

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0345-05

氧化铝陶瓷基片激光热应力切割仿真与实验

曹倩倩 胡 俊 罗敬文

(上海交通大学机械与动力工程学院机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

摘要 以氧化铝陶瓷为研究对象介绍了 CO₂ 激光热应力切割脆性材料的机理。采用 Ansys 的 APDL 编程语言, 建立三维对称的氧化铝陶瓷基片热应力切割有限元仿真模型, 研究了切割过程中的温度场和热应力场的分布, 实现裂纹尖端的扩展速度的动态仿真。研究发现激光切割路径上节点的正应力 σ_y 经历“无应力-拉应力-压应力-拉应力-无应力”的变化过程, 直至裂纹扩展; 激光功率与温度场最高温度成正比, 功率增大情况下断裂时产生的拉应力 σ_y 加大, 裂纹萌生早, 且断裂表面的微裂纹加大。最后, 采用对比实验验证了分析结果。

关键词 激光技术; 激光切割; 温度场; 热应力; 仿真

中图分类号 TG485; TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0345

Simulation and Analysis of Laser-Controlled Thermal Stress Cutting of Alumina Ceramic

Cao Qianqian Hu Jun Luo Jingwen

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract Taking example for alumina ceramic, this paper briefly introduces the mechanism of CO₂ laser-controlled thermal stress cutting of brittle materials. In order to study the distributions of temperature field and thermal stress field, a three-dimensional axial symmetric model of alumina ceramic is established by using APDL programming language of Ansys software. The normal stress σ_y of nodes which are in the laser scanning path, is in the process of "no stress-tensile stress-compressive stress-tensile stress-no stress" during cutting process, until the crack grows. The study reveals that laser power and the maximum temperature is directly proportional during the cutting process. While the laser power increases, the crack initiates earlier and the microcrack of the fracture surface becomes bigger with greater tensile stress. The results are proved by comparative experiments.

Key words laser technique; laser cutting; temperature field; thermal stress; simulation

1 引 言

陶瓷是目前应用发展最快的非金属材料, 具有硬度高、抗氧化、抗磨损、耐高温、耐腐蚀、摩擦系数低、热膨胀系数小和密度轻等优点。但由于其常温下几乎不呈现塑性变形, 加工表面易产生龟裂, 棱角处易崩裂, 且材质硬而脆, 加工难度大。由于激光具有高能量密度、非接触性等特点, 因此被广泛应用于玻璃、陶瓷等脆性材料的加工^[1]。激光热应力切割技术通过激光束在材料表面切割时引起的温度场梯度变化产生热应力, 诱导并控制裂纹扩展, 从而分割

材料。相对于传统的金刚刀切割和激光气化切割方式, 具有切割面光滑、材料没有损失、微裂纹小等优点^[2,3]。

国内外很多学者对激光热应力切割进行了理论和实验研究^[4~8]。Lumley^[9]最早提出了可控断裂激光切割理论, 并对陶瓷基片进行了切割实验。张铭峰等^[4]利用 CO₂ 激光脉冲频率的快慢, 平均功率的大小, 加上辅助气体空气吹气压力的变化及其之间的相互作用, 探讨了氧化铝陶瓷基片控制断裂切割的最佳模式。Brugan 等^[8]成功地对氧化铝陶瓷

收稿日期: 2010-03-16; 收到修改稿日期: 2010-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(50905112)资助课题。

作者简介: 胡 俊(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光加工工艺与装备方面的研究。

E-mail: hujun@sjtu.edu.cn

进行了双激光束可控断裂切割实验, Segall 等^[10]采用双节光束切割氧化铝陶瓷。Akarapu 等^[11]建立了单波长和双波长激光切割氧化铝陶瓷的三维有限元模型, 分析消融现象和热应力变化过程。Tsai 等^[12]研究了陶瓷基板的激光可控断裂切割技术, 分析断面的金相组织和切割面的构成; 研究了 YAG 激光和 CO₂ 激光同步切割厚板氧化铝陶瓷片方法^[13]; 并结合裂纹探测和补偿的图像处理技术, 研究了激光可控断裂切割的裂纹方向控制^[14]。

上述研究主要是采用实验研究方式, 文献^[15]假定裂纹的扩展速度为不变, 建立了简化的激光切割陶瓷的热应力有限元仿真模型, 随后的切割实验发现裂缝的传播是不均匀的, 其传播速度也是变化的, 仿真模型无法模拟真实的裂纹扩展速度。

本文以氧化铝陶瓷为例, 研究了激光热应力切割脆性材料的机理。建立了氧化铝陶瓷基片激光热应力切割的有限元模型, 可动态仿真裂纹尖端的扩展速度, 即裂纹尖端和激光光斑之间的距离是动态变化的, 讨论了切割过程中温度场和应力场的变化过程, 以及激光功率变化对切割效果的影响, 最后进行了实验验证。

2 基本理论

2.1 瞬态热传导方程

对于各向同性的材料, 瞬态热传导的方程为^[16]

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 z}\right) + Q = c\rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

式中 c 为材料比热容, ρ 为材料密度, Q 为内热源。 T 为温度场分布函数, t 为传热时间, k 为导热系数。

2.2 热应力方程

在热弹性力学中, 弹性体的应变由两部分组成。一部分是由应力引起的弹性应变, 另一部分是由于变温引起的应变。在各向同性体中, 线膨胀系数 α

不随方向和位置而变(在通常的热弹性力学中, 还假定 α 不随温度而变)。

对于陶瓷薄板, 假设沿厚度方向上温度均匀分布, 问题简化为热弹性平面应力问题, 即

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \mu\sigma_y] + \alpha T \\ \epsilon_y = \frac{1}{E}[\sigma_y - \mu\sigma_x] + \alpha T \end{cases}, \quad (2)$$

式中 E, μ 分别为材料的弹性模量和泊松比; σ_x 和 σ_y 分别分别为 x, y 方向的正应力; ϵ_x, ϵ_y 为 x, y 方向的正应变。

2.3 断裂准则

氧化铝陶瓷属于脆性材料, 其裂纹扩展可采用最大切向应力原则。对于激光热应力对称切割模型, 选用 I 型(张开型)裂纹模型进行分析, 其材料断裂基本判据可表示为

$$K_I \leq K_{IC}, \quad (3)$$

式中 K_I 是应力场强度因子, 其值与材料中存在的裂纹长度及外加应力大小有关, 与材料本身性质无关; K_{IC} 是材料断裂韧性, 其值与材料本身的组织状态有关。

3 数值模拟及分析

3.1 有限元模型

材料为氧化铝陶瓷基片, 具体参数见表 1, 仿真中假定氧化铝陶瓷的热物理特性参数为常数。采用 Ansys 热分析单元 SOLID70, 建立了尺寸为 30 mm × 20 mm × 0.635 mm 的对称切割模型。由于激光光斑附近温度梯度和应力梯度很大, 在激光切割路径附近的网格进行加密处理, 采用 0.1 mm × 0.1 mm 细网格, 如图 1 所示。激光切割路径与 x 轴平行, y 轴方向为裂纹扩展方向的法线方向, z 轴垂直于纸面。

表 1 氧化铝陶瓷基片材料参数

Table 1 Parameters of alumina ceramic

Density ρ / (kg/m ³)	Young's modulus E /GPa	Poisson's ratio λ	Thermal conductivity / (W·m ⁻¹ ·K)	Heat capacity C / (J·kg ⁻¹ ·K)	Thermal expansion / (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Melting point /°C
3960	350	0.25	33.5	800	7	2015

在切割过程中, 存在着激光热流密度输入和对流换热两种边界条件。由于在同一单元表面不能加载两种边界条件, 故而在 SOLID70 上覆盖一层三维表面效应单元 SURF152, 对流采用自然对流方式, 室温取 27 °C。

仿真通过 Ansys 参数化设计语言 APDL 实现。

采用间接耦合方法, 先分析激光切割过程中的温度场分布, 然后将热分析单元转换为结构分析单元, 读入温度场结果文件, 间接耦合计算热应力。采用连续 CO₂ 激光, 功率 P 为 25 W, 切割速度 v 为 4 mm/s, 激光光斑直径 $D=0.25$ mm, 光源类型为典型高斯光源, 其功率密度为

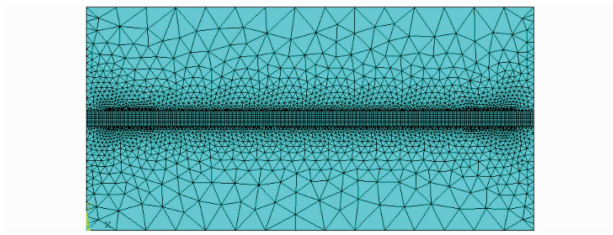


图 1 氧化铝陶瓷基片有限元模型

Fig. 1 Finite-element model of alumina ceramic

$$P(x, y) = \frac{2P_0}{\pi w^2} \exp\left(-2 \frac{d^2}{w^2}\right), \quad (4)$$

式中 P_0 为激光功率, w 为光斑半径, d 为点到光斑中心的距离。

3.2 仿真分析

由于 CO_2 激光能量不能完全被陶瓷材料吸收, 部分能量会被反射掉, 反射率与陶瓷表面的粗糙度相关。因为反射掉激光的能量难以估计, 下面结果将包含一个吸收系数的未知因素。因为激光能量较低, 力分析可以被限制在弹性变形的范围内。材料属性, 例如热传导性质和机械性能都假设与温度变

化无关。

图 2 为功率 25 W, 切割速度 4 mm/s, 3 s 时刻陶瓷基片的温度场分布状况。从图 2(a) 可以看出温度场最高点一直是激光光源所在中心点; 从图 2(b) 可以看出激光未切割区域温度为室温, 激光切割点温度迅速上升为 1150 °C。

由于为对称薄片切割, 断裂方式为 I 裂纹模型, 所以裂纹的扩展路径与激光切割路径一致。当激光不沿基片对称切割时, 其裂纹扩展路径与激光切割路径将发生分离, 属于复合断裂模式。

图 3(a) 为热应力 σ_y 分布图, 可以看到三个应力区域。在激光切割点前面和后面, 各存在着一个拉应力区域, 在激光光斑附近则存在一个压应力区域。激光光斑后面区域, 激光热源渐渐远离, 温度下降材料处于收缩状态, 产生一个拉应力; 在光斑附近, 材料吸热温度快速升高, 材料膨胀, 产生压应力; 由于激光点处材料受热膨胀, 而热量未传递到激光点前部, 此处未发生受热膨胀, 激光点处的膨胀带动激光点前面部分被动膨胀, 因而产生一个拉应力。

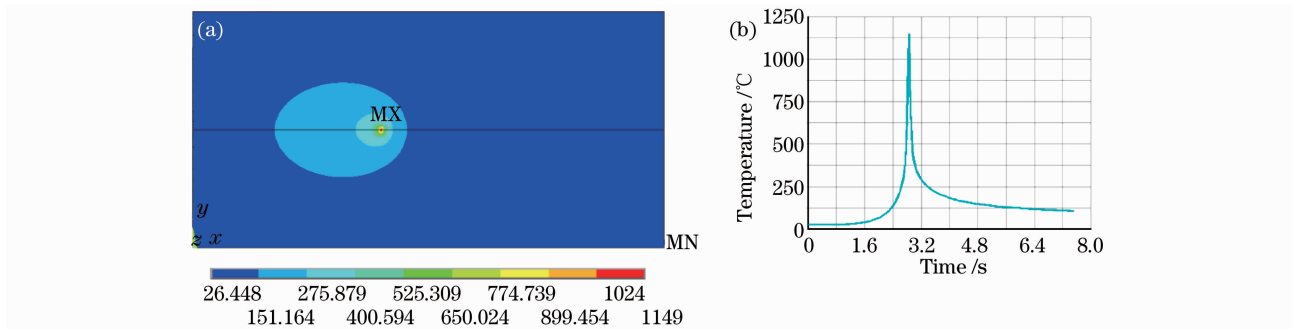


图 2 材料表面的温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of the material surface

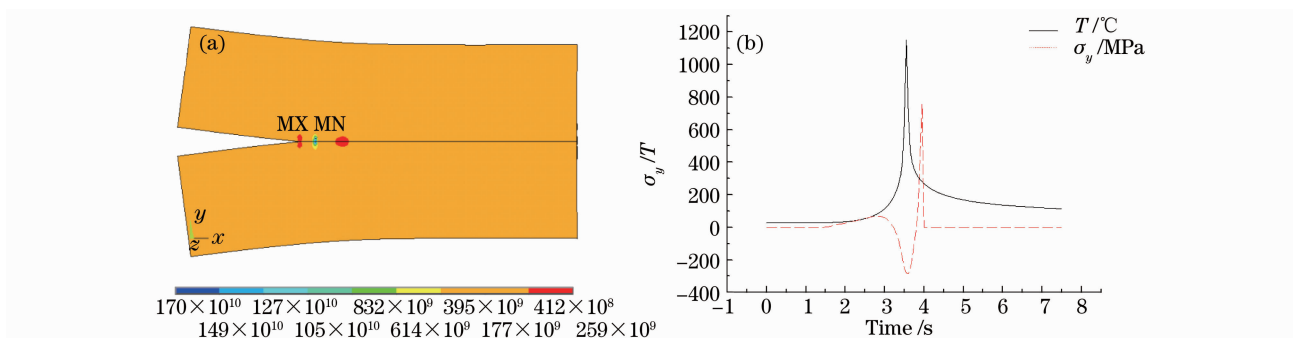


图 3 基片的热应力分布

Fig. 3 Thermal stress distribution of the substrate

图 3(b) 为温度 T 和热应力 σ_y 变化过程, 3.5 s 左右激光光斑切割到该节点, 温度迅速上升至最高点 1150 °C, 此时对应的热应力 σ_y 为最大压应力 -0.28 GPa。当激光远离该节点, 由于对流换热和

热传导温度迅速下降, 材料收缩产生拉应力。当拉应力 σ_y 达到 0.75 GPa 时, 裂纹萌生, 材料断裂, 应力迅速下降至 0 Pa。可以看出, 切割路径上的节点, 其应力 σ_y 在切割过程中经历“无应力-拉应力-

压应力-拉应力-无应力”的变化过程,直至裂纹扩展。

4 激光功率对热应力切割过程的影响分析

分别选取激光功率为 20, 25 和 30 W, 激光扫描速度为 $v=4$ mm/s, 对厚度为 0.635 mm 氧化铝陶瓷进行温度场和热应力分析。获得如图 4 所示的激光功率和切割最高温度的关系图, 对于薄板基片, 功率 P 和最高温度 T 之间基本成线性关系, 其拟合的曲线可以表示为

$$T = 45.18P + 22.7 \text{ (}^\circ\text{C)}. \quad (5)$$

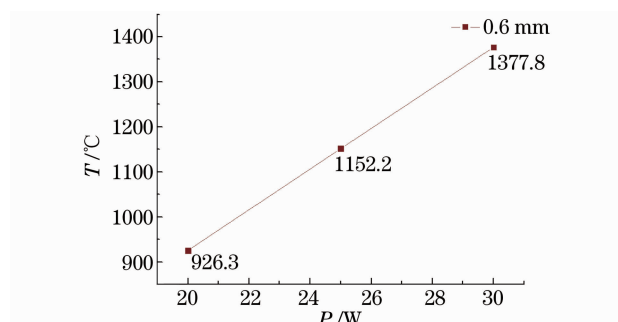


图 4 功率与最高温度的关系

Fig. 4 Dependence of the highest temperature on the laser power

进一步分析表明, 材料越薄, 其线性斜率越大, 而且斜率与激光速度等因素有关。

图 5 为氧化铝陶瓷基片在上述 3 种功率下同一节点的应力 σ_y 的变化过程, 相同参考点的正应力 σ_y 变化有着相同的趋势, 均经历了拉应力-最大压应力-最大拉应力-断裂的过程。随着功率从 20 W 变

化到 30 W, 其最大压应力也由 -0.22 GPa 变至 -0.32 GPa, 功率越大, 应力变化值也就越大。当功率越大的时候, 拉应力越早到达断裂所需要的拉力值, 越早发生断裂。

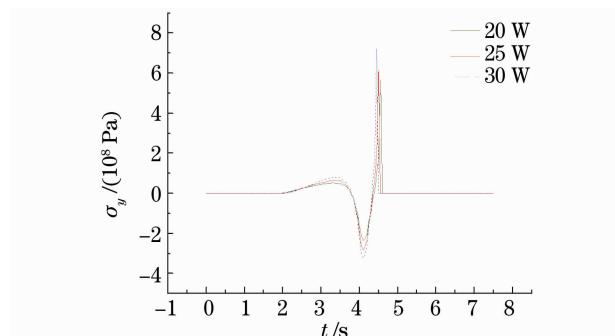


图 5 不同功率下节点上应力的变化过程

Fig. 5 Variation of the stress under different laser powers at nodes

5 实验与分析

采用纯度为 96% 氧化铝陶瓷基片, CO_2 激光切割机为上海市激光技术研究所提供的 PLATFORM M-360 激光切割机。切割速度为 4 mm/s, 工件板厚为 0.635 mm, 功率分别取 20, 25, 30 W。

图 6(a)~(c) 分别为 20, 25, 30 W 功率下的氧化铝陶瓷断面的形貌, 实测的断面粗糙度为 5.0932, 6.7544, 7.5835。可以看出, 在切割速度和工件厚度一定时, 激光功率越大, 切割断面越粗糙。

在厚度和切割速度一定时, 激光功率越大, 断裂时的临界正应力 σ_y 值越大。由于裂纹尖端的应力集中, 临界的正应力值越大, 断裂表面的微裂纹越明显, 断面质量越差。

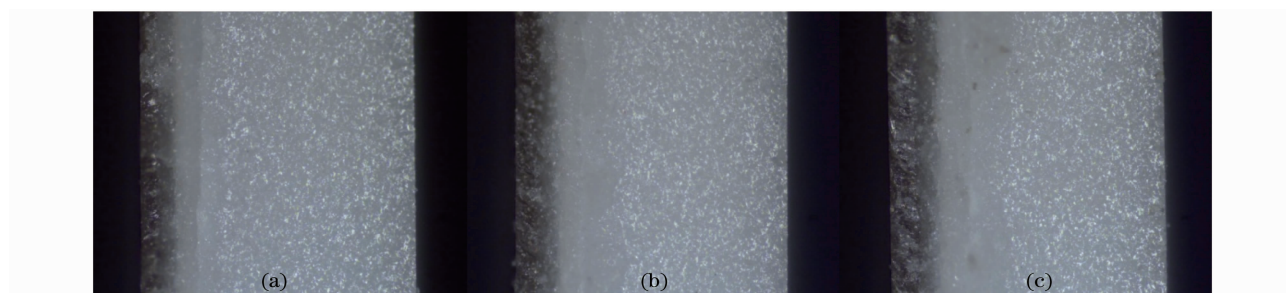


图 6 不同激光功率下切割断面的形貌图

Fig. 6 Morphology of the cutting fracture surface under different laser powers

6 结 论

建立了三维对称的氧化铝陶瓷基片热应力切割有限元仿真模型, 研究了切割过程中的温度场和热应力场的分布, 实现裂纹尖端扩展速度的动态仿真。

研究发现激光切割路径上节点的正应力 σ_y 经历“无应力-拉应力-压应力-拉应力-无应力”的变化过程, 直至裂纹扩展, 其中激光光斑后面部分的拉应力 σ_y 是导致裂纹的直接原因。有限元分析和实验都说明

激光功率和温度场最高温度成正比,功率增大情况下断裂时产生的拉应力 σ_y 加大,裂纹萌生早,且断裂表面的微裂纹加大。该研究对于其他脆性材料的激光热应力切割具有一定的借鉴作用。

参 考 文 献

- 1 Ma Nangang, Wang Xijun, Ding Huadong *et al.*. Laser cutting processing and mechanism for thick boron plate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1441~1445
马南钢, 王希军, 丁华东等. 碳化硼厚板的激光切割工艺及其机制[J]. 中国激光, 2007, **34**(10): 1441~1445
- 2 Ji Lingfei, Yan Yinzhou, Bao Yong *et al.*. Research and consideration on laser cutting technique of ceramics[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1686~1692
季凌飞, 闫胤洲, 鲍勇等. 陶瓷激光切割技术的研究现状与思考[J]. 中国激光, 2008, **35**(11): 1686~1692
- 3 Wen Jinwei, Zhang Shan, Zhang Guihua *et al.*. Control of the seam width and shape in laser cutting rotary die-board[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(1): 79~82
温劲苇, 张珊, 张桂华等. 激光切割圆形模切板缝宽和缝形的控制[J]. 光电子·激光, 2003, **14**(1): 79~82
- 4 Chang Mingfeng, Zhang Shengxiong, Zheng Shaojia *et al.*. Investigation of optimized cutting conditions of Al₂O₃ ceramic plate by pulsed CO₂ laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(11): 1045~1049
张铭峰, 张胜雄, 郑劭家等. CO₂激光控制断裂切割氧化铝陶瓷基片最佳条件的探讨[J]. 中国激光, 2000, **A27**(11): 1045~1049
- 5 Yan Yinzhou, Ji Lingfei, Bao Yong *et al.*. Theory analysis and experiment verification on crack characters during laser processing ceramics[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1401~1408
闫胤洲, 季凌飞, 鲍勇等. 激光加工陶瓷裂纹行为的理论分析及实验验证[J]. 中国激光, 2008, **35**(9): 1401~1408
- 6 Wang Yunshan, Yang Xichen, Liu Yajun. Temperature field of laser scanning line facula[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7): 981~986
王云山, 杨洗陈, 刘亚君. 激光扫描光斑温度场[J]. 中国激光, 2006, **33**(7): 981~986
- 7 Shi Jingwei, Li Liqun, Chen Yanbin *et al.*. Numerical simulation of bending properties for sheet metal with different laser source modes[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1303~1307
石经纬, 李俐群, 陈彦宾等. 不同激光热源模式下薄板弯曲特性数值模拟[J]. 中国激光, 2007, **34**(9): 1303~1307
- 8 P. Bragan, G. Cai, R. Akarapu *et al.*. Controlled-fracture of prescored alumina ceramics using simultaneous CO₂ lasers[J]. *J. Laser Appl.*, 2006, **18**(3): 236~241
- 9 R. M. Lumley. Controlled separation of brittle materials using a laser[J]. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 1969, **48**(1): 850~854
- 10 A. E. Segall, G. Cai, R. A. Akarapu *et al.*. Fracture control of unsupported ceramics during laser machining using a simultaneous prescore[J]. *J. Laser Appl.*, 2005, **17**(1): 57~62
- 11 R. Akarapu, B. Q. Li, A. E. Segall. Finite element modeling of ablation phenomena and thermal stress evolution during a unique application of dual laser cutting of ceramics[C]. TMS Annual Meeting, 2003. 87~98
- 12 C. H. Tsai, C. J. Chen. Formation of the breaking surface of alumina in laser cutting with a controlled fracture technique[J]. *P. I. Mech. Eng., B-J. Eng.*, 2003, **217**(4): 489~497
- 13 C. H. Tsai, H. W. Chen. Laser cutting of thick ceramic substrates by controlled fracture technique [J]. *J. Mater. Process. Tech.*, 2003, **136**(1): 166~173
- 14 C. H. Tsai, C. S. Liou. Applying an on-line crack detection technique for laser cutting by controlled fracture [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2001, **18**(10): 724~730
- 15 C. H. Tsai, C. S. Liou. Fracture mechanism of laser cutting with controlled fracture[J]. *J. Manuf. Sci. E-T ASME*, 2003, **125**(3): 519~528
- 16 Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer Theory [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998. 20~120
杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998. 20~120