普通水泥封孔注浆材料的 C-S-H 凝胶和 Ca(OH)₂ 吸热峰的峰值温度小于高流态封孔注浆材料,说明普通水泥封孔注浆材料水化产物中 C-S-H 凝胶和 Ca(OH)₂ 的产量较少,其分解脱水所需要的温度也越低,而高流态封孔注浆材料中的 C-S-H 凝胶、AFt 和 Ca(OH)₂ 吸热峰的峰值温度较大,分解温度滞后,说明 C-S-H 凝胶、AFt 和 Ca(OH)₂ 的含量较多,也表明高流态封孔注浆材料的水化反应充分,生成的水化产物也更多。

不同材料水化 7 天的 TG-DTG 曲线如图 9 所示。从图 9 可以看出,高流态封孔注浆材料的 TG-DTG 曲线也存在 3 个明显的吸热峰,普通水泥封孔注浆材料的 TG-DTG 曲线有 5 个明显的吸热峰。高流态封孔注浆材料的 Ca(OH)₂ 和 C-S-H 的吸热峰值温度逐渐降低,而普通水泥封孔注浆材料的 Ca(OH)₂ 的吸热峰值温度逐渐增大,表明随着水化反应的进行,普通水泥封孔注浆材料的矿物得到充分的反应,生成了大量的 Ca(OH)₂,而材料矿物中的 C₃A 与 Ca(OH)₂ 发生反应生成 C-A-H,进而消耗复合材料内部的 Ca(OH)₂,因而导致高流态封孔注浆材料的 Ca(OH)₂ 吸热峰逐渐降低。

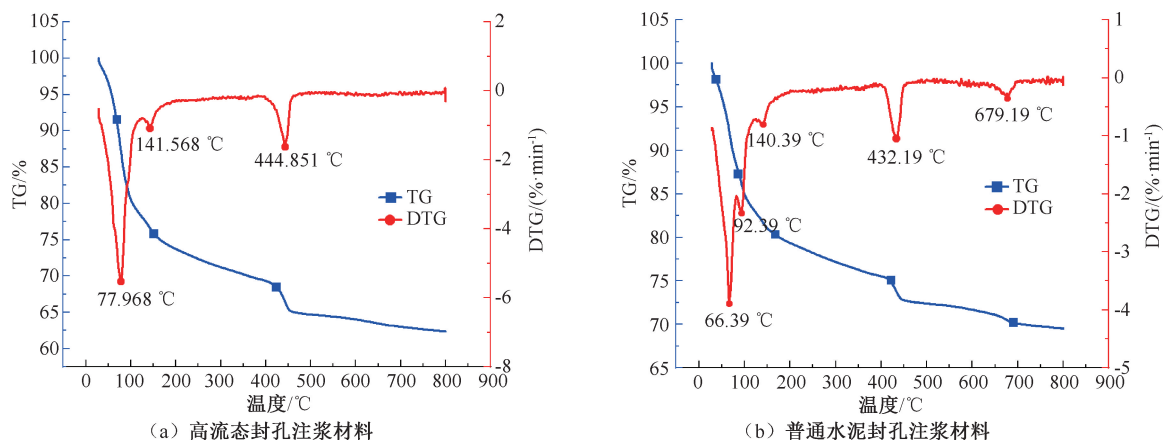


图 9 不同材料水化 7 天的 TG-DTG 曲线

Fig. 9 TG-DTG curves of different materials after hydration of 7 days

不同材料水化 28 天的 TG-DTG 曲线如图 10 所示。从图 10 可以看出,随着水化反应的进行,高流态封孔注浆材料的 AFt 与 C-S-H 凝胶等水化产物的

吸热峰继续增加,Ca(OH)₂ 吸热峰继续减小,说明高流态封孔注浆材料的水化反应比普通水泥封孔注浆材料更充分。

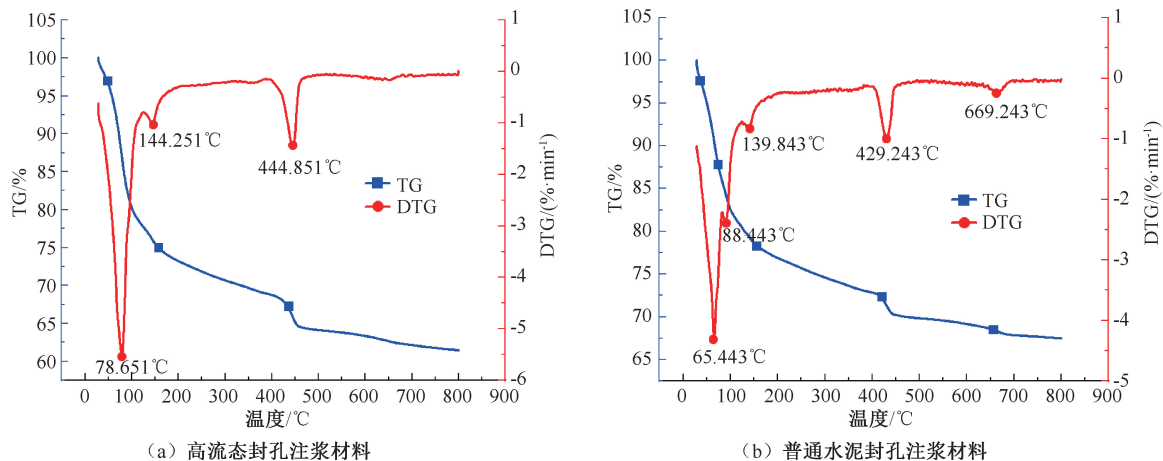


图 10 不同材料水化 28 天的热重分析曲线

Fig. 10 Thermogravimetric analysis curves of different materials after hydration of 28 days

4 结 论

1) 通过 SEM 结果可知:普通水泥封孔注浆材

料硬化后的内部存在大量空隙,微观结构疏松,导致普通水泥封孔注浆材料的抗压强度较低。高流态封孔注浆材料内部孔隙较少,水化产物之间相互作用

形成一个整体,微观结构致密,有效增加高流态封孔注浆材料的抗压强度。

2) 通过 XRD 测试和 TGA 可知:在水化反应早期,高流态封孔注浆材料的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 Aft 衍射峰值温度高于普通水泥封孔注浆材料,生成了大量代表性水化产物,提高了材料的抗压强度;随着水化反应的继续,高流态封孔注浆材料水化产物的衍射峰

值温度不断增加,材料的水化程度逐步提高。

3) 通过抗压强度测试结果可知:高流态封孔注浆材料的最大抗压强度为 40.213 MPa,而普通水泥封孔注浆材料的最大抗压强度为 28.785 MPa,高流态封孔注浆材料抗压强度比普通水泥封孔注浆材料提高 39.7%。证明高流态封孔注浆材料整体结构致密,水化反应更充分,更有利于煤矿钻孔的封孔注浆。

参 考 文 献

- [1] 张超,杨朴超,李树刚,等. 瓦斯抽采钻孔密封段防塌支护材料试验研究及现场应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2021,38(1):199-205.
ZHANG Chao, YANG Puchao, LI Shugang, et al. Experimental research and field application of anti-sloughing support material in gas extraction borehole sealing section[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021,38(1):199-205.
- [2] ZHENG Chunshan, LI He, KIZIL M, et al. Performance enhancement of horizontal underground-to-inseam gas drainage boreholes with double-phase-grouting sealing method for coal mining safety and clean gas resource[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 76: DOI:10.1016/j.jngse.2020.103179.
- [3] 鲁义,谷旺鑫,丁仰卫,等. 固结软煤层瓦斯抽采钻孔周围裂隙的弹性胶结材料研制[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2):129-136.
LU Yi, GU Wangxin, DING Yangwei, et al. Development of elastic cemented material for consolidating cracks around the drilling holes in gas drainage in soft coal seams [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2):129-136.
- [4] 李树刚,张静非,张超,等. 新型 CF 封孔材料的膨胀作用机理及其关键影响因素实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018,35(2):415-421.
LI Shugang, ZHANG Jingfei, ZHANG Chao, et al. Experimental study on expansion mechanism of new CF sealing material and the key influencing factors[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018,35(2):415-421.
- [5] 张天军,包若羽,李树刚,等. 新型 CF 封孔材料膨胀及蠕变特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(1):175-183.
ZHANG Tianjun, BAO Ruoyu, LI Shugang, et al. Experimental study on expansion and creep characteristics of new CF sealing material[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019,36(1):175-183.
- [6] 王志明,孙玉宁,宋维宾,等. 瓦斯抽采二次膨胀封孔材料膨胀机理及应用研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018,14(12):28-33.
WANG Zhiming, SUN Yuning, SONG Weibin, et al. Study on expansion mechanism and application of double-expansive material for borehole sealing in gas drainage[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018,14(12):28-33.
- [7] HOGANCAMP J, GRASLEY Z. The use of microfine cement to enhance the efficacy of carbon nanofibers with respect to drying shrinkage crack resistance of portland cement mortars[J]. Cement & Concrete Composites, 2017,83:269-272.
- [8] 孙文标,郭兵兵,卢前明. SDS 对瓦斯预抽孔封孔材料性能的影响[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(7): 88-94.
SUN Wenbiao, GUO Bingbing, LU Qianming. Effects of SDS on properties of gas extraction hole sealing material[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(7): 88-94.
- [9] 曹明莉,许玲,李志文. 聚乙烯醇纤维及钢纤维增强水泥砂浆流变性和流动性能[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(1):112-117.
CAO Mingli, XU Ling, LI Zhiwen. Rheology and flowability of polyvinyl alcohol fiber and steel fiber reinforced cement mortar[J]. Journal of Building Materials, 2017,20(1):112-117.
- [10] 王慧涛,王晓晨,翟明华,等. 矽石基含水层注浆改造新型材料实验与应用[J]. 煤炭学报, 2017,42(11): 2981-2988.

- WANG Huitao, WANG Xiaochen, ZHAI Minghua, et al. Experiment and application of new material for grouting of ganguebased aquifer[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(11): 2 981-2 988.
- [11] 余诗刚, 林鹏. 中国岩石工程若干进展与挑战[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(3): 433-457.
SHE Shigang, LIN Peng. Some developments and challenging issues in rock engineering field in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(3): 433-457.
- [12] 谢和平. “深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J]. *工程科学与技术*, 2017, 49(2): 1-16.
XIE Heping. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, 49(2): 1-16.
- [13] 褚怀保, 吴礼报, 杨小林, 等. 新浇混凝土爆破振动损伤累积机制试验研究[J]. *中国安全科学学报*, 2017, 27(9): 69-73.
CHU Huaibao, WU Libao, YANG Xiaolin, et al. Experimental research on blasting vibration damage accumulation mechanism of fresh concrete[J]. *China Safety Science Journal*, 2017, 27(9): 69-73.
- [14] 李犇. 水化硅酸钙(C-S-H)凝胶的细观力学机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
LI Ben. Investigation of the meso-mechanical properties of calcium-silicate-hydrate[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [15] EMMANUEL A C, KRISHNAN S, BISHNOI S, et al. Influence of curing temperature on hydration and microstructural development of ordinary Portland cement [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 329: DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127070.
- [16] CHUNDAWAT D S, SHARMA D K, TOMAR S K, et al. To study the use and effect of phyllite as clinker replacement in cement manufacturing[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 44: 4 184-4 189.
- [17] LIN Xiuju, LIAO Bing, LI Jialin, et al. Effect of crosslinked polycarboxylate superplasticizers with varied structures on cement dispersion performance[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, 138(11): DOI: 10.1002/app.50012.



作者简介: 郭鑫 (1994—),男,山东菏泽人,博士,讲师,主要从事矿井灾害防治等方面的研究。E-mail: guoxin190510@163.com。