

破裂岩石注浆固结体的剪切力学性能研究进展

黄耀光^{1,2}, 张天军¹, 刘鹏辉¹, 梁景铭¹, 郭海龙³, 陈智云³

1. 西安科技大学理学院, 西安 710054
2. 西安科技大学安全科学与工程博士后流动站, 西安 710054
3. 西安科技大学安全科学与工程学院, 西安 710054

摘要 破裂岩石注浆固结后形成的岩-浆-岩结构面呈现较强的剪切力学特性,且其剪切强度及稳定性是衡量注浆加固效果的关键性指标。基于科学研究的常用方法,从3方面阐述了国内外破裂岩石注浆固结体的剪切力学性能的研究进展:注浆固结体剪切力学性能试验研究,包括剪切强度、刚度及蠕变等性能;注浆固结体剪切强度预测模型研究,主要为理论计算模型和经验模型;注浆固结体剪切变形破坏数值研究,涉及有限差分法、有限单元法和离散单元法等。总结分析了目前破裂岩石注浆固结体剪切力学性能研究存在的主要问题,提出应加强注浆固结体的剪切蠕变性能、长期稳定性以及具有普适性的剪切强度预测模型的研究,以完善注浆加固机理和注浆加固强度强化理论。

关键词 破裂岩石注浆固结体;剪切蠕变;稳定性;剪切强度预测模型

岩石作为复杂的天然介质,其内部不可避免地存在结构面和结构体等缺陷^[1]。而且,由于生产扰动(如巷道隧道开挖、煤矿开采、大坝蓄水等),使得岩体内的缺陷进一步发展演化,导致其整体性和承载能力显著降低,影响岩土工程的稳定性。国内外采矿、水利和桥隧等建设中的大量工程实践表

明^[2-7],注浆加固技术能有效地充填黏连固结破裂岩体,提高岩体的密实程度、整体性及其拉伸、压缩、剪切和蠕变等力学性能,进而维持岩土体工程的稳定性。

由于破裂岩石注浆加固后的胶结岩体的强度及稳定性是衡量注浆加固效果的重要指标,因此注

收稿日期:2018-09-21;修回日期:2019-07-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51604214);中国博士后科学基金项目(2016M592818);陕西省自然科学基金项目(2019JQ381);西安科技大学博士启动基金项目(2015QDJ071);西安科技大学培育基金项目(201647)

作者简介:黄耀光,博士后,研究方向为岩石力学、渗流力学以及采矿工程理论分析与数值模拟,电子信箱:hyg85@xust.edu.cn

引用格式:黄耀光,张天军,刘鹏辉,等.破裂岩石注浆固结体的剪切力学性能研究进展[J].科技导报,2019,37(17):73-83;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2019.17.013

浆固结岩体的强度及稳定性是注浆加固理论的关键研究内容。目前对于破裂岩石注浆固结体的压缩及压缩蠕变等力学性能已进行了大量的研究,并取得了许多重要的研究成果^[8-10]。这些研究对于认识破裂岩石注浆加固的压缩强度强化规律及注浆加固理论起到了奠基作用,并为研究岩土体注浆加固工程的长期稳定性提供了有价值的参考。但是,这些研究并未考虑到注浆加固后的固结岩体内存在大量的岩-浆-岩结构面(图1)^[11-12],以及其在外力扰动(如煤矿重复开采、跨煤层开采、大坝坝基反复蓄泄水和隧道车辆往返通行加卸载等)作用下必将表现出明显的剪切力学性能、剪切蠕变力学特性和沿弱结构面的剪切再破坏特性等,而这些将成为影响注浆加固岩体的强度强化特性和长期稳定性的重要因素。

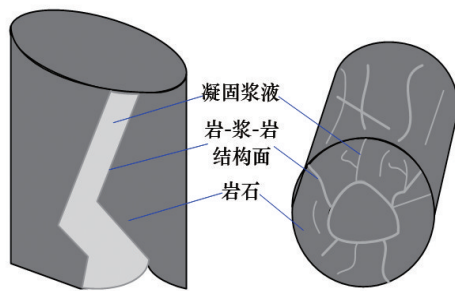


图1 破裂岩石注浆固结体

Fig. 1 Grouting-reinforced fractured rock

由此表明,当前研究主要针对的是注浆固结岩体的压缩强度强化规律,而较少研究其剪切强度强化规律以及剪切力学相关性能,且极少讨论注浆固结岩体的长期稳定性,使得对注浆加固的强度强化机理及注浆加固后的再破坏特性及长期稳定性的认识还存在局限性。因此,有必要对破裂岩石注浆固结体的剪切相关力学性能进行深入研究。本文分别从破裂岩石注浆固结体的抗剪强度试验研究、剪切强度理论计算与评估研究和剪切变形破坏数值研究3方面,对已有的破裂岩石注浆固结体的剪切力学性能研究及成果进行归纳总结和分析评述,并结合当前岩土体工程中面临的新问题,探讨注浆固结岩体剪切性能研究的新趋势和具有重要工程应用参考价值的研究方向。

1 注浆固结体的剪切力学性能试验研究

科学试验是认识材料的物理力学性能的基础手段之一。而研究者对破裂岩石注浆固结体的剪切力学性能也进行了大量的科学试验研究。Evdo-kimov等^[13]进行了裂隙岩石注浆固结体的剪切强度试验,通过对比分析注浆固结前、后的剪切强度参数得出注浆加固明显增加了裂隙岩石的抗剪强度,但其未讨论水灰比对注浆体剪切性能的影响。Moosavi等^[14]得到水灰比分别为0.4和0.5时固结后的注浆体的峰值和残余剪切强度,且其随法向应力增大而增大。对此,Aziz等^[15]得到了相似的结论。而Salimian等^[16]通过对人工制造的具有不同表面粗糙度和不同水灰比的圆柱形注浆体试样的剪切试验进一步表明,随着水灰比从2:1降低到1:1,其注浆体的抗压强度增加,但抗剪强度并不一定增加,其注浆体的最大内摩擦角分别降低36%~48%和5%~15%,而最大黏聚力分别增加145%~282%和59%~96%。但这些均未考虑岩-浆结构面对其剪切强度的影响。韩立军等^[11,12,17]对破裂岩样注浆加固体及锯齿形模型化结构面(图2)进行了剪切试验,结果表明:注浆加固使得固结体的剪切峰值强度和残余强度、结构面刚度及抗剪强度参数均有明显提高;并指出结构面锯齿个数(即粗糙度)和注浆过程都将影响其抗剪强度,但其未研究注浆加固体在重复加卸载条件下的剪切力学性能和剪切蠕变特性。

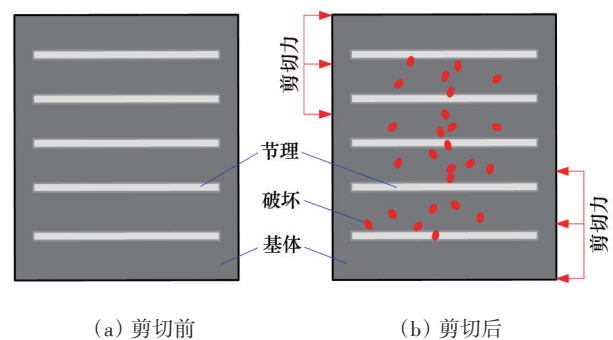


图2 试件剪切前后对比^[11]

Fig. 2 Rock samples before and after shearing^[11]

为此,李坤等^[18]对灌浆固结体进行的剪切试验和剪切蠕变试验表明,在峰值剪切强度前,其剪应变与剪应力呈现线性变化关系,但过峰值强度后,法向变形加快而易破坏;节理面变形具有蠕变特性,且法向应力的增加可延长其蠕变破坏时间。Chen等^[19]经不同法向应力和法向刚度条件下的水泥注浆试样的直剪试验表明,注浆后的剪切强度都有提高,但注浆体在常法向应力下剪切强度要高于其在常法向刚度下的。Zhao等^[20]进一步指出,法向应力和试样的干燥程度将显著影响其剪切力学性能,但对注浆节理的摩擦系数影响较小。商海星等^[21]得到了水玻璃-水泥基混合注浆固结体的收缩变形特征和抗剪强度随裂隙率增大而减小的变化规律。刘泉声等^[22-24]利用自行研制的裂隙岩石注浆系统(参见文献[22]中的图1)对注浆固结体进行了直剪试验,其结果表明:注浆能显著提升法向和切向抗变形能力,提高其剪切刚度约2倍,以及泥岩的峰值剪切强度和残余剪切强度分别增加约68%~117%和17%~21%,而砂岩的分别增加约为108%~170%和54%~72%。Indraratna等^[25]通过三轴试验得出随着饱和度降低,压密充填体节理的峰值剪切强度呈增大趋势。Chen等^[26]对不同围压下的硅酸盐水泥注浆体进行的三轴试验表明,其法向应力和围压与水灰比之间呈双线性关系,并利用Mohr-Coulomb模型得到其在三轴压缩下的剪切强度包络线,为研究注浆体的剪切性能提供了新的思路。这些研究得到了法向应力和刚度等对注浆固结体剪切性能的影响,为认识注浆固结体的剪切性能和剪切蠕变性能提供了丰富资料。

在此基础上,Gómez等^[27]研究了复杂加载路径下不同尺度的砂-混凝土界面的峰值和残余剪切强度,并建立了界面剪切测试标准,为讨论砂-浆界面的扩展双曲线模型提供了参考基础。吴乐文^[28]对含平直硬性台阶状结构面的注浆固结岩石进行了剪切试验,讨论了不同台阶数目及组合形式对其剪切力学性能的影响,得到注浆固结岩样的抗剪强度比未注浆岩样提高了20%,但对剪胀效应无明显影响。王晓晨等^[29]通过对含不同规则锯齿数目的注浆固结体进行了研究,认为抗剪强度

随锯齿个数增加而升高,且注浆固结体的锯齿结构面在不同正应力下呈现三种失效模式:黏接失效、爬坡失效和剪断失效。Lu等^[30,31]进一步讨论了裂隙注浆充填度对含规则锯齿形结构面岩样抗剪强度和破坏模式的影响,其结果表明:抗剪强度随注浆充填度增大呈现出先增大(充填度小于0.1)后减小(充填度大于等于0.1而小于等于1.0)直至平衡不变(充填度大于1.0)的变化规律(图3);注浆体的破坏形式有4种,即先爬坡后啃断、锯齿直接啃断、浆液脱离与啃断和浆液剪断,其受正应力和充填度的影响明显,但两者的作用相反。郑卓等^[32]对利用水泥砂浆和水泥制成的具有规则锯齿状结构面的类岩石试样进行了不同法向载荷下的剪切试验研究,表明其先发生黏结力失效破坏再发生滑动破坏。此外,Tian等^[33]借助直剪试验和3D扫描试验得到了注浆加固后充填度、粗糙度、岩石-充填材料的强度比、法向应力和内聚力等对注浆体的峰值剪切强度和破坏模式的影响规律,使得对注浆等影响固结体剪切性能的相关研究更为详细和完整。这些在研究注浆固结体的剪切性能时,主要讨论了对于不同岩样而言,注浆充填破裂岩石后对其剪切强度和破坏模式的影响规律,即讨论的是注浆后的固结体的剪切强度和破坏模式的变化,而大多未讨论相同岩石从完整状态到破裂状态再到注浆固结状态转变过程中的剪切强度的演化规律和破坏特征,故其不能很好地解释注浆加固的剪切强化机理。

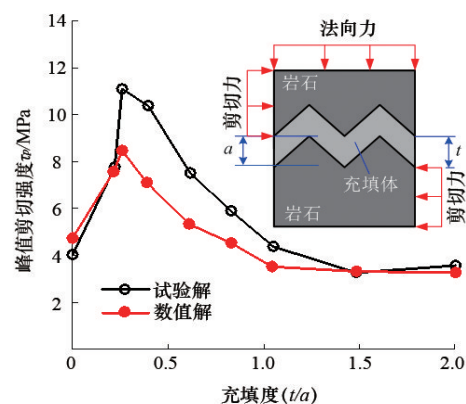


图3 注浆固结体的峰值剪切强度随充填度的变化曲线^[27]

Fig. 3 Peak shear strength of cement-grout-filled reinforcement under different filling ratios^[27]

针对注浆加固的剪切强化机理, Swedenborg等^[34]指出, 浆液在注浆节理中起润滑剂的作用, 其节理水力破坏是剪胀的函数, 且其与节理峰值剪切强度相一致。康志强等^[35]研究表明注浆是通过改变节理弱面的初始摩擦力和增加节理弱面的接触面积来增大注浆加固后试件的黏聚力和内摩擦角, 初步探讨了注浆加固的内在机理。而Lei等^[36]也指出, 注浆是通过增加注浆体接触面的剪切强度参数和降低接触面缺陷尖端的应力集中程度来提高注浆固结体的强度, 即增加其内摩擦角和内聚力。这些研究在一定程度上揭示了注浆加固的剪切强化机理, 有助于完善注浆加固强度强化理论。

以上对注浆固结体剪切强度的试验研究取得了较为丰富的成果, 对于认识注浆加固能提高其剪切强度有了科学的验证和阐释。但是, 目前这些研究多是针对其剪切强度进行, 忽略了注浆加固对剪切蠕变力学性能的影响, 而其蠕变性能恰好是衡量注浆加固岩土体工程长期稳定性的基础; 研究中尽管获得了一些注浆固结体的破坏和再破坏特征, 但未对其剪切破坏和再破坏进行对比研究, 故其不能有效阐明其剪切再破坏机理; 试验研究主要直观地讨论剪切强度的变化, 其仅能定性地给出注浆固结体的强度增加量, 而不能给出定量的评价, 且不具有普适性。并且其未对注浆加固的剪切强度强化原理给出阐释, 使得该研究对于完善注浆加固剪切强化理论以及长期稳定性理论还具有缺陷性, 值得进一步扩展、深入系统地研究。

2 注浆固结体的剪切强度理论预测模型研究

在利用科学试验得到破裂岩石注浆固结体的剪切强度变化规律的基础上, 研究者也开始探寻其强度强化的理论评估模型及计算。对此类研究, 最早是由张农和杨米加等^[37,38]基于注浆固结体的单轴压缩试验结果, 利用损伤力学建立了注浆固结体的本构模型, 阐释了注浆加固因子与裂隙、注浆材料等之间的关系。其研究成果为定量评价注浆固结体的强度强化规律提供了基础, 也为后续的注浆固

结体的剪切强度理论预测模型等相关研究指明了方向。

针对注浆固结体的抗剪强度, 韩立军等^[1]对所得试验结果采用数据拟合的方法, 建立了注浆固结体的峰值和残余抗剪强度的理论公式, 在一定程度上反映了注浆锯齿结构面数目和特性等对其抗剪强度的影响。而吴乐文^[28]在假设剪切变形符合非线性幂函数关系下, 建立了考虑裂隙开度的注浆固结体的剪切本构模型, 并用数据拟合方法确定了模型中的相关参数。许宏发等^[39,40]利用非线性拟合方法得到了破碎岩体注浆加固体的强度增长率和剪切强度参数增长率的经验计算公式, 并通过建立的注浆固结前后破碎岩体强度增长理论, 推得了其单轴抗压、抗拉和内摩擦系数及内聚力增长率的关系方程。王晓晨等^[29]建立了单锯齿面顺面剪断和逆面黏接失效的剪切力学模型(图4), 并基于莫尔库伦理论, 建立了规则注浆锯齿结构面的抗剪强度经验公式。对此, Lu等^[30,31]基于大量的试验数据, 建立了注浆固结体的峰值剪切强度与注浆充填度的经验公式, 其在一定程度上能预测其抗剪强度。张妹珠等^[41]基于摩尔-库仑强度准则, 构建了锚注加固大理岩破裂面的抗剪强度公式, 但其仅适用于表面粗糙程度较低且充填度大于1的锚注加固体。郑卓等^[32,42]在考虑黏结力作用下, 提出了计算单一界面注浆固结体抗剪强度的理论公式, 指出黏结力能提高抗剪强度, 并讨论了微凸体滑动、剪切和受拉破坏的极限切应力。但这些研究仅适用于含锯齿结构面的注浆固结体的剪切强度预测, 而且强度预测模型大都是基于试验结果的数据拟合而得, 并

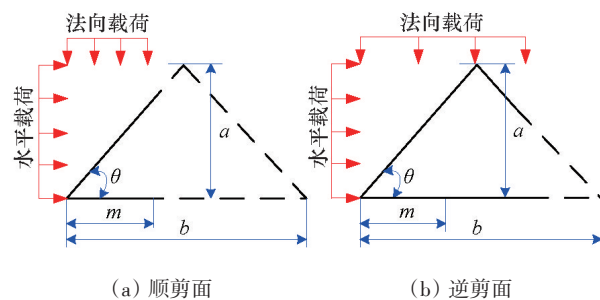


图4 锯齿形注浆固结体剪切的简化力学模型^[22]
Fig. 4 Simplified mechanical model of the saw tooth grouting reinforcement^[22]

未明确给出拟合所得经验公式的具体适用范围和条件。

为此,孙辅庭等^[43,44]基于分形粗糙度维数、分形粗糙度、分布参数等3个不依赖于测量尺度的节理三维形貌参数,推导建立了充填水泥浆节理峰值剪切强度估算模型,讨论了节理的三维形貌参数、充填度和节理岩壁与水泥结石强度比等对峰值剪切强度的影响,并以直剪试验对模型进行了验证。Zhao等^[20]在引入损伤因子条件下,提出一种描述注浆体剪切性能的分段本构模型,并将其成功应用于隧道开挖的剪切变形预测的数值模拟中。Tian等^[33]基于试验结果,提出一种预测注浆充填体剪切强度的弱充填节理剪切模型。Ma等^[45]进一步基于无充填节理的JRC-JCS模型,在考虑注浆节理面的宏观粗糙度条件下,结合微观黏结剪切模型,建立了破裂砂岩和泥岩注浆固结体的峰值剪切强度预测模型。这些对注浆固结体剪切强度模型的研究已经由简化的单一锯齿结构面模型向实际的粗糙度结构模型转化,为获得其更真实的剪切强度预测奠定了基础。

综合以上研究成果发现,破裂岩石注浆固结体的抗剪强度理论预测模型主要存在两方面的问题:现有抗剪强度理论预测模型多为经验性公式,而缺乏完整有力的理论支撑;所建立的理论预测模型的基础是具体的剪切试验数据,但由于试验不可能考虑到所有情况,因而导致其强度预测模型在应用上具有局限性,并且大多的剪切强度经验性预测模型未给出明确的适用范围和条件。

3 注浆固结体的剪切变形破坏数值研究

考虑到科学试验和理论分析因其局限性而不能解决破裂岩石注浆固结体的剪切力学性能的所有问题,如破裂岩石结构面的粗糙度、岩-浆-岩结构面的固结程度和应力加卸载等对其剪切力学性能的影响。因而,研究者尝试通过数值试验这种经济高效的方法对其注浆固结体剪切力学性能进行相关研究。Asadi等^[46]利用建立的粗糙岩石裂隙的

粗糙度退化和剪切强度的结合模型,研究了合成岩体的剪切力学性能。Vladimir等^[47]研究了混凝土和岩石结构面的剪切特性,得到了其剪切变形规律和剪切强度特征。李坤等^[48]利用FLAC3D(fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions)软件对灌浆锯齿形固结体进行了直剪数值试验(图5),得到了注浆充填度、起伏角和正应力等对剪切力学性能的影响规律:抗剪强度随充填度呈先增大后减小直至平衡的变化特征,该结论也被文献[30]和[31]的试验结果所证实;建立了多因素耦合作用下的注浆固结体抗剪强度经验公式,其相比于理论预测模型有更高的普适性和工程应用参考价值。吴乐文等^[28,49]将FLAC3D软件和ANSYS软件相结合,模拟了不同台阶性注浆结构面的高宽比和组合形式等对注浆固结体抗剪强度和破坏模式的影响,结果表明:注浆加固能提高其抗剪强度,但未给出台阶结构面高宽比和组合形式等对抗剪强度的具体的、量化的影响结果。Lu和孙海洋等^[30,31]进一步基于试验结果,研究得到了不同注浆充填度下锯齿形结构面固结体的应力破坏特征,并且明确给出了注浆充填度对其应力、变形和破坏的影响规律。但Bahaaddini^[50]指出直剪试验中因忽略边界条件而导致过高估计峰值剪切强度,其结合物理试验,利用PFC2D(particle flow code in 2 dimensions)软件研究了边界条件对峰值强度的影响,认为试样上下部中间的裂隙尺度对剪切强度和破坏模式有较大影响,即大尺度裂隙而导致拉伸破坏、降低强度,而小尺度裂隙将导致剪切破坏、增大强度(图6)。这些研究主要以有限差分法、有限单元法、离散元法和

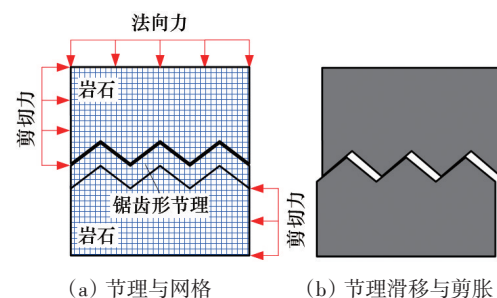
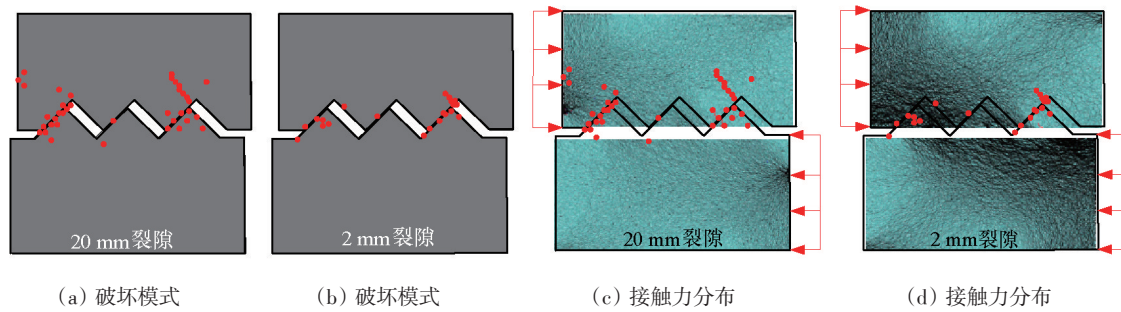


图5 灌浆锯齿形节理网格及滑移与剪胀^[34]

Fig. 5 Grids and slip and swell of cement-grouted saw-shaped joint^[34]

图6 试样的破坏模式和接触力分布^[36]Fig. 6 Failure mode and contact force distribution of samples^[36]

颗粒流法等对单一锯齿形注浆固结体的剪切力学性能作了研究,得到了许多有重要参考价值的成果,促进了对其剪切力学性能研究的发展。

但是,由上述研究也发现,研究者较少利用数值试验来分析讨论破裂岩石注浆固结体的剪切力学性能,且现有的数值试验也主要针对锯齿形这种单一结构面进行研究,其既未能考虑多结构面(如注浆体中含有两种以上或两个以上的岩-浆-岩结构面)等对注浆固结体的剪切力学性能的影响规律,又未能对复杂形式的岩-浆-岩结构面(如实际的结构面粗糙度和形状)以及剪切蠕变性能等进行研究。

4 存在的主要问题

软弱破裂岩土体进行注浆加固的主要目的是提高岩土体结构的完整性和承载能力,以维护其长期稳定性。而且,考虑到破裂岩石注浆加固后的固结体中存有大量的岩-浆-岩结构面,使其在复杂外力扰动下表现出极强的剪切力学性能和破坏特征,由此认为注浆固结体的剪切强度和剪切破坏是影响注浆加固强度强化和稳定性的关键因素。对此,尽管科研工作者们对其剪切力学性能进行了大量的研究工作,并取得了许多具有基础理论意义和工程应用价值的研究成果,推动了注浆加固理论和技术的发展,但是仍然存在以下不足和问题。

1) 研究对象较为单一,其与注浆固结体所具

有的复杂岩-浆-岩结构面存在较大差异。现有研究中,无论是科学试验还是数值试验,其研究对象多为含单一锯齿形结构面的注浆固结体,而未考虑其结构面的复杂程度,如不同粗糙度、结构面形状和构成、结构面数目和分布及组合形式等,对其剪切力学性能的影响。

2) 研究方法不够完善,未能充分发挥各种方法的优势。由于经济成本和问题复杂性,所采用的科学试验方法很难考虑注浆固结体的所有复杂构成对其剪切力学性能的影响。因而需要充分发挥数值试验方法所具有的经济、高效和应用广泛的优势,以在更符合实际注浆固结体的结构下来研究其剪切强度和破坏机理。

3) 研究内容不够全面,缺乏对剪切蠕变强度和剪切再破坏机理的研究。当前研究主要针对的是注浆固结体的剪切强度特性,但注浆固结体的长期稳定性才是注浆加固的最根本目的。因而有必要研究注浆固结体的剪切蠕变特性和蠕变再破坏特征,并建立相应的剪切强度理论模型,以为预测和评估注浆固结体的长期稳定性提供参考。

4) 研究条件多为法向压力下的剪切试验,而未考虑如煤矿重复开采等循环加卸载条件下注浆固结体的剪切力学性能。

综合以上分析,结合岩土体工程中的前沿与热点问题,初步给出如图7所示的破裂岩石注浆固结体的剪切力学性能与破坏特征的研究技术路线及框架。

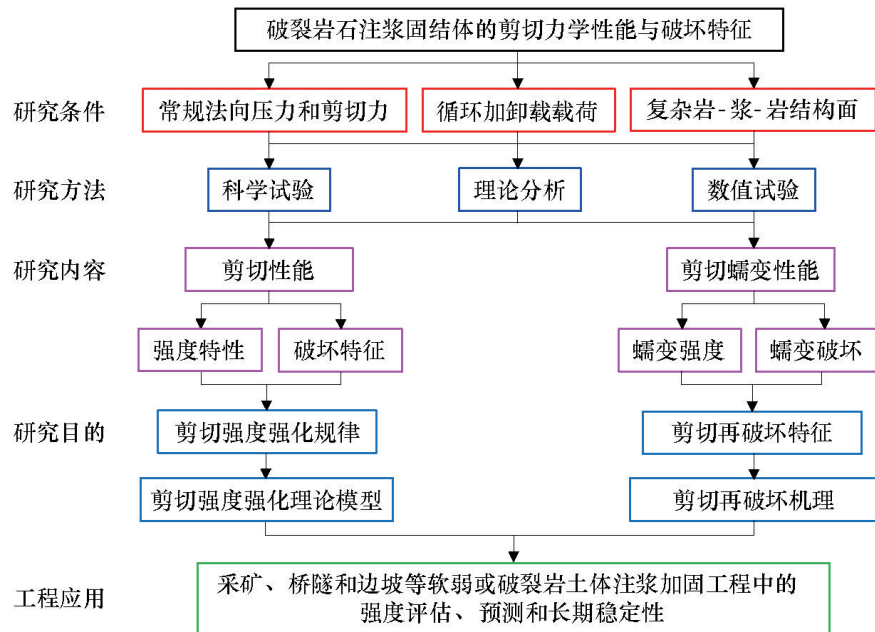


图7 破裂岩石注浆固结体的剪切力学性能研究技术路线及框架

Fig. 7 Technical route and framework for the study of shear mechanical properties of grouting reinforcement

5 结论

开展破裂岩石注浆固结体的剪切力学性能研究,对于完善注浆加固强度强化理论和预测岩土体注浆加固工程的长期稳定性等都具有重要的基础理论意义和工程应用价值。通过对国内外现有的注浆固结体剪切力学性能研究现状的综述分析,得到如下主要结论。

1) 破裂岩石注浆固结体内存在的岩-浆-岩结构面,使其呈现出明显的剪切性能和剪切蠕变性能,且极易发生结构面的剪切再破坏,严重影响岩土体注浆加固工程的长期稳定性。但是目前对注浆固结体的科学试验研究仅集中在剪切性能上,因而对其剪切蠕变性能和再破坏机理进行深入、系统地研究,将有助于扩展、完善注浆加固体的剪切蠕变再破坏机理和稳定性控制理论。

2) 破裂岩石注浆加固后固结体的剪切强度强化规律是评价注浆加固效果的关键性指标。而当前对注浆固结体的剪切强度理论模型研究较少,且主要针对特定试验进行,故建立具有普适性的注浆固结体的剪切强度及剪切蠕变强度强化预测理论

模型,将是完善注浆加固强度强化理论研究的前沿热点方向。

3) 破裂岩石注浆固结体的剪切力学性能数值试验是科学试验和理论研究的有效且必要补充。积极开展注浆后复杂形式的岩-浆-岩结构面对其剪切蠕变性能和剪切再破坏的影响特征,继而考虑其对注浆固结体的长期稳定性的影响规律,将极大丰富注浆固结体的剪切性能的相关研究内容。

4) 开展循环加卸载等不同载荷条件下的注浆固结体的剪切力学性能研究,将有助于促进注浆加固技术更好地在复杂软弱或破裂岩土体工程中的应用。

参考文献(References)

- [1] 韩立军, 宗义江, 韩贵雷, 等. 岩石结构面注浆加固抗剪特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2570-2576.
Han Lijun, Zong Yijiang, Han Guilei, et al. Study of shear properties of rock structural plane by grouting reinforcement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2570-2622.
- [2] 刘传孝, 王龙, 刘志浩, 等. 软岩硐室稳定性的复合结构

- 柔性反底拱控制时效分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(8): 1464-1468.
- Liu Chuanxiao, Wang Long, Liu Zhihao, et al. Time effects of flexible inverted arch with composite structures to control stability of chamber adjoining with soft rock masses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(8): 1464-1468.
- [3] 刘泉声, 康永水, 白运强. 顾桥煤矿深井岩巷破碎软弱围岩支护方法探索[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3097-3104.
- Liu Quansheng, Kang Yongshui, Bai Yunqiang. Research on supporting method for deep rock roadway with broken and soft surrounding rock in Guqiao Coal Mine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 3097-3104.
- [4] Wang F T, Zhang C, Wei S F, et al. Whole section anchor-grouting reinforcement technology and its application in underground roadways with loose and fractured surrounding rock[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2016(51): 133-143.
- [5] Mortazavi A, Maadikhah A. An investigation of the effects of important grouting and rock parameters on the grouting process[J]. Geomechanics and Geoengineering, 2016, 11(3): 1-17.
- [6] Ma Z Q, Jiang Y D, Du W S, et al. Fracture evolution law and control technology of roadways with extra thick soft roof[J]. Engineering Failure Analysis, 2018(84): 331-345.
- [7] Lin P, Zhu X Y, Li Q B, et al. Study on optimal grouting timing for controlling uplift deformation of a super high arch dam[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2016, 49(1): 115-142.
- [8] 张乃焯, 黄明, 郑斌, 等. 泥质页岩注浆结石体的蠕变特性试验研究[J]. 有色金属: 矿山部分, 2016, 68(1): 52-56.
- Zhang Naiyang, Huang Ming, Zheng Bin, et al. Experimental study on the concretion stone of arillaceous shale [J]. Nonferrous Metals: Mining Section, 2016, 68(1): 52-56.
- [9] 金爱兵, 王志凯, 明世祥. 破裂岩石加固后力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 3395-3398.
- Jin Aibing, Wang Zhikai, Ming Shixiang. Experimental investigation on mechanical property of reinforced fractured rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Suppl 1): 3395-3398.
- [10] 王汉鹏, 高延法, 李术才. 岩石峰后注浆加固前后力学特性单轴试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(1): 27-31.
- Wang Hanpeng, Gao Yanfa, Li Shucui. Uniaxial experiment study on mechanical properties of reinforced broken rocks pre-and-post grouting[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(1): 27-31.
- [11] 陆银龙, 王连国, 张蓓, 等. 软岩巷道锚注支护时机优化研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1395-1401.
- Lu Yinlong, Wang Lianguo, Zhang Bei, et al. Optimization of bolt-grouting time for soft rock roadway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1395-1401.
- [12] 宗义江, 韩立军, 韩贵雷. 破裂岩体承压注浆加固力学特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(4): 483-488.
- Zong Yijiang, Han Lijun, Han Guilei. Mechanical characteristics of confined grouting reinforcement for cracked rock mass[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(4): 483-488.
- [13] Evdokimov P D, Adamovich A N, Fradkin L. P, et al. Shear strengths of fissures in ledge rock before and after grouting[J]. Hydrotechnical Construction, 1970, 4(3): 229-233.
- [14] Moosavi M, Bawden W F. Shear strength of Portland cement grout[J]. Cement & Concrete Composites, 2003, 25(7): 729-735.
- [15] Aziz N, Majoor D, Mirzaghobanali A. Strength properties of grout for strata reinforcement[J]. Procedia Engineering, 2017(191): 1178-1184.
- [16] Salimian M H, Baghbanan A, Hashemolhosseini H, et al. Effect of grouting on shear behavior of rock joint[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017(98): 159-166.
- [17] Han L J, He Y N. Experimental Study on mechanical characteristics of cracked rock mass reinforced by bolting and grouting[J]. Journal of China University of Mining And Technology (English Edition), 2005, 15(3): 177-182.
- [18] 李坤, 余成学. 灌浆节理的剪切特性和剪切蠕变特性试验[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(4): 423-426.
- Li Kun, She Chengxue. Test for shearing properties and

- shearing creep properties of cement-filled joint[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(4): 423-426.
- [19] Chen J H, Hagan P C, Saydam S. Shear behaviour of a cement grout tested in the direct shear test[J]. Construction and Building Materials, 2018, 166: 271-279.
- [20] Zhao W S, Chen W Z, Zhao K. Laboratory test on foamed concrete-rock joints in direct shear[J]. Construction and Building Materials, 2018, 173: 69-80.
- [21] 商海星, 陆海军, 李继祥, 等. 裂隙岩体注浆结石体收缩变形与抗剪强度[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(36): 231-235.
- Shang Haixing, Lu Haijun, Li Jixiang, et al. The shrinking deformation and shear strength of fractured rock grouting stone[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(36): 232-235.
- [22] 刘泉声, 周越识, 卢超波, 等. 含裂隙泥岩注浆前后力学特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(3): 509-514.
- Liu Quansheng, Zhou Yueshi, Lu Chaobo, et al. Experimental study on mechanical properties of mudstone fracture before and after grouting[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2016, 33(3): 509-514.
- [23] 刘泉声, 雷广峰, 卢超波, 等. 注浆加固对岩体裂隙力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊1): 3140-3147.
- Liu Quansheng, Lei Guangfeng, Lu Chaobo, et al. Experimental study of grouting reinforcement influence on mechanical properties of rock fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(Suppl 1): 3140-3147.
- [24] Liu Q S, Lei G F, Peng X X, et al. Rheological characteristics of cement grout and its effect on mechanical properties of a rock fracture[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2018, 51(2): 613-625.
- [25] Indraratna B, Premadasa W, Brown E T, et al. Shear strength of rock joints influenced by compacted infill[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 70: 296-307.
- [26] Chen J H, Xu C H. A study of the shear behavior of a Portland cement grout with the triaxial test[J]. Construction and Building Materials, 2018, 176: 81-88.
- [27] Gómez J E, Filz G M, Ebeling R M, et al. Sand-to-Concrete interface response to complex load paths in a large displacement shear box[J]. Geotechnical Testing Journal, 2008, 31(4): 358-369.
- [28] 吴乐文. 岩石结构面注浆前后力学特性研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2012.
- Wu Lewen. Study on mechanical properties before and after grouting of rock structure surface[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science, 2012.
- [29] 王晓晨, 李术才, 刘人太, 等. 锯齿结构面注浆剪切特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(S2): 438-444.
- Wang Xiaochen, Li Shucai, Liu Rentai, et al. Study on shear properties of grouting in sawtooth structure plane [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(S2): 438-444.
- [30] Lu Y, Wang L, Li Z, et al. Experimental study on the shear behavior of regular sandstone joints filled with cement grout[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(5): 1321-1336.
- [31] 孙海洋. 破裂围岩注浆加固后的力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- Sun Haiyang. Research on mechanical properties of fractured rocks after grouting reinforcement[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [32] 郑卓, 李术才, 刘人太, 等. 注浆加固后岩体单一界面抗剪强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊2): 3915-3922.
- Zheng Zhuo, Li Shucai, Liu Rentai, et al. Shearing strength of single structural surface of grouted rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Suppl 2): 3915-3922.
- [33] Tian Y C, Liu Q S, Ma H, et al. New peak shear strength model for cement filled rock joints[J]. Engineering Geology, 2018, 233: 269-280.
- [34] Swedenborg S., Dahlstrom L O. Rock mechanics effects of cement grouting in hard rock masses[C]. Proceedings of the International Conference on Grouting & Ground Treatment, 2003: 1089-1102.
- [35] 康志强, 张雪岩, 贾玉波, 等. 裂隙岩体锚注-注浆-无锚三种加固方式的剪切实验及岩体变形规律研究[J]. 化工矿物与加工, 2013(6): 25-29.
- Kang Zhiqiang, Zhang Xueyan, Jia Yubo, et al. Shear experiment on fissure rock with three modes of anchor

- grouting, grouting and no anchor and analysis on rock deformation regulation[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2013(6): 25-29.
- [36] Le H L, Sun S R, Kulatilake P H S W, et al. Effect of grout on mechanical properties and cracking behavior of rock-like specimens containing a single flaw under uniaxial compression[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2018, 18(10): 04018129-1-16.
- [37] 张农, 侯朝炯, 陈庆敏, 等. 岩石破坏后的注浆固体体的力学性能[J]. *岩土力学*, 1998, 19(3): 50-53.
Zhang Nong, Hou Chaojun, Chen Qinmin, et al. Mechanical properties of broken rock after grouting reinforcement[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1998, 19(3): 50-53.
- [38] 杨米加, 张农. 破裂岩体注浆加固后本构模型的研究[J]. *金属矿山*, 1998, 263(5): 11-14.
Yang Mijia, Zhang Nong. Study on the intrinsic model of broken rockmass after grouting reinforcement[J]. *Metall Mine*, 1998, 263(5): 11-14.
- [39] 许宏发, 耿汉生, 李朝甫, 等. 破碎岩体注浆加固强度估计[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(11): 2018-2022.
Xu Hongfa, Geng Hansheng, Li Chaofu, et al. Estimating strength of grouting reinforced bodies in broken rock mass[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(11): 2018-2022.
- [40] 许宏发, 耿汉生, 刘伟东, 等. 基于 BQ 的破碎岩体注浆加固强度增长理论[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(6): 1147-1151.
Xu Hongfa, Geng Hansheng, Liu Weidong, et al. Theory of strength increment of grouting-reinforced bodies for broken rock mass based on BQ[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(6): 1147-1151.
- [41] 张妹珠, 权江, 王雪亮, 等. 破裂大理岩锚注加固试样的三轴压缩试验及加固机制分析[J]. *岩土力学*, 2018, 39(10): 3651-3660.
Zhang Meizhu, Quan Jiang, Wang Xueliang, et al. Triaxial compression test and strengthening mechanism analysis of cracked marble specimens with bolting-grouting reinforcement[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(10): 3651-3660.
- [42] 郑卓. 单一裂隙注浆扩散与加固机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
Zheng Zhuo. Study on grouting diffusion and reinforcement mechanism of single fracture[J]. Jínan: Shandong University, 2016.
- [43] 孙辅庭, 余成学, 万利台. 充填水泥浆岩石节理峰值剪切强度模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(12): 2481-2489.
Sun Futing, She Chengxue, Wan Litai. A peak shear strength model for cement filled rock joints[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(12): 2481-2489.
- [44] 孙辅庭, 余成学, 万利台, 等. 基于三维形貌特征的岩石节理峰值剪切强度准则研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(3): 529-536.
Sun Futing, She Chengxue, Wan Litai, et al. Peak shear strength criterion for rock joints based on three-dimensional morphology characteristics[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(3): 529-536.
- [45] Ma H, Liu Q S. Prediction of the peak shear strength of sandstone and mudstone joints infilled with high water-cement ratio grouts[J]. *Rock mechanics and rock engineering*, 2017, 50(8): 2021-2037.
- [46] Asadi M S, Rasouli V, Barla G. A bonded particle model simulation of shear strength and asperity degradation for rough rock fractures[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45(5): 649-675.
- [47] Andjelkovic V, Pavlovic N, Lazarevic Z, et al. Modelling of shear characteristics at the concrete-rock mass interface[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015(76): 222-236.
- [48] 李坤, 余成学. 灌浆节理压剪峰值抗剪强度数值试验研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2012, 45(5): 570-574.
Li Kun, She Chengxue. Numerical test study of peak shear strength cement-grouted joint under compression shearing[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2012, 45(5): 570-574.
- [49] 吴乐文, 赵奎. 岩石结构面注浆前后抗剪特性数值分析[J]. *有色金属科学与工程*, 2014, 5(4): 96-100.
Wu Lewen, Zhao Kui. Numerical analysis for the shear characteristics of structure plane at pre-and-post grouting[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2014, 5(4): 96-100.
- [50] Bahaaddini M. Effect of boundary condition on the shear behaviour of rock joints in the direct shear test[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(5): 1141-1155.

Advances in shear mechanical properties of grouting-reinforced bodies for fractured rock

HUANG Yaoguang^{1,2}, ZHANG Tianjun¹, LIU Penghui¹, LIANG Jingming¹, GUO Hailong³, CHEN Zhiyun³

1. College of Sciences, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

2. Center for Post-Doctoral Studies in Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054 China

3. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, 710054, China

Abstract It is known that the rock-grout-rock structural plane formed after the grouting of fractured rock is consolidated with strong shear mechanical properties, and its shear strength and stability are the key indicators to measure the effect of the grouting reinforcement. The advances in researches of the shear mechanical properties of fractured rock with the grouting reinforcement at home and abroad are reviewed from three aspects: (1) experimental study of shear mechanical properties of grouting-reinforced fractured rocks, including the shear strength, the stiffness and the creep; (2) theoretical prediction models for the shear strength of the grouting-reinforced fractured rocks, mainly, the theoretical calculation models and the empirical models; (3) numerical simulations of the shear deformation and the failure of the grouting-reinforced fractured rocks, including the finite difference method (FDM), the finite element method (FEM) and the discrete element method (DEM). Based on a summary of existing problems to be solved on the shear mechanical properties of the grouting reinforcement, it is proposed that the theory of the shear creep and the long-term stability of the grouting-reinforced fractured rocks should be a focus, especially, the general-purpose shear strength theory prediction model, to improve the shear strengthening theory and the reinforcement mechanism of the grouting reinforcement theory.

Keywords grouting-reinforced bodies for fractured rock; shear creep; stability; shear strength prediction model ●



(责任编辑 韩星明)