

焦散线方法的应用和发展现状

刘泽宇 吴霄 隋显毅 谷海波
浙江省高能爆破工程有限公司
DOI:10.12238/bd.v6i2.3889

[摘要] 为了提高爆破效果,满足现场施工要求,焦散线实验方法广泛应用于研究爆破时裂纹扩展机理以及相关参数的测定。本文对焦散线实验方法的发展历史、形成原理、实验系统以及在爆破工程中的应用等方面进行了阐述,为研究爆破参数对其效果影响以及裂纹扩展机理提供了可靠的依据;分析了焦散线方法在爆破机理研究中的优势,并对其目前的发展做了相关的总结。

[关键词] 焦散线; 裂纹扩展; 爆破效果; 机理

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A

Application and Development Status of Caustics Method

Zeyu Liu Xiao Wu Xianyi Sui Haibo Gu
Zhejiang High Energy Blasting Engineering Co., Ltd

[Abstract] In order to improve the blasting effect and meet the field construction requirements, the scorch line experimental method is widely used to study the crack expansion mechanism and the determination of related parameters during blasting. In this paper, the development history, principle of formation, experimental system and application in blasting engineering are described, which provide a reliable basis for studying the effect of blasting parameters on its effect and crack expansion mechanism; the advantages of scorch line method in blasting mechanism research are analyzed and its current development is summarized accordingly.

[Key words] scorched wire; crack expansion; blasting effect; mechanism

引言

随着近些年科学研究技术的快速发展,光学实验方法广泛应用于工程断裂力学,在实际断裂问题方面具有重要的意义。

19世纪50年代,G. B. Airy最先发现了焦散线。Manogg于1964年分析研究并首次引入了焦散线理论方法解决异性问题,并将此实验投入实际应用。尽管以现今视角看,焦散线方法对于研究异性问题,从理论到实践角度都有很大意义,但当时并没有引起主流学界的认可和重视。20世纪70年代,Theocariss^[1]根据Manogg提出的焦散线实验理论方法,用以分析研究裂纹的动态扩展过程,并通过实验确定了裂纹尖端附近塑性区尺寸的大小以及裂纹尖端扩展位置,并通过进一步的研究分析,计算出了应力强度因子的大小。而Kalthoff^[2]将焦散线方法大量应用于断裂力学中,使其有了系统的发展。

焦散线方法在上世纪八十年代初被引入我国,并逐渐受到科研人员的认可与重视。我国相关研究学者管大椿^[3]、吴向^[4]等系统的梳理了焦散线理论、实验方法,首次将焦散线方法应用于静态断裂问题的研究,描述并分析了静态断裂结果。苏先基等^[5]为探究裂纹在冲击荷载作用下的动态扩展规律,结合凹面镜

和多火花式高速摄影机,运用焦散线方法进行试验。杨仁树^[6]基于动态焦散线方法,针对爆炸在节理面产生的不同夹角,研究并分析描述了裂纹穿过节理面的扩展,并总结得出了裂纹扩展的速度变化规律及裂纹尖端动态强度因子。李清^[7]针对爆炸裂纹定向断裂的超动态力学问题,借助焦散线实验系统,分析了裂纹扩展过程中的力学特征。

近些年来,焦散线方法广泛应用于定向断裂控制爆破机理研究中,本文就焦散线方法目前的发展现状和应用展开讨论,对后续的研究具有一定的意义。

1 焦散线方法的基本原理

1.1 焦散线形成的原理

图1为焦散线原理示意图^[8]。厚度为d的试件在荷载0作用下产生变形进而促进了裂纹的形成。随着裂纹尖端部位的应力梯度发生变化,试件的厚度和折射率也会改变,距离裂纹尖端位置越近,该区域产生的变化会越大。因此,平行光入射该区域时,并不垂直穿过试件表面,从而导致透射现象的产生,光线的传播方向受到影响发生偏转,进而就会观察到一个暗斑形成于距离试件z0处的平面上,该斑就是焦散斑。在焦散斑附近围绕的亮线即是焦散线。改变裂纹的受力状态,焦散斑的尺寸和大小也会随

之改变,所以可以通过观测焦散斑的尺寸和大小,分析裂纹处处于的受力状态。

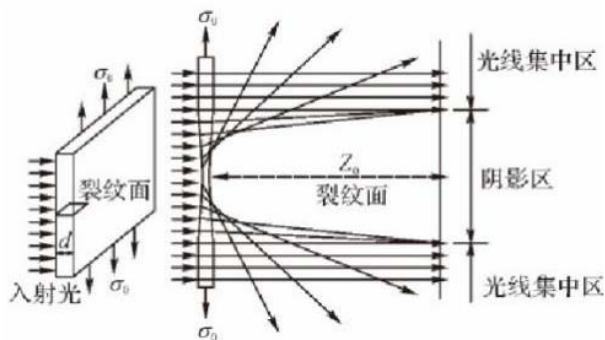


图1 焦散线成像示意图

1.2 焦散线实验系统的发展

杨仁树等^[9]采用光电系统和爆炸加载同步控制系统设计焦散线实验系统。光电系统主要由延迟装置、半反镜、光源、高清摄像机、触发装置、高压电力供应装置和瞬态波形记录仪等组成。电子控制系统的作用是控制火花放电以及焦散照片拍摄的频率,时间间隔主要根据实验安排的提前进行设置,可调节的范围为0~999s。透射式焦散线实验光路如下图2所示。

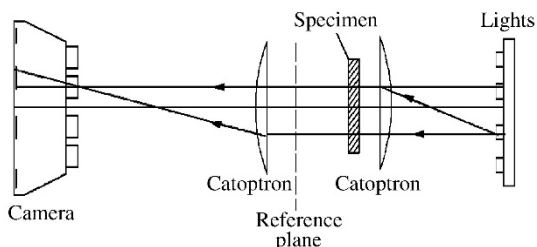


图2 透射式焦散实验光路图

杨立云等等设计的新型动态焦散线实验系统主要由加载装置、固体激光器、场镜、扩束镜、高速数码相机、计算机和同步控制开关组成,如下图3所示。整套系统主要是将焦散线实验与固体激光器和高速数码相机结合在一起,利用焦散线拍摄在很高的冲击速度下试件发生断裂的整个动态过程,并且,为得到图像数字,可以以计算机作为平台,借助其计算能力及图形处理软件,从而达到对整个实验系统控制的目的。

1.3 确定动态应力强度因子

施加在试件上的动态荷载,促使试件缺陷处在应力集中作用下会最先出现裂纹,从而导致失稳扩展过程的发生。而材料的受力状态发生变化与其光学性质发生变化具有一定的对应关系,对于I型裂纹,Beinert J等展开了研究,研究结果得出了裂纹尖端的动态应力强度因子KI_d的影响参数,具体表达式为:

$$K_1^d = \frac{2\sqrt{2}F(v)}{3g^{5/2}z_0d|c_1|} (D_1)^{5/2} \quad (1)$$

上述公式中,D1为焦散斑在纵向上能够达到的最大直径;Z0

为试件到参考平面的距离;d为试件的有效厚度。

Rosakis通过实验研究发现焦散斑的形状会受到裂纹扩展速度的影响,相比于静止裂纹尖端,动态裂纹尖端的焦散斑更大,因此,将速度调节因子引入到动态裂纹尖端的应力强度因子KI_d和KI_{II}d的计算中。速度调节因子为F(v),可表示为:

$$F(v) = \frac{4\beta_1\beta_2 - (1 + \beta_2^2)^2}{(1 + \beta_2^2)(\beta_1^2 - \beta_2^2)} \quad (2)$$

上述公式中:β₁²=1-(V/C₁)²,i=1,2,C₁为有机玻璃板中膨胀波传播速度,C₂为剪切波传播速度.F(v)为速度调节因子,在裂纹扩展前,F(v)=1;裂纹扩展后,随着V/C₁从0上升到1,F(v)从1降到0,但对于大多数动态裂纹的扩展速度(0<V/C₁<0.7),F(v)≈1。

2 在定向断裂控制爆破机理研究中的应用

2.1 在切槽孔爆破中的应用

在切槽孔爆破中,在首先确定装药量的情况下,切槽的深度以及切槽的角度是决定最终爆破效果的主要因素。因此,为得到比较合理的切槽深度和角度,进而得到更好的爆破效果,分析切槽深度和角度对爆破效果的影响机理并总结得出规律,对切槽孔爆破的后续研究及现场实际施工具有指导意义。

杨立云等采用焦散线系统和动静组合的加载试验,研究炮孔切槽在不同角度下裂纹扩展受到初始应力场影响的规律,得出初始应力场中的圆形炮孔周边的应力集中因为切槽孔的存在而发生改变。岳中文通过采用焦散线实验系统研究切槽方向与主裂纹扩展之间的关系,得出爆生主裂纹的扩展会受到切槽方向的影响,切槽方向发生改变,裂纹扩展也随之改变。杨仁树等通过焦散线试验系统,对比研究含缺陷物质在普通炮孔中和切槽炮孔中的裂纹扩展,得出切槽炮孔相比于普通炮孔沿着切槽方向更有利于能量释放。岳中文为了研究起爆时差与孔间裂纹扩展之间的联系,采用焦散线试验系统,得出在实际的开挖工程中,为了提高爆破效果可使用同时起爆的方法,该实验研究对后续的工程实践具有一定的参考价值。

2.2 在切缝药包爆破中的应用

切缝药包的爆破效果主要由切缝宽度、切缝数目和切缝外壳的厚度和强度决定。可将焦散实验系统引入研究切缝药包爆破时裂纹扩展规律以及切缝宽度对其爆破效果的影响。

丁晨曦基于切缝药包爆破机理,借助动焦散试验系统进行试验研究爆破过程中裂纹扩展与张开节理之间的作用,试验结果表明:节理对定向裂纹的扩展起阻滞作用,裂纹经过节理端部形成两条翼纹并继续发展,而非沿原有裂纹扩展方向贯穿节理;当裂纹定向扩展方向与张开节理入射角度接近90°时,节理两端处于近似相同的受力状态,此时,由于节理对定向裂纹的阻滞作用生成的翼纹,具有相同的起裂方式和扩展行为。岳中文为研究在切缝药包爆破中孔距与爆生裂纹的关系,将动焦散实验系统与数值模拟相结合,分析试验结果,发现爆破过程中,裂纹定

向扩展的程度与一定程度内的孔距大小呈反比例关系,即孔距越小,炮孔由爆炸产生的裂纹更易向外发展。

3 焦散线的应用

3.1 焦散线法在断裂力学中应用

基于动焦散线方法的动态断裂问题研究逐渐普遍,观测焦散斑的动态轨迹,可以测定动态强度因子,结合爆破理论分析导致裂纹起裂和扩展的主要因素,并测定相关参数。

岳中文等为了探究纹对试件裂纹在受到双预制裂纹的影响下,扩展速率和动态应力强度因子值会发生什么变化,采用焦散线实验系统,得出试件发生开裂现象后,随着时间变化,裂纹扩展速度和动态应力强度因子值先快速上升后波动下降。宋耀等采用静态焦散线实验系统,探究岩层的断裂力学行为,发现在相同的荷载下,爆炸过程中的焦散斑大小和试件对裂纹扩展的阻滞作用均与铝板试件的宽度相关,其中焦散斑大小即动态强度因子与铝板宽度呈反比,而阻滞作用铝板宽度呈正比。

3.2 焦散线的其他应用

杨仁树等为研究圆形孔缺陷与运动裂纹之间的相互作用与关系,对预制含圆孔缺陷的试件进行冲击试验,并借助动态焦散线实验系统,得出以下结果:通过对高速摄影仪拍摄结果的观测,预制圆孔上端部位率先起裂,且裂纹扩展路径较为曲折,最终得到的爆破结果,圆孔周边的断裂面页凹凸不平。杨立云等基于焦散线理论,采用焦散线实验系统和动静组合加载装置,研究裂纹沿主应力方向扩展的过程及结果,并从力学角度分析此试验条件下的主裂纹及次生裂纹扩展的力学行为,得出以下结论:由于预制炮孔的存在,静态竖向的荷载在炮孔下端处产生应力集中,此处受到最大拉应力作用;裂纹在动态爆炸荷载的作用下,在炮孔壁上最大拉应力位置起裂。

4 结论

(1) 目前广泛应用于断裂力学中,对研究裂纹扩展机理规律

有很大帮助,并且对于测定应力强度因子以及相关的一些参数具有重要意义。

(2) 在研究切缝药包爆破机理时,焦散线实验方法提供了一种很好的观测手段,对于研究切缝药包参数对其爆破效果的影响以及爆生主裂纹的扩展规律具有很大的帮助。

(3) 利用焦散线实验方法研究切槽孔爆破裂纹扩展机理,从而得到比较确定合理的切槽宽度和角度,有利于提高切槽孔爆破的爆破效果。

[参考文献]

[1] Theocaris PS, Ioakimidis N I. The equations of caustics for crack and other dynamic plane elasticity problems [J]. Pergamon, 1979, 12(4): 37-42.

[2] JF KSWJ. B. Dynamic stress intensity factors for arresting cracks in DCB specimens [J]. International Journal of Fracture, 1976, 12(2): 687-701.

[3] 管大椿, 杨钟衡. 焦散线方法及其在测定应力强度因子上的应用 [J]. 北京工业大学学报, 1983, (03): 65-77.

[4] 吴向, 杨槐堂. 焦散线法在断裂力学中的应用(应力强度因子 K_{I1} 的测定) [J]. 固体力学学报, 1984, (02): 299-309.

[5] 苏先基, 雷志辉. 动态焦散线实验方法及其在断裂力学中的初步应用 [J]. 力学学报, 1987, (04): 357-365.

[6] 肖同社, 杨仁树, 边亚东, 等. 含节理岩体爆生裂纹扩展的动焦散模型实验研究 [J]. 实验力学, 2006, (04): 539-545.

[7] 李清, 梁媛, 任可可, 等. 聚能药卷的爆炸裂纹定向扩展过程试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(08): 1684-1689.

[8] 李清, 曹怀建, 杨鸣泽, 等. 含偏置裂纹材料断裂韧性的焦散线实验测试 [J]. 矿业科学学报, 2017, 2(03): 243-250.

[9] 肖同社, 杨仁树, 边亚东, 等. 含节理岩体爆生裂纹扩展的动焦散模型实验研究 [J]. 实验力学, 2006, (04): 539-545.