

文章编号:1006-9941(2022)12-1282-11

典型高聚物黏结炸药在不同温度下的脆韧转换机制

李丹^{1,2},陈杨¹,李克武³,赵锋³

(1. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010; 2. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621010; 3. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为研究典型高聚物黏结炸药(PBX)在温度影响下剪切带和脆韧转换行为的关系,结合DIC数字图像技术,测试PBX在323~363 K下的剪切带参数,对剪切带演变规律与破坏模式进行深入分析。基于裂纹滑移理论模型,分析温度效应下PBX的脆韧转换机制,得到翼裂纹失稳扩展和塑性滑移区的判定条件。结果表明:在323~363 K下,PBX的剪切带宽度变化取决于剪胀和剪缩的竞争机制,其主要机制有4类:Ⅰ:剪胀与剪缩达到平衡;Ⅱ:剪缩占优;Ⅲ:剪胀占优;Ⅳ:剪胀间歇性占优。结合Griffith能量释放原理,发现试件的剪切强度、粘聚力、断裂韧度是脆韧转换的控制因素,并以此为基础,进一步获得了PBX脆韧转换的判定依据:当满足翼裂纹失稳的条件时,宏观破坏模式趋于劈裂破坏;当满足塑性滑移区的临界生成条件时,多个滑移区相互连接形成塑性滑移面,宏观破坏模式以剪切裂纹滑移的韧性断裂为主导。

关键词: PBX炸药;DIC技术;温度;剪切带;脆韧转换

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2022118

0 引言

随着现代高性能武器装备的迅速发展,弹药的安全性能问题受到广泛关注。周围环境的温度、湿度、振动等因素都可能会影响高聚物粘结炸药的感度,从而影响其安全性^[1-5]。高聚物粘结炸药(Polymer Bonded Explosive,以下简称PBX)在机械荷载和温度的耦合作用下,制备过程中产生的微裂纹、微孔洞等内部缺陷可能会进一步扩展,形成宏观裂纹,其损伤演化过程直接影响材料的力学性能。因此相关学者围绕外界因素影响下PBX的力学性质劣化和损伤参量的关系展开了一系列研究,其科学问题是弹药安全性能研究的热点之一。

目前已有相关学者对高聚物粘结炸药的局部损伤

变化及内部破坏情况进行研究^[6-11]。许盼盼等^[12]采用断面扫描技术研究了PBX代用材料单轴压缩下的损伤演化行为,用CT图像灰度值定量表征了材料的损伤积累过程。周忠彬等^[13]、李明等^[14]利用数字图像技术分析PBX的应变场、位移矢量场及裂纹发展情况,以预估材料内部损伤变化。席鹏等^[15]发现PBX损伤后有应变软化现象,表现出聚合物的黏性特征。陈春燕等^[16]结合扫描电镜(SEM)技术分析不同特性PBX的损伤模式,发现断裂面同时出现穿晶断裂、固体颗粒脱粘和粘剂剂断裂三种破坏形式。Xian Wang等^[17]结合声发射(AE)和数字图像相关(DIC)方法衡量和评价单轴压缩载荷下聚合物粘结炸药(PBX)的损伤演化过程,提出了一个基于Dominant Localization Band(DLB)和实测损伤参数的简单力学模型。可见相关研究主要是通过观测技术对损伤演化的应变情况进行表征,分析其宏观上的破坏过程以及破坏模式,并未对温度影响下剪切带的演化规律、损伤机制以及破坏模式的判定依据进行深入研究,对PBX炸药计及温度效应的脆韧和破坏模式转换机制分析还有待加强。

此外,相关学者针对剪切带的演化及相应损伤行

收稿日期:2022-05-05;修回日期:2022-06-23

网络出版日期:2022-11-04

基金项目:国家自然科学基金面上项目(11572297);四川省应用基础研究计划项目(2018JY0514)

作者简介:李丹(1975-),男,博士,副教授,主要从事爆炸冲击与动力学研究。e-mail: danli@swust.edu.cn

通信联系人:李丹(1975-),男,博士,副教授,主要从事爆炸冲击与动力学研究。e-mail: danli@swust.edu.cn

引用本文:李丹,陈杨,李克武,等.典型高聚物黏结炸药在不同温度下的脆韧转换机制[J].含能材料,2022,30(12):1282-1292.

LI Dan, CHEN Yang, LI Ke-wu, et al. Brittle-Ductile Transition Mechanism of Typical Polymer Bonded Explosives (PBX) at Different Temperatures[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2022, 30(12):1282-1292.

为展开了系统研究。Liu等^[18]研究了PBX压缩实验的温度效应,发现温度与压缩载荷引起的横向拉伸和剪切是造成PBX宏观破坏的原因,剪切对材料破坏的影响随着温度升高而减小。Clancy等^[19]使用包含粘弹性和脆性断裂的本构方程研究了PBX9501的损伤和绝热剪切带演化等行为,但模拟结果与实测值存在差异。Liu等^[20]研究了在冲压载荷下聚合物粘结炸药的剪切带演化过程,发现隔离区边界存在剪应力集中区域,剪切带生成主要有三个阶段:①形成弧形剪切带;②形成剪切带分支;③形状由弧形变为直线形,最终破坏。以上研究表明试件在压缩荷载作用下主要为剪切破坏,与剪切带的形成有密切关系,但仅对已形成的剪切带形状进行了初步分析,未深入探究剪切带演变规律,缺乏对剪切带特征参数的变化规律与脆韧转换机制内在联系的深入分析,温度影响下炸药力学性能劣化的损伤演化主控机制有待进一步研究。

由于以HMX为基的典型高聚物粘结炸药PBX为粘弹性材料^[21],受温度影响,内部组织软化会弱化其宏观性能^[22],导致其损伤机制发生改变,为此,研究结合数字图像相关方法,对323~363 K的典型PBX在单轴压缩荷载下的损伤演化行为进行研究,探究其剪切带演变规律,对剪切带特征参数的变化规律与脆韧转换机制的内在联系进行深入分析。同时基于裂纹滑移模型和Griffith能量释放准则,计及温度效应,分析PBX脆韧转换机制和破坏模式。

1 实验部分

1.1 试样与仪器

本研究所用PBX由奥克托今(HMX)、粘结剂以及钝感剂等部分组成,其主要成分由表1所示,该材料由中国工程物理研究院化工材料研究所提供。为消除端部效应,保证整个试件出现较多的应力均匀状态,以及观测到试件的剪切带情况,参考炸药与准脆性材料压缩试验标准^[23-24]与长径比为1.0~3.3的对比实验,确定试件尺寸为 $\Phi 15\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的圆柱体试件,密度约为 $1.852\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,如图1a所示。

实验主要由加载系统、升温系统、图像采集系统3部分组成,实验装置如图1b~1c所示,其中准静态压缩实验主要使用了低温试验箱(EMC003A-2型号)、50kN微机控制电子万能试验机(EMT504D型号)、三脚架以及灰点相机。

表1 PBX的组成

Table 1 Composition of PBX

component	weight / %	volume / %
HMX	95	94.15
binder	4.3	4.64
desensitizer	0.7	1.21

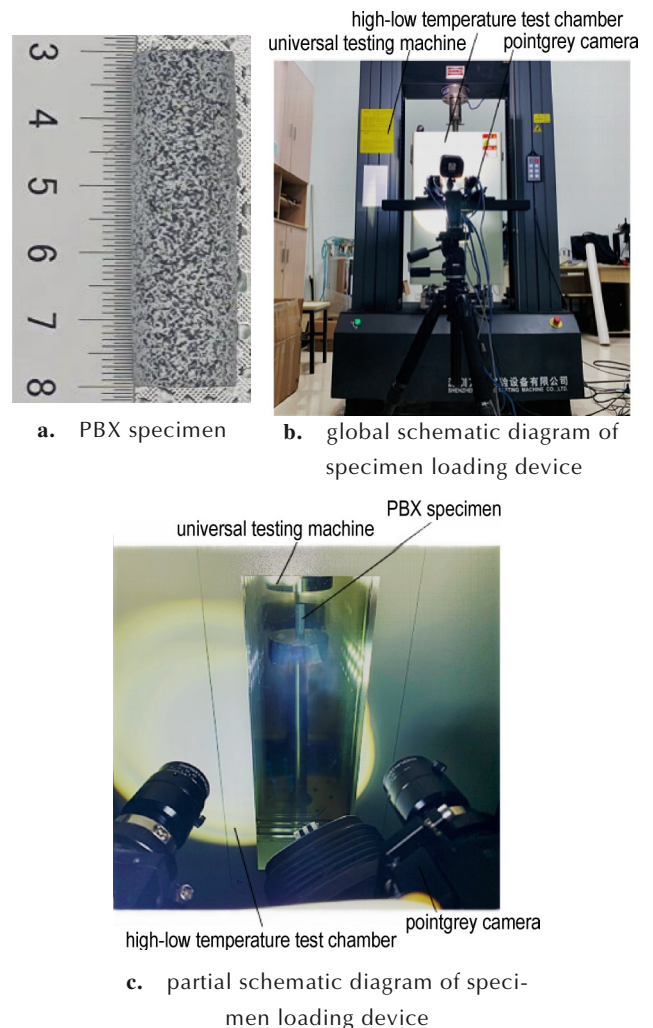


图1 PBX试件及准静态压缩试验的加载装置图

Fig. 1 Diagram of PBX specimen and loading device for quasi-static compression test

1.2 实验

研究采用军标单轴压缩试验方法(GJB 772A.41 6.1-1997)^[23]对323~363 K的PBX试件进行加载,并选取具有明显变化特征的5组温度进行分析,其工况以及样品参数如表2所示。为保证实验数据的精准度,采用游标卡尺对试件的上、中、下3部分进行测量。单轴压缩实验采用位移控制加载方式,加载速率为 $0.03\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,加载应变率均为 10^{-5} S^{-1} ,通过均匀涂抹凡士林进行端部抗摩擦处理。实验过程中灰点相机

表2 各实验工况以及对应的样品参数

Table 2 Various experimental conditions and corresponding parameters of samples

work condition	T / K	diameter / mm	height / mm	density / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	mass / g
1	323	14.92	50.12	1.852	16.23
2	336	14.92	50.10	1.852	16.23
3	348	14.93	50.14	1.839	16.15
4	356	14.92	50.10	1.849	16.20
5	363	14.92	50.12	1.849	16.21

Note: T is ambient temperature under loading.

采样频率为 2 s/帧,结合 DIC 技术,采用不同角度的两台灰点相机对加载过程中试件表面的损伤演化过程进行记录。

2 结果与讨论

结合各工况变形特征和宏观破坏模式,采用 DIC 技术记录试件局部特征变形的演化情况,基于剪切带演化规律及相关竞争机制的研究,剖析剪切带特征参数与脆韧转换机制的内在联系;结合裂纹滑移模型^[25]和 Griffith 能量释放准则^[26]分析脆韧转化机制和判定依据。

2.1 温度作用下单轴压缩试件的变形特征分析

为揭示温度作用下 PBX 的脆韧转化特性,结合典型工况应力-应变关系,针对不同温度点的局部应变演化与试件脆韧转换间的有机联系,分析了不同温度下 PBX 的变形特征。对 323~363 K 下的 PBX 进行了力学性能测试,得到其应力-应变关系,如图 2 所示。由图 2 可知,在温度效应作用下, PBX 有明显的软化现象,弹性模量、峰值应力显著降低。结合试件弹性模量、峰值应力等宏观力学参量的下降幅度,将其变形特征分为 3 个区间:应变硬化区域、应变硬化-热软化区域、热软化区域。

应变硬化区域(曲线 a):有明显的弹性阶段和较大的弹性模量,结合图 2 中曲线 a 的应变云图,其弹性阶段下大部分区域应变在 $4.6\times 10^{-3}\sim 6.0\times 10^{-3}$ 之间,局部存在应力集中现象。接近峰值应力时切线模量逐渐减小,表现为明显的脆性特征。

应变硬化-热软化区域(曲线 b):在此阶段,由于粘结剂刚度降低,材料发生一定程度软化,其应力极值和弹性模量大幅下降(39.4%以上),同一应力下,其应变值相较于曲线 a 更大。

热软化区域(曲线 c、d、e):升温至 348 K 及以上

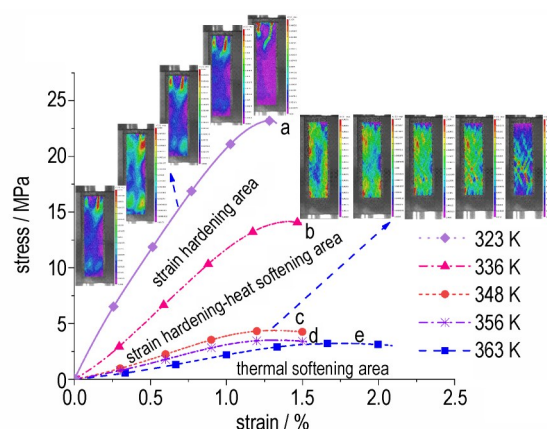


图2 不同温度下的试件应力-应变曲线关系

Fig.2 Stress-strain curves of specimens at different temperatures

时,粘结剂的储能模量降幅较大^[27],局部应力集中区域增多,主要集中在试件中间部位的宽窄条带状区域,最终形成应变集中的交叉带状,峰值应力趋于稳定。

通过对样品进行回收分析,选取试件变形损伤及裂纹演化富集区域,利用 CAD 对试件局部显著的破坏特征进行勾描,获得其裂纹发展情况如图 3 所示。在图 3 中,根据多条裂纹带及附属次级裂纹带的变形特

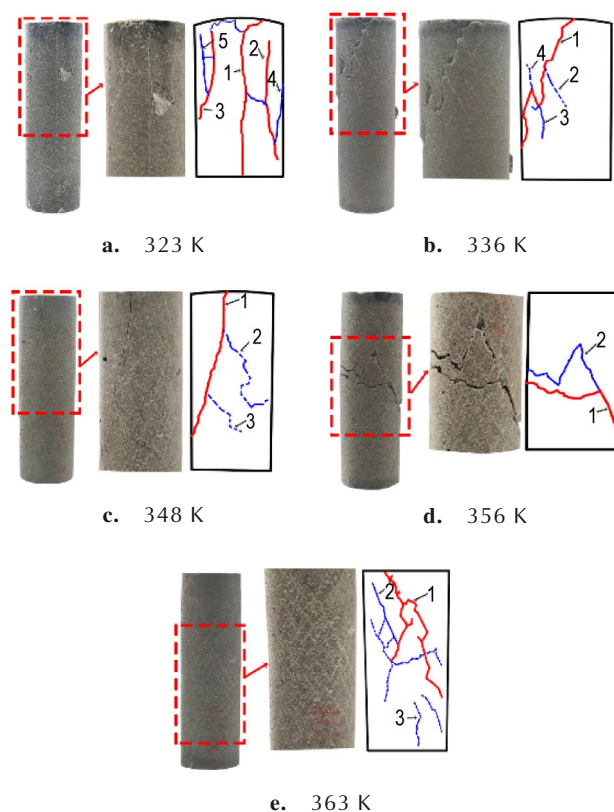


图3 不同温度下试件终态的裂纹扩展情况

Fig.3 Crack propagation in the final state of specimens at different temperatures

征进行编号,将长度最大值的主裂纹带编为1,其余裂纹依次进行编号。裂纹由试件上部向中部转移与发展,断裂模式主要分为轴向劈裂破坏、剪切破坏。

当温度为323 K时,试件表现出脆性特征,由于泊松效应^[28]和剪切作用等复合效应使得径向产生张拉应力,其值超过试件的抗拉极限,致使试件内部发生张拉断裂,最终形成沿轴向的劈裂破坏(见图3a)。

当温度处于336~348 K之间,材料软化导致剪切强度与粘聚力降低。在荷载及温度耦合作用下,试件内部出现软化点,当局部剪应力超过试件的剪切强度时就会发生剪切滑移。张拉裂纹与剪切滑移裂纹相互贯通、纵横交错形成宏观裂纹,导致材料的断裂韧度等力学性能迅速劣化,最终形成剪切破坏(如图3b、3c)。

升温至356 K或363 K时,由于材料发生软化,试件刚度显著降低,局部应力集中区域造成较为密集交叉剪切面,试件表面出现斜向交错泛白细纹,见图3d、3e。其中356 K下试件张拉裂纹与剪切破坏形成裂纹相互贯通的宏观裂纹(如图3d),363 K下试件出现多条裂纹带及附属的层状次级裂纹带的现象较为明显(如图3e)。

2.2 基于DIC技术的不同温度试件局部应变特征演化分析

通过试件的局部应变演化过程,探究其剪切带演变规律,进一步剖析剪切带特征参数的变化规律与脆韧转换机制的内在联系。选择图2中具有代表性局部特征的曲线b、d、e等3个温度,挑选了破坏点之前的5个特征点主应变云图以及剪应变云图,336~363 K下局部应变演化特征如图4所示。在图4中,试件两端虚线矩形框标示部分为考虑端部效应而忽略的区域,以避免对分析结果造成影响。

由于剪切带通常是材料内部具有高度剪切应变处在应力作用下材料局部产生应变软化形成的,剪切带的形成将引起材料发生失稳与破坏,因此需对试件局部的应变集中区域进行分析。结合图3的裂纹分布情况与图4主应变集中区域,其裂纹发展区域与主应变集中区域具有较好程度的重合,认为主应变主要在开裂处最大,可在一定程度上揭示裂纹的演化情况以及预估损伤变形的大致位置。对比图4中主应变云图和剪应变云图的局部应变集中带,发现两者代表的应变集中区域均由试件的上部向中部位置下移且范围逐渐增大。同一温度下的加载过程中,部分区域剪应变较小且不明显,但主应变却占优(如图4a1、图4b1),表明此时剪应变不是试件变形的主控因素,可能是由于

试件压缩或膨胀造成的。由于温度升高,材料内部软化引起的抗剪能力逐渐下降,剪应变对变形的影响逐渐增加(见图4b、图4f)。

当升温至336 K时,高温软化使PBX的剪切强度和粘聚力降低,当局部应力超过临界切应力时会引发明显的局部剪切滑移,会沿着最大剪切力方向发展形成优势发展方向的平行剪切带(图4b5),升温至356 K及以上时,由于温度和变形作用引起的初始损伤以及新损伤的萌生,致使颗粒间发生滑移最终形成交叉剪切带(图4d5、图4f5)。关于局部剪切带宽度的演变规律将在本节末进行分析。

在塑性变形过程中,剪切带内材料体积改变会引起不均匀的体积应变分布,为更好地分析局部剪切带的演变特征,需要对试件有无剪切带的形成进行预判。其中以具有典型应变集中带的336 K为例,结合336 K的应变云图,选取了试件中间位置失效区内4种代表性点 P_0 、 P_1 、 P_2 、 P_3 ,其中 P_0 为相邻两个方向剪切带的交点, P_1 、 P_2 为交叉剪切带上的点, P_3 为相邻剪切带围成的平行四边形区域内的点,如图5所示。通过对以上4个点进行平均值计算,拟合得到平均体积应变曲线,作体积应变值为零的水平线与拟合曲线曲率最大点处的切线交于一点,再作此点的垂直线交于体积应变曲线,即得到平均体积应变曲线的拐点,将体积应变曲线的拐点对应的主应变作为剪切带形成的临界应变值^[29]。由图5可知,336 K下体积应变在1000 s附近发生改变则代表有剪切带形成。按照上述依据,323 K无剪切带形成,为应力集中带;336~363 K出现剪切带的主应变临界值分别为0.99%、0.72%、1.00%、1.21%,有剪切带形成。

为深入研究温度效应对PBX的脆韧转换机制的影响,获取应力集中带与剪切带密度、宽度以及倾角等参数,对各温度下应力集中带与剪切带参数的变化情况进行分析,将应力集中区域进行勾描,其中剪切带密度为测试面内剪切带面积与测试面的面积比值,剪切带倾角为剪切带与水平方向的夹角。在剪切带两侧布置测线后利用粒径分析软件对其宽度进行测量,为保证剪切带宽度值的精准度,剪切带宽度按如下方式测量:在剪切带上分别选取3、5、7、10、15个测量点进行平均值比较,采用回归分析,以15个点的平均值作为剪切带的宽度,其测量误差控制在10%左右,应力集中带参数的获取方法与剪切带测量方法相同,得到323 K破坏点云图应力集中带密度为53.37%,宽度为1.77 mm,倾角范围为71°~86°;剪切带的相关参数如

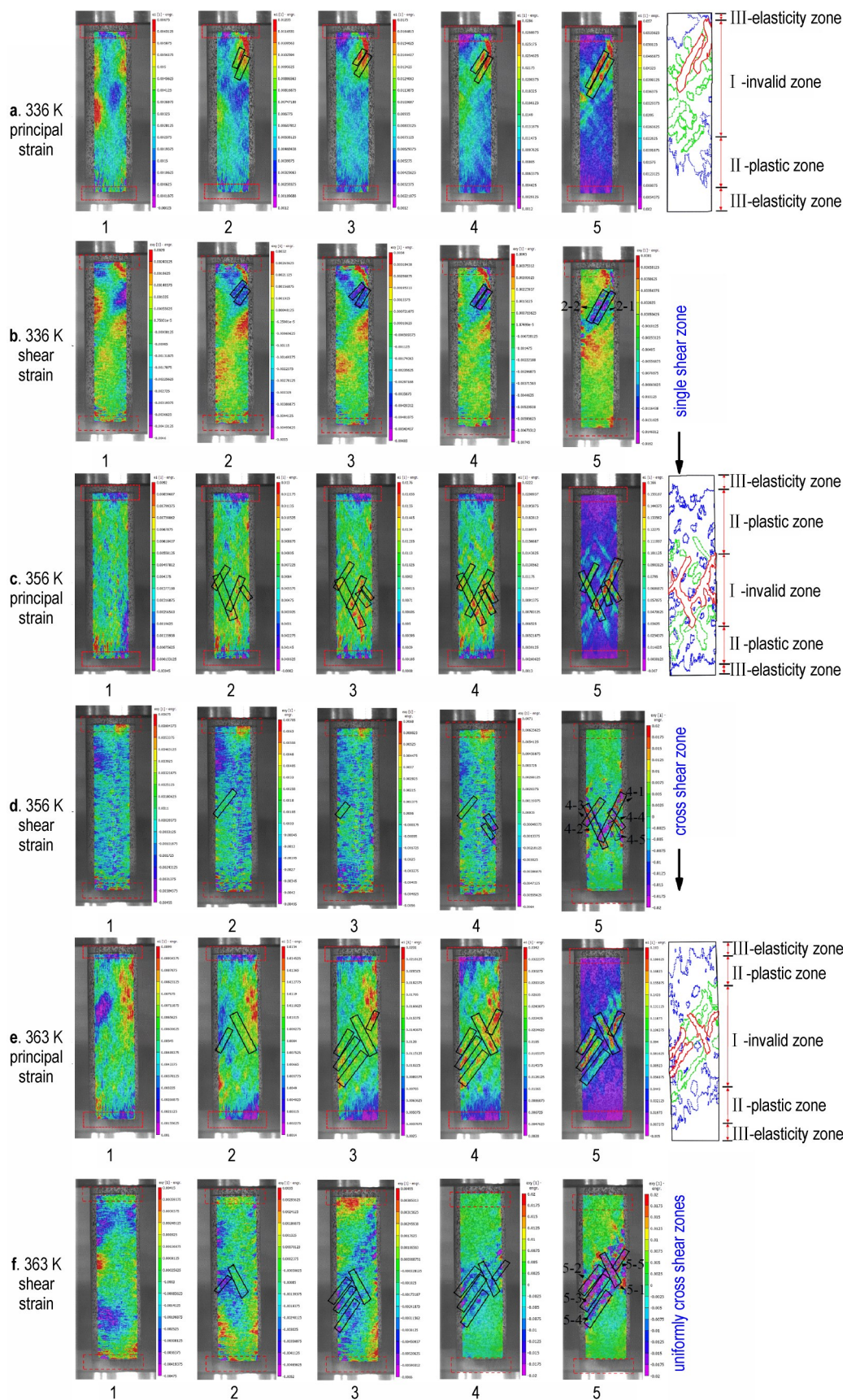


图4 各温度下试件局部应变演变规律

Fig.4 The evolution law of the local strain of the specimen at different temperatures

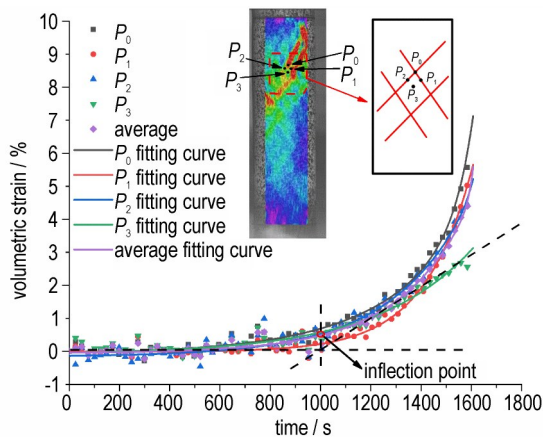


图 5 336 K 试件体积应变随时间的演变

Fig. 5 Evolution of volumetric strain of 336 K specimen with time

表 3 所示。

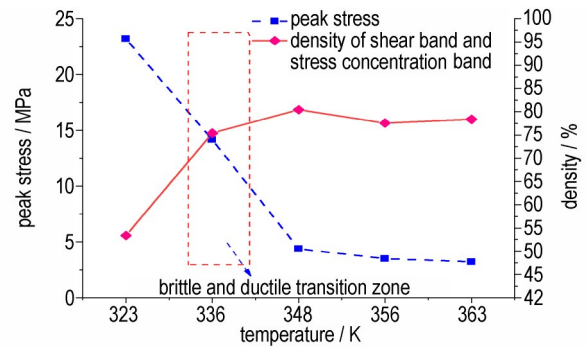
根据表 3 中 PBX 的剪切带参数以及应力集中带参数情况,得到应力集中带及剪切带随温度变化的趋势如图 6 所示。由图 6 可知,随着温度升高,试件峰值应力变化与应力集中带分布程度发展趋势相反,在发展历程中必然会有交点,可认为该温度下 PBX 发生了一定程度的脆韧转换;当升温至 336 K 以上,由于材料热塑性变形导致局部强度及粘聚力等力学性能下降,试件表面出现滑移带,其剪切带密度趋势呈先增再维持相对稳定且最大值为 80.42%,说明 348 K 后,温度对材料的影响减小,且剪切带倾角范围呈现逐渐稳定现象。在力和温度的耦合作用下,粘结剂强度降低, PBX 这种高颗粒填充度的复合材料界面效应明显,多个交叉剪切带呈现较为均匀的局部应变梯度,使剪切带的平均宽度减小且最终维持在 1.20 mm 左右。脆韧转化机制的理论分析将在第 2.3 节进行分析。

由于颗粒材料受到剪切作用以及温度等组合效应,试件的体积发生改变,出现剪胀和剪缩现象。目前研究表明,剪胀会引起剪切带宽度的增加^[30],其机

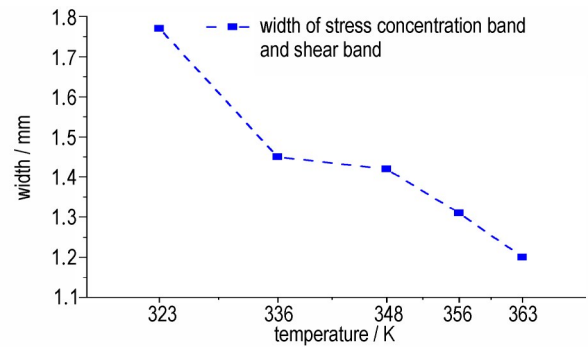
表 3 不同温度下的破坏点剪切带演化情况

Table 3 Evolution of shear zone at failure point at different temperatures

T / K	density of shear band / %	width of shear band / mm	angle range of shear band / (°)
336	75.42	1.45	55-78
348	80.42	1.42	61-66
356	77.56	1.31	62-64
363	78.35	1.20	55-61



a. peak stress and density of shear band and stress concentration band



b. width of stress concentration band and shear band

图 6 应力集中带与剪切带参数随温度的变化规律

Fig. 6 Variation of parameters of stress concentration band and shear band with temperature

理包括:裂隙的扩张效应超过闭合效应;在应力作用下颗粒间相互位置发生改变,增加了颗粒间的空隙^[31-33]。因此,为阐述其剪胀或剪缩效应,结合图 4 中已标明编号的局部明显剪切带,测量轴向加载过程中剪切带的宽度,得到其宽度随 ϵ_{yy} 的演变规律,如图 7 所示。据剪切带宽度在轴向应变 0.8~2.0% 的演变情况,将加载过程中其变化的临界值定为 0.2 mm,按照某一区域连线的阶段性变化划分,对于始终在 0.2 mm 以内变化的判定为基本不变关系,而发生在 0.2 mm 以外且总体趋势呈下降、上升或同时有升有降的可分别判定为下降、上升、不确定关系。由图 7 可以看出,剪切带宽度与轴向应变 ϵ_{yy} 关系分为 4 类:第 I 类为剪切带宽度基本保持恒定(图 7a),此时剪胀与剪缩达到平衡;第 II 类为剪切带宽度与轴向应变呈负相关关系(图 7b),是由剪缩引起颗粒间空隙减小导致的;第 III 类为剪切带宽度与轴向应变呈正相关关系(图 7c),是由剪胀引起颗粒间空隙增大造成的;第 IV 类剪切带宽度与轴向应变无明显关系(图 7d),是由剪胀间接性占优引起的。综上所述:在 336~363 K

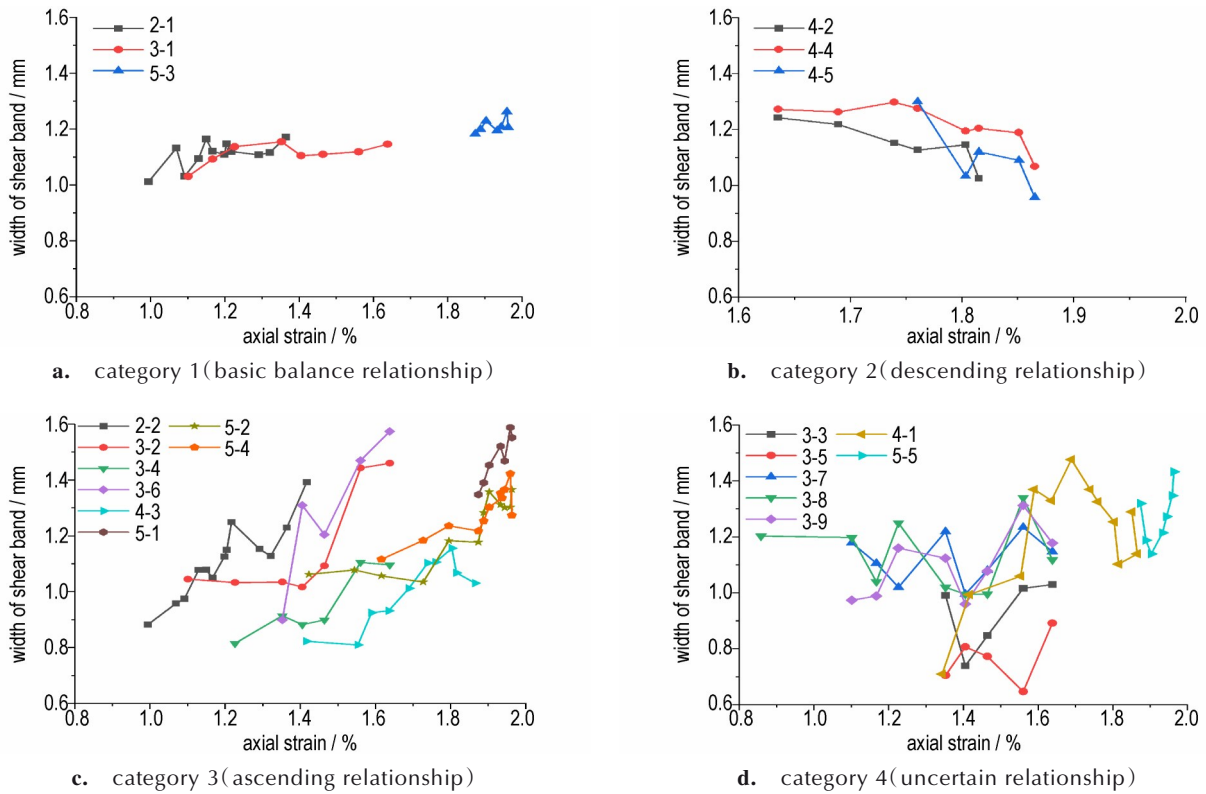


图7 剪切带宽度与轴向应变的关系(图例中第一个数值为根据工况表2中温度值所对应的工况编号,第二个数值为剪切带的编号)
 Fig.7 Relationship between width of shear band and axial strain(The first number is the working condition number corresponding to the value of temperature in working condition shown in Table 2, The second number is the number of the shear band)

下,剪切带宽度变化取决于剪胀和剪缩的竞争机制。

2.3 PBX脆韧转换机制分析

通过以上研究发现,脆韧转换机制在较大程度上取决于外部因素(如温度)和内部因素(如微观结构、剪切带竞争机制),与剪切强度、粘聚力等物理参数息息相关。本研究尝试利用剪切滑移模型^[25]和Griffith能量释放原理^[26],获取PBX脆韧转换的判定依据,定量确定剪切强度、粘聚力、断裂韧度等物理参数与脆韧转换机制之间的损伤准则。

材料内部存在的微裂纹在外载荷的作用将同时具有形成翼裂纹与形成塑性滑移区的2种趋势。当首先满足翼裂纹失稳的条件时,试样将沿轴向劈裂破坏;如果生成的塑性滑移区之间首先连接形成宏观滑移带,试样将沿塑性滑移区发生剪切滑移错动。当试件达到峰值应力时,在试件中将存在如图8所示的裂纹,其中 c 为裂纹半径, γ 为微裂纹面与试样轴向的夹角。外载荷作用在裂纹面上的正应力 $\sigma_s = \sigma_1(\cos 2\gamma - 1)/2$,剪切应力 $\tau_s = \sigma_1(\sin 2\gamma)/2$ 。基于摩尔-库伦准则,沿裂纹面的剪切应力为 $\tau = \tau_s - (\mu\sigma_s + \tau_c)$ 。其中, τ_c 和 μ 分别为PBX的粘聚力和内摩擦系数。

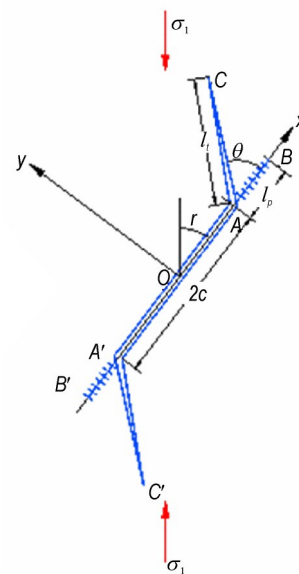


图8 滑移裂纹模型
 Fig.8 Slip crack model

2.3.1 脆韧转换相关参数获取

该裂纹在轴向载荷 σ_1 下,既存在沿轴向生成翼裂纹(图8中AC和A'C')的可能,也存在沿裂纹面产生塑性滑移(图8中AB和A'B')的可能。若不考虑裂纹

扩展速度对应力强度因子的影响,则以 Griffith 能量释放率的临界条件作为判据,轴向载荷 σ_1 与劈裂翼裂纹长度 l_i 有式(1)^[25]所示关系:

$$\sigma_1 = \frac{2\tau_c \sin \theta + K_{IC} \sqrt{\frac{\pi}{c} \sqrt{\frac{l_i}{c} + \frac{l_i'}{c}}}}{a \sin \theta + \pi \sin^2(\theta - \gamma) \sqrt{\frac{l_i}{c} \sqrt{\frac{l_i}{c} + \frac{l_i'}{c}}}} \quad (1)$$

其中, $a = \sin 2\gamma - \mu(1 - \cos 2\gamma)$; $l_i' = 0.27c$ mm 为裂纹长度; τ_c 为粘聚力, MPa; K_{IC} 为断裂韧度, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; γ 为微裂纹面与试样轴向的夹角, ($^\circ$); c 为裂纹半径, mm。结合图 8 和式(1), $l_i = 0$ 时对应的轴向载荷即为开裂载荷阈值 σ_i 。轴向载荷 σ_1 超过 σ_i 后, 劈裂裂纹开始进入失稳扩展状态, 轴向劈裂的破坏模式初步形成。

同时, 轴向载荷 σ_1 与塑性滑移区长度 l_p 有式(2)^[25]所示关系:

$$\sigma_1 = \frac{2\pi + 4\left(\frac{\tau_c}{\tau_y} - 1\right)\eta}{2\mu(1 - \cos 2\gamma)\eta + \pi \sin 2\gamma} \tau_y, \quad \eta = \sin^{-1}\left(\frac{1}{1 + \frac{l_p}{c}}\right) \quad (2)$$

式中, τ_y 为屈服强度, MPa; η 为简化公式的替代参数。多个初始裂纹间的塑性滑移区相互连接后即形成了贯通试样的塑性滑移面, 试样呈现塑性滑移破坏模式。当翼裂纹起裂时, 其裂尖处的应力强度因子为:

$$K_I = \frac{3}{4} \tau \sqrt{\pi c} \left(\sin \frac{1}{2} \theta + \sin \frac{3}{2} \theta \right) \quad (3)$$

当 $\theta = 70.6^\circ$ 时, K_I 取到最大值。而当 $\gamma = 55.3^\circ$ 时, 微裂纹面上的剪切应力 $\tau = \tau_s - (\mu\sigma_s + \tau_c)$ 在轴向载荷 σ_1 一定的情况下取最大值。综上所述, $\theta = 70.6^\circ$ 且 $\gamma = 55.3^\circ$ 时, 翼裂纹最易起裂。裂纹半径 c 与粒径 d 之间满足 $0.2d < 2c < d$, 且平均裂纹间距约为 2 倍颗粒直径。基于作者前期工作, 测得内摩擦系数 $\mu = 0.377$, 并结合 PBX 粒度分析的结果, 颗粒最大直径为 0.148 mm, 取 $2c = d$, 即 c 为 0.074 mm。同时, 当塑性滑移区长度 $l_p = 2d = 4c$ 时, 即可认为塑性滑移面贯穿试样, 试样进入应变软化。

2.3.2 脆韧转换临界条件分析

将临界条件 $l_i = 0$ mm, $c = 0.074$ mm, $l_p = 4c = 0.296$ mm, $\theta = 70.6^\circ$, $\gamma = 55.3^\circ$ 代入式(1)和式(2), 简化得到:

$$\sigma_1 = 4.69\tau_c + 8.42K_{IC} \quad (4)$$

$$\sigma_1 = 1.74\tau_y + 0.26\tau_c \quad (5)$$

联立式(4)和(5), 推导试件脆韧模式转换临界条件如式(6)所示:

$$\bar{\tau}_y = 2.55\bar{\tau}_c + 4.83\bar{K}_{IC} \quad (6)$$

其中 $\bar{\tau}_y = \tau_y/\tau_0$, $\bar{\tau}_c = \tau_c/\tau_0$, $\bar{K}_{IC} = K_{IC}/K_0$, $\tau_0 = 1$ MPa, $K_0 = 1$ $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。当 $\bar{\tau}_y < 2.55\bar{\tau}_c + 4.83\bar{K}_{IC}$ 时, 塑性滑移区将首先贯穿了试样, 破坏以剪切裂纹滑移的韧性断裂为主导; 而当 $\bar{\tau}_y \geq 2.55\bar{\tau}_c + 4.83\bar{K}_{IC}$ 时, 轴向劈裂将首先发生, 材料为脆性破坏。据式(6), PBX 破坏机制发生转变是由于 τ_y , τ_c 和 K_{IC} 呈现温度敏感性。粘聚力 τ_c 与裂纹起裂应力 σ_c 成线性关系, 因此可用形如 $y = x(1 - b \cdot T)$ 形式的方程描述温度对粘聚力的影响, 即 $\tau_c = \tau_{c0}[1 - c_1(T - 298)]$, 其中 c_1 为材料的模型参数, 基于本文作者前期工作, 测得 $\tau_{c0} = 1.73$ MPa, 经拟合得 $c_1 = 4.88 \times 10^{-3}$ 。

K_{IC} 计算公式拟合及有效性验证: 根据实验结果, 当 $T = 323$ K 时, 试件为轴向劈裂破坏, 起裂应力阈值为 23.19 MPa, 由式(1)推出, K_{IC} 为 0.191 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; 当 $T = 336$ K 时, 试件出现剪切滑移破坏, 起裂应力阈值为 14.15 MPa, 由式(2)推出, K_{IC} 为 0.174 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。温茂萍等^[34]研究了 PBX 炸药的断裂韧度随温度的变化规律, 对其结果进行线性拟合, 如图 9 所示。根据图 9 中的 K_{IC} 拟合公式, 当 $T = 323$ K 时, $K_{IC} = 0.185$ $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; 当 $T = 336$ K 时, $K_{IC} = 0.162$ $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 与实验推测结果基本吻合验证了 K_{IC} 拟合公式的可靠度, 得出各温度下无量纲化断裂韧度, 如表 4 所示。为了对比实验结果和脆韧转换理论判据的吻合度, 将本实验测得的结果列于表 4。

当 $\bar{\tau}_y \geq 2.55\bar{\tau}_c + 4.83\bar{K}_{IC}$, 材料为轴向劈裂破坏, $\bar{\tau}_y < 2.55\bar{\tau}_c + 4.83\bar{K}_{IC}$, 由轴向劈裂变为塑性滑移, 并产生剪切带。由表 4 的结果对比分析可知, $T = 323$ K 时, 试件为脆性破坏, 当 T 在 336 K 到 363 K 之间, 试件

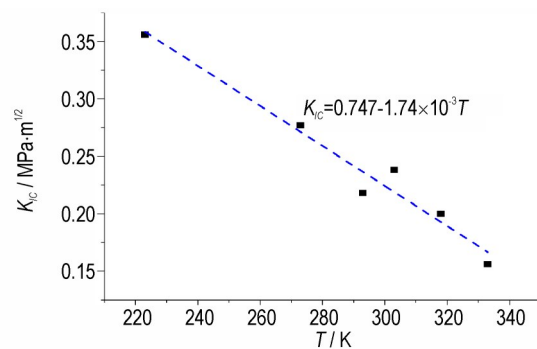


图 9 PBX 炸药断裂韧度与温度的关系

Fig.9 Relationship between fracture toughness and temperature of PBX explosive

表4 屈服强度比较表

Table 4 Comparison of yield strengths

T / K	\bar{K}_{IC}	$\bar{\tau}_c$	$2.55\bar{\tau}_c + 4.83\bar{K}_{IC}$	$\bar{\tau}_y$
323	0.185	1.52	4.77	6.97
336	0.162	1.41	4.38	4.24
348	0.141	1.31	4.02	3.82
356	0.128	1.24	3.78	3.41
363	0.115	1.18	3.57	3.22

处于韧性滑移破坏,这与图3中试件的破坏最终形态以及图4中DIC的测量结果一致,温度达到336 K时,PBX体积应变相较于323 K会发生突变,因此可判断(336±5) K是PBX脆韧转换的临界温度。

3 结论

为研究温度效应对PBX的脆韧转换机制影响,对323~363 K的PBX进行单轴压缩实验,得到以下结论:

(1)在323~363 K的单轴压缩实验中,随着温度升高,PBX的力学性能发生显著改变,按照温度将其分为三种效应区间(应变硬化区、应变硬化-热软化区、热软化区),试件由脆性破坏转为韧性破坏,其主导试件变形的控制机制由应变硬化机制逐渐转换为热软化机制。

(2)剪切带的发展过程为:首先出现优势发展方向的平行剪切带,随后出现不同密度的多种交叉剪切带,其最大密度为80.42%,最终维持相对稳定。在336~363 K时,PBX的剪切带宽度变化取决于剪胀和剪缩的竞争机制,其主要机制为I剪胀剪缩平衡;II剪缩占优;III剪胀占优;IV剪胀间歇性占优。

(3)基于剪切滑移模型与Griffith能量释放率准则,发现试件的剪切强度、粘聚力、断裂韧度是影响脆韧转换机制的控制因素,获得PBX脆韧转化的判定依据为 $\bar{\tau}_y = 2.55\bar{\tau}_c + 4.83\bar{K}_{IC}$ 。当 $\bar{\tau}_y < 2.55\bar{\tau}_c + 4.83\bar{K}_{IC}$ 时,满足塑性滑移区的临界生成条件,宏观破坏模式以剪切裂纹滑移的韧性断裂为主导;当 $\bar{\tau}_y \geq 2.55\bar{\tau}_c + 4.83\bar{K}_{IC}$ 时,满足翼裂纹失稳的条件,宏观破坏模式趋于劈裂破坏。

参考文献:

- [1] 郭亚南,王玉玲.表面吸附对JO-9159炸药感度影响的分子动力学模拟[J].火工品,2016(3):43-47.
GUO Ya-nan, WANG Yu-ling. Effects of surface adsorption on sensitivity of JO-9159 by molecular dynamics simulation [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2016(3): 43-47.
- [2] 陈鹏万,丁雁生,陈力.含能材料装药的损伤及力学性能研究进展[J].力学进展,2002,32(2):212-222.
CHEN Peng-wan, DING Yan-sheng, CHEN Li. Progress in the study of damage and mechanical properties of energetic materials [J]. *Advances in Mechanics*, 2002, 32(2): 212-222.
- [3] 张伟斌,李敬明,杨雪海,等. TATB颗粒温压成形PBX的初始细观损伤[J].含能材料,2015,23(2):202-204.
ZHANG Wei-bin, LI Jing-ming, YANG Xue-hai, et al. Initial mesoscopic damage of TATB based PBX pressed by warm compaction [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(2): 202-204.
- [4] 梁华琼,雍炼,唐常良,等. RDX为基的PBX炸药压制过程损伤形成研究[J].含能材料,2009,17(6):713-716.
LIANG Hua-qiong, YONG Lian, TANG Chang-liang, et al. Pressing damage of RDX-based polymer bonded explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(6): 713-716.
- [5] 刘佳辉,刘世俊,黄明,等.压制PBX中炸药晶体损伤的研究进展[J].含能材料,2013,21(3):372-378.
LIU Jia-hui, LIU Shi-jun, HUANG Ming, et al. Progress on crystal damage in pressed polymer bonded explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(3): 372-378.
- [6] TOURNE M. Developments in explosives characterization and detection [J]. *Journal of Forensic Research*, 2013, S12: 1-10.
- [7] 唐明峰,庞海燕,蓝林钢,等. RDX基PBX的本构行为与应变历史、应变率效应[J].含能材料,2016,24(9):832-837.
TANG Ming-feng, PANG Hai-yan, LAN Lin-gang, et al. Constitutive behavior of RDX-based PBX with loading-history and loading-rate effects [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(9): 832-837.
- [8] 李俊玲. PBX炸药装药的力学性能及损伤破坏研究[D].长沙:国防科学技术大学,2012.
LI Jun-ling. Study on PBX's mechanical behavior and damage feature [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [9] 郑雪,王娟,于劭钧,等. PBX细观损伤及其与安全性能的关系研究[J].材料保护,2014,47(s1):166-171.
ZHENG Xue, WANG Juan, YU Shao-jun, et al. Micro-damage in PBX and its influence on sensitivity [J]. *Materials Protection*, 2014, 47(s1): 166-171.
- [10] 李尚昆,黄西成,王鹏飞.高聚物黏结炸药的力学性能研究进展[J].火炸药学报,2016,39(4):1-11.
LI Shang-kun, HUANG Xi-cheng, WANG Peng-fei. Recent advances in the investigation on mechanical properties of PBX [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2016, 39(4): 1-11.
- [11] 郭虎,罗景润,谢朝阳. PBX细观损伤特征及表征方法研究综述[J].兵器装备工程学报,2012,33(1):125-129.
GUO Hu, LUO Jing-run, XIE Chao-yang. A review of research on mesoscopic damage characteristics and characterization methods of PBX [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2012, 33(1): 125-129.
- [12] 许盼盼,陈华,解社娟,等. PBX代用材料损伤演化原位CT研究[J].含能材料,2018,26(10):888-895.
XU Pan-pan, CHEN Hua, XIE She-juan, et al. Damage evolution behavior of PBX substitute material using in-situ CT [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(10): 888-895.

- 2018, 26(10): 888-895.
- [13] 周忠彬, 陈鹏万, 丁雁生. PBX代用材料非线性粘弹性本构模型研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(6): 276-281.
ZHOU Zhong-bin, CHEN Peng-wan, DING Yan-sheng. Study on nonlinear viscoelastic constitutive model of polymer-bonded explosive mock materials[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(6): 276-281.
- [14] 李明, 张珏, 李敬明, 等. 高聚物粘结炸药压缩破坏的细观力学实验研究[J]. 含能材料, 2005, 13(2): 79-83.
LI Ming, ZHANG Jue, LI Jing-ming, et al. Experimental investigation to the damage localization of PBX mechanical failure at mesoscale[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(2): 79-83.
- [15] 席鹏, 孙培培, 郑亚峰, 等. 典型浇注PBX炸药的准静态压缩力学行为[J]. 爆破器材, 2021, 50(2): 41-44+49.
XI Peng, SUN Pei-pei, ZHENG Ya-feng, et al. Mechanical behaviors of typical casting-PBX explosives under quasi-static compression [J]. *Explosive Materials*, 2021, 50(2): 41-44+49.
- [16] 陈春燕, 南海, 李昆, 等. 动态加载下不同特性浇注聚合物粘结炸药的力学响应研究[J]. 化工新型材料, 2021, 49(7): 162-166.
CHEN Chun-yan, NAN Hai, LI Kun, et al. Mechanical behaviors of different property PBX by dynamic loading [J]. *New Chemical Materials*, 2021, 49(7): 162-166.
- [17] Wang X, Ma S, Zhao Y, et al. Observation of damage evolution in polymer bonded explosives using acoustic emission and digital image correlation [J]. *Polymer testing*, 2011, 30(8): 861-866.
- [18] LIU Z W, XIE H M, LI K X, et al. Fracture behavior of PBX simulation subject to combined thermal and mechanical loads [J]. *Polymer Testing*, 2009, 28(6): 627-635.
- [19] Clancy S P, Johnson J N, Burkett M W. Modeling the viscoelastic and brittle fracture response of a high explosive in an Eulerian hydrocode [R]. Los Alamos National Lab. (LANL), Los Alamos, NM (United States), 1998.
- [20] LIU Z W, ZHANG H Y, XIE H M, et al. Shear band evolution in polymer bonded explosives subjected to punch loading [J]. *Strain*, 2016, 52(6): 459-466.
- [21] 张延耿, 楼建锋, 洪滔. PBX炸药粘弹性统计微裂纹本构模型的改进[J]. 高压物理学报, 2015, 29(1): 9-14.
ZHANG Yan-Geng, LOU Jian-Feng, HONG Tao. Modification of visco statistical crack mechanics for PBXs [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2015, 29(1): 9-14.
- [22] 王玉玲, 郭亚南. 表面吸附对JO-9159炸药力学性能影响的分子动力学模拟[J]. 火炸药学报, 2016, 39(2): 80-85.
GUO Ya-nan, WANG Yu-ling. Effects of surface adsorption on mechanical properties of JO-9159 explosive by molecular dynamics simulation [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellant*, 2016, 39(-2): 80-85.
- [23] GJB772A-97: 中华人民共和国军用标准: 炸药试验方法[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1997.
GJB772A-97, Military standard of People's Republic of China: Explosive test method [S]. Beijing: Commission of Science, Technology and Industry for National Defense of the PRC, 1997.
- [24] 中华人民共和国行业标准编写组. DZ/T 0276.18-2015: 岩石物理力学性质试验规程 第18部分: 岩石单轴抗压强度试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
Industry Standard Compilation Group of People's Republic of China. DZ/T 0276.18-2015: Regulation for testing the physical and mechanical properties of rock-Part 18: Test for determining the uniaxial compressive strength of rock [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [25] HORII H, NEMAT-NASSER S. Brittle failure in compression: splitting, faulting and brittle-ductile transition [J]. *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 1986, 319(1549): 337-374.
- [26] GRIFFITH A A. The phenomena of rupture and flow in solids [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1921, 221(2): 163-198.
- [27] 林聪妹, 刘世俊, 张娟, 等. 粘结剂增强对TATB基PBX力学性能的影响[J]. 广州化工, 2012, 40(14): 77-79+109.
LIN Cong-mei, LIU Shi-jun, ZHANG Juan, et al. Influences of binder enhancement technology on mechanical properties of TATB-based polymer bonded explosives [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2012, 40(14): 77-79+109.
- [28] 梅年峰. 循环动荷载作用下脆性岩石疲劳损伤力学特性研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
MEI Nian-feng. Research on fatigue damage and mechanical characteristics of brittle rock under cycle dynamic loading [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014.
- [29] 曾亚武, 黎玲, 熊俊, 等. 基于塑性体积应变的梯度塑性理论研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(8): 7-11, 51.
ZENG Ya-wu, LI Ling, XIONG Jun, et al. Gradient plasticity theory based on plastic bulk strain [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2012, 29(8): 7-11, 51. (in Chinese)
- [30] WANG X B, TANG J P, ZHANG Z H, et al. Analysis of size effect, shear deformation and dilation in direct shear test based on gradient-dependent plasticity [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 37(7): 1096-1099.
- [31] 王学滨, 杜亚志, 潘一山. 单轴压缩湿砂样局部及整体体积应变的数字图像相关方法观测[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1648-1656.
WANG Xue-bin, DU Ya-zhi, PAN Yi-shan. Measurements of local and global volumetric strains for wet sand specimens under uniaxial compression using digital image correlation method [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(9): 1648-1656.
- [32] CHERRY J T, SCHOCK R N, SWEET J. A theoretical model of the dilatant behavior of brittle rock [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1975, 113(1): 183-196.
- [33] GERBAULT M, POLIAKOV A, DAIGNIERES M. Prediction of faulting from the theories of elasticity and plasticity: what are the limits? [J]. *Journal of Structural Geology*, 1998, 20(2-3): 301-320.
- [34] 温茂萍, 庞海燕, 田勇, 等. PBX平面应变断裂韧度随温度的变化规律[J]. 火炸药学报, 2005, 28(3): 63-65.
WEN Mao-ping, PANG Hai-yan, TIAN Yong, et al. Regulations of plane strain fracture toughness of PBX changed with temperatures [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2005, 28(3): 63-65.

Brittle-Ductile Transition Mechanism of Typical Polymer Bonded Explosives(PBX) at Different Temperatures

LI Dan^{1,2}, CHEN Yang¹, LI Ke-wu³, ZHAO Feng³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang 621010, China; 3. National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: To study the relationship between shear band and brittle-ductile transition behavior of typical polymer bonded explosives(PBX) under the influence of temperature, the mechanical response of PBX at 323–363 K was tested by using DIC digital image technology, in-depth analysis of shear band evolution law and failure mode. At the same time, the brittle-ductile transition mechanism of PBX under temperature effect was analyzed based on the theoretical model of crack slip. And the critical conditions of wing crack development and plastic slip area were obtained by considering the effect of temperature. The results showed that at 323–363 K, the variation of the shear band width of the PBX depended on the competition mechanism of dilation and shrinkage. There are four main mechanisms: I . Dilatation and shrinkage reach equilibrium; II . Shrinkage is dominant; III . Dilatation is the main controlling factor; IV . Dilatation dominates intermittently. Combined with the principle of Griffith energy release, it is found that the shear strength, cohesion and fracture toughness of the specimen are the key controlling factors of the brittle-ductile transition. Under the condition, the judging basis of PBX brittle-ductile transition was obtained. When the condition of wing crack instability was met, the macroscopic failure mode tends to split failure; and when the critical condition of the plastic slip area was achieved, the multiple slip zones are connected to each other to form a plastic slip surface, and the macroscopic failure mode was dominated by the ductile fracture of shear crack slip.

Key words: PBX explosive; DIC technology; temperature; shear band; brittle-ductile transition

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2022118

Grant support: General Program of National Natural Science Foundation of China (No.11572297), Sichuan Province Applied Basic Research Program (No.2018JY0514)

(责编:姜梅)