

文章编号: 0253-2239(2008)Supplement-0155-04

激光冲击 Al_2O_3 陶瓷中反射拉伸波破坏的预防

张凌峰 任凤章 刘 勇

(河南科技大学材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要 激光冲击过程中,反射拉伸波一直都是造成材料失效的主要破坏模式。为了进一步分析陶瓷材料的冲击性能,控制拉伸波对材料造成的破坏,从而最终达到改善其脆性的目的,使用高功率钕玻璃脉冲激光器对 Al_2O_3 陶瓷进行了冲击试验。通过在 Al_2O_3 试样背表面粘贴胶带,发现陶瓷表现出与无粘贴状态下完全不同的破裂模式。使用扫描电子显微技术观察其断口形貌并结合理论分析,发现粘贴胶带以后,对背表面的反射拉伸波能量有相当程度的衰减,大幅减少了拉应力的作用。通过计算表明,这种背面粘贴的胶带可降低冲击波能量到反射前的 40% 左右,这样就可以通过降低反射波能量来大幅减少拉伸波造成的灾难性脆断。

关键词 激光冲击; 拉伸波; 断裂; 陶瓷材料; 反射

中图分类号 TB484.5; TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200828s1.0155

Prevention for Destruction by Reflected Tensile Wave of Laser Shocking in Al_2O_3 Ceramics

Zhang Lingfeng Ren Fengzhang Liu Yong

(College of material science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China)

Abstract The reflected tensile wave is a main damage mode of materials failure in laser shock processing. The shock test of Al_2O_3 ceramic was carried on using high power Nd: glass pulse laser for further analyzing shock performance of ceramic materials and controlling the damage to improve its toughness. The different damage mode appeared through sticking film on the back of the ceramics. It can be illuminated that the energy of reflected wave is reduced to 40% of that before stucked, and the baleful rupture caused by tensile wave is greatly depressed by lessening reflected energy.

Key words laser shock processing; tensile wave; fracture; ceramic materials; reflection

1 引 言

陶瓷为典型的抗压而不抗张材料,一般认为只能应用在承受静压力的场合,在受到冲击作用时,由于冲击波在后表面的反射形成拉应力,很容易造成产品的破坏^[1]。然而随着现代战争中高科技的发展,事实已经证明陶瓷可以作为防护装甲的夹层提高其抗冲击能力^[2,3]。陶瓷的韧性在使用的过程中主要表现出来的就是抗冲击能力的好坏,特别是在低温下的抗冲击能力,而激光冲击波能提供这样一个很好的研究手段^[4~7]。

在以前的试验中,发现激光冲击陶瓷材料的断裂过程,主要的断裂模式有两种,一种为放射状裂纹,一种为锥形裂纹,在此基础上,对冲击波的破坏

机理进行了分析,发现其主要破坏方式是背反射形成的拉应力,这与陶瓷抗压而不抗张的特征是相符的^[8]。为了有效改善陶瓷材料的抗冲击能力,对冲击过程进行了改进,通过降低反射波能量来改善材料抵抗冲击能量下的破坏。

2 试验材料及方法

试验材料为在常熟华星现代陶瓷有限责任公司定制的 Al_2O_3 陶瓷,该公司生产的陶瓷量块成分非常精确、表面加工质量好并具有极佳的尺寸稳定性。经精密切割后,使用磨床加工成 $45\text{ mm} \times 45\text{ mm}$,厚度 4 mm 的试样,试样加工成形后抗压强度为 880~900 MPa,密度 $\rho = 3.65\text{ g/cm}^3$ 。

基金项目: 国家自然科学基金(50771042)资助课题。

作者简介: 张凌峰(1974—),男,博士,讲师,主要从事激光冲击强化方面的研究。E-mail: zlf-601@sohu.com

试验使用的激光机为中国科技大学和江苏大学强激光技术研究所联合研制的高功率钕玻璃脉冲激光器,激光参量如下:脉冲能量 25 J;激光波长 $1.054 \mu\text{m}$;脉冲宽度 23 ns;脉冲能量输出不稳定性小于 $\pm 5\%$;光斑直径 8 mm。

激光冲击前,在陶瓷材料表面涂覆一层厚约 0.1 mm 的黑漆能量吸收层,黑漆充分固化后,在其上覆盖一层对激光透明的 PVC 胶(粘度 $90000 \sim 100000 \text{ MPa} \cdot \text{s}$,密度 $\rho = 1.13 \text{ g/cm}^3$,厚度约 1 mm)作为约束层^[9],约束层固化后,将试样固定在试样架上进行冲击。

采用日本电子公司的 ASM-SX 型扫描电子显微镜(SEM)做断口形貌观测,为防止充电效应,试样在观测前进行喷金处理,并用导电树脂固定在试样架上。

3 试验结果与分析

3.1 激光冲击过程

图 1 为激光脉冲能量为 42 J 时的破裂形状,表现出明显的放射状裂纹,裂纹在中心点形成,并向四方扩散导致材料最终破坏,基本所有方向都是垂直断裂。在高压冲击波产生的峰值压力(1.03 GPa)高于陶瓷的断裂强度(880~900 MPa)时,裂纹直接在冲击区中心形成,微观断裂主要表现为沿晶断裂与穿晶解理断裂,即形成“冰糖状”断口和穿晶解理裂纹。由于这二者都是低能量的断裂方式,裂纹必然沿着尽可能短的路径扩展并导致断裂,所以断口基本保持在 90° 的方向上,与材料放射状裂纹的宏观表征是相吻合的。

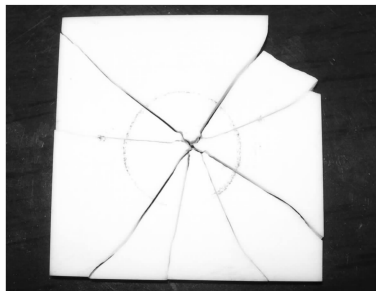


图 1 陶瓷的放射状断裂($E=42 \text{ J}$)

Fig. 1 Radial fracture of ceramic ($E=42 \text{ J}$)

图 2 为激光脉冲能量为 25 J 时的宏观破裂形状,表现出与 42 J 时放射状断裂不同的锥形裂纹断口特征,根据上下表面的断面直径尺寸以及陶瓷材料的厚度进行分析,可以发现断裂裂纹基本沿着 45° 方向扩展,一般说来在材料内产生的非垂直断裂

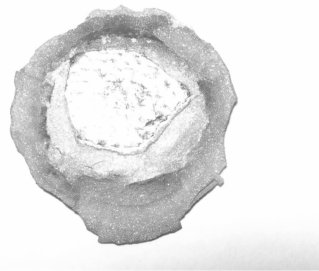


图 2 陶瓷的锥形断裂($E=25 \text{ J}$)

Fig. 2 Subulate fracture of ceramic ($E=25 \text{ J}$)

模式,其主要控制因素是拉伸波的作用^[8]。

为了进一步分析陶瓷材料的破坏机理,重复了不同功率下的冲击过程。同时考虑到以前试验中陶瓷的碎裂、崩落和飞溅,使用数层胶带在材料的背表面进行了整体粘结,但结果却出现了与前面试验完全不同的现象,在整个冲击试验结束以后,不管哪个功率下,所有的冲击材料均没有出现宏观的破裂。面对这一现象,原本以为是试验参量出现了问题,调整参量重复试验,结果依然如此,反复分析结果也没有发现参量方面的异常。

在试验结束以后,对材料表面的残余吸收层进行了清洗,并去除了背面的胶带,通过仔细观察试样,却意外的发现材料出现了一种与前面的碎裂截然不同的破裂模式。

图 3 为 4 mm 厚 Al_2O_3 陶瓷片在激光脉冲能量 42 J,也就是功率密度 $1.16 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 下的冲击试样,约束层为 PVC 胶。由于表面裂纹极细,不仔细观察很难发现,同时陶瓷试样本身有较高的反光率,所以对该试样经过了染色处理。在染色的过程中,由于处理时间过长,染色剂向裂纹内部渗透较多,所以看起来有一定的裂纹宽度,但实际上,这些都是极细的裂纹。

由图 3 可见,冲击形成的裂纹是同时具有放射性断裂模式和锥形断裂模式特征的混合裂纹,但每

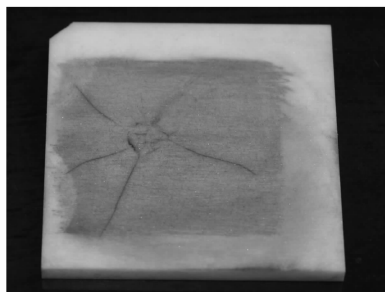


图 3 减弱背反射后形成的混合裂纹($E=42 \text{ J}$)

Fig. 3 Mixed fracture formed by weakened reflected wave ($E=42 \text{ J}$)

种裂纹都没有造成材料的宏观破裂。

2.2 反射波能量衰减分析

仔细分析整个试验过程,发现之所以出现这种变化,其主要原因是在陶瓷背面粘贴的几层胶带产生的影响。在陶瓷材料的破裂过程中,对整个材料危害最大的就是拉伸波的作用,背面粘贴胶带以后,对背表面的反射波能量有相当程度的衰减,大幅度减少了拉应力的作用,通过计算表明,这种背面粘贴的胶带可降低冲击波能量到反射前的 40% 左右。

该结论可由下式推出^[10]:

$$\frac{I_R}{I_1} = \left(\frac{B-1}{B+1}\right)^2, \quad \frac{I_T}{I_1} = \frac{4B}{(B+1)^2}, \quad (1)$$

式中 I_R 为反射波能量密度; I_T 为透射波能量密度; I_1 为到达界面的总能量密度。

$$B = Z_1/Z_2,$$

Z_1 、 Z_2 分别为 Al_2O_3 陶瓷材料和与其相邻介质的声阻抗, $Z_1 = 1.35 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 所使用的胶带纸的声阻抗较难查到,但其组份性质及性能均与硅胶有一定的相近之处^[11],所以用硅胶的声阻抗代替作近似计算,取 $Z_2 = 0.3 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,由此可得 $B = 4.5$ 。

将 B 代入(1)式可得: $\frac{I_R}{I_1} \approx 40.5\%$; $\frac{I_T}{I_1} \approx 59.5\%$ 。

本公式也可以解释在陶瓷背表面为自由端时,拉伸波产生无损反射的原因,由 Z_1 、 Z_2 分别取 Al_2O_3 陶瓷材料和空气的声阻抗, $Z_1 = 1.35 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, $Z_2 = 0.43 \times 10^2 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,可得 $B = 3.14 \times 10^4$ 。

故由(1)式可知, $I_R/I_T \approx 1$; $I_T/I_1 \approx 0$,即接近于全反射。

由此可知,在粘结胶带后,入射能量高达 59.5% 的部分通过界面透射,反射能量被大幅度降低。可见这种在陶瓷背面使用吸收层的做法可大幅度削减反射波的拉应力,从而降低对材料的危害^[12,13]。

粘结胶带后,虽然在激光功率密度 $I_0 = 1.16 \times 10^9 \text{ W}/\text{cm}^2$ 时,可产生高于材料抗压强度的冲击波峰压(1.1 GPa),但由于拉应力能量在被透射大幅削减后,又在裂纹扩展过程中被进一步耗散,所以该裂纹并没有造成整体的断裂。

除了对 42 J 能量的冲击进行研究外,也对 25 J (峰值压力为 856 MPa) 的情况下,背面贴上胶带的陶瓷在冲击后进行了观察,在材料的冲击面和背表面均未发现宏观裂纹,这一结果与上面的分析也是吻合的,由于压应力降低,材料内裂纹源或微裂纹的

生长减弱。而在材料内造成破坏的反射拉应力由于在材料内传播时能量的衰减,以及微裂纹的扩展过程的消耗已不足以提供使材料产生宏观裂纹的能量,所以陶瓷材料没有出现破裂现象。

2.3 反射波作用机理

在观察到了减弱背反射后形成的混合断口并进行分析之后,对放射状断口内是否也同时存在拉伸波造成的破坏产生了兴趣,也对在激光冲击能量的范围内单纯的压应力能否直接造成材料的断裂产生一定的疑问,经过对放射性断口重新观察,在靠近锥形裂纹相对应的断裂部位附近,在 25 倍的放大情况下,发现了一条几乎贯穿整个厚度范围的环形裂纹,如图 4 所示。

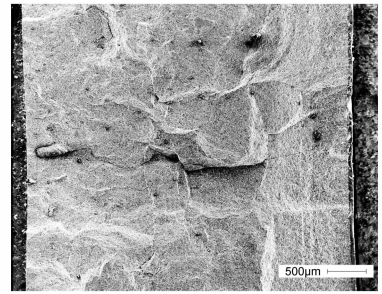


图 4 放射性断口上的内部环形裂纹

Fig. 4 Inner ring crack of the radial fracture

但这种发生在放射性断口内的环形裂纹,与图 2 所示拉伸波造成的锥形断裂的裂纹在扩展方向有一定的差异,将这一过程与前面的结果进行对比,可以发现材料的断裂并不应该是由正面的压应力直接造成的,事实上单纯的压应力也很难造成材料的宏观破裂,但由于这一应力过大,必然在材料内形成大量的裂纹源,这些裂纹源在压应力作用下是闭合的,并没有也不会造成材料的整体宏观断裂,在承受拉应力波时这些裂纹源会表现出强烈的择优扩展倾向。

同时按照冲击中心区应力最大的理论,以及压应力下的沿晶断裂倾向,可以知道这一择优取向是从中心区域开始扩展的垂直状放射性方向。这样在大的反射拉伸波到来后,闭合的裂纹源在拉应力作用下沿择优取向迅速扩展,并导致材料宏观断裂,从而造成如图 1 所示的放射状断裂。

此时的反射波除了提供放射性裂纹扩展的能量外,还使材料有锥形断裂的倾向,而放射性裂纹的扩展与材料的断裂过程又在大量的耗散反射波的能量,反射波已不足以造成材料的整体锥形断裂。最终在这样的作用下就形成了如图 4 所示的与锥形断裂并不一样的环形裂纹表征模式,它本质上是由于

过大的压应力和反射的拉应力两者共同造成的。

再来看图 3 粘贴胶带后的冲击断裂,这一理论与之也是非常吻合的,压应力虽大,但只能造成闭合的裂纹源,虽然这些裂纹源有很强的择优生长倾向,但粘贴胶带后,反射波无法达到使这些裂纹达到放射性宏观断裂的程度,也不足以造成锥形断裂,但由于大的压应力,从而形成了如图所示的混合裂纹。

由此可知,通过减弱背反射可以明显提高陶瓷的抗冲击能力。这一结果对研究以陶瓷为夹心的复合材料(如陶瓷装甲)具有极其重要的意义^[14],一直以来,人们使用帆布、尼龙布等作为陶瓷夹层的承载体,都只是考虑了它们对陶瓷碎片和子弹的支承,并没有分析过是否更有利于对反射波的衰减^[15]。

3 结 论

在背面粘贴胶带后,冲击形成的裂纹同时具有放射性断裂模式和锥形断裂模式特征,但每种裂纹都没有造成材料的宏观破裂。

背面粘贴胶带以后,对反射波能量有相当程度的衰减,大幅减少了拉应力的作用,计算表明,该方式可降低冲击波能量到反射前的 40% 左右。

通过减弱背反射能量,可以有效提高材料的抗冲击能力,从而优化背面能量吸收层可以为陶瓷夹心复合材料提供一个较好的增强及增韧手段。

参 考 文 献

- 1 Chang Mingfeng, Cheng Chaochia, Chang Shenghsung *et al.*. Investigation of optimized drilling conditions of Al_2O_3 ceramic plate by CO_2 laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 1999, **26**(5): 449~454
张铭峰,郑劭家,张胜雄等. 氧化铝陶瓷基片 CO_2 激光钻孔最佳条件之探讨[J]. *中国激光*, 1999, **26**(5): 449~454
- 2 Medvedovski Eugene. High-alumina armor ceramic tile for ballistic protection [J]. *American Ceramic Society Bulletin*, 2001, **80**(7): 25~29
- 3 Medvedovski Eugene. Alumina ceramics for ballistic protection part 2[J]. *American Ceramic Society Bulletin*, 2002, **81**(4): 45~50
- 4 Chen Jimin. Development of laser micro technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(9): 25~29
陈继民. 激光微技术的发展现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(9): 25~29
- 5 Clau Smuller, Ultich Papenburg. *C/SiC High Precision*

- Lightweight Components for Opt mechanical Applications* [M]. Bellingham: The International Society for Optical Engineering (SPIE), 2001
- 6 Krell Andreas, Blank Paul, Hongwei Ma. Processing of high-density submicrometer Al_2O_3 for new applications [J]. *J. American Ceramic Society*, 2003, **86**(4): 546~553
 - 7 Zhang Yongkang. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(3): 74~77
张永康. 激光冲击强化产业化关键问题及应用前景[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(3): 74~77
 - 8 Zhang Lingfeng, Zhang Yongkang, Feng Aixin *et al.*. Fracture characteristic of Al_2O_3 ceramics by strong laser shock processing [J]. *J. Jiangsu University*, 2006, **27**(2): 113~116
张凌峰,张永康,冯爱新等. 强激光冲击波作用下 Al_2O_3 陶瓷材料的断裂特征[J]. *江苏大学学报*, 2006, **27**(2): 113~116
 - 9 Hua Yinqun, Zhang Yongkang, Yang Jichang *et al.*. Study on theoretical thickness of free limiting layer in laser shock processing[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **29**(8): 751~754
花银群,张永康,杨继昌等. 激光冲击强化技术中自由约束层理论厚度的研究[J]. *中国激光*, 2002, **29**(8): 751~754
 - 10 Wu Bian, Wang Shengbo, Guo Dahao *et al.*. Research of material modification induced by laser shock processing on aluminum alloy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1352~1356
吴 边,王声波,郭大浩等. 强激光冲击铝合金改性处理研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1352~1356
 - 11 Liu Aihua, Zhang Yunhai, Man Baoyuan. Surface modification and ablation of polytetrafluorethylene by excimer laser irradiation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1073~1077
刘爱华,张云海,满宝元. 聚四氟乙烯材料表面激光改性与刻蚀[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1073~1077
 - 12 J. P. Chu, J. M. Rigsbee, G. Babas. Laser shock-processing effects on surface microstructure and mechanical properties of low carbon steel [J]. *Materials Science and Engineering*, 1999, **A2601**: 145~153
 - 13 Lü Hong, Zhou Guohui, Gao Kewei *et al.*. Study of tensile stress generated by dezinc layer during corrosion for brass [J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 1999, **11**(5): 269~273
吕 宏,周国辉,高克玮等. 黄铜静态腐蚀脱 Zn 层引起拉应力的研究[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 1999, **11**(5): 269~273
 - 14 Cui Lin, Ning Junsheng, Xiao Jiajia. Application of efficiency-cost principle in selecting ceramics and designing composite armor [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2002, **25**(1): 46~48
崔 琳,宁俊生,肖佳嘉. “效-费”比原则在陶瓷材料选择及复合装甲设计中的运用[J]. *兵器材料科学与工程*, 2002, **25**(1): 46~48
 - 15 Fu Suli, Ding Huadong, Lei Bingqiang *et al.*. A primary investigation of ballistic performances of ($\text{B}_4\text{C}+\text{Al}$) tri-dimension microstructure composite [J]. *J. Armor Force Engineering Institute*, 2003, (3): 17~20
傅苏黎,丁华东,雷秉强等. 碳化硼基 3DMC 材料抗弹性能的初步探讨[J]. *装甲兵工程学院学报*, 2003, (3): 17~20