材料与成形性能

# 2024-T3 铝合金的动态断裂韧性

王思军[1]，李宁[1]，郗学奎[2]

（1.华中科技大学 材料科学与工程学院，武汉 430074；2.中国科学院物理研究所，北京 100190）

**摘要：目的** 实现 2024-T3 铝合金动态断裂韧性的测量，揭示加载速率对动态断裂韧性的影响机理。**方法** 采用屏蔽措施避免电磁干扰，测量 2024-T3 铝合金在不同加载速率下的动态断裂韧性，采用扫描电子显微镜(SEM)观察断口形貌，理论分析加载速率对动态断裂韧性的影响机理。**结果** 当加载速率小于 103 MPa·$m^{1/2}$·$s^{-1}$ 时，2024-T3 铝合金的动态断裂韧性约为 35 MPa·$m^{1/2}$；当加载速率高于 105 MPa·$m^{1/2}$·$s^{-1}$ 时，动态断裂韧性超过 40 MPa·$m^{1/2}$，且随加载速率的增加而不断增大至 101 MPa·$m^{1/2}$。断口分析表明，加载速率较低时，断口形貌为微孔聚集型；当加载速率超过 105 MPa·$m^{1/2}$·$s^{-1}$ 时，断口特征由延性韧窝向准解理形态转变。理论分析表明，上述现象主要是由于裂纹尖端的无位错区域尺寸随加载速率的增大而减小，位错对裂纹尖端应力场的屏蔽效应增大，从而导致裂纹起裂后迅速由韧窝状态向准解理状态转变。**结论** 电磁屏蔽后的电阻应变片法，能够准确测量电磁环境下 2024-T3 铝合金的动态断裂韧性，且动态断裂韧性表现出明显的应变率敏感性；2024-T3 铝合金的微观断裂机制在准静态下为微孔聚集型，加载速率超过 105 MPa·$m^{1/2}$·$s^{-1}$ 时，材料的断裂表现为由延性韧窝形态向准解理形态转变。

**关键词：**铝合金；加载速率；动态断裂韧性；断面分析

**DOI：**10.3969/j.issn.1674-6457.2017.04.013

**中图分类号：**TG21；TG24.9 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-6457(2017)04-0072-07

## Dynamic Fractural Toughness of 2024-T3 Aluminum Alloy

*WANG Si-jun*[1], *LI Ning*[1], *XI Xue-kui*[2]

(1.College of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2.Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to measure the dynamic fracture toughness of aluminum alloy, probe effects of loading rate on dynamic fracture toughness and understand the corresponding mechanism. The dynamic fracture toughness of 2024-T3 aluminum alloy under various loading rates was systematically measured by shielding the electromagnetic interference. The fractural morphology was characterized by Scanning Electron Microscope (SEM), and the effect of loading rate on dynamic fracture toughness was understood through theoretical analysis. The dynamic fracture toughness was about 35 MPa·$m^{1/2}$ when the loading rate was less than 103 MPa·$m^{1/2}$·$s^{-1}$. As the loading rate was higher than 105 MPa·$m^{1/2}$·$s^{-1}$, the dynamic fracture toughness was over 40 MPa·$m^{1/2}$, and increased with increasing loading rate up to 101 MPa·$m^{1/2}$. The fracture morphology was microporous aggregation at low loading rate. The fracture feature changed from ductile dimple to quasi-cleavage morphological when the loading rate exceeded 105 MPa·$m^{1/2}$·$s^{-1}$. The above phenomenon was mainly caused by that the crack tip of the dislocation area size decreased with the increase of loading rate, the dislocation of the crack tip stress field shielding effect became larger, resulting in crack initiation rapidly changing from the dimple state to the quasi-cleavage state. The dynamic fracture

**收稿日期：**2017-05-02

**基金项目：**国家重点基础研究发展计划（973）(2011CB012806）

**作者简介：**王思军（1990—），男，硕士研究生，主要研究方向为电磁成形。

**通讯作者：**李宁（1978—），男，工学博士，副教授，博士生导师，主要研究方向金属材料的超塑性成形、金属材料的激光 3D 打印成形及轻质合金的电磁驱动高速成形与变形。

toughness of 2024-T3 aluminum alloy can be measured accurately by shielding the electromagnetic interference, and the dynamic fracture toughness is sensitive to the loading rate. The fracture morphology is microporous aggregation at low loading rate, but it transfers from ductile dimple to quasi-cleavage morphological when the loading rate exceeds 105 MPa・$m^{1/2}$・$s^{-1}$.

**KEY WORDS:** aluminum alloy; loading rate; dynamic fracture toughness; fracture analysis

2024-T3 铝合金因具有较高的塑性、疲劳寿命、断裂韧性和抗疲劳裂纹扩展性能，而广泛应用于机身机翼、抗剪肋板和腹板等结构件中[1]。目前，大部分学者主要研究了成分、热处理方式、蠕变时效工艺及应力状态对 2024-T3 铝合金性能的影响规律。如刘富等[2]通过电子万能试验机和分离式霍普金森杆拉伸试验，获得了 2024-T3 铝合金准静态和高应变率下的应力应变曲线，建立了鸟撞数值计算模型，为验证飞机的抗鸟撞设计与分析提供了有力参考。姜薇等[3]研究了 2024-T3 铝合金在不同拉伸和扭转载荷作用下的失效机理，构造了细观损伤本构模型，预测了延性金属材料在多种应力状态下的损伤破坏过程。目前对 2024-T3 铝合金的冲击断裂性能的系统研究较为缺乏，研究 2024-T3 铝合金的动态断裂韧性($K_{Id}$)，对于评估动载下材料结构的安全性以及进行失效分析具有重要意义[4]。

鉴于材料动态断裂韧性研究的重要性，许多学者在动态断裂韧性的测量和表征方面开展了大量工作。如KALTHOFF 等[5]采用动态焦散线方法对摆锤冲击过程进行了动态测量，但发现通过焦散线方法得到的动态应力强度因子与准静态方法得到的差别很大，其结果具有不可靠性。KLEPACKO 等[6]在霍普金森压杆上对试件进行了应力波加载（加载速率可达 $10^6$ MPa·$m^{1/2}$·$s^{-1}$），根据 Rice 提出的 $J$ 积分公式，计算出动态断裂韧性，该方法比三点弯曲合理，但是由于试件与装置之间存在摩擦，且摩擦因数难以准确确定，导致测量准确性不足。夏源明等[7]对圆柱形缺口试样进行弹塑性断裂韧性测试，但由于试件尺寸偏小，试件切口加工的偏心对断裂韧性影响很大。可见，由于试验装置及测试技术的限制，动态加载下材料的断裂韧性的表征与测试的研究进展缓慢，上述的表征和测试方法均存在不足，尚不能形成研究材料性能和工程应用的标准。此外，由于断裂过程具有一定的复杂性，目前还尚未有一个公认的、可以信赖的且令人信服的断裂扩展判据，也尚未有一套动态断裂韧性测试的标准。

相比而言，电阻应变片法测量动态断裂韧性[8]简单易行，因而得以广泛应用。该方法对应变片的位置要求较为严格，而且在实验过程中，实验仪器的瞬间启动及关闭都会产生变化的磁场，变化的磁场会对裸露在空气中的应变片施加一个磁场力，引起应变片产生变形，严重干扰真实应变信号的获取。针对上述问题，文中采取电磁屏蔽措施[9]，避免外界因素干扰，对 2024-T3 铝合金在不同加载条件下的动态断裂韧性进行测量，探讨 2024-T3 铝合金动态断裂韧性随加载速率变化的关系及断裂过程的微观演变机理。为铝合金动态断裂韧性测量提供可靠的技术支持，并系统研究了应变率对动态断裂韧性的影响及机理，这对动态载荷作用下航空铝合金的安全设计具有重要的工程及理论意义。

## 1　实验

### 1.1　原理

电阻应变片法的基本原理是利用应变片测得裂纹尖端处的应变信号，通过记录应变随时间的变化曲线，定义应变最大时刻为起裂时间 $t_f$，在满足平面应变的条件下，再计算出此时刻下的应力强度因子，即为动态断裂韧性。文中依据文献[9]采取的屏蔽措施，采用 AFT-0957B 型动态应变仪和示波器记录应变过程中产生的电信号 $U(t)$。

屏蔽前后测得的电信号对比见图 1，当采用屏蔽措施时，相同测试条件下的电磁干扰幅值显著降低。屏蔽前测得的电信号（正比于应变信号）见图 1a，

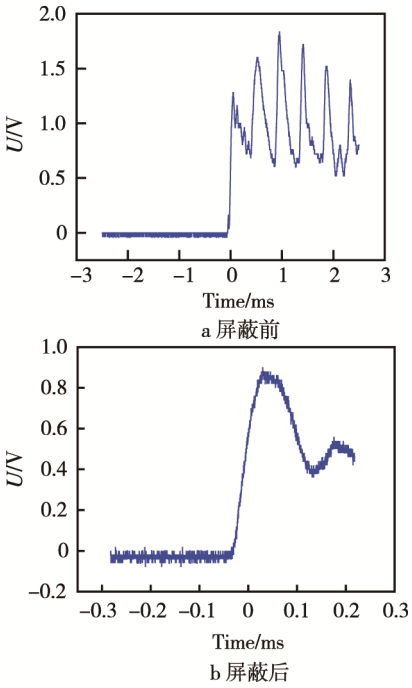


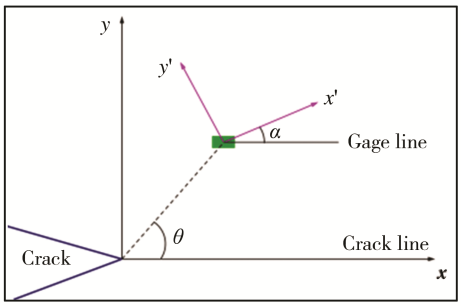

图 1　屏蔽前后测得的电信号对比

Fig.1 Comparison of the measured signals before and after shielding

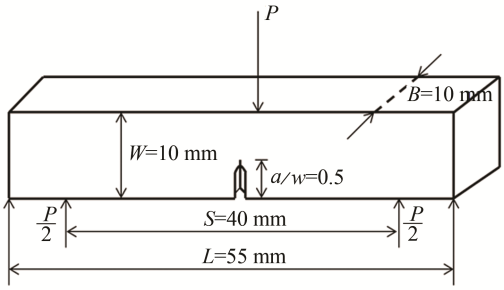
由于存在电磁干扰，信号曲线有较多峰，而且峰值偏大，不能确定裂纹的起裂点。屏蔽后的信号曲线只有一个最大峰（见图 1b），与文献[10]相符，而且峰值较为适中，这说明采取的屏蔽措施是有效的，为后续电磁环境下动态断裂韧性的测量提供了技术支持。

在准确测得电信号的基础上，可以获得起裂时间 $t_f$ 以及此时刻的应变值，下一步需要测定应力强度因子 $K_I$。DALLY 等在利用应变片测量动态断裂韧性的方法中[8]，所采用的应变片位置及方向与裂纹尖端相对位置见图 2a，且应变片的位置及方向、应力强度因子和材料的常数之间存在的关系见式(1)。

$$\mu\varepsilon_g=\frac{K_I}{2\sqrt{2\pi r}}\left(\begin{array}{l}k\cos\frac{\theta}{2}-\frac{1}{2}\sin\theta\sin\frac{3\theta}{2}\cos2\alpha+\\ \frac{1}{2}\sin\theta\cos\frac{3\theta}{2}\sin2\alpha\end{array}\right) \quad (1)$$




a 应变片在试样上的相对位置




b 样品尺寸

图 2 试样信息

Fig.2 Information of sample

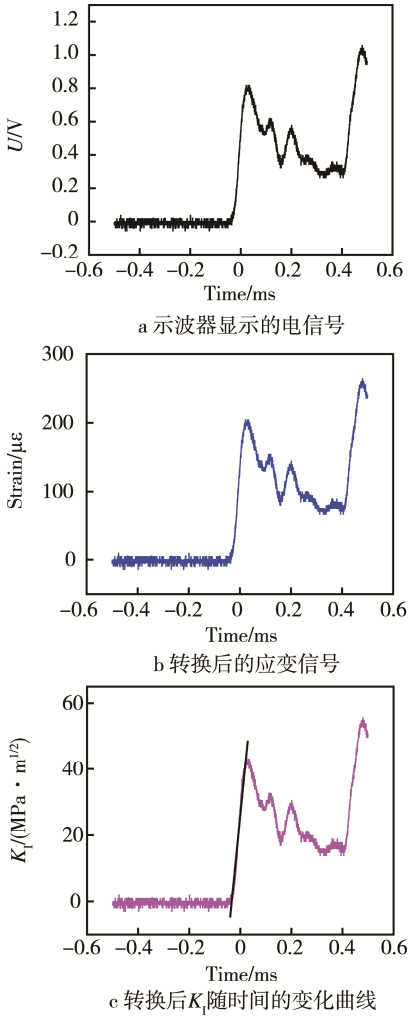
式中：$K_I$ 为 I 型裂纹的应力强度因子；$r$=4 mm，为裂纹尖端与应变片中心之间的距离；$\varepsilon_g$ 为起裂时刻的应变值；$\alpha$ 为裂纹线与应变片坐标系 $x$ 轴之间的夹角；$\theta$ 为裂纹线与参考坐标系 $x$ 轴之间的夹角；$\mu$ 和 $k$ 取决于弹性模量 $E$ 和泊松比 $\nu$：

$$\mu=\frac{E}{2(1+\nu)},\quad k=\frac{1-\nu}{1+\nu} \quad (2)$$

参照 DALLY 的贴片方式，应变片的坐标系中选用 $\alpha=\theta=60°$。试样为 2024-T3 铝合金，该型铝合金的泊松比 $\nu$=0.33，弹性模量 $E$=72 GPa，因此式(1)可简化为式(3)。

$$K_I=E\sqrt{\frac{8}{3}\pi r\varepsilon_g} \quad (3)$$

在满足平面应变的条件下，通过动态应变仪和示波器记录断裂过程的电信号见图 3a，通过 $\varepsilon(t)=kU(t)$（其中 $k=200\mu\varepsilon/v$）将电压信号 $U(t)$转换为应变信号 $\varepsilon(t)$，转换后的应变信号见图 3b，再依据式(3)，可获得动态应力强度因子随时间的变化曲线 $K_I(t)$，见图 3c，起裂时刻对应的应力强度因子即为动态断裂韧性 $K_{Id}$，即 $K_{Id}=K_I(t_f)$。




a 示波器显示的电信号

b 转换后的应变信号

c 转换后$K_I$随时间的变化曲线

图 3 电信号的转换过程

Fig.3 Conversion process of electrical signal

## 1.2 试样的设计

采用西南铝业提供的 2024-T3 铝合金板材作为研究对象，板厚为 10 mm，含有质量分数为 0.5%的 Si，0.5%的 Fe，3.8%~4.9%的 Cu，0.3%~0.9%的 Mn，1.2%~1.8%的 Mg，0.1%的 Gr，0.25%的 Zn，0.15%的 Ti，0.15%的杂质，余量为 Al。在进行材料动态断裂韧性 $K_{Id}$ 测量时，板厚是影响 $K_{Id}$ 的重要因素。参考静态断裂韧性 $K_{Ic}$ 的测量标准，样品的厚度 $B$ 满足式(4)，以保证试样侧面有足够的约束产生平面应变条件[11—14]。

$$B \geq 2.5\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_s}\right)^2 \tag{4}$$

式中：$\sigma_s$ 为材料的屈服强度。根据式(4)确定，试样厚度 $B$ 不小于 9.3 mm，因此取样品厚度为 10 mm。此外，分别将样品进行三点弯曲、摆锤冲击及 Hopkinson 杆冲击试验。参照夏比试验 U 型缺口试样尺寸标准，确定试样的长度 $L$ 为 55 mm，宽度 $W$ 为 10 mm，预制缺口长度 $a$ 为 5 mm。样品几何尺寸见图 2b。

### 1.3　试样制备及动态断裂韧性测量

由静态断裂力学可知，裂纹尖端由于应力奇异性而存在塑性区域，因此需要考虑韧带 $b_0$（宽度 $W$ 与预制裂纹长度 $a$ 之差）尺寸对应力强度因子的影响[15—16]。若韧带尺寸过小，韧带对裂纹尖端塑性区域的约束作用降低，可能导致韧带在动态加载过程中发生屈服，测得的动态断裂韧性不能真实地反映材料的真实断裂韧性，因此实验中设置韧带尺寸 $b_0$=5 mm。进行断裂韧性测试前，将样品表面打磨抛光，酒精清洗后，参考文献[8]的应变片粘贴方法，在与预制缺口方向呈 60°夹角，且距离缺口尖端距离 $r$($r<b_0$)为 4 mm 的位置贴应变片（见图 2a）。

进行不同加载速率($10^{-3}$~$10^{7}$ MPa·m$^{1/2}$·s$^{-1}$)条件下的动态断裂韧性测量，获得不同加载速率下 2024-T3 铝合金的动态断裂韧性。采用扫描电子显微镜对断口进行形貌观察，根据断口形貌分析加载速率对动态断裂机制的影响及机理。

## 2　结果

### 2.1　三点弯曲实验

采用电液伺服万能材料试验机进行断裂韧性测试，该系统由载荷、应变或十字头位移传感器得到反馈控制信号，能够实现的加载速率在 $10^{-3}$~$10^{3}$ MPa·m$^{1/2}$·s$^{-1}$ 之间，准静态条件下的断裂韧性计算见式(5)[17]。

$$K_{Ic} = \frac{PS}{BW^{\frac{3}{2}}} f\left(\frac{a}{w}\right) \tag{5}$$

式中：$P$ 为载荷；$S$ 为跨距。查询三点弯曲试样 $f(a/w)$数值表可知，$a/w$=0.5，$f(a/w)$=2.66，在此条件下分别计算了不同加载速度下的断裂韧性，当加载速度分别为 3.33×10$^{-5}$, 1.83×10$^{-4}$, 3.33×10$^{-3}$ m/s 时，相应的加载速率分别为 0.794, 2.326, 7.943 MPa·m$^{1/2}$·s$^{-1}$，断裂韧性分别为 32.107, 33.217, 34.098 MPa·m$^{1/2}$。可知，准静态加载情况下，加载速率对 2024-T3 铝合金材料的断裂韧性值影响不大。

### 2.2　摆锤冲击实验

为了提高加载速率，采用摆锤冲击试验机实现动态加载，锤头的冲击速度一般在 2~6 m/s 之间，能够实现的加载速率在 $10^2$~$10^5$ MPa·m$^{1/2}$·s$^{-1}$ 之间[18]。按图 2a 的贴片方式粘贴应变片，处理后得到的动态断裂韧性 $K_{Id}$ 见表 1。可知，摆锤冲击能够实现加载速率在 $10^2$~$10^4$ MPa·m$^{1/2}$·s$^{-1}$ 内，动态断裂韧性相对准静态略有增加，但基本保持在 34~36 MPa·m$^{1/2}$ 左右。

**表 1　摆锤冲击实验时测得的动态断裂韧性**
**Tab.1 Dynamic fracture toughness measured at Pendulum impact test**

| 摆锤速度/(m·s$^{-1}$) | 最大电压/V | 加载速率/(MPa·m$^{1/2}$·s$^{-1}$) | $K_{Id}$/(MPa·m$^{1/2}$) |
|---|---|---|---|
| 2.0 | 1.08 | 2.326×10$^2$ | 34.67 |
| 3.5 | 1.14 | 1.468×10$^3$ | 35.15 |
| 5.0 | 1.22 | 1.259×10$^4$ | 35.58 |
| 6.5 | 1.33 | 6.812×10$^4$ | 36.16 |

### 2.3　Hopkinson 杆加载

为了进一步提高加载速率，采用 Hopkinson 杆及其改进装置实现了更高速率下的动态加载[19]，其加载速率超过了 $10^6$ MPa·m$^{1/2}$·s$^{-1}$。实验中所用子弹与入射杆为优质合金钢，子弹和入射杆的直径均为 10 mm，子弹长度为 200 mm，入射杆长度为 800 mm，改变子弹速度，也就是改变气压，测量冲击载荷作用下的动态断裂韧性，结果见表 2。可以看出，当加载速率达到 $10^5$ MPa·m$^{1/2}$·s$^{-1}$ 后，2024-T3 铝合金的动态断裂韧性值超过 40 MPa·m$^{1/2}$，且随加载速率的增加而不断增大。当加载速率为 3.16×10$^6$ MPa·m$^{1/2}$·s$^{-1}$ 时，2024-T3 铝合金的动态断裂韧性值高达 101 MPa·m$^{1/2}$。

**表 2　Hopkinson 压杆加载时测得的动态断裂韧性**
**Tab.2 Dynamic fracture toughness measured by Hopkinson bar loading**

| 压力/MPa | 最大电压/V | 加载速率/MPa·m$^{1/2}$·s$^{-1}$ | $K_{Id}$/MPa·m$^{1/2}$ |
|---|---|---|---|
| 0.09 | 1.28 | 1.259×10$^5$ | 42.16 |
| 0.1 | 1.67 | 5.012×10$^5$ | 54.81 |
| 0.12 | 1.79 | 1.259×10$^6$ | 59.03 |
| 0.15 | 2.05 | 1.469×10$^6$ | 67.5 |
| 0.18 | 2.11 | 2.511×10$^6$ | 72.8 |
| 0.2 | 3.07 | 3.162×10$^6$ | 101.13 |

根据加载速率的定义，对应力强度因子-时间曲线 $K_I(t)$曲线求导（见图 3c）直线段斜率作为样品断裂时的加载速率，重复多次试验，然后再对加载速率取以 10 为底的对数，利用三点弯曲、摆锤冲击、Hopkinson 杆冲击测得的断裂韧性与加载速率之间的关系见图 4。可见，加载速率较低时，2024-T3 铝合金的断裂韧性变化不明显，但当加载速率超过一定值时，动态断裂韧性迅速增大。

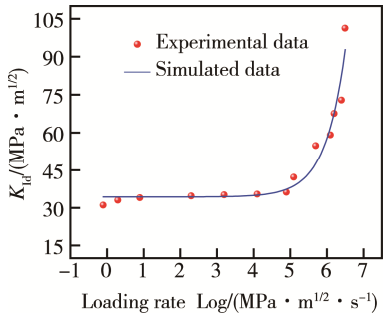



图 4 动态断裂韧性 $K_{Id}$ 随加载速率变化曲线

Fig.4 Curve of dynamic fracture toughness with loading rate

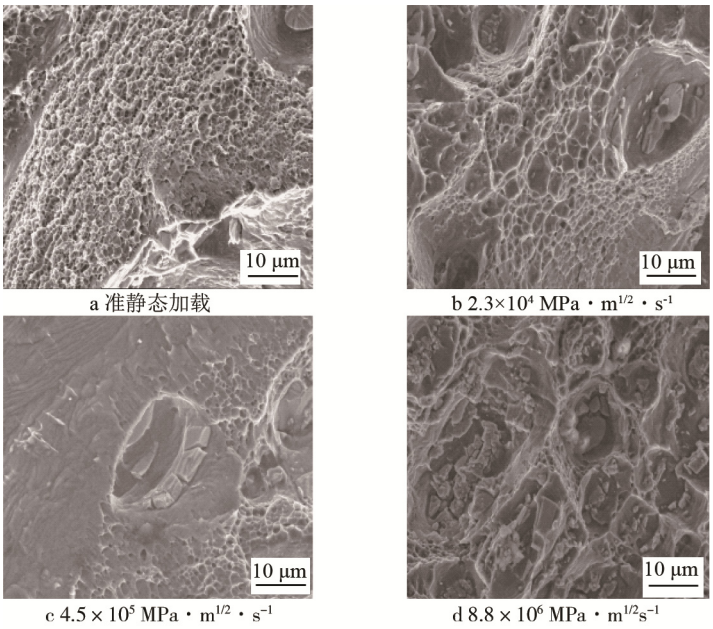
## 3 分析讨论

### 3.1 加载速率与动态断裂韧性的关系

当加载速率小于 $10^5$ MPa·m$^{1/2}$·s$^{-1}$ 时，2024-T3 铝合金的动态断裂韧性保持在 32~36 MPa·m$^{1/2}$；当加载速率高于 $10^5$ MPa·m$^{1/2}$·s$^{-1}$ 时，动态断裂韧性超过 40 MPa·m$^{1/2}$，且随加载速率的增加而不断增大。当加载速率为 $3.16\times10^6$ MPa·m$^{1/2}$·s$^{-1}$ 时，动态断裂韧性值高达 101 MPa·m$^{1/2}$。一般情况下，在准静态或静态加载时，断裂过程缓慢，此时速率的变化对断裂过程影响较小，因此当加载速率小于 $10^3$ MPa·m$^{1/2}$·s$^{-1}$ 时，2024-T3 铝合金的动态断裂韧性保持在 35 MPa·m$^{1/2}$ 左右。但在较高的加载速率条件下，材料的断裂和变形机制发生了改变，此时加载速率对断裂过程的影响不容忽视。在弹性阶段，应变快速响应应力，当加载速率低于应变响应速率时，加载速率无疑不会对材料的弹性变形产生影响。在塑性变形阶段，材料变形缓慢，表现出粘滞性[20—21]，因此在较高加载速率下，加载速率很容易超过材料塑性变形所需要的临界速率，这将使材料响应不能满足外界应力需求，测量获得的屈服应力增大，塑性降低。如在 Hopkinson 高速冲击（加载速率>$10^5$ MPa·m$^{1/2}$·s$^{-1}$）载荷作用下，为了响应外界应力，材料内部三维空间不同滑移系会在瞬间产生大量位错且迅速增殖，从而引起位错密度增大，位错缠结、交织机率增大。此种情况下，材料表现出加工硬化现象，大量交织的位错阻止裂纹扩展的能力增强，从而引起断裂韧性的增大。当加载速率进一步增大时，这种加工硬化现象愈加明显，大量缠结的高密度位错对阻止裂纹扩展能力进一步增强，从而表现出动态断裂韧性随加载速率增加而增大的现象，见图 4。

### 3.2 微观断裂特征及机理

为了进一步分析 2024-T3 铝合金动态断裂韧性随加载速率增加而增大的现象，对不同加载速率下断裂样品的断口进行分析，结果见图 5。由图 5a 可知，准静态下（加载速率为 0.79~7.9 MPa·m$^{1/2}$·s$^{-1}$）材料的微观断裂机制为微孔聚集型，整个裂纹扩展区均表现出等轴韧窝型延性断裂的特征。在摆锤载荷冲击下（加载速率 $2.3\times10^2$~$6.8\times10^4$ MPa·m$^{1/2}$·s$^{-1}$），在预制裂口区与裂纹扩展区之间还发现一个光滑平坦的区域，即伸张区（见图 5b），这主要是由于裂纹尖端受载后发生塑性滑移。当加载速率进一步增加至 $4.5\times10^5$ MPa·m$^{1/2}$·s$^{-1}$ 时，动态加载下试样断口形貌观察表明，在起裂区附近，材料仍表现出延性断裂的断口特征，存在大量韧窝。同静态加载情况比，伸张区的特征不明显（见图 5c）。当加载速率继续升高到 $8.8\times10^6$ MPa·m$^{1/2}$·s$^{-1}$ 时，在裂纹扩展的中间区域，断口形貌又由韧窝形态转变为准解理形态（见图 5d）。




a 准静态加载　b $2.3\times10^4$ MPa · m$^{1/2}$ · s$^{-1}$

c $4.5\times10^5$ MPa · m$^{1/2}$ · s$^{-1}$　d $8.8\times10^6$ MPa · m$^{1/2}$s$^{-1}$

图 5 不同加载速率下断裂样品的断口 SEM

Fig.5 SEM micrographs of the fractural specimens under various loading rate

上述结果表明，2024-T3 铝合金在不同加载速率下表现出不同的变形机理和断裂模式[22—23]。这种现象可根据位错贫化带理论来理解：动态断裂过程中，在冲击载荷的作用下，裂纹尖端会形成塑性应变区 $A_0$，塑性区内产生大量位错。随着裂纹的进一步扩展，裂纹与 $A_0$ 区位错相互作用，消耗部分能量，在新的裂纹尖端区域会产生瞬时无位错区 $A_1$。在外力作用下，塑性区内位错进一步扩展，当这些位错运动到无位错区时，位错的运动受到阻碍，大量的位错因塞积而相互缠结，在无位错区的尾部会形成塑性变形带。在高速冲击载荷作用下，裂纹源附近的应力集中，使裂纹尖端区域产生大量位错，以有限的速度向前滑移。加载速率较高会使裂纹尖端无位错区减小，位错对裂纹尖端应力场的屏蔽效应增大，阻止微裂纹扩展能力增强。另一方面，加载速率增大时，不同位错间的间距减小，相邻位错因间距过小而易于缠结、塞积，抑制裂纹尖端位错的萌生，导致裂纹在特定方向表现为解理断裂的特征。值得关注的是，裂纹尖端虽然不能产生大量位错，但仍有少量位错可以在解理面上产生滑移区，导致断口呈现出准解理断裂的特征。

## 4　结论

1) 采用电磁屏蔽技术，减小电磁干扰，可准确测量 2024-T3 铝合金在电磁环境下的动态断裂韧性。

2) 2024-T3 铝合金的动态断裂韧性随加载速率的增加而增大，表现出显著的应变率敏感效应。这主要是由于高加载速率引起高密度位错，对裂纹尖端应力场的屏蔽效应增大，阻止微裂纹扩展能力增强，从而引起断裂韧性增加。

**参考文献：**


[1] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
China Aeronautical Materials Hand-book. Editorial Board of China Aeronautical Materials Handbook[M]. Beijing: Standards Press of China,2001.

[2] 刘富, 张嘉振, 童明波, 等. 2024-T3 铝合金动力学实验及其平板鸟撞动态响应分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(4): 113—118.
LIU Fu, ZHANG Jia-zhen, TONG Ming-bo, et al. Dynamic Response of 2024-T3 Aluminum Alloy and Its Dynamic Response Analysis of Flat Birds[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(4): 113—118.

[3] 姜薇, 李亚智, 苏杰, 等. 2024-T3 铝合金拉伸及剪切断裂行为[J]. 固体火箭技术, 2015(3): 426—450.
JIANG Wei, LI Ya-zhi, SU Jie, et al. Tensile and Shear Fracture Behavior of 2024-T3 Aluminum Alloy[J]. Solid Rocket Technology, 2015(3): 426—450.

[4] 范天佑. 断裂动力学引论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.
FAN Tian-you. Fracture Dynamics Introduction[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990.

[5] KALTHOFF J F. On the Measurement of Dynamic Fracture Toughnesses: a Review of Recent Work[J]. International Journal of Fracture, 1985, 27(3): 277—298.

[6] KLEPACKO. Mechanical Properties at High Rates of Strain[M]. Institute of Physics, 1974.

[7] 夏源明, 杨报昌. 摆锤式杆杆型冲击拉伸试验装置和低温动态测试技术[J]. 实验力学, 1989, 4(1): 57—66.
XIA Yuan-ming, YANG Bao-chang. Pendulum-type Rod-type Impact Tensile Test Device and Low Temperature Dynamic Test Technology[J]. Experimental Mechanics, 1989, 4(1): 57—66.

[8] DALLY J W, BARKER D B. Dynamic Measurements of Initiation Toughness at High Loading Rates[J]. Experimental Mechanics, 1988, 28(3): 298—303.

[9] CHEN Jin-ling, XI Xue-kui, WANG Si-jun, et al. A Method of Measuring Dynamic Strain Under Electromagnetic Forming Conditions[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(4): 043902.

[10] 张从和. 强辐射条件下应变测量的抗干扰技术研究[J]. 实验流体力学, 2001, 15(1): 1—7.
ZHANG Cong-he. A Study on Anti-jamming Technique of Strain Measurement under Strong Radiation[J]. Fluid Mechanics and Measurement, 2001, 15(1): 1—7.

[11] 赵健生. 断裂力学及断裂物理[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003.
ZHAO Jian-sheng. Fracture Mechanics and Fracture Physics[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2003.

[12] OWEN D M, ZHUANG S, ROSAKIS A J. Experimental Determination of Dynamic Crack Initiation and Propagation Fracture Toughness in Thin Aluminum Sheets[J]. International Journal of Fracture, 1998, 90: 153—174.

[13] 任珊, 罗艳. 关于弹性力学平面应力问题与应变问题的判别[J]. 力学与实践, 2015(5): 644—646.
REN Shan, LUO Yan. Discussion on Plane Stress Problem and Strain Problem of Elasticity[J]. Mechanics and Practice, 2015(5): 644—646.

[14] 赵婷, 邓磊, 王新云. 2024 铝合金板材高温拉伸流变行为和微观组织演化研究[J]. 精密成形工程, 2015, 7(3): 37—42.
ZHAO Ting, DENG Lei, WANG Xin-yun. Flow Behavior and Microstructure Evolution of 2024 Aluminum Alloy Sheet during Hot Tension Deformation[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(3): 37—42.

[15] RUBIO L. Determination of Fracture-initiation Hopkinson Pressure Toughness Using Three-point Bending Tests in Dynamic Modified Bar[J]. Experimental Mechanics, 2003, 43(4): 379—386.

[16] 张林. 延性材料冲击响应: 动态损伤与断裂、结构相变的新模型[D]. 中国工程物理研究院, 2005.

ZHANG Lin. Ductile Materials Shock Response: a New Model of Dynamic Damage and Fracture, Structure, Phase Change[D]. Chinese Academy of Engineering Physics, 2005.

[17] 李玉龙. 利用三点弯曲试样测试材料起裂韧性的技术展望[J]. 稀有金属材料与工程, 1993, 22(5): 12—18.
LI Yu-long. Technological Prospect for Testing Fracture Toughness of Materials by Three-point Bending Specimen[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1993, 22 (5): 12—18.

[18] 林君山, 娜文彬. Charpy 裂纹试样的启裂点确定与动态断裂韧性[J]. 金属学报, 1992, 28(4): 170—175.
LIN Jun-shan, NA Wen-bin. Charpy Crack Sample Point of Crack is Determined and the Dynamic Fracture Toughness[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1992, 28(4): 170—175.

[19] 邹广平. 金属材料动态断裂韧性的表征与测试[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
ZOU Guang-ping. Characterization of Dynamic Fracture Toughness of Metallic Materials and Testing[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005.

[20] YOKOYAMA T, KISHIDA K. A Novel Impact Three-point Bend Test Method for Determining Dynamic Fracture-initiation Toughness[J]. Experimental Mechanics, 1989(2): 188—194.

[21] 许泽建, 李玉龙, 李娜, 等. 加载速率对高强钢 40Cr 和 30CrMnSiNi2A Ⅰ型动态断裂韧性的影响[J]. 金属学报, 2006, 42(9): 965—970.
XU Ze-jian, LI Yu-long, LI Na, et al. Effect of Loading Rate on Dynamic Fracture Toughness of High Strength Steel 40Cr and 30CrMnSiNi2A Type I[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(9): 965—970.

[22] 江慧丰, 张青川, 蒋震宇, 等. 铝合金中 PLC 变形带的轨迹观察和研究[J]. 实验力学, 2004, 19(4): 430—436.
JIANG Hui-feng, ZHANG Qing-chuan, JIANG Zhen-yu, et al. Aluminum Alloy in the PLC Deformation Band Track Observation and Study[J]. Experimental Mechanic, 2004, 19(4): 430—436.

[23] POTHNIS J R, PERLA Y, ARYA H, et al. High Strain Rate Tensile Behavior of Aluminum Alloy 7075 T651 and IS2062 Mild Steel[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2011, 133(2): 1—9.