

激光辐照下预内压低碳钢 圆柱壳爆裂断口分析*

赵剑衡^a 孙承伟^a 李思忠^b 袁永华^a 王春彦^a 刘绪发^a 张宁^a

(a 中物院流体物理研究所强辐射重点实验室 成都 523信箱 610003)

(b 中物院结构力学研究所 成都 521信箱 610003)

摘要 通过实验揭示了预内压低碳钢薄柱壳在激光辐照下裂纹萌生、扩展和止裂过程的较完整物理图象。对断口特性进行了深入分析,发现辐照区上裂纹的形成和扩展机制以韧性为主,断口在柱壳壁厚度方向有明显分层,如外层为塑性变形层,内层是韧窝或层状撕裂,部分试件的最内层出现脆性石头状断口。给出了激光辐照区应力分布与裂纹萌生之间的关系,同时探讨了激光辐照区材料金相组织变化对材料细观损伤和初始裂纹萌生的影响,有助于进一步对激光辐照下柱壳的断裂问题进行更深入的理论研究。

关键词 激光 断口 柱壳 爆裂

中图法分类号 O 432 O 38

1 引言

外热载作用下充压柱壳破坏机理的研究在民用和军事工业中都有其特殊的实际背景。国内自 80年代以来,在这方面已经开展了广泛和深入的研究工作^[1-4],国外同类研究工作常常和具体的研究对象联系在一起,因此可供参考的文献较少^[5-6]。在激光束的辐照下,充压柱壳上光斑区温度迅速上升,材料发生热软化,在热和力的联合作用下,柱壳体发生屈曲、坍塌或开裂等多种破坏形式。这是一个具有几何和材料非线性的热动力学问题,对其进行完整的数学描述和求解是困难的。目前没有公认的描述激光辐照下热弹塑性断裂问题的判据,同时薄壁板壳的 K_{rc} 随板或壳厚度变化明显^[7],而且也没有统一的测量其临界断裂参数的标准,因此对激光辐照下充压柱壳断裂问题研究具有相当的难度,目前关于这方面研究工作开展不多^[3-5]。我们试图从一个新的角度来研究这个问题,即对激光辐照下充压柱壳的断口进行分析,从细观的角度直接了解裂纹的萌生、扩展和止裂的机制,了解这种断裂过程完整的物理图象,同时探讨激光加热对柱壳材料金相组织的影响,以及由此给柱壳造成的细观损伤,对激光辐照下充压柱壳上裂纹起始萌生造成的影响。我们试图通过这些工作对建立相应的断裂判据和进一步开展理论研究提供参考。

* 国家激光技术青年科学基金(批准号 9510),国家自然科学基金(批准号 19772048),国家 863计划激光技术领域及强辐射重点实验室资助项目。

赵剑衡:男,1969年5月生,博士研究生。

1997-12-25收到原稿,1998-03-19收到修改稿。

2 实验条件和结果

激光辐照下充压柱壳的断裂与内压、柱壳的外径和壁厚、材料、激光的功率密度、光斑尺寸、激光辐照时间以及激光能量的空间分布等有密切的关系。用最大输出功率为 400W 的重复频率 YAG 激光器 (频率为 20HZ) 作外热源, 激光波长为 $1.06\mu\text{m}$, 充压柱壳材料为 05F 低碳钢, 柱壳的几何尺寸有两种: A 类柱壳的外径为 52.5mm, 壁厚 0.2mm, 高为 123mm, B 类柱壳的外径为 66mm, 壁厚 0.2mm, 高为 123mm。我们对不同激光光斑、功率密度和内压下破坏的柱壳断口进行分析。试件的具体实验加载条件和部分实验结果见表 1。图 1 给出柱壳上激光辐照区中心处产生的裂纹沿柱壳轴向扩展的示意图。同时在开裂柱壳激光辐照区部分切取金相试件, 将其用 502 胶粘在钢样上磨光, 由 4% 硝酸酒精侵蚀, 在扫描电镜下观察其显微组织变化, 以了解激光辐照对材料组织的变化和已经造成的损伤以及对初始裂纹萌生的影响。

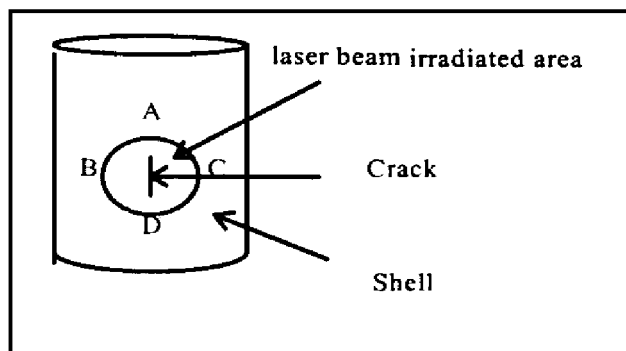


图 1 激光辐照下试件破坏示意图

Fig. 1 Schematics of experimental specimens

表 1 试件的加载条件和结果

Table 1 Loading conditions and experimental results

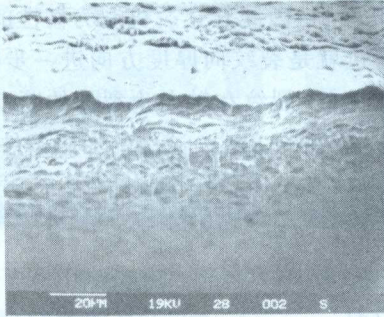
编号	输出激光强度 $/(W/mm^2)$	内压 MPa	光斑直径 /mm	柱壳直径 /mm	失效时间 /s	激光辐照区中心 鼓出位移 /mm	激光辐照区 裂纹长度 /mm
A 008	0.378	12.28	30	52.5	18.64	55.78	10.65
A 029	0.366	11.00	23	52.5	23.14	55.30	4.70
A 031	0.614	11.04	23	52.5	12.46	58.16	6.14
B002	0.373	8.78	23	66.0	24.30	69.38	4.30
B022	0.3539	8.80	30	66.0	22.10	70.40	4.16
B024	0.3539	8.81	30	66.0	23.50	69.74	7.20

3 结果分析

3.1 断口特性

A 008 试件裂纹源位于激光辐照区中心处, 裂纹沿柱壳轴向扩展, 其断口形貌如图 2 所示。从图 2(a) 中可以看到, 裂纹在起裂前, 柱壳上激光辐照区处外表面已经有显著的塑性变形, 在断口上面 (柱壳的外表面) 即裂纹起裂处留有明显边界, 当裂纹向壳壁厚度方向和轴向扩展时, 在壳壁厚度方向有约 $10\mu\text{m}$ 厚塑性变形层, 在厚度方向的其余部位分布着大量韧窝。图 2(b) 为 A 008 试件裂尖端部位的断口形貌, 断口在柱壳方向上仍旧有明显分层, 只是外形的塑性变形层厚度变薄, 内层仍为韧窝断口, 因此裂纹起裂、扩展和止裂机制都是韧性的。柱壳上激光辐照区在裂纹萌生以前经历了较大的塑性变形, 以及裂纹首先萌生于激光辐照区中心处壳壁外表面事实表明在壁厚 0.2mm 的壳壁上应力分布并不均匀。当激光辐照区中心处外表面塑性变形达到一定程度时, 外表面首先发生颈缩或表面微缺陷长大形成裂纹向柱壳的厚度和轴向扩

向扩展,而此时柱壳光斑中心处温度最高,材料强度下降最大,在热和力联合作用下它承受很大拉伸的变形,使其基体材料在第二组或夹杂处脱开,形成许多微孔洞,这些微孔洞在外载荷的作用下不断长大和聚合,最终与由外表面向壁厚方向扩展的宏观裂纹汇合在一起,这就是在断口厚度方向形成许多韧窝的原因。



(a) 裂纹源附近的断口形貌

(a) Fractograph near the origin of crack



(b) 裂纹尖端附近的断口形貌

(b) Fractograph near the crack tip

图 2 A008 试件光斑中心附近的断口形貌

Fig. 2 Fractograph of specimen No. A008

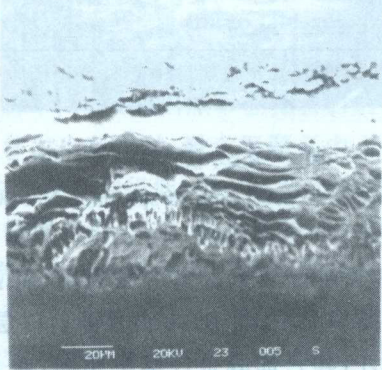


图 3 A029 试件裂纹源附近断口形貌

Fig. 3 Fractograph of specimen No. A029 near the origin of crack

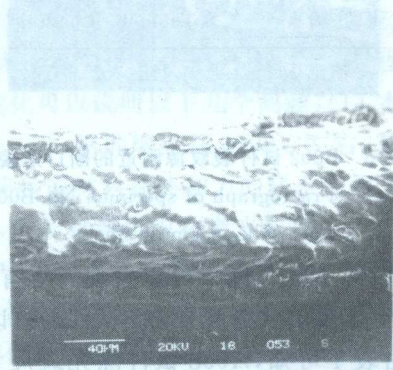


图 4 A031 试件断口形貌

Fig. 4 Fractograph of specimen No. A031

A029 试件的断口与 A008 有明显的不同,图 3 给出了其裂纹源附近断口,从中可看到裂纹起裂时其表面已有明显塑性变形,断口在厚度方向也存在分层,但是其外为层状撕裂,断口内层次分布的是大量的韧窝。这种层状撕裂仍属韧性的,它的形成一方面与薄板在轧制过程中形成饼形的晶粒和非金属夹杂物等的层状分布有关,另一方面与激光辐照区的温度场和应力分布有关,因为 A029 试件与 A008 试件的几何尺寸和材料完全相同,仅加载条件有差异。A029 试件裂纹尖端的断口与图 3 相似,A029 试件的裂纹萌生和扩展以及止裂均为韧性的。

从图 4 中可以看到大部分断口被激光烧蚀破坏,只有最内层约 10 μm 厚断层保存完好,这部分断口为石头状断口,是脆性的。从 A031 未被烧蚀的断口上看其断裂机制与 A029 试件明显不同,从表 1 可以发现 A031 试件的加载条件除功率密度比 A029 试件高外,其它基本相同。因此可以肯定地说,较高的功率密度是造成 A031 试件的断口特性发生明显转变的主要原因,

它使 A031 试件比 A029 试件更早发生破坏,且激光辐照区中心处沿径向外鼓出的位移也大于 A029 试件。

B002 试件的断口与以上试件断口有明显不同,即断口在厚度方向上分为层状撕裂层和内层约 $10\mu\text{m}$ 厚的石头状断裂层,见图 5。断口外层的层状撕裂为韧性,而内层石头状断口为脆性,因此其裂纹厚度方向发展时断裂的机制由韧性向脆性转换。B002 试件的裂纹在柱壳轴向扩展时,其断口由层状撕裂和石头状断口转变为韧窝状断口,因此其止裂机制为韧性的。

B024 试件的断口除外层的塑性变形,在断口内层也就是裂纹向厚度方向进一步扩展时,断口表现为韧窝和层状撕裂的混合,断口为韧性的,见图 6。裂纹在轴向止裂处的断口与起裂处相同。由此可见 B024 试件裂纹萌生、扩展和止裂都是韧性的。B002 试件的加载条件与 B024 试件相同,它们的断口形貌和特性也基本相同。

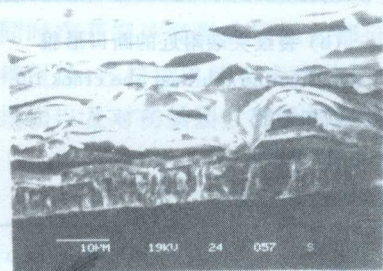


图 5 B002 试件裂纹源附近的断口形貌

Fig. 5 Fractograph of specimen No. B007 near the origin of crack

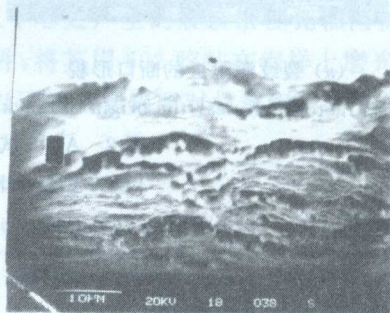


图 6 B024 试件的断口形貌

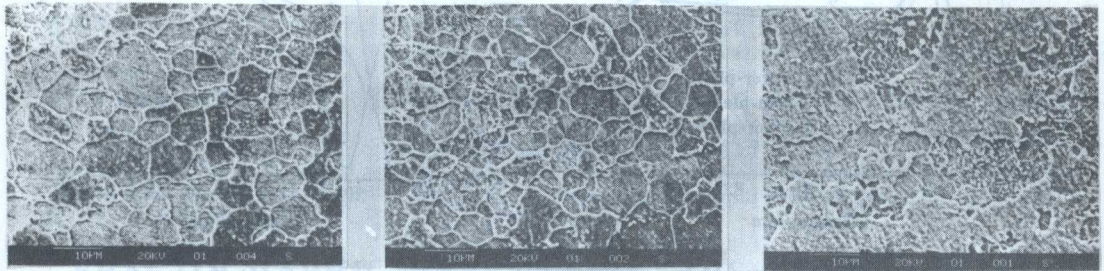
Fig. 6 Fractograph of specimen No. B024

比较以上试件断口可以发现一个有趣现象:A008 试件断口以韧窝分布为主,而 A029 试件断口上出现层状撕裂;B024 试件断口以韧窝和层状撕裂为主,而 B002 试件断口以层状撕裂为主,由表 1 可知,A008 试件除光斑尺寸比 A029 大外,其它加载条件基本相同,而 B002 与 B024 也是如此,这表明在其它加载条件相同时,受小光斑尺寸激光辐照的柱壳断口趋向于层状撕裂,而受大光斑尺寸激光辐照的柱壳断口趋向于韧窝状断口。由于 A008 和 A029, B002 和 B024 试件激光辐照区中心位移分别近似相同,那么对 A008 和 A029 试件而言, A029 激光辐照区尺寸小于 A008, A029 试件激光辐照区中心要达到与 A008 试件相同的径向位移,其激光加热区的变形要更大一些,相应的曲率半径要小一些, B002 和 B024 也是这种情况。显然这是造成受小光斑尺寸激光辐照的柱壳的断口趋向于层状撕裂的原因,尽管在本文中给出的加载条件下它没有造成辐照区的断口特性发生质的转变,但是不能排除光斑尺寸的差异进一步增大时,断裂机制发生质的变化的可能。

3.2 激光辐照区的金相组织的变化

A008 试件的原始显微组织为细的铁素体及少量颗粒状的渗炭体(Fe_3C),铁素体晶粒直径约为 $10\mu\text{m}$,如图 7(a)所示。A008 试件在光斑为 $\phi 30\text{mm}$,输出功率为 267W 的激光辐照 18.64s 时开裂,距离光斑中心 15mm 处即光斑边缘处显微组织与原始组织差别不大,表明此处的温度没有超过 910C ,未发生重结晶过程。图 7(b)为距离光斑中心 5mm 处的显微组织,铁素体

的显微组织已经细化,表明已经加热到临界点 910℃,但过热度不大,形成的奥氏体晶粒未来得及长大就停止了激光的辐照,冷却下来在低于临界点 910℃时发生多型性转变,即重结晶,细小的奥氏体转变为更细小的铁素体晶粒。图 7(c)为光斑中心处的显微组织,可以看到有的铁



(a) 原始组织 (b) 距光斑中心 5mm 处的组织 (c) 光斑中心处组织

(a) Original structure (b) Structure 5mm away from the spot center (c) Structure at the spot center

图 7 A008 试件激光辐照区的金相组织

Fig. 7 The metallograph of specimen No. A008 in the area irradiated by laser beam

素体晶粒较大,晶粒的粗细不均匀,表明该处在临界点 910℃以上过热度较大,形成的奥氏体晶粒已经开始不均匀长大,长大的奥氏体晶粒冷却时发生重结晶造成铁素体晶粒也较大。其余试件金相变化与 A008 大致相同,只是由于光斑尺寸和激光辐照时间的不同,以上过程出现的位置有所不同。激光辐照下柱壳材料的金相组织的变化可以说明以下几个问题:(1)本文中分析的试件发生断裂时,激光辐照区中心温度都高于 910℃,钢的熔点在 1600℃左右,其强度在 700℃左右下降到很低,因此在激光辐照区中心裂纹萌生前材料在热和力的联合作用下经历加大的粘塑性变形。(2)激光辐照区上裂纹萌生以前,由于材料组织在激光辐照下发生显著变化,在原始组织向奥氏体转换或奥氏体长大的过程中,在较大的外载作用下,激光辐照区发生很大的变形,这样新相与旧相之间可能会因变形不协调而产生细观损伤。由于使用 YAG 激光的能量空间分布为高斯分布,光斑中心显微组织的变化最为剧烈,因此也是激光辐照带来损伤最易发生的地方,使光斑中心易于萌生裂纹,这与实验观察和上面的断口分析一致。

3.3 数值模拟

激光辐照下充压柱壳的断裂机制准确地说与激光辐照区应力分布和材料强度有关。文献 [3]用有限元方法数值模拟了一个在激光辐照下 30CrMnSi 钢充内压柱壳爆裂前的热弹塑性应力应变场。该柱壳外径 57mm,壁厚 2mm,内压 30MPa,激光光强 10W/mm²,光斑直径 32mm。这个模型的材料和加载条件等与本文柱壳模型不同,但其基本的物理模型是一致的,反映的问题相同。计算结果表明^[3],过光斑中心的轴线与激光加热区边缘相交处的 A、D 点中面环向应力最大,过光斑中心的环线与加热区边缘相交处即 B、C 点处的中面轴向应力最大。单从受力大小上讲这四个点是危险点,见图 1。图 8^[3]给出了上述模型在激光加载 1.05s 时壳壁内、中、外面上环向应力和轴向应力沿过光斑中心的轴线方向的分布。从图 8(a)中可以发现,尽管光斑中心位置上中面环向应力不是最大的,但是考虑到光斑中心处内、外表面上环向应力值相差很大,表明在此处有很大的弯矩存在,这与前面断口分析时指出壳壁厚度方向应力分布不均匀的结论一致。并且光斑中心温度最高,材料的屈服强度和抗拉强度下降最厉害,光

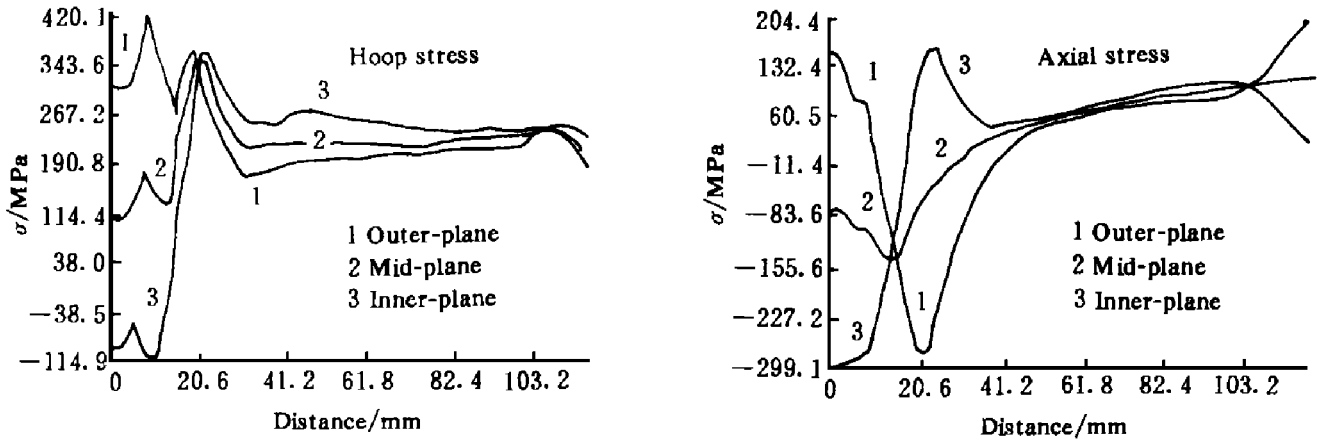


图8 应力在过光斑中心的轴线方向上的壳壁上的分布 (图中0点为光斑中心)

Fig. 8 Stress distribution along axial direction in the shell of thickness 2mm

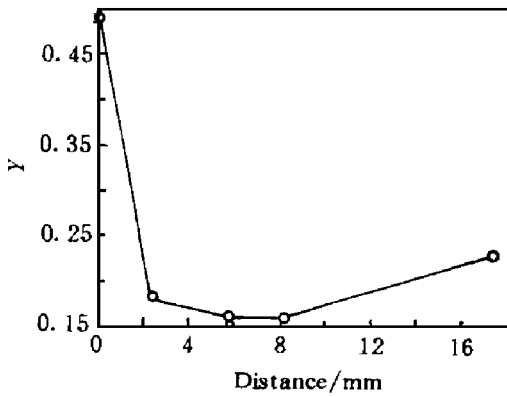


图9 过光斑中心轴线上 $Y = \sigma_0 / \sigma_b$ 的分布

Fig. 9 Parameter $Y = \sigma_0 / \sigma_b$ vs axial distance

能是一个危险点。图9给出了柱壳壁中面环向应力与其对应温度下的抗拉强度的比 Y 在过光斑中心轴线上的分布。从图9中看到, 光斑中心的中面环向应力最接近其抗拉强度, 并且此时光斑中心外表面的环向应力超过对应温度 620°C 下的抗拉强度 294MPa 因此计算结果表明在 $1 \sim 10^3\text{W}/\text{mm}^2$ 的强激光辐照下, 充压柱壳的初始裂纹是在光斑中心处外表面上萌生, 向柱壳轴向和壳壁厚度方向发展。该结果与前面断口分析部分发现裂纹萌生前柱壳激光辐照区表面发生很大的塑性变形, 裂纹由柱壳激光辐照中心外表面萌生向壳壁厚度方向和轴向扩展的现象吻合。

4 结论

- (1) 在激光辐照下, 柱壳发生沿轴向扩展的裂纹时, 初始裂纹是在光斑中心区域的外表面上萌生, 向轴向和厚度方向扩展。断口分析、金相分析以及有限元计算都支持本结论。
- (2) 充压柱壳激光辐照区裂纹的起裂、扩展和止裂机制以韧性为主。
- (3) 激光辐照下充压柱壳发生断裂时大部分试件的断口有明显分层, 即外层的塑性变形层和内层的韧窝状断口或层状撕裂的断口。部分试件厚度方向的最内层断口出现石头状的脆性断口, 表明其断裂的机制由韧性向脆性转换。裂纹在柱壳轴向发展时, 断口主要是韧性的, 但是其断口形貌在轴向扩展过程中并不单一, 表明在特定加载条件下其断裂机制有转变的可能。
- (4) 从本文分析来看, 断口形貌和特性取决于内压和激光参数如功率、光斑直径、能量的空间分布以及柱壳的几何参数和材料在高温下的强度等。其与断裂之间的具体关系需要进一步的计算和实验来说明。
- (5) 在本文实验中, 柱壳的裂纹萌生时光斑中心温度高于 910°C 。

研组人员参加了实验工作, 本工作还得到流体物理研究所章冠人研究员、中科院力学所段祝平研究员、结构力学研究所陈裕泽研究员的帮助和指导, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 赵剑衡, 章冠人, 刘绪发. 强激光辐照下柱壳温度场的数值模拟. 高压物理学报, 1996 10(1): 44~ 49
- 2 Chen Y, Li S. Buckling Failure of Axially Precompressed Cylindrical Shell Irradiated by CW CO₂ Laser Beam. AIAA 93-3231
- 3 赵剑衡, 章冠人, 刘绪发. 强激光辐照下充压柱壳结构变形的数值模拟. 高压物理学报, 1996 10(4): 262~ 268
- 4 纪 峥, 刘勇刚. 激光束照射下内压柱壳热爆破数值模拟. 强激光与粒子束, 1996 8(1): 99~ 104
- 5 Garrison JN. Thermal Stresses as a Laser Heating Damage Mechanism. AD-A 034877, 1976
- 6 Nichols JW. The Effective Fracture Toughness of Aluminum at Rapid Heating Rates AD-A 189745
- 7 杨 卫. 宏观断裂力学. 北京: 国防工业出版社, 1995 40

FRACTOGRAPHIC ANALYSIS OF LOW CARBON STEEL CYLINDRICAL SHELLS DAMAGED BY INNER PRESSURE AND SURFACE LASER IRRADIATION

Zhao Jianheng^a, Sun Chengwei^a, Li Sizhong^b, Yuan Yonghua^a,
Wang Cunvan^a, Liu Xufa^a, Zhang Ning^a

(a *Institute of Fluid Physics, CAEP, High Power Radiation Laboratory,
P. O. Box 523 Chengdu, 610003*)

(b *Institute of Structural Mechanics, CAEP, P. O. Box 521 Chengdu, 610003*)

ABSTRACT In this paper, the fractographs of low carbon steel cylindrical tanks damaged by inner pressure and laser irradiation have been analyzed. It is found that the main mechanism of crack formation and development in the area irradiated by the laser beam is ductile. Most of these fractographs have obviously layers on the shell wall due to stress distribution and deformation, for example, the outer one is induced by plastic deformation, the inner one consists of many ductile dimples or layers teared. Some fractographs show that the inner one is brittle like stone. The relations between the stress distribution and cracks, also the development process of crack, are discussed in this paper. The metallograph in the area irradiated by the laser is focused on to find some evidence to explain its original damage induced by the laser beam. All information provided here are conducive to a better theoretical study on this problem.

KEY WORDS high power laser; crack; cylindrical shell; fractograph