

国家重点研发计划 (2016YFC0600900) 资助

国家自然科学基金 (51474135、51774192) 资助

# 深井围岩

## 微裂隙粗糙度特性与渗流机理

乔卫国 宋伟杰 张帅 著

Shenjing Weiyao

Weiliexi Cuaodu Texing Yu Shenliu Jili



中国矿业大学出版社  
国家一级出版社 全国百佳图书出版单位

(FC0600900)资助  
(135、51774192)资助

# 深井围岩微裂隙粗糙度特性与 渗流机理

乔卫国 宋伟杰 张帅 著



中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书以深井砂岩微裂隙为研究对象,综合运用室内试验、理论分析、数值模拟等技术手段,研究了不同类型深井砂岩的物理与力学特性,研制了微裂隙砂岩相似模型并讨论了其损伤机制,提出了微裂隙三维粗糙度的表征方法,并构建了微裂隙粗糙度指标  $JRI$ ,揭示了粗糙度因素作用下的微裂隙渗流规律,对完善裂隙岩体水力学理论起到一定的推动作用。

### 图书在版编目(CIP)数据

深井围岩微裂隙粗糙度特性与渗流机理 / 乔卫国,宋伟杰,张帅著. — 徐州:  
中国矿业大学出版社,2018.12  
ISBN 978 - 7 - 5646 - 4273 - 0

I. ①深… II. ①乔… ②宋… ③张… III. ①深井—围岩—微裂隙—  
裂缝渗流—研究 IV. ①TD745

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第297507号

书 名 深井围岩微裂隙粗糙度特性与渗流机理  
著 者 乔卫国 宋伟杰 张帅  
责任编辑 杨 洋  
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司  
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)  
营销热线 (0516)83884103 83885105  
出版服务 (0516)83885789 83884920  
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com  
印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司  
开 本 787×1092 1/16 印张 8 彩插 2 字数 210 千字  
版次印次 2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷  
定 价 32.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

# 前 言

我国是世界上最大的煤炭生产和消费国,煤炭资源消费量一直占据国内一次能源消费结构中的60%以上。煤炭资源作为我国能源结构中的主体构成部分,支撑着我国经济与社会的发展。随着人类对煤炭的持续开采利用,近年来我国浅部煤炭资源日益减少和枯竭,煤炭资源开发不断走向地球深部,千米级深井煤炭资源开采已成为资源开发中的常态。然而,进入1 000~2 000 m的深部开采,煤炭资源赋存的地质环境越来越复杂,将面临严峻的深部开采问题。其中,深井井筒井壁是矿井建设与生产过程中亟须解决的问题。诸如,高地应力、高地温、高瓦斯、高渗透水压等引起的一系列突发性工程灾害。尤其深井巷道围岩微裂隙渗水的问题,更是摆在岩土领域专家与学者面前的一道难题。

本书围绕深井围岩微裂隙渗水这一科学问题,综合运用室内试验、理论分析、数值模拟等手段系统研究微裂隙粗糙度特性及渗流规律。从试验研究的角度揭示了深井砂岩的物理与力学性质,研制了微裂隙砂岩相似模型并讨论了其损伤机制;提出了一种裂隙三维粗糙度的表征方法,可以快速、准确评价岩体结构面粗糙度;研发了微裂隙三轴应力渗流模型试验系统并利用光纤光栅传感器对微裂隙渗流过程中的表面应变进行实时监测,对深井围岩微裂隙渗流机理的研究具有理论价值与指导意义。

本书由乔卫国、宋伟杰、张帅共同撰写,是作者在微裂隙岩体方面多年的研究成果及工程实践的集中体现。全书由乔卫国统筹策划与安排,李彦志、陈朋成、席恺、王继焱、秦军令参与了部分章节的整理工作。

在本书撰写过程中,北京中岩大地科技股份有限公司、深部岩土力学与地下工程国家重点实验室等单位给予了大力支持,在此表示衷心的感谢。感谢为本书顺利出版提出宝贵意见的专家和学者。本书由国家重点研发计划(2016YFC0600900)、国家自然科学基金(51474135、51774192)联合资助。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,衷心希望读者批评指正并提出宝贵意见。

作者  
2018年10月

## 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.2 研究现状 .....	2
1.3 本书研究内容 .....	20
<b>2 深井砂岩基本物理力学性质试验研究</b> .....	22
2.1 深井砂岩基本物理性质 .....	22
2.2 深井砂岩基本力学性质 .....	27
2.3 本章小结 .....	29
<b>3 微裂隙砂岩相似材料及损伤特性研究</b> .....	30
3.1 相似材料的基本理论及方法 .....	30
3.2 微裂隙砂岩相似材料的研制 .....	33
3.3 微裂隙砂岩相似材料基本力学性质 .....	35
3.4 微裂隙砂岩相似材料损伤本构模型研究 .....	44
3.5 微裂隙砂岩相似模型的制备 .....	50
3.6 本章小结 .....	51
<b>4 微裂隙粗糙度参数特性及三维粗糙度表征方法</b> .....	52
4.1 微裂隙表面三维几何特征描述 .....	53
4.2 表征方法及参数设置 .....	55
4.3 微裂隙粗糙度形貌参数的单因素及多因素分析 .....	61
4.4 微裂隙粗糙度指标的提出及验证 .....	77
4.5 本章小结 .....	82
<b>5 砂岩微裂隙渗流机理试验及数值模拟研究</b> .....	83
5.1 微裂隙三轴应力渗流机理模型试验系统研发 .....	83
5.2 砂岩微裂隙渗流试验方案 .....	90
5.3 不同粗糙度微裂隙砂岩相似模型渗流试验结果及讨论 .....	94

5.4 粗糙度因素作用下的微裂隙渗流特征数值模拟 .....	100
5.5 本章小结 .....	112
<b>参考文献</b> .....	114

# 1 绪 论

煤炭是我国的主体能源,煤炭工业是关系能源安全和国民经济命脉的重要基础产业。研究指出,到 2030 年,煤炭在我国能源消耗中的比重仍将占 55%左右,因此煤炭在国民经济和社会发展中占重要地位,具有不可替代性。在长期大强度的开采中,浅部煤炭资源储量逐渐减少,煤炭开采的深度越来越大。国家发展与改革委员会在煤炭工业发展“十三五”规划中明确指出,安全生产形势依然严峻,煤矿地质条件复杂,水灾害愈发严重。科技部已将 2 000 m 以浅深部煤矿建井与开采技术研究列为国家“十三五”重点科技专项,进行超前研究和技术储备。因此加强深部矿井煤炭资源开发和生产是我国煤炭工业今后发展的必然趋势,而深井围岩微裂隙渗水是制约深井高效利用的难题之一,其关键在于对微裂隙粗糙度特性及渗流机理的研究。

## 1.1 研究背景及意义

煤矿深井井筒穿过的岩层,大部分为富含水且裂隙发育的沉积砂岩,诸如二叠系—石盒子组—山西组石英质胶结砂岩及侏罗系—直罗组泥质胶结砂岩等裂隙砂岩是地下工程建设中的主要充水含水层之一。井筒掘砌过程中伴随着大量渗水,采用普通水泥进行壁后注浆,可以对砂岩中较大的裂隙实现有效封堵,千米深井井筒进行现场监测结果表明,井筒残余涌水量最大可降至 15 m<sup>3</sup>/h 左右。当对井筒浅部和深部作为渗水通道的较大开度裂隙进行封堵后,残余涌水量主要集中在井筒 700~1 000 m 以深范围内的砂岩地层。井壁漏水的主要特征表现为,以大面积均匀汗渗形式出水,未产生明显的集中出水点,使得注浆堵水后井筒总漏水量仍超过验收规范上限( $\leq 6$  m<sup>3</sup>/h)。取样电镜分析表明,该砂岩渗水通道属开度为 0.03~0.1 mm 的微裂隙。裂隙砂岩涌水流量较大,有一定规模含导水构造且分布范围较广。因此,深井井筒微裂隙注浆堵水难题成为制约井筒快速掘进和井筒正常移交的瓶颈。而且井壁长期漏水,会诱发深部混凝土井壁及岩体失稳,导致井筒提升设备停运、人员不能正常升井事故,延误井筒建设工期和生产,经济损失巨大。随着深度的增加和水压增高,发生这类灾害的可能性增大,由此造成的损失将更加严重。

岩石作为一种非连续性介质材料,内部含有大量不同形态、尺寸的微裂隙。这些裂隙通常具有多样的几何形态与不确定性的空间分布特征,同时彼此连接、贯通形成复杂的裂隙网络结构。岩石内部裂隙及裂隙流体的存在直接影响着岩石的物理、力学性质,如强度、渗透性等。

目前对微裂隙进行系统性研究的成果较少,关于微裂隙的定义尚未有统一的认识。龚高武(2007)、李术才等(2017)从地质意义和防渗注浆的角度对微裂隙开展了一系列研究,卓有成效,描述了微裂隙的基本特征。部分观点认为微裂隙主要是指开度小于 0.1 mm、透水

率小于 10 Lu 的细小裂隙。鉴于本研究以微裂隙渗流机理为目标,从透水性和可注性角度,将岩体微裂隙定义为初始开度小于或等于 0.1 mm、高水压下呈现面渗出水的细小裂隙。

已有的工程实践表明,可注性是限制深井孔隙注浆堵水技术发展的重要因素。要保证通过注浆法封堵岩体微裂隙渗水技术的可靠性,必须解决的科学问题是研究不同应力状态下流体在微裂隙中的渗流规律。因此,确定微裂隙表面粗糙度的评价方法及其对岩石渗流特性的影响,揭示微裂隙渗流机理,对于矿井建设乃至隧道工程、水利工程中实际问题的解决具有十分重要的意义。

微裂隙粗糙度是流体渗流模型中的重要参数之一,渗流模型的合理与否关键在于粗糙度评价方法,微裂隙的开度决定了其粗糙度评价方法相对于传统粗糙度评价方法应该更加精细化、系统化。结合微裂隙物理力学参数,科学、合理地描述微裂隙表面形态的粗糙度指标,并探索深部高应力条件下微裂隙的渗流机理是本课题的核心任务。

深井围岩中微裂隙粗糙度特性及渗流机理研究的难点在于:第一,深井砂岩的基本物理力学性质,特别是对其砂岩的微观结构及水理特性的系统性研究方面成果较少。第二,深井围岩微裂隙具有普通裂隙的基本特点,然而也具有其特殊性。在宏观角度上,微裂隙具备一定的起伏角度、起伏的方向性、起伏的分布特点以及粗糙度的分形特性。在微观角度上,微裂隙表面岩石颗粒尺寸与微裂隙开度相比,岩石颗粒尺寸不可忽略不计,影响普通裂隙粗糙度的主要因素为裂隙表面的宏观起伏参数;当微裂隙表面岩石颗粒尺寸比微裂隙开度更小或较为接近时,影响微裂隙粗糙度的主要因素在于微裂隙表面岩石颗粒的形态参数。研究对象决定了粗糙度的评价方法需要较高的精确度与稳定性,而工程应用背景决定了粗糙度的评价方法需要较高的效率与适应能力,这使得目前极少有针对微裂隙粗糙度评价方法的相关研究。第三,基于微裂隙渗流条件下的水力耦合特性的相关研究较少,未认识到在微小通道条件下渗流场和应力场的相互作用规律及微裂隙表面粗糙度产生的影响。第四,由于微裂隙渗流过程主要体现于微观环境中,造成其试验监测的复杂化,缺乏相应的试验研究成果及对全过程动态实时监测的研究,目前微裂隙渗流机理的研究多集中于理论,试验方面的成果极少。

目前,国内外学者在裂隙的粗糙度指标评价、裂隙围岩的水力耦合特性及渗流机理等方面开展了大量的科学研究及工业性试验,而对微裂隙围岩的相关研究涉及甚少。因此,本书以开发千米深井资源,治理深部围岩水害为契机,以深井砂岩为研究对象,基于理论分析与试验研究,揭示砂岩的物理与力学性质,研制了微裂隙砂岩相似模型并讨论了其损伤机制,提出了微裂隙三维粗糙度的表征方法,并构建了微裂隙粗糙度指标 *JRI*,揭示了不同粗糙度条件下微裂隙渗流规律,为深部围岩微裂隙注浆堵水的实现提供了理论基础,对我国深部地下工程的开发和资源利用具有重要的现实意义和工程应用价值。

## 1.2 研究现状

### 1.2.1 岩体裂隙表面粗糙度特性研究

工程岩体内部往往存在节理、裂隙、断层等不连续面,这些不连续面破坏了岩体的完整性,控制着岩体的强度、变形及渗透等特性,进而影响岩体工程的稳定与安全。粗糙度是影响节理面的力学特性的重要因素,而天然节理的表面形态具有一定的随机性与复杂性,因

此,如何有效描述节理面的粗糙度是研究岩体节理面力学特性的基础。

### 1.2.1.1 裂隙粗糙度定量表征方法研究现状

国内外学者对岩体节理粗糙度表征方法开展了大量的科学研究,卓有成效。1973年,N. Barton 通过模型拉伸断裂的直剪试验推导了岩体节理峰值剪切强度经验公式,在国际上首次提出了粗糙度系数  $JRC$  的概念。

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ JRC \lg \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_b \right] \quad (1-1)$$

式中  $\tau$ ——节理峰值剪切强度;

$\sigma_n$ ——作用于节理面上的正应力;











$JRC$ ——节理粗糙度系数;

$JCS$ ——节理壁面强度;

$\varphi_b$ ——基本摩擦角。

N. Barton 和 V. Choubey(1977)为直观地表征  $JRC$  值,在大量岩石试件剪切试验的基础上,提出了 10 条典型节理轮廓线,其表征的  $JRC$  取值范围在 0~20 之间,如表 1-1 所示。1978 年国际岩石力学学会将 N. Barton 和 V. Choubey 提出的该方法作为评估节理粗糙度的标准方法。

表 1-1 标准节理轮廓线

编号	标准剖面	$JRC$ 取值
1		0~2
2		2~4
3		4~6
4		6~8
5		8~10
6		10~12
7		12~14
8		14~16
9		16~18
10		18~20

R. Tse 和 D. M. Crudent(1979)基于 Myers 和 Sayles 的研究成果采用 8 个参数对 Barton 标准轮廓线开展了定量化研究,结果表明,参数二维节理轮廓线平均坡度均方根  $Z_2$ 、结构函数  $SF$  与岩石节理粗糙度  $JRC$  关联程度最高,并建立两个参数与节理粗糙度系数  $JRC$  的函数关系。

$$JRC = 32.20 + 32.47 \lg Z_2 \quad (1-2)$$

$$JRC = 37.28 + 16.58 \lg SF \quad (1-3)$$

式中  $Z_2$ ——二维节理轮廓线平均坡度均方根;

SF——结构函数。

谢和平等(1997)将分形理论用于描述岩石节理的粗糙度,并分析了分形参数对剪切特性的影响,并且分形理论作为科学领域中研究不规则形态的一种有效研究手段已引起众多学者的关注。

EI-Soudani(1978)提出了用  $R_p$  表示物体的线粗糙度。 $R_p$  为迹线长度与其直线长度的比值,表达式为:

$$R_p = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} [(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2]^{1/2}}{L} \quad (1-4)$$

式中  $x_{i+1}, x_i$ ——第  $i+1, i$  个坐标点横坐标值;

$y_{i+1}, y_i$ ——第  $i+1, i$  个坐标点纵坐标值;

$L$ ——节理迹直线长度。

Yu 和 Vaysade(1991)对 10 条标准轮廓线开展研究后发现,节理轮廓线的采样间隔对回归模型结果会产生显著影响,通过设置 0.25 mm、0.5 mm、1.0 mm 的节理采样间隔,获得了平均坡度均方根  $Z_2$ 、结构函数 SF、起伏角标准偏差  $SD_i$  与 JRC 的关系。

Grasselli 等(2002)基于 37 个节理试件的剪切试验,对试验数据进行回归分析,发现了参数最大视倾角  $\theta_{max}^*$  和视倾角分布参数  $C$  与节理面的粗糙度 JRC 之间的函数关系式。

$$JRC = \frac{\arctan\{\tan[\varphi_b + (\theta_{max}^*/C)] \cdot [1 + e^{(\theta_{max}^*/9A_0C)} (\sigma_n/\sigma_t)]\} - \varphi_b}{\lg(JCS/\sigma_n)} \quad (1-5)$$

式中  $A_0$ ——最大可能接触面积比;

$\varphi_b$ ——节理的基本内摩擦角;

$\theta_{max}^*$ ——最大剪切方向倾角;

$C$ ——节理表面粗糙度参数;

$\sigma_n$ ——法向应力;

$\sigma_t$ ——岩石材料的抗拉强度。

若岩体结构面未遭风化时,  $JCS = \sigma_c$ ,  $\sigma_c$  为岩块单轴抗压强度。

近几年来,葛云峰等(2014)提出了采用光亮面积百分比 BAP 描述结构面的形貌,采用三维激光扫描方法构建岩体节理三维模型;通过虚拟光源模拟技术及图像数字分割技术获取了岩体裂隙表面的光亮面积百分比,并拟合了 BAP 与 JRC 的回归关系。王昌硕(2017)基于平均起伏角  $i_{ave}$ 、平均相对起伏度  $H/L$ 、起伏角标准偏差  $SD_i$  和起伏高度标准偏差  $SD_h$  4 个参数,建立了 JRC 支持向量回归(SVR)预测模型来反映结构面形貌,并通过 Barton 标准剖面线的 JRC 预测值与试验反算值的对比证明了模型的可靠性。杜时贵等(1996)对直边法的可靠性进行了科学验证后发现,对于起伏度为毫米级的岩体结构表面形态而言,直边法的测量精度在毫米尺度上可以满足岩体裂隙表面粗糙度系数的统计要求,并在此基础上,对直角边法的数学表达式进行了修正。陈世江等(2016)对结构面的分形特征开展了大量研究,利用数字图像处理技术创新性地提出了岩体结构面投影覆盖法分形维数计算程序;并由维数  $D$  和起伏度  $W_d$  建立了 JRC 表达式。孙辅庭(2013)基于 3 个粗糙度参数—节理平均剪切抵抗角、节理起伏分布参数、节理粗糙度分形参数建立了节理剪切粗糙度指标 SRI,并建立了 SRI 与 JRC 之间的拟合关系。

### 1.2.1.2 裂隙粗糙度各向异性研究现状

节理粗糙度是存在各向异性特征的,节理表面形貌的各向异性是影响节理力学行为(渗流规律、剪切强度等)各向异性的重要因素。天然岩体节理表面通常是凹凸起伏的,与此同时,也表现有显著的各向异性特征,这里的各向异性主要是指节理表面形貌参数或特征受方向影响而表现出较大的差异。近几十年以来,国内外学者对节理粗糙度各向异性进行了研究,卓有成效,提出了很多理论和公式,几乎涵盖了裂隙粗糙度各向异性的各个方面。

Aydan等(1996)对裂隙表面形貌特征的不连续性及其各向异性开展研究,在笛卡儿坐标系中提出了与方向倾角 $\theta$ 有关的结构函数 $SF$ ,且不连续面可以用其特征方向上的轮廓线来描述。

Tatone等(2010)将节理表面形貌的三维离散点坐标数据网格化后,认为每个网格的方位均可由方位角 $\alpha$ 、倾角 $\theta$ 确定。节理的粗糙程度可用网格视倾角 $\theta^*$ 的函数表示,采用最大接触面积比 $A_0$ 、最大视倾角 $\theta_{\max}^*$ 和视倾角分布参数 $C$ 描述节理的貌特征,该方法能够很好地反映节理形貌的各向异性性质。

Kulatilake等(2006)提出了复合参数 $D_{\text{rid}} \times K_v$ 表征结构面的粗糙度,其中 $D_{\text{rid}}$ 表示结构面的分形维数, $K_v$ 是和分形维数 $D_{\text{rid}}$ 相关的一个常数。

李久林等(1994)基于结构面断裂力学,用结构面不同方向上剖线的粗糙度研究了结构面的各向异性,对I型、II型结构面的表面特征进行分析后发现,羽纹构造是I型结构面的重要特征,II型结构面沿断裂时剪应力方向的粗糙程度明显高于垂直应力方向的粗糙程度。

唐志成等(2011)认为结构面坡度起伏是影响抗剪强度的主要因素,提出结构面“角度粗糙度”的概念,同时对结构面坡度起伏、剖面线长度进行加权处理,采用加权均值与加权方差对“角度粗糙度”进行了描述。

周宏伟等(2001)提出了采用高度分度转化为斜率分布、斜率分布采用频谱分析的方法对裂隙表面的形貌数据进行分析,结合累计功率谱密度指数的方法,对岩体节理表面的各向异性进行了定量描述。

### 1.2.1.3 裂隙粗糙度尺寸效应研究现状

岩体裂隙粗糙度的尺寸效应特性不容忽视,微裂隙粗糙度的尺寸直接影响渗流路径与渗流规律。节理尺寸效应的相关研究可追溯至20世纪70年代末,Barton和Choubey在研究岩体节理剪切强度的过程中就发现了节理尺寸效应会对粗糙度系数结果产生一定影响。研究表明,当岩石节理长度逐渐增大,其粗糙度系数会随之逐渐减小。研究粗糙度的尺寸效应为全面描述裂隙粗糙度特性奠定了基础,对探索深井围岩微裂隙渗流机理具有一定的理论价值。

Barton和Bandis(1983)通过大量试验研究发现,导致节理剪切强度和抗剪刚度随试块尺寸的增大而减小的根本原因是有效节理粗糙度降低所致,并且提出了估计节理粗糙度系数 $JRC$ 尺寸效应的修正公式。

N. Fardin等(2004)系统地研究了尺度对岩石节理表面粗糙度的影响,应用分形维数 $D$ 和振幅参数 $A$ 全面地描述了节理面的粗糙度,并详细讨论了结构面粗糙度的尺寸效应,研究发现,随着节理面选取的窗口尺寸范围逐渐增大,分形维数 $D$ 和振幅参数 $A$ 在逐渐减小,当窗口尺寸超过一定范围时,它们的取值基本保持不变。

杜时贵等(2010)为解决图解修正直边法估计  $JRC$  过程中未考虑尺寸效应的问题,在分析  $JRC$  的尺寸效应产生机理的基础上,认为壁岩强度的尺寸效应和节理表面起伏幅度的尺寸效应的共同作用引发了  $JRC$  的尺寸效应,最终提出了考虑节理尺寸效应规律的  $JRC$  修正直边法数学表达式。

徐磊等(2008)通过非接触光栅投影照相式三维测量系统对人工张裂法制备的花岗岩节理三维形貌参数进行定量描述。研究表明,岩体节理三维表面形貌具有明显的尺寸效应,在一定的尺寸范围内,随着节理尺寸的逐渐增大,其分形参数  $D$ 、振幅参数  $A$  的值逐渐减小。但当结构面线尺寸超过 210 mm 后,分形参数值逐渐保持稳定,不再随尺寸增大而产生较为显著的变化。

近几年来,国内外学者对裂隙粗糙度尺寸效应做了大量而广泛的研究,尤其是在研究节理剪切强度的过程中,岩体节理的剪切强度存在尺寸效应特征往往也会得到进一步证明,而产生剪切强度的尺寸效应主要原因在于节理表面几何形态。然而,由于岩体节理存在各向异性,导致节理粗糙度在各个方向上的尺寸效应也存在差异性。因此,有必要加强对裂隙粗糙度尺寸效应的研究。

吉锋等(2011)采用研制的新型接触打孔器实现了对结构面的机械化测量,并对硬性结构面的粗糙度开展了尺寸效应分析,最终获得了结构面  $JRC$  值的统计方差随测量长度的增加而逐渐减小的规律,并提出了消除起伏粗糙度对剪切试验影响的极限尺寸计算方法,最后通过对工程实例分析后发现,当强风化粉砂岩的取样长度大于 50 cm 时,剪切方向上起伏粗糙度尺寸效应可以忽略;当平直新鲜砂岩的取样长度大于 5 cm 时,剪切方向上起伏粗糙度尺寸效应可以忽略。

曹平等(2011)运用三维表面激光形貌仪扫描 10 个不同尺度的大理岩节理表面,根据分形理论对节理尺寸效应开展了大量研究工作。结果表明,当大理岩试件的尺寸在 500 mm 以内时,分形维数  $D$  和截距  $A$  随试件尺寸增大而减小,两参数均表现有显著的尺度效应,而超过 500 mm 这个极限尺寸时,两参数的尺度效应不明显,并且发现试件处于小尺寸范围时获得的分形参数不具有代表性。

陈世江等(2012)在考虑岩体节理地质本质性的基础上,结合地质统计学原理,提出了描述节理粗糙度各向异性特征的  $SR_v$  法;在采用  $SR_v$  法表征节理粗糙度各向异性的基础上,考虑了粗糙度在某一方向正向与逆向存在不同结果,按照 Tatone 等(2010)提出的分析方法,获取了不同方向上节理在不同尺寸范围内的  $SR_v$  值。

唐志成等(2012)采用岩石三维表面形貌仪对 3 组砂岩相似材料不同形貌的节理试件进行研究,获得不同的采样间距下形貌坐标的三维离散点数据;采用节理形貌描述方法计算节理的三维粗糙度,其值随采样间距的增大而逐步减少。基于 0.5 MPa、1.0 MPa、1.5 MPa、2.0 MPa 和 3.0 MPa 共 5 级法向应力下的直剪试验结果,提出了基于采样间距作用下的节理峰值抗剪强度公式。

#### 1.2.1.4 岩体裂隙形貌获取方法研究现状

节理三维信息数据的获取是进一步分析岩体节理形貌特征参数的前提条件。因此,要计算某一节理表面其任一粗糙度特征参数,必须建立在获取结构面的三维信息数据的基础之上。然而针对节理表面几何形貌获取方法的分类,角度不同可以有多种分类方法。本课题按照与节理表面接触与非接触关系的分类方法,对国内外学者所采用的节理表面粗糙度

数据形貌获取方法进行归纳总结。

### (1) 接触式量测

接触式测量法,其实质在于利用单根或多根测量探针在节理上接触并在其表面上沿直线进行移动,逐点进行测量进而获取节理表面二维或三维坐标数据,最终转换为与节理粗糙度参数相关的数据信息。使用这种方法获取节理形貌信息典型研究有:Barton(1973)利用研制的一排具有自由升降功能的针状轮廓尺来获取节理二维剖面线;Stimpson(1982)采用170个直径为0.9 mm的钢针完整排列在不规则的节理表面上来记录节理表面的轮廓。杜时贵(2005)基于转绘仪的工作原理,采用一根探针代替一排探针的方法,研发了简易纵剖面仪;夏才初等(1996)为了实现测量仪器既能记录表面形貌参数,又能精确地记录节理形貌轮廓线的功能,研制了用微机驱动控制和采集数据的RSP-I型智能岩石表面形貌仪,该形貌仪的分辨率为0.01 mm,测试量程为10 mm,通过计算机对形貌仪的精确控制,实现了对节理形貌数据的自动采集,通过计算机软件进行数据变换处理和坡度修正后,最终获取具有较高精确度节理表面形貌参数,工作效率得到了较大提升;吉锋等(2011)对国内外结构面测量仪器优缺点进行了深入分析,利用自主研发的新型接触打孔器对硬性结构面进行了精细化测量,结果显示:通过接触打孔器方法获得的结构面粗糙度JRC值与实际结构面表面的JRC值吻合度较高。

基于上述文献,接触式获取节理形貌信息数据方法的优势在于:整个设备结构简单,制作价格较为低廉;设备体积适中,便于携带,可以在室内和室外灵活地开展相关粗糙度试验。但该方法在测量精度上受测量仪器触针的硬度、大小和移动速度等因素的影响,以至于其存在一定的缺点:

① 接触式测量仪器是以点或线的形式采集数据,其触针的直径与间距限制了其测量精度。尤其是当节理两个相邻的波峰间距小于触针直径时,则触针将无法量测到波谷的数据,进而使测量仪器的精度大大降低,使得测量结果可能存在较大偏差。

② 由于设备整体设计尺寸有限,导致其单次测量的范围有限,使得测量仪器不适用于大规模节理粗糙度测量,且大多数测量仪器需要人工手动进行操作,测量速度极其有限。

③ 根据接触式测量仪器的工作原理,触针必须要和节理表面接触才能进行数据采集,这使得触针硬度对测量精度会产生很大影响。如果触针硬度过小,触针和节理接触的过程中会发生严重磨损从而导致测量精度显著降低;而如果触针硬度过大则会导致节理表面形貌发生严重破坏。与此同时,触针选用的材料也极为重要,很多材料受环境温度、湿度影响,会发生变形,也会严重影响测量精度。因此,为了保证测量精度的准确性,必须根据节理表面的力学性能配合使用相对应硬度,且受环境因素影响较小的触针,最大限度地保证整个测量过程测量仪器的精准度与稳定性。

④ 触针对人工操作的要求较高,操作人员必须要在现场进行操作。受人为因素影响,测量仪器的移动速度直接影响测量的精度。如果操作人员移动速度过快,这会使得触针在节理表面接触时间极短,进而可能未发生有效接触,这将会使节理表面一些数据信息丢失,导致节理粗糙度评价结果出现偏差。

⑤ 接触式测量方法仅能在节理表面上获取单条轮廓线的粗糙信息,即获取的是二维剖面数据信息,要想全方位地反映节理粗糙度,需要采用多条轮廓线对整个结构面进行测量。

### (2) 非接触式量测

非接触式量测是与接触式量测相对的,具体是指在数据采集过程中使用的测量仪器在不损坏结构面的前提下,可以量测到无法接触到的岩体节理表面,而且具有采集速度快和测量精度相对较高等优点。近几年来,非接触式量测方法在岩石力学领域得到了广泛应用,目前广泛采用的方法是摄影测量法和三维激光扫描法。

① 摄影测量法——摄影测量法其主要原理在于采用数字图像采集技术全面获得节理表面数字图像,然后采用数学运算法则对节理表面的三维信息进行重建,其难点在于节理三维形貌的重建方法,国内外在采用摄影测量法对岩体节理表面量测方面已经取得了较为丰硕的成果。

Maerz 和 Franklin 等(1990)提出采用直尺阴影法获取节理剖面的三维数据信息,该方法源于地质学和地球物理学领域中的风成沙波纹研究。主要研究过程为:采用数码相机对节理表面进行图像采集,采用节理表面放置的直尺产生的阴影来表征节理表面的粗糙特征。

Hakami(1996)在开展岩体渗流试验过程中,为了量化裂隙的隙宽,将裂隙中充满环氧树脂的岩样加工处理成岩石薄片,采用显微镜对裂隙中环氧树脂的充填情况进行观察并采集图片,然后基于数字图像处理技术对节理各位置处的隙宽进行统计。该方法提出的最初目的是对裂隙的隙宽进行测量,然而发现其亦可以用于测量节理表面的起伏特征。该方法与一般的摄影测量法的最大区别在于:采集图像的过程不在节理表面进行,而是从节理的侧面方向开展的。

夏才初等(2008)研制了 TJXW-3D 型便携式岩石三维表面形貌仪,该形貌仪融合了双目成像、结构光栅和立体视觉等多项技术,通过对被测节理表面投射光栅条纹的方式来获取节理表面的三维坐标数据,通过对数据进行深入分析后计算出节理表面的形貌参数,整套系统尺寸适中,操作方便,可以在现场对岩石节理表面的三维形貌进行测算,并可直接对获取的图像进行显示与分析。

王卫星(2010)基于图像技术对岩石节理粗糙度进行测量,在确定自定义的 4 个特征参数的粗糙信息量化值的基础上,建立了粗糙信息量化值与 10 条标准粗糙度曲线对应关系,将该方法进一步在岩石节理上进行推广应用。通过实验证实,该方法可以有效地获取岩石节理粗糙度,在实现了用计算机自动快速测量的基础上,使得岩石节理粗糙度的测量精度获得了大幅度提升。

Bae(2011)利用井下电视测量技术获取了钻孔中结构面与孔壁相交的剖面数字图像,通过采用分形的方法对节理轮廓数据进行分析,进而对节理表面的粗糙度规律开展研究。

陈世江(2012)以摄影测量为基础,借助数字图像处理技术,通过 VC++ 平台开发了节理轮廓线分形维数计算程序,该程序可通过分形维数对实际工程岩石节理粗糙度  $JRC$  值进行方便获取,有效解决了分形维数难以进行现场量测的瓶颈,同时也提高了粗糙度的计算精度。但该方法的进一步发展,仍依赖于数字图像处理技术的进步与分形维数的计算方法的提升。

② 三维激光扫描仪——三维激光扫描仪是利用脉冲激光测距原理,通过高速激光对被测节理表面大量密集点的三维坐标进行测量,并可获取节理表面的其他信息,如反射率、纹理等。通过三维激光扫描技术,可根据被测岩体或节理表面的三维模型及线、面、体等各种图件数据对岩体或节理快速进行模型重构,结合计算机数字处理手段,可全面获取节理粗糙度特征。由于三维激光扫描系统可以高精度密集地获取节理表面形貌的三维坐标点,因此

相对于传统的节理粗糙度测量方法,三维激光扫描技术的产生实现了对节理粗糙度准确、高效扫描的革命性突破。

基于三维激光扫描仪可以获得以点云数据形式描述目标物体表面几何信息的基本属性,该方法在室内试验中得到了广泛的应用。

Fardin(2001)采用印模的方法,首先在户外复制出岩体节理表面形貌的基本形状,然后在实验室采用三维激光扫描仪对复制的模具进行数字化扫描,获取其表面三维坐标数据。试验过程中使用的三维激光扫描仪的主要部件为激光传感器,受激光传感器激发,激光源投射一组宽为 25 mm 的线性光束,节理表面受激光照射图像被两个电荷耦合器件(CCD)相机记录。该激光扫描仪的激光传感器可以根据预先在计算机内的编程路径在样品上自动移动,进而来测量节理表面起伏形态,并可根据扫描步长选择每秒最多扫描 15 000 个点,用 0.2 mm 的采样间隔对复制节理的表面形貌进行数字化表达,最终通过 Imageware 软件对节理进行重构。

Kulatilake(1995)将从露天铜矿采集的闪长岩节理作为研究对象,在实验室采用激光轮廓仪获取节理表面三维坐标,并且基于激光轮廓仪采集的数据采用不同的分析方法来研究节理尺寸大小对二维天然岩石节理粗糙度各向异性产生的影响。该扫描仪测量精度最高可达 3  $\mu\text{m}$ ,为该研究结果的准确性提供了平台保障。

曹平(2011)选用英国生产的 Talysurf CLI 2000 三维表面形貌测试仪对节理表面三维形貌进行量测。节理表面的凹凸形状通过激光变位计转换成光信号,光信号再由 CCD 转换成电信号,电信号经过处理后通过三维表面形貌测试仪以数据的形式存储在计算机中。该仪器由激光扫描测量装置、计算机、控制单元及数据采集软件等几部分组成,是一种三维非接触式高精度激光扫描仪。利用三维激光测量技术,通过移动测头下的试件来完成节理表面的扫描,其最大扫描范围为 200 mm $\times$ 200 mm $\times$ 200 mm,相比于 Kulatilake 使用的激光轮廓仪,该仪器的精度更高,其扫描精度最高可至 0.05  $\mu\text{m}$ 。

熊祖强等(2015)采用三维激光扫描仪对 3 种石灰岩自然结构面表面形态进行扫描获得了大量高精度的点云数据,采用逆向工程重构石灰岩结构面的表面形态并生成三维结构面数字模型。然后借助 3D 打印技术对石灰岩结构面形貌进行批量制作,其打印精度为 0.2 mm,并在实验室内开展了结构面剪切试验。

近几年来,王昌硕、庞明敏、郑罗斌等分别运用了三维激光扫描设备,在室内环境下对岩体节理表面进行了扫描,通过激光扫描仪可以快速、准确地获取岩石节理的三维模型及其相应的三维坐标数据,通过对数据进一步分析,获取三维粗糙度表征方法,为岩体节理剪切强度或渗流规律的研究奠定了基础。三维激光扫描仪具备自动定位功能,不会产生扫描数据发生重复的现象,具有操作灵活、简便、高效率、高精度以及高稳定性等优点。因室内试验条件下选取的三维激光扫描设备的基本构成、工作原理及后处理步骤基本保持一致,与前文所述的成果较为相似,在此就不再赘述。

三维激光扫描仪在室内试验环境中得到了极大推广,但由于其精度很高而导致扫描范围极其有限,对于较小的测量对象可以很好地发挥作用。如果此时测量对象范围较大,或是直接进行户外量测时,室内三维激光扫描仪则完全无法使用,此时亟须研发一种能大规模高效率且能保持较高精度的测量仪器,可在室外环境条件下使用的三维激光扫描仪应势而生。在室外条件下采集节理表面的形貌特征,采用三维成像扫描方法是至关重要的。户外环境

中存在诸多复杂性条件,如有限的光照条件、现场大量的扬尘及不确定的天气状况,这些因素给户外节理形貌采集工作带来了极大的挑战。要想获取高精度的岩体形貌特征,这就要求具有高精度、高分辨率的激光扫描仪来解决这些挑战。目前,三维激光扫描仪已经在户外岩体节理表面识别方面得到了广泛应用。

Mah 等(2013)采用 Neptec Design Group 开发的激光相机系统在加拿大汤普森市的某镍矿地下洞室中开展了一次地下现场试验,在埋深 1 524 m 的条件下对 5 m×4 m 的侧壁表面形貌特征进行了数据采集,数据采集过程中扫描仪在距离被扫描目标 10 m 范围内工作,其精度可控制在亚毫米数量级。三维激光仪基于采集的数据运用数学形态学原理来评估节理表面粗糙度特征,为进一步研究岩石裂隙表面粗糙度的定量表达和流体渗流规律提供了便利条件。

Fekete 等(2013)采用激光雷达技术对挪威某 10 m 直径的铁路隧道岩体进行了量测,并对爆破后的岩体质量进行了评价与分析。实现激光雷达技术的关键步骤在于使用 Leica Geo 系统的 HDS 6000 扫描仪对岩体进行扫描。该扫描仪具有 360°水平视野和 310°垂直视野,其扫描精度为 0.6 mm,在距离被扫描目标 10 m 处的最低反射率可降至 20%,可每秒实时采集高达 500 000 点的三维数据,是地下工程环境中扫描岩体表面特征较为理想的方法。

胡超等(2014)采用大尺度三维激光扫描技术对某水利工程边坡表面岩体特征数据进行扫描,根据随机采样一致性算法对系统产生的误差进行修正,并开发了海量点云数据的高效处理流程。根据数据特点及工程特征利用大型关系数据库建立了基于 B 树及其拓展结构的海量点云数据存储与管理机制。

葛云峰等(2012)采用加拿大生产的 ILRIS-36D 型三维激光扫描仪对岩体结构面进行扫描,ILRIS-36D 型三维激光扫描仪工作原理在于:首先将坐标原点调整至扫描仪中心,基于脉冲激光测距原理,获取激光光束与节理表面之间的水平方向角、垂直方向角及距离,最终以点云形式表达被测节理表面形貌特性,获取节理表面的三维点云数据。

目前对岩体节理粗糙度的研究工作,一部分是基于节理的二维剖面提出的,不能体现节理粗糙度系数的三维特性;而对于三维粗糙度的评价方法,大多数无法反映节理面粗糙度各向异性的特性;对粗糙度或粗糙度参数存在的各向异性、尺寸效应与间距效应进行全面分析的研究较少且大多数粗糙度评价方法通过单一变量构建评价模型,具有很大的局限性,并不能很好推广。因此,应对粗糙度或粗糙度参数存在的各向异性、尺寸效应与间距效应进行全面分析,并在此基础上构建一种受多参数影响的节理粗糙度评价方法,与此同时节理粗糙度评价方法应该具备高效率、高精度的特征,能够较好地反映岩体结构面的实际情况,同时能够结合不同渗流方向,对节理面三维粗糙度的各向异性进行描述。

### 1.2.2 裂隙岩体渗流特性理论与试验研究

在地下工程中,天然岩体在形成和运动的过程中,经过长时间的地质构造运动在岩体内部形成了大量的节理裂隙、微裂纹以及孔隙等宏观非连续结构面,这些非连续结构面成为地下水储存和流动的载体。在裂隙岩体中运移的过程中,与岩体节理之间会发生相互作用。

天然岩体节理基本处于压剪应力状态,按照垂直方向和水平方向来分解节理上的应力可分为法向应力和剪切应力。节理应力—渗流耦合作用就是节理在法向应力的作用下发生闭合变形,从而影响节理有效开度,导致流体渗流规律发生变化;节理在剪切应力作用下发生剪胀效应,使得节理有效开度继续发生变化,进而对节理流体渗流规律的变化发挥影响作

用。因此裂隙应力—渗流耦合作用研究可分为两个方面：一方面为节理法向应力—渗流耦合作用；另一方面为节理剪切应力—渗流耦合作用。与理想光滑平行板模型显著不同的是，天然岩石节理表面是起伏不平的，因此，岩体节理的应力—渗流耦合分析具有一定的复杂性。为有效探索岩体节理应力—渗流耦合作用的内在机理与外在特征，国内外学者主要从理论模型和试验研究两个方面开展研究。

### 1.2.2.1 岩体单裂隙渗流理论及试验研究现状

单一裂隙是岩体裂隙网络结构的基本组成单元，其渗流基本规律对研究地下岩体裂隙渗流应力关系发挥着至关重要的作用。对于不可压缩的稳定流体，可以采用 Navier-Stokes 方程和质量守恒方程对单一裂隙的渗流特性进行很好的描述。1868 年俄国流体学家 Boussinesq 假定裂隙流体为不可压缩、黏性及水流为层流，并且岩体裂隙为两片光滑、平直、无限长的平行板，基于平行板间的定常层流，利用 Navier-Stokes(N-S)方程推导出裂隙岩体渗流领域的基本理论——立方定理。

$$Q = \frac{g}{\nu} \frac{we^3}{12} J \quad (1-6)$$

式中  $J$ ——量纲为 1 的水力梯度；

$g$ ——重力加速度；

$\nu$ ——水的运动黏滞系数；

$Q$ ——流体的总体积流速；

$e$ ——裂隙水力隙宽；

$w$ ——平行板间流动区域的宽度。

在此基础上，国内外学者通过理论和试验的方法对立方定律进行了修正和完善，同时在岩体单裂隙渗流—应力耦合方面进行了广泛且深入的研究。

在立方定律修正方面，单宽流量  $q$  与隙宽  $e$  之间的关系在大量研究成果中得到体现，具体对立方定理建立了以下修正公式。

Lomize(1951)提出：

$$\text{层流：} \quad q = \frac{ge^3}{e12\nu} J \frac{1}{1+6(\Delta/\bar{e})^{1.5}} \quad (1-7)$$

$$\text{紊流：} \quad q = \bar{e} \sqrt{gJ\bar{e}} [2.6 + 5.11\lg(\bar{e}/2\Delta)] \quad (1-8)$$

Louis(1967)提出：

$$\text{层流：} \quad q = \frac{ge^3 J}{12\nu} \cdot \frac{1}{1+8.8(\Delta/\bar{e})^{1.5}} \quad (1-9)$$

$$\text{紊流：} \quad q = 4\bar{e} \sqrt{gJ\bar{e}} \lg[1.9/(\Delta/\bar{e})] \quad (1-10)$$

Huitt(1956)发现裂隙面粗糙特征对裂隙水流规律产生的作用主要是裂隙面面积接触率造成的：

$$q = q_0 \frac{1-\omega}{1+\eta\omega} \quad (1-11)$$

Barton(1985)提出了节理粗糙度系数  $JRC$  修正法，并且在立方定理中裂隙宽度采用等效水力隙宽：

$$q = \frac{1}{JRC^{7.5}} \cdot \frac{ge_m^6}{12\nu} J \quad (1-12)$$