

文章编号: 1001-3806(2014)05-0684-04

激光辐照下金属/炸药结构温度场的数值模拟

王文斌, 郭子如*, 张 阳, 陈世雄
(安徽理工大学 化学工程学院, 淮南 232001)

摘要: 为了分析不同功率激光对金属/炸药结构内部温度分布的影响以及炸药爆炸的可能性, 利用有限元软件, 考虑金属材料的物性参量和钢靶表面能量耦合系数随温度的变化规律, 建立了在功率分别为 55kW、60kW 和 65kW 的激光辐照下金属/炸药结构的 3 维温度分布模型, 得到了光斑中心轴线方向温度分布和金属表面中心及金属与炸药接触面的温度随时间变化曲线, 在 55kW、60kW 和 65kW 3 种功率不同的激光辐照下, 5s 末炸药表面的温度分别为 521K、550K 和 581K。结果表明, 功率越大炸药获得的温升越大越易引起爆炸, 功率增加时炸药获得的温度增量在不同时刻有所不同, 在一定辐照时间内, 炸药的温升发生在与金属接触的小区域内。这对激光辐照金属/炸药结构的深入研究具有指导意义。

关键词: 激光技术; 温度场; 有限元分析; 金属/炸药结构; 热爆炸

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.05.023

Numerical simulation of temperature field of metal/explosive structure irradiated by high energy laser

WANG Wenbin, GUO Ziru, ZHANG Yang, CHEN Shixiong

(School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to analyze effect of different power laser on the temperature fields of the metal/explosive structure and the possibility of thermal explosion of the explosive, the three-dimensional temperature field of the metal/explosive structure irradiated by 55kW, 60kW, 65kW continuous laser was calculated based on a finite element analysis software, ANSYS. In the numerical model, the variation of the physical parameters of the metal materials and the surface energy coupling coefficient of steel target with the change of the temperature was also taken into account. The temperature distribution of the facular center axis direction and the temperature variation curve of the explosive and metal surface center with the change of irradiation time, were given. Under 5s of laser irradiation with different power, i. e., 55kW, 60kW and 65kW, the surface temperatures of the explosive were 521K, 550K and 581K respectively. The greater the laser power, the higher the temperature and the easier the explosion. The temperature rise of the explosive is different when the power increases at different time. The temperature rise of the explosive occurs in a small area in contact with the metal within a certain irradiation time. These results have guiding significance to further study on metal/explosive irradiated by laser.

Key words: laser technique; temperature field; finite element analysis; metal/explosive structure; thermal explosion

引 言

目前金属材料和炸药分别在激光作用下的研究已取得了较多成果^[1-3], 而激光对金属/炸药结构的研究较少。国外, BOLEY 与 RUBENCHIK 等人^[4-5]建立了激光对炮弹的辐照作用的模型。该模型考虑了金属表面能量耦合系数的变化, 模拟计算了不同

激光参量下炸药的点火时间, 模拟结果与实验数据一致性较好。国内, WANG 等人应用 2 维非线性轴对称有限元法计算了激光对金属/炸药结构辐照作用的温度分布, 并讨论了炸药表面温度与激光参量和辐照时间的关系^[6]; ZHONG 等人^[7]用 2 维非线性瞬态导热方程计算了激光辐照金属/炸药复合介质内部的温度分布, 但未考虑金属表面能量耦合系数随温度的变化情况。JIAO 等人^[8]用生热率载荷模拟计算了在激光辐照下金属/炸药复合介质结构的温度分布。

为了使模拟计算更加符合实际, 本文中在建立

作者简介: 王文斌(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事爆破器材技术方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zrguo@ aust. edu. cn

收稿日期: 2013-10-28; 收到修改稿日期: 2013-12-13

模型时考虑了金属表面能量耦合系数及物性参量随温度的变化规律对计算结果的影响。用热流密度载荷模拟了连续激光作用下金属/炸药复合结构的3维温度分布,讨论了激光功率大小和辐照时间对复合结构温度的影响,并从热爆炸的角度分析了炸药发生爆炸的可能性,这对进一步了解激光对金属/炸药结构的辐照效应有一定的参考价值。

1 计算参量及有限元模型的建立

金属/炸药结构为一圆柱体,外层厚5mm材料为45#钢,内层炸药是半径为75mm的圆柱体材料为黑索今,圆柱体长为160mm。假设金属内表面与炸药接触理想,因为模型的结构和加载载荷都是对称的,因此计算时只需取模型的1/4。为了使计算更加的精确和符合实际,模型在进行单元格划分时,金属层从内到外分为6个单元逐渐加密,炸药层分为

两部分,与炸药接触的5mm厚区域从内到外分为5个单元逐渐加密,另一部分分为15个单元,长度方向分为30个单元,模型如图1所示。

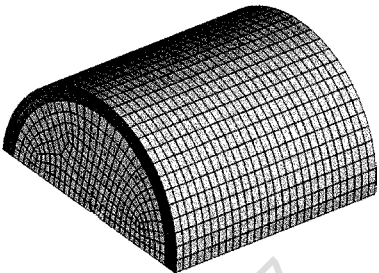


Fig. 1 Finite model of the metal/explosive structure

金属材料为45#钢,密度为7810kg/m³,随温度变化的热导率和比热容如表1所示^[9],炸药为黑索今,密度为1638kg/m³,比热容为1507J/(kg·K),导热系数为0.292W/(m·K)。

相关实验中^[10-11]得到了45#钢被波长为1319nm

Table 1 Thermal conductivity and specific heat capacity of the 45# steel at different temperature

item	value										
T/K	373	473	573	673	773	873	973	1028	1073	1173	1273
$c/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	480	498	524	560	615	700	854	1064	806	637	602
$\kappa/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	43.53	40.44	38.13	36.02	34.16	31.98	28.66	25.14	26.49	25.92	24.04

的激光辐照时钢靶表面反射率随温度的变化规律,本文中根据不透明材料能量耦合系数ε计算公式:ε=1-R(R为反射率),近似计算了钢靶在不同温度下的能量耦合系数ε,如图2所示。

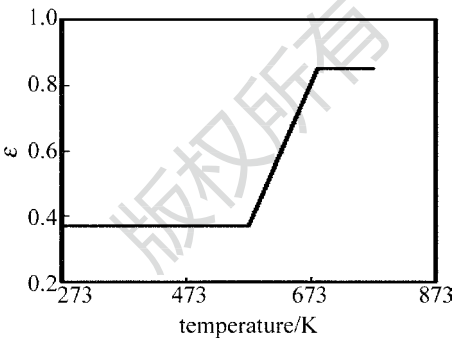


Fig. 2 Temperature dependence of thermal coupling coefficient of 45# steel

激光在金属表面作用时,其穿透金属的深度远小于金属的厚度,因此,激光对金属的辐照效应可以用金属表面的热流边界条件来处理^[12]。模型侧面边界条件为不同大小的热流密度,忽略壳体表面热对流及热辐射的影响,对称边界为绝热条件,模型的初始温度为293K。激光以垂直的方式作用于金属外壳,且激光的强度分布相同。激光参量如下:功率分别为55kW,60kW和65kW;波长为1319nm;光斑

半径r=80mm;辐照时间t=5s;热流密度载荷施加在金属外表面单元上。

2 计算结果及分析

运用有限元分析软件ANSYS进行计算,得到了金属表面和金属与炸药接触面沿光斑中心轴线方向温度随时间的变化曲线,如图3所示,t=5s时光斑中心轴线方向的温度分布如图4所示。

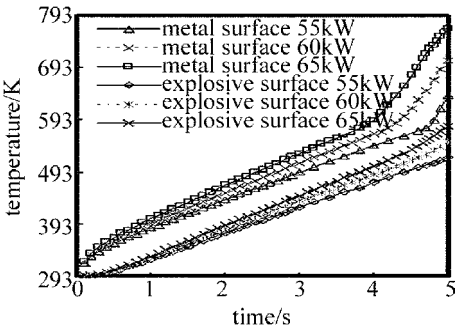


Fig. 3 Temperature history of metal and explosive surface along the central axis of laser spot

如图3所示,金属表面温度随时间的增加而升高,从图中3条金属表面温升曲线可以看出,当金属表面温度达到573K左右时均出现一明显拐点,温升明显加快,这是金属表面的能量耦合系数随温度

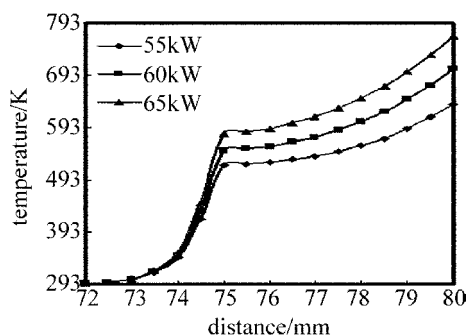


Fig. 4 Temperature distribution curves along the central axis direction when $t = 5s$

的变化引起的,由图 2 所示,当金属表面温度升至 573K 左右时,能量耦合系数出现上升趋势,钢靶吸

收的热量增多温度上升加快,因此考虑能量耦合系数随温度的变化是很有必要的;辐照功率的大小对金属表面温升有明显影响,功率越大温升越快,与 55kW 相比辐照功率增加 9.09% (60kW) 和增加 18.18% (65kW) 时,不同时刻温度增量如表 2 所示。图 3 中炸药与金属接触面的温升曲线显示:接触面的温度随时间的增加而升高,因为热量的传递需要一个过程所以曲线并未出现像金属表面温升曲线中的明显拐点;功率越大温升越大,辐照功率增加 9.09% (60kW) 和增加 18.18% (65kW) 时,不同时刻温度增量如表 2 所示。

从表 2 中可以看出, t 分别为 0.5s ~ 4s 时,金属

Table 2 Temperature rise of metal and explosive surface at different time

time t/s	temperature increase percentage/% (power increased by 9.09%)		temperature increase percentage/% (power increased by 18.18%)	
	metal surface	explosive surface	metal surface	explosive surface
0.5	7.32	3.33	14.63	6.66
1	7.08	5.77	15.04	11.54
2	7.78	6.80	16.17	13.59
3	8.22	7.90	16.44	15.13
4	8.15	7.50	18.15	15.50
5	18.31	11.69	35.26	24.19

表面的温度增量变化范围不大,且逐渐接近功率增量; $t = 5s$ 时金属表面温度增量有很大的变化,约为功率增量的 2 倍,引起温升突变的原因是金属表面能量耦合系数随温度变化。 $t = 0.5s \sim 4s$ 时,金属与炸药接触面的温度增量变化范围较大,且逐渐接近于功率增量,与金属面的温升相比较为平缓而且最终的温升幅度较小。 $t = 5s$ 时,温升幅度增大是因为金属表面能量耦合系数增大吸热增加。

图 4 表示的是 $t = 5s$ 时,光斑中心轴线方向的温度分布,轴线方向 72mm ~ 75mm 部分是炸药黑索金,75mm ~ 80mm 部分为金属。当距离圆柱中心 75mm 时。温升梯度增大,造成这种现象的原因是金属和炸药这两种介质的导热率相差很大,炸药的传热速率远小于金属。炸药层的温升主要集中在与金属接触面 2mm 厚的区域内,其它区域温升并不明显。该结果与相关参考文献^[7]中所得到的结果相似。

黑索金的 5s 爆发点为 533K^[13],如图 4 所示,功率为 55kW,60kW 和 65kW 时,金属与炸药接触面在 $t = 5s$ 的温度分别是 521K,550K 和 581K,功率为 65kW 和 60kW 时接触面的温度已经超过了黑索金

的 5s 爆发点有可能发生剧烈反应甚至爆炸,功率为 55kW 时其温度低于黑索金的 5s 爆发点。

3 结 论

利用 ANSYS 软件计算了激光辐照金属/炸药结构内部温度分布,讨论了不同功率激光对计算结果的影响。结果表明,功率越大金属/炸药结构温升越大,随着激光辐照时间延长温升越大且功率增加一定时其温度增量随时间变化而有所不同,金属与炸药接触面的温升与金属与空气接触面的温升相比,较平缓;当金属表面温度达到 573K 时金属表面能量耦合系数增大温升梯度增大;炸药热导率远小于金属,因此,炸药层的温升主要集中在与金属接触面的 2mm 厚的区域内;在金属层厚度和激光光斑半径不变的情况下,炸药是否爆炸取决于辐照时间和激光功率决定。本文中没有考虑金属表面气流对辐射效应的影响及炸药层温度升高时发生热分解所释放的热对结构温度场的影响,这些还有待深入研究。

参 考 文 献

- [1] LU C L, HU F Y, HUANG X R, *et al.* Numerical simulation of temperature and stress field of metal plates irradiated by pulsed la-

- ser [J]. Laser Technology, 2012, 36(6):754-758 (in Chinese).
- [2] MA J, ZHAO Y, GUO R, *et al.* Numerical simulation of temperature rise of material surface irradiated by the laser [J]. Laser Technology, 2013, 37(4):455-459 (in Chinese).
- [3] WANG H E, SHEN R Q, YE Y H, *et al.* Effect of reagent ratio of graphite to potassium nitrate on reactive photoacoustic characteristics [J]. Laser Technology, 2013, 37(2):274-276 (in Chinese).
- [4] BOLEY C D, FOCHS S, PARKER J, *et al.* A directed energy system for defeat of improvised explosive devices and landmines [R]. Livermore, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 2006:2-13.
- [5] BOLEY C D, RUBENCHIK A M. Modeling antimortar lethality by a solid-state heat-capacity laser [R]. Livermore, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 2005:1-13.
- [6] WANG W P, WANG X. Calculation of temperature field of metal/explosive materials irradiated by laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1999, 11(2):205-209 (in Chinese).
- [7] ZHONG M, LUO D W, ZHU Z J, *et al.* Numerical simulation of temperature field of metal/explosive materials irradiated by laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(2):137-140 (in Chinese).
- [8] JIAO L G, ZHAO G M. Numerical simulation of three-dimensional temperature field of metal/explosive irradiated by high energy laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(9):1715-1719 (in Chinese).
- [9] TAN Z, GUO G W. Thermophysical properties of engineering alloys [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994:52-53 (in Chinese).
- [10] JIAO L G, ZHAO G M. Temperature dependence of reflectivity of 45[#] steel at the wavelength of 1.319 [J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(6):983-987 (in Chinese).
- [11] JIAO L G, ZHAO G M, CHEN M S. Modeling of temperature rise of steel plate irradiated by laser [J]. Laser Journal, 2010, 31(1):25-27 (in Chinese).
- [12] WANG W P, WANG X. Calculation of temperature field of metal/explosive materials irradiated by laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1999, 11(2):205-209 (in Chinese).
- [13] HUANG W Y, YAN S L. Explosive chemistry and production [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009:41-47 (in Chinese).