DOI: 10.11883/bzycj-2016-0389 文章编号: 1001-1455(2018)04-0749-10

表面粗糙度对 6061 铝合金薄壁管冲击膨胀断裂性能的影响*

刘龙飞,周 强
(湖南科技大学材料科学与工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要: 采用分离式霍普金森杆实验技术,对表面加工后不同粗糙度的 6061 铝合金薄壁圆柱管进行动态膨胀断裂冻结回收实验,并对薄壁金属圆柱管动态膨胀断裂过程中裂纹萌生、扩展情况以及最终断裂模式等进行了研究。结果表明:相同冲击压力条件下,薄壁金属圆柱管表面粗糙度越大,材料越容易发生膨胀破裂;裂纹萌生于外壁面,由外向内扩展,并且裂纹的扩展主要受裂纹处应力状态的影响;薄壁金属圆柱管的断裂模式由拉伸和剪切断裂机制起主导作用,其断口为拉剪混合型断口。

关键词: 6061 铝合金;分离式霍普金森杆;薄壁圆柱管;膨胀断裂
中图分类号: O347;TG156 **国标学科代码**: 1301545 **文献标志码**: A

现实生活中,金属柱壳被广泛应用在各种场合,例如:输水、输油、输气管道和压力容器;火箭的助推器中的燃料箱;导弹、炮弹、枪管的金属柱壳;核电站中的防护装置等。作为各种应用场合中的主要部件,金属壳体的损坏经常会使整个设备停止工作甚至报废,因此对金属柱壳动态膨胀断裂行为的研究一直受到人们的高度重视[1-8]。实际应用过程中,金属柱壳一般需要承受来自柱壳内部载荷的作用,因此对金属壳体在内部冲击载荷的作用下的膨胀断裂时间、断裂程度及断裂结果预测理论的研究是金属柱壳研究领域中的重点,也是工程领域非常重要的问题之一[9-10]。

目前,薄壁金属圆柱管膨胀断裂机理主要通过对最终断裂碎片的回收分析得到[2,4,6,8]。在低应变率下,Taylor[2]认为金属圆柱管的断裂模式为拉伸断裂模式,拉伸裂纹首先萌生于外壁面,而后始终沿径向向内壁面扩展。在高应变率下,Hoggatt 等[7]提出的绝热剪切断裂模式认为,内壁面首先发生绝热剪切失稳,形成绝热剪切带向外扩展;当外壁面处于拉伸应力状态时,裂纹将沿剪切带向内扩展并最终断裂;随着应变率的降低,剪切方向的断裂带将不能贯穿整个壁厚,而是由拉伸裂纹首先沿径向向内壁面扩展一段距离遇到绝热剪切带后,才沿着绝热剪切带向内壁面扩展,形成拉剪混合断口[4,6]。另外,汤铁钢等[4]和胡八一等[8]的实验结果显示,减小壁厚或提高加载应变率,会出现拉-绝热剪切混合断裂向纯绝热剪切断裂的过渡。

采用 6061 铝合金薄壁圆柱管作为研究对象,利用分离式霍普金森杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)对其进行冲击膨胀断裂冻结回收实验,用粗糙度仪检测表面的粗糙度,并通过光学显微镜和扫描电子显微镜观察分析,研究不同表面粗糙度的 6061 铝合金在内部冲击载荷作用下的膨胀断裂过程中的裂纹萌生位置、宏观表现、裂纹的生长、萌生裂纹类型以及微观组织形貌的变化规律,以期为薄壁圆柱管冲击膨胀断裂机理研究提供直接的实验和理论参考。

1 实验材料及方法

实验材料为商用 6061 铝合金薄壁管,内径 $r=14$ mm,壁厚 $\delta=2$ mm,如图 1 所示。本实验选用 6061 铝合金作为实验材料,以便与之前的实验结论进行对比。

* **收稿日期**: 2016-12-20; **修回日期**: 2017-09-09
基金项目: 国家自然科学基金项目(11772127);湖南省科研创新项目(CX2017B634)
第一作者: 刘龙飞(1975—),男,博士,教授,lfliu1@hnust.cn。



图 1 6061 铝合金管实物

Fig. 1 Photo of 6061 aluminum-alloy tube

6061 铝合金属于铝-镁-硅系，是可热处理强化的变形铝合金，主要化学成分如表 1 所示。首先对 6061 铝合金管进行表面切削加工，考虑车刀痕迹的影响，表面采用 500-7000CW 不等的砂纸在 P-2 型金相试样抛光机进行抛光处理，并用 Marsurf-RD18 粗糙度仪测其粗糙度，加工成∅16 mm×20 mm 的薄壁管，然后填充石蜡于柱壳中心位置。其物理性能参数见表 2，其中 ρ 为密度，ν 为泊松比，T_m 为熔化温度，σ_t 为抗拉强度，E 为弹性模量。

表 1 6061 铝合金主要化学成分

Table 1 Chemical composition of 6061 aluminum alloy

化学元素	Mg	Si	Fe	Cu	Cr	Zn	Mn	Ti
质量分数/%	0.8～1.2	0.4～0.8	0.7	0.15～0.40	0.04～0.35	0.25	0.15	0.15

表 2 6061 铝合金物理性能参数

Table 2 Physical property parameters of 6061 aluminum alloy

ρ/(g·cm^{-3})	ν	延伸率	T_m/℃	σ_t/MPa	E/GPa
2.69	0.330	＞10%	582～652	＞205	68.9

将低剪切强度、高体积模量、便于成型的石蜡填充在薄壁管内，在两端对具有较高弹性模量及屈服强度的垫块进行加载。由于填充物与薄壁管、垫块是紧密结合的，在较大冲击力的作用下，填充物迅速膨胀，导致薄壁柱管迅速膨胀断裂。如图 2 所示，实验所用模具由左、右垫块，薄壁管和石蜡构成。其中垫块由 42CrMo 钢制成，属于超高强度合金钢，具有高强度和高韧性的特征；其淬透性较好，无明显的回火脆性，经调质处理后能够有效地提高其疲劳极限与抗多次冲击的性能。左、右垫块的尺寸∅14 mm×16 mm；薄壁管尺寸为：内径 14 mm，长度 20 mm，壁厚 1 mm；石蜡尺寸为∅14 mm×10 mm。

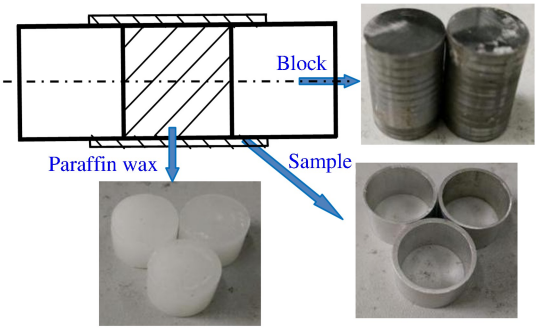


图 2 冲击膨胀断裂实验材料及模具

Fig. 2 Impact expansion fracture test material and mold drawing

通过调节透射杆端部、挡板(起安全保护作用)与减震器之间的距离，可实现对样品的单次可控加载和冻结回收[11]。实验装置如图 3 所示，通过对子弹加载速度的控制，可以控制对样品的加载应变率。在冲击实验前，为减弱弥散振荡，在模具与入射杆和透射杆的接触处涂上凡士林，并将模具与入射杆和透射杆紧密压紧。由子弹对入射杆提供冲击力，实验结束后，迅速拆开模具，取出膨胀断裂的薄壁圆柱管，并保持薄壁圆柱管断口的清洁。

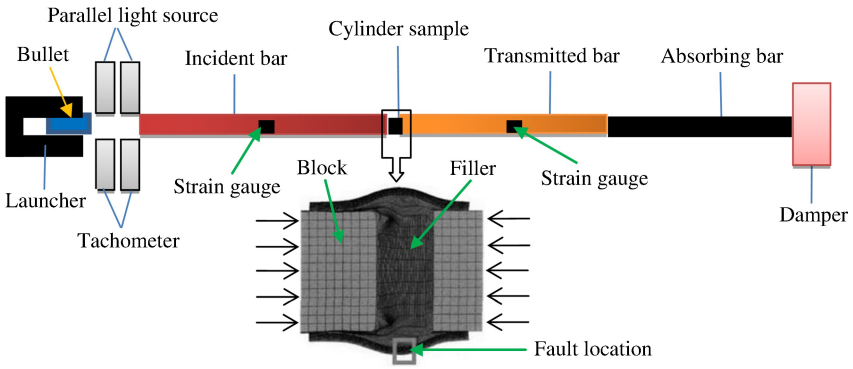


图 3　实验装置示意图

Fig. 3　Schematic of experimental device

实验后取薄壁圆柱管断口附近纵截面、断口、横截面及表面进行微观结构分析，如图 4 所示。用砂纸先粗磨后精抛其剖面，采用的腐蚀剂为盐酸 3 mL＋蒸馏水 190 mL＋氢氟酸 2 mL＋硝酸 5 mL 的 Keller 试剂，微观组织分析采用 OLYMPUS 金相显微镜观察，随后采用日立 S-530 型扫描电子显微镜对冲击膨胀断口及表面进行观察。

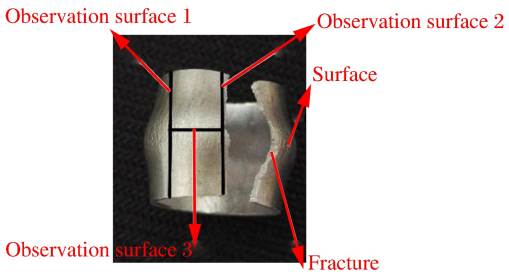


图 4　冻结回收样品

Fig. 4　Research directions of freezing recovery sample

2　实验结果与分析

2.1　粗糙度及加载速率

经过 LBR-370(M)数控车床加工得到冲击膨胀断裂实验所采用的 6061 铝合金薄壁圆柱管，其表面粗糙度(R_a)如表 3 所示。在压力、壁厚相同的条件下，对 6061 铝合金薄壁柱壳进行冲击膨胀断裂冻结回收实验。由单一变量法对实验数据结果进行分析得出：表面粗糙度越大，冲击后薄壁圆柱管的断口宽度越大，即薄壁圆柱管越容易发生膨胀断裂，如图 5 所示。

表 3　薄壁圆柱管实验参数

Table 3　Experimental parameters of thin-walled cylindrical tubes

No.	R_a/μm	No.	R_a/μm	No.	R_a/μm	No.	R_a/μm	No.	R_a/μm
1	0.190	3	0.278	5	0.385	7	0.489	9	0.689
2	0.243	4	0.314	6	0.414	8	0.551		

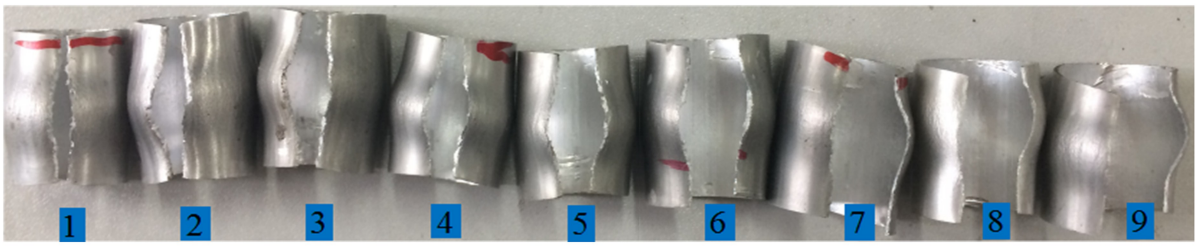


图 5　薄壁圆柱管冲击后宏观形貌

Fig. 5　Macro-morphology of the thin-walled cylindrical tube

圆柱管凸起处内部压强载荷(p)和圆柱管凸起破裂处环向拉伸应力(σ)可以分别表示为：

$$p=\frac{A_0E_b\varepsilon_1}{A_1},\qquad \sigma=\frac{A_0E_b\varepsilon_1r_1}{A_1(r_2-r_1)} \tag{1}$$

式中：r_1 和 r_2 分别为圆柱管初始内径和外径，E_b 为 SHPB 杆的杨氏模量，A_0、A_1 分别为 SHPB 和垫块的横截面积，ε_1 为 SHPB 杆上的透射应变波。

为进一步研究表面粗糙度对薄壁管冲击膨胀断裂行为的影响，现对相同粗糙度的薄壁柱壳（采用 800CW 砂纸处理）在不同加载速率条件下进行冻结回收实验，得到圆柱管膨胀断裂过程中从发生塑性变形到裂纹在壁厚内演化、再到圆柱管发生完全断裂的整个过程，如图 6 所示。由图 6 可知：在实验所涉及应变率范围内，提高加载速率，圆柱管内部损伤演化的程度加剧，损伤演化速率更快，表现为宏观径向断裂应变增加，断裂时间缩短，即加载速率越大，薄壁管越容易发生膨胀断裂[9]。实验结果与化爆圆柱管实验结果一致[4]。

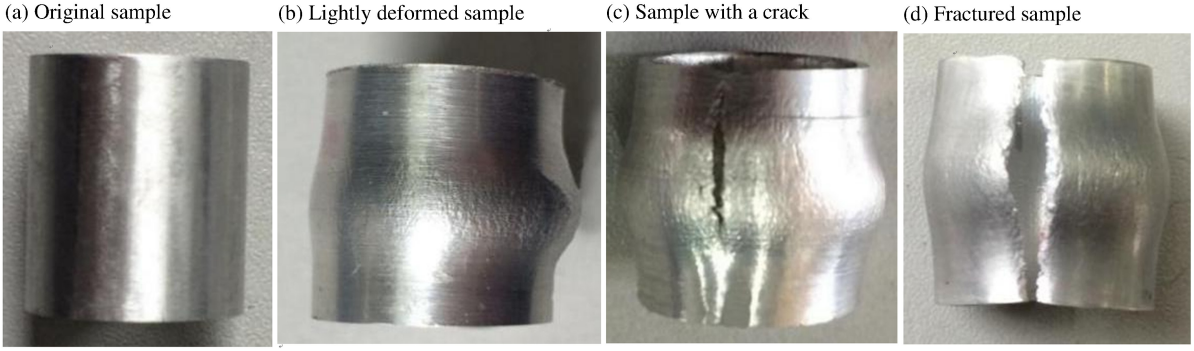


图 6 冻结回收样品

Fig. 6 Pictures of freezing recovery sample

为分析薄壁柱壳膨胀断裂机制，可将粗糙的表面近似用有轴向浅表面半椭圆裂纹的压力圆筒表示，如图 7 所示。采用线弹性力学方法，对切口尖端附近区域应力场进行定性分析，得出该区域任一点应力分量 σ_x、σ_y、τ_{xy} 的表达式为：

$$\sigma_x=\frac{\sigma_a\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}}\cos\frac{\theta}{2}\left(1-\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right) \tag{2}$$

$$\sigma_y=\frac{\sigma_a\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}}\cos\frac{\theta}{2}\left(1+\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right) \tag{3}$$

$$\tau_{xy}=\frac{\sigma_a\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}}\cos\frac{\theta}{2}\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{3\theta}{2} \tag{4}$$

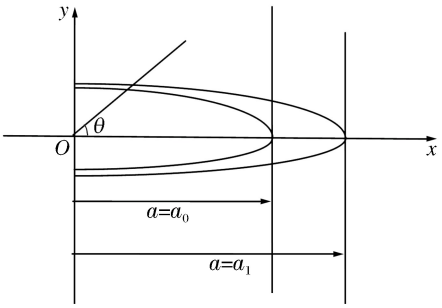


图 7 粗糙的表面形貌半椭圆尖端模型

Fig. 7 Semi elliptical tip mode of rough surface morphology

式中：σ_a 为距离切口处足够远处均匀分布的拉应力。半椭圆尖端断裂临界应力为：

$$\sigma_c=\frac{K_{IC}}{1.95}\sqrt{\frac{Q}{a}} \tag{5}$$

式中：K_{IC} 为材料的断裂韧性，可通过查表得到；a 为切口的深度；Q 为形状因子[12]。由式(5)可知，半长轴 a 越大，σ_c 就越大。定性分析可知，表面粗糙度越大，其尖端处集中应力就越大，薄壁圆柱管越容易在短时间内发生膨胀断裂。

2.2 裂纹萌生位置及形式

图 8 为 6061 铝合金薄壁管冲击膨胀断裂前、后金相组织。由图 8(b)可知，外部晶粒被环向拉伸，这是由于圆柱管内部受到膨胀压应力的作用。同时，从图 8(b)观察到轴向方向上外表面靠近裂纹位置的金相组织中有滑移线存在，其方向与外表面相平行。该滑移线的产生主要是由于试样受到内部载荷作用时发生膨胀，靠近外表面粗糙度比较大的区域受到了拉伸应力的作用，而拉伸应力由外表面向内逐渐减少，不均匀的应力分布及试样的膨胀变形共同导致了滑移线的出现[13]。对变形区金相组织观察发

现，微裂纹主要存在于外表面粗糙度相对较大的晶界处。试样除在外表面有裂纹萌生外，在靠近外表面的金相组织中也出现了较多的微裂纹，如图 8(c)～(d)所示。此外，从图 8(d)中观察到的裂纹是以剪切形式萌生于外壁面比较粗糙的表面，并沿着 45°剪应力的方向扩展，这是因为最大剪应力方向与径向的夹角为±45°。

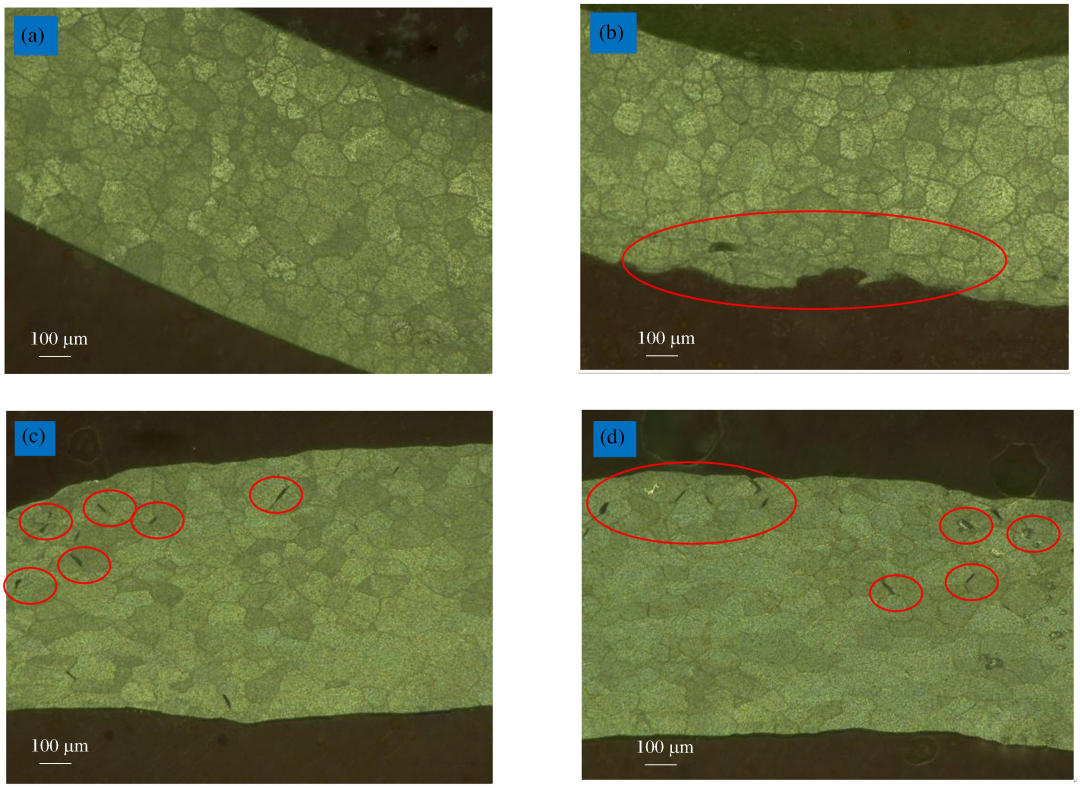


图 8 圆柱管裂纹起始位置及扩展形式

Fig. 8 Starting positions and Propagation routes of crack on cylinder shells

2.3 裂纹扩展及断裂模式

由图 9(a)～(b)断口可知，表面萌生的拉伸裂纹先沿径向扩展一段距离再转而沿剪切方向向内壁扩展。这是因为在冲击载荷作用下，裂纹首先在外表面粗糙度较大的地方产生，形成剪切断口，裂纹进一步向内壁扩展，形成滑移型断口，断口表现为拉剪混合型的形貌。裂纹的扩展形式主要受应力状态的影响，当裂纹受到的拉伸应力较大时，裂纹呈张开型扩展，随着裂纹不断向内壁扩展，冲击载荷所产生的剪切应力未能达到使其产生剪切裂纹的应力值，裂纹的扩展为先张开、后滑移的方式。若裂纹从开裂就受到较大剪切应力的影响，裂纹就会沿 45°方向以剪切的方式扩展，形成剪切裂纹，断口就会呈现剪切形貌。在 6061 铝合金薄壁圆管试样外表面的裂纹开裂有沿径向开裂(见图 9(c))和沿 45°方向开裂的(见图 9(d))两种形式。因为裂纹的开裂形式主要是与外表面受到的应力状态有关，当表面受到的拉伸应力较大时，裂纹的开裂方式便沿径向开裂为主；当表面受到的剪切应力较大时，裂纹的开裂方式则沿 45°方向开裂为主。外壁面裂纹张开的宽度也比内壁面宽，说明圆柱管在膨胀断裂过程中，裂纹起始于外壁面。

从图 9 也可以看出，断口及外表面比较粗糙部位晶粒发生了细化，这是由于薄壁管外表面粗糙度较大的地方在膨胀变形的过程中受到的拉伸应力及剪切应力比较大，在凸凹不平的切口处发生较严重的开裂变形，从而达到细化晶粒的效果。6061 铝合金的晶界是较薄弱的环节，能量较低，当晶界处的损伤达到临界损伤条件时，外表面便产生张口和剪切口致使晶粒被拉伸和剪切细化，致使靠近断口处出现较多的微裂纹[14]。

针对圆柱壳体膨胀断裂是径向裂纹从外表面向内表面的扩张，裂纹侵彻深度可由下式计算得到：

$$y = T\sigma_s / p \tag{8}$$

式中：T 为壳体壁厚，σ_s 为屈服强度，p 为壳体内部压力。此壳体动态断裂准最早由 Taylor 提出[15]。

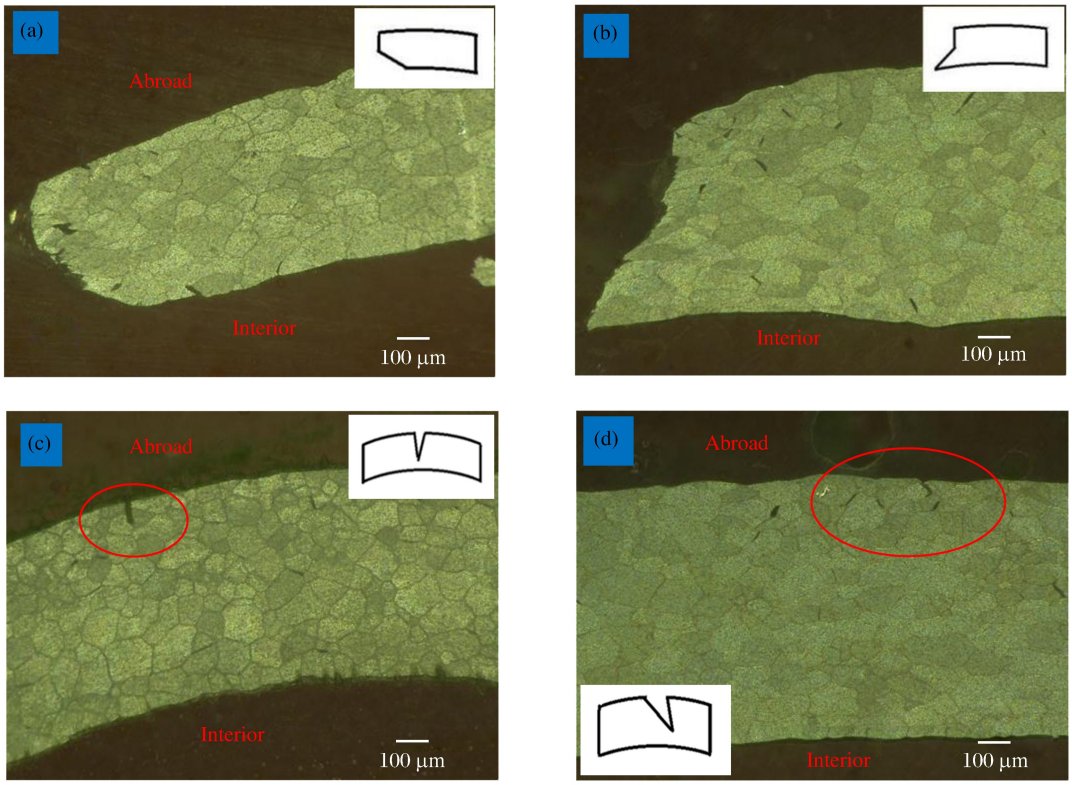


图 9 冲击膨胀断裂后断口处金相组织

Fig. 9 Microstructure of fracture after impact expansion fracture

2.4 表面形貌变化

通过冻结回收实验，可以得到不同表面粗糙度圆柱管膨胀断裂过程中从发生塑性变形到裂纹在外壁表面演化、再到圆柱管发生完全断裂的整个过程[9]。在冲击膨胀实验过程中，6061 铝合金薄壁管首先从柱壳的外表面发生塑性变形开裂最后发生韧性断裂，说明裂纹是从外表面开始产生的，如图 10 所示。在图 10 中观察到试样表面粗糙度越大，其发生塑性变形的程度就越大。这是因为切口及晶界处是最为薄弱的地方，在冲击力的作用下，外表面粗糙度较大的地方受到的拉伸及剪切应力较大，因此，6061 铝合金薄壁圆柱管在晶界及表面粗糙度较大的地方首先开裂并发生塑性变形，表面出现开裂滑移的现象，样品在最短的时间内发生开裂。

2.5 表面微观形貌

图 11 为 6061 铝合金薄壁圆柱管冲击膨胀断裂后的表面微观形貌。通过对内、外壁所受到的应力数值模拟可知，外壁所受到的环向拉伸应力比内壁要大得多，因此裂纹一般多萌发于靠近外壁表面粗糙度较大的部位。在图 11(a)中可以观察到薄壁圆柱管的外表面晶界处有很多的微裂纹及滑移的痕迹，晶界处是较薄弱的环节，当表面受到同等的应力时，晶界处首先达到临界损伤，产生图 11 中的形貌。从图 11(b)～(c)中观察到裂纹多产生于外表面凸凹不平粗糙度较大的区域，而在粗糙度较小的区域几乎没有裂纹产生。这是由于裂纹的萌发需要消耗一定的变形能，而裂纹在凸凹不平粗糙度较大的区域萌发所消耗的能量要比粗糙度较小的区域少得多。证实了宏观分析中试样表面粗糙度越大，试样的外表面越容易产生裂纹，从而更容易导致试样的开裂。在图 10(d)中观察到滑移线和微裂纹的存在，说明圆柱管在膨胀断裂的过程中，裂纹起始于外壁面，定性上与金相观察分析的现象与结论相吻合。

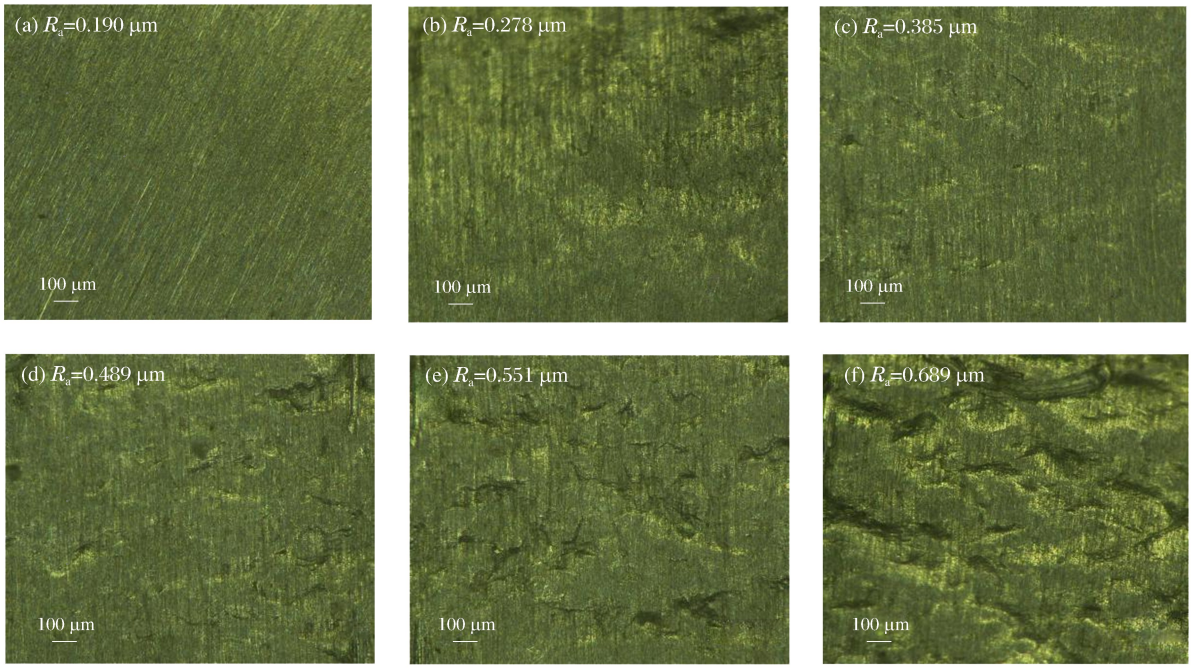


图 10　不同表面粗糙度的 6061 铝合金表面形貌变化

Fig. 10　Surface morphology changes of 6061 aluminum alloy with different surface roughnesses

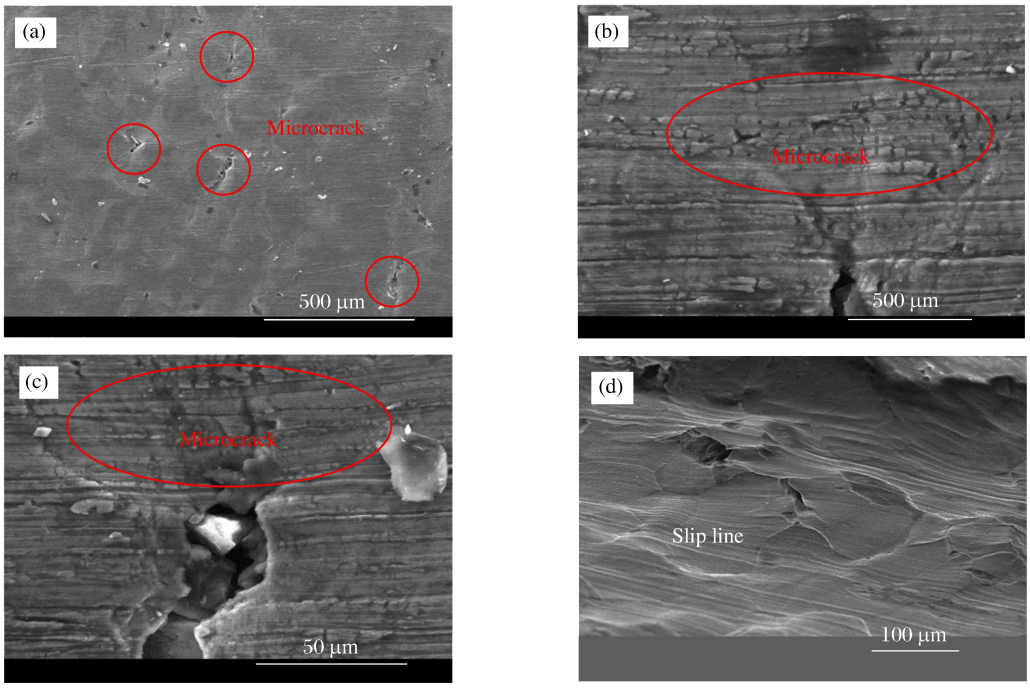


图 11　6061 铝合金薄壁圆柱管冲击膨胀断裂后的表面微观形貌

Fig. 11　Surface micro-morphology of 6061 aluminum alloy after impact expansion fracture of thin-walled cylindrical tube

2.6　断口微观形貌

图 12 为 6061 铝合金薄壁柱管断口处的微观形貌。由于 6061 铝合金属于塑形材料，其断口的特征

应表现为韧性断裂特征，但却在断口处发现了脆性材料中常出现的沿晶断裂的特征，如图 12(a)～(b)所示。对断口处放大观察发现，沿晶断裂处的晶面并不是光滑、干净的，而是有许多细小浅韧窝存在，如图 12(c)所示。由此可以判定，断口由韧性断裂和脆性断裂二者混合构成，但主要是韧性断裂[16]。

在图 12(a)中观察到断口上有很多的韧窝存在，其不仅表现为等轴韧窝的形态，还有剪切韧窝，见图 12(d)。对韧窝部位放大观察，其中受拉伸应力作用形成的是近似圆形的等轴韧窝，为正断模式，如图 12(e)所示；而受剪切应力作用形成的是呈抛物线形的剪切韧窝，并且抛物线的开口方向与切应力的方向相同，为切断模式，如图 12(f)所示。说明不同的应力状态下，断口上的韧窝呈现不同形态。在断口上两种韧窝形态并存的现象，也主要是受应力状态的影响，如图 12(d)所示。因为断口是在拉剪应力混合作用下产生的，在断裂的过程中韧窝的形成也是在拉剪应力混合作用下形成的，断口才会存在有等轴韧窝、剪切韧窝以及由等轴韧窝与剪切韧窝混合的韧窝形态。

图 12 中薄壁圆柱管微观断口形貌上同时存在着沿晶断裂特征与韧窝特征等多种断裂形式。薄壁圆柱管膨胀变形的过程中，试样内部的晶粒组织发生变形，晶界处产生损伤。随着变形的加剧，晶界处的损伤进一步累积，当达到一定的临界值时便会产生微裂纹，然而没有产生微裂纹的晶界也会累积一定程度的损伤。当裂纹向内壁进一步扩展时，会优先沿着损伤的晶界扩展，最终断裂形成断口。通过金相及表面形貌分析可知，本文中薄壁圆柱管的断口主要是在拉剪应力混合作用下形成的，裂纹首先在表面比较粗糙的地方萌生，然后在拉伸应力的作用下沿径向扩展，随后在剪切应力与拉伸应力混合作用下沿 45°方向扩展，最终引起断裂。

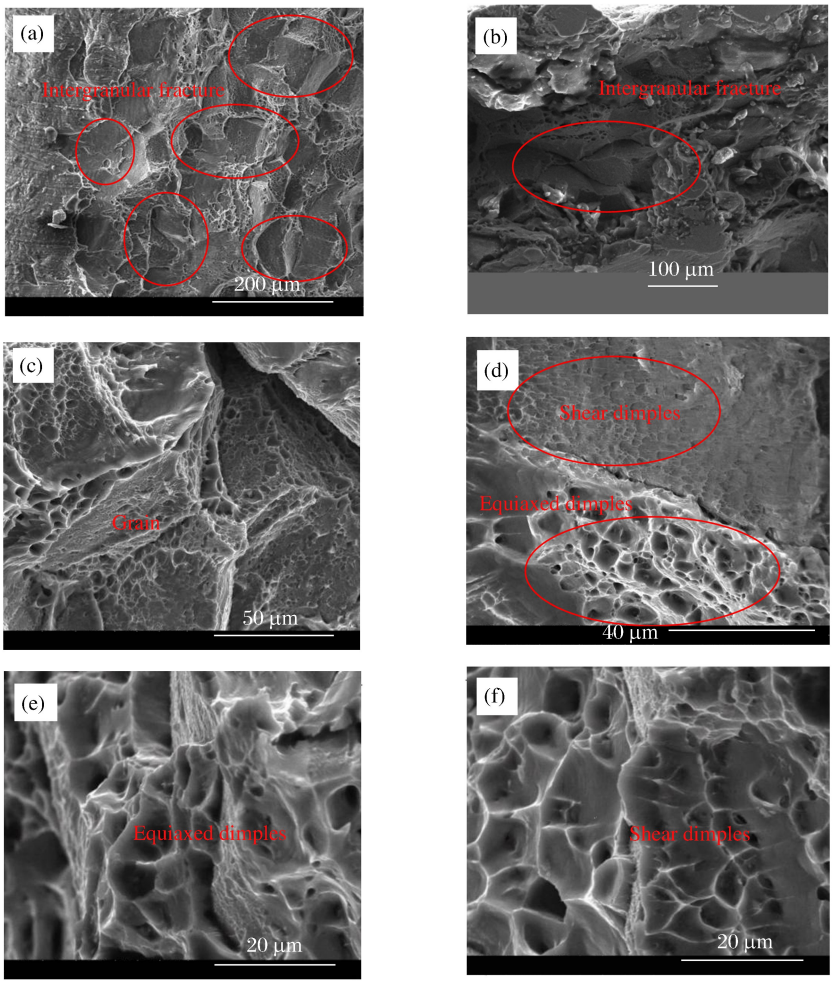


图 12 6061 铝合金薄壁柱管断口处的微观形貌

Fig. 12 Microstructure of 6061 aluminum alloy thin-walled cylinder tube

3　结　论

(1) 圆柱管裂纹的萌生、扩展主要受拉伸应力及剪应力的作用，裂纹沿 45°方向扩展。

(2) 冲击膨胀过程中，裂纹萌生于试样外壁面，裂纹的开裂与扩展受裂纹生长位置及应力状态的影响，表面粗糙度越大，越容易发生膨胀开裂。

(3) 试样在膨胀变形过程中表面有滑移线产生，并且在粗糙度较大的地方及膨胀变形严重的区域内，晶界处首先开裂产生微裂纹，同时有晶粒被拉伸细化的现象。

(4) 6061 铝合金冲击膨胀断口为拉剪混合型断口，其微观形貌特征包括韧窝特征及沿晶韧窝断裂特征，韧窝的形态有等轴韧窝、剪切韧窝及混合韧窝。

参考文献：

[1] MOTT N F. A theory of fragmentation of shells and bombs[M]. Berlin: Springer Publishing, 2006:243-294.

[2] TAYLOR G I. The fragmentation of tubular bombs[G]// Batchelor G K. The Scientific Papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor: Vol. 3. Cambridge: Cambridge University Press, 1963:387-390.

[3] 马晓青. 冲击动力学[M]. 北京：北京理工大学出版社，1992:282-294.

[4] 汤铁钢，李庆忠，孙学林，等. 45 钢柱壳膨胀断裂的应变率效应[J]. 爆炸与冲击，2006，26(2):35-39.
TANG Tiegang, LI Qingzhong, SUN Xuelin, et al. Strain-rate effects of expanding fracture of 45 steel cylinder shells driven by detonation[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(2):35-396.

[5] 汤铁钢，李庆忠，陈永涛，等. 实现材料高应变率拉伸加载的爆炸膨胀环技术[J]. 爆炸与冲击，2009，29(1):45-46.
TANG Tiegang, LI Qingzhong, CHEN Yongtao, et al. An improved technique for dynamic tension of metal ring by explosive loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(1):45-46.

[6] 汤铁钢，谷岩，李庆忠，等. 爆轰加载下金属柱管膨胀破裂过程研究[J]. 爆炸与冲击，2003，23(6):529-533.
TANG Tiegang, GU Yan, LI Qingzhong, et al. Expanding fracture of steel cylinder shell by detonation driving [J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(6):529-533.

[7] HOGGATT C R, RECHT R F. Fracture behavior of tubular bombs[J]. Journal of Applied Physics, 1968,39(3): 1856-1862.

[8] 胡八一，董庆东，韩长生，等. 内部爆轰加载下的钢管膨胀断裂研究[J]. 爆炸与冲击，1993，13(1):49-54.
HU Bayi, DONG Qingdong, HAN Changsheng, et al. Studies of expansion and fracture of explosive-filled steel cylinders[J]. Explosion and Shock Waves, 1993,13(1):49-54.

[9] 叶想平，李英雷，张祖根. 45 钢薄壁圆柱管的冲击膨胀断裂机理研究[J]. 爆炸与冲击，2014，31(3):322-327.
YE Xiangping, LI Yinglei, ZHANG Zugen, et al. Study on the fracture mechanism of 45 steel thin walled cylindrical tube[J]. Explosion and Shock Waves, 2014,31(3):322-327.

[10] 叶想平. 薄壁金属圆柱管的冲击膨胀断裂行为研究[D]. 绵阳：中国工程物理研究院，2012.

[11] 叶想平，李英雷，李英华. 基于 SHPB 装置的膨胀圆柱管实验技术[J]. 爆炸与冲击，2012，32(5):528-534.
YE Xiangping, LI Yinglei, LI Yinghua. Experimental technique of expanding cylinder tube based on SHPB device [J]. Explosion and Shock Waves, 2012,32(5):528-534.

[12] 熊峻江. 疲劳断裂可靠性工程学[M]. 北京：国防工业出版社，2008:15-17.

[13] 孙兆霞. 6061 铝合金冲击载荷作用下的变形断裂行为[J]. 轻合金加工技术，2012，40(7):65-69.
SUN Zhaoxia. Deformation and fracture behavior of 6061 aluminum alloy under impact load[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2012,40(7):65-69.

[14] 朱浩，吕丹，朱亮，等. 6061 铝合金断裂机理的原位拉伸研究[J]. 机械工程学报，2009，45(2):94-99.
ZHU Hao, LÜ Dan, ZHU Liang, et al. Study on the fracture mechanism of 6061 aluminum alloy by *in-situ* tension[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009,45(2):94-99.

[15] 高重阳，施惠基，姚振汉，等. 薄壁柱壳在内部爆炸载荷下膨胀断裂的研究[J]. 爆炸与冲击，2000，20(2):160-167.
GAO Chongyang, SHI Huiji, YAO Zhenhan, et al. Study on the expansion fracture of thin walled cylindrical shell under internal explosion load[J]. Explosion and Shock Waves, 2000,20(2):160-167.

Effect of surface roughness on impact expansion fracture of 6061 aluminum alloy thin-walled cylindrical tube

LIU Longfei, ZHOU Qiang

(*School of Materials Science and Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan* 411201, *Hunan, China*)

Abstract: Dynamic expansion crack freezing recovery tests of 6061 aluminum alloy thin-walled cylindrical tubes with different roughnesses after surface processing were carried out with the split Hopkinson pressure bar experimental technique, and the crack initiation, propagation and final fracture mode of the thin-walled metal cylindrical tubes of dynamic expansion fracture process were studied. The results show that: under the same impact pressure, the greater the surface roughness of the thin-walled metal cylindrical tube, the more prone to the expansion of the material in the process of expanding fracture; the crack initiating on the surface of the outer wall is extended from the outside to the inside, and the crack propagation is mainly affected by the stress state at the crack; the fracture mode is dominated by the tensile and shear fracture mechanism, the fracture mode is a mixed type of tension and shear fracture.

Keywords: 6061 aluminum alloy; split Hopkinson pressure bar (SHPB); thin-walled cylindrical tube; expansion fracture

(责任编辑 王玉锋)