

文章编号: 1001-3806(2004)06-0575-05

高热负荷激光介质热应力场的分析与优化研究

王军荣, 闵敬春, 宋耀祖

(清华大学 工程力学系 传热强化与过程节能教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 研究了高热负荷板状激光介质在抽运面采用常规冷却技术时, 换热面积较小的上下侧面的换热强度对激光介质最高温度及最大应力的影响情况, 并对热应力场进行了优化研究。结果表明, 任意抽运功率下, 介质的最高温度及最大应力均随侧面换热系数的变化而变化, 并存在最优换热系数。与侧面采用常规冷却手段时相比, 采用最优换热系数时介质的最大应力降幅高达 36%。另外, 对介质上下侧面进行温度控制, 也可达到与控制换热系数相同的效果。

关键词: 激光介质; 热应力; 最优换热系数; 最优控制温度

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Analysis and optimization of thermal stress field in a high power laser slab

WANG Jun-rong, MIN Jing-chun, SONG Yao-zu

(Education Ministry Key Laboratory of Heat Transfer Enhancement and Energy Conservation, Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper deals with the high power laser slab. The influence of the cooling intensities at its top/ bottom sides on its highest temperature and maximum thermal stress has been numerically investigated for the case that its pumped sides are cooled with the conventional technique. The optimization of thermal stress field has been performed. The calculation results show that for any pumped power the highest temperature and maximum thermal stress vary with the heat transfer coefficient of the top/ bottom sides and the optimum heat transfer coefficient exists. As compared to the case that the top/ bottom surfaces are cooled with the conventional technique, using the optimum heat transfer coefficient maximum thermal stress can decrease 36% and the same effect can be achieved if the top/ bottom surface temperature is appropriately controlled.

Key words: laser slab; thermal stress; optimum heat transfer coefficient; optimum controlled temperature

引 言

高热负荷激光介质作为高功率固体激光器中的关键部件, 在受到高功率抽运光作用时, 内部将产生不均匀内热源, 导致严重的热效应。其直接后果是激光功率下降、光束质量降低, 甚至使激光晶体炸裂。热效应已经成为制约激光器功率进一步提高的严重障碍。同时, 只有对激光介质进行有效的冷却才能保证其安全运行。近年来, 针对激光介质的热

效应及其冷却问题开展了一系列的研究^[1~6]。

XIE 等^[4]对板状激光介质采用对流换热时的最佳换热系数问题进行了研究, 在分析介质内温度分布时, 假设温度仅在厚度方向变化。而实际温度分布并非一维。MUDGE 等^[3]给出了侧面抽运板状激光介质采用上下面加热时的温度及应力分布, 并同理想模型(一维、常物性、均匀内热源)及非均匀内热源模型的结果进行了比较, 指出上下侧面加热可降低介质的最大应力值。但未对上下侧面不同温度控制情况下的温度及应力分布作进一步探讨。此外, 翟群、吕百达等^[6]利用二维模型研究了单面抽运板状激光介质在不同冷却方案下的温度和应力分布, 结果表明, 在 1W~10W 的抽运功率范围内, 从抽运面的对面进行冷却不利于改善光束质量, 而从上下面进行主动的温度控制是一个较好的冷却方案。

笔者对侧面双向抽运板状激光介质进行了热分

基金项目: 国家高技术研究发展计划八六三计划资助项目(2002AA744042); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20020003022)

作者简介: 王军荣(1976), 女, 博士研究生, 主要从事固体激光器传热强化的研究。

E-mail: wj01@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2003-12-04

析。研究表明,在抽运面换热强度一定的情况下,虽然上下侧面的换热面积很小,但通过对其换热强度的控制可以显著改善介质的热应力场。笔者从上下侧面的换热系数和温度控制两个方面研究了其上下侧面换热状态对介质温度场和热应力场的影响规律,并提出了最优换热系数和最优控制温度的概念,实现了对热应力场的优化。

1 模型

所研究的板状介质,其常用的冷却方式为水冷,冷却腔结构如图1所示。

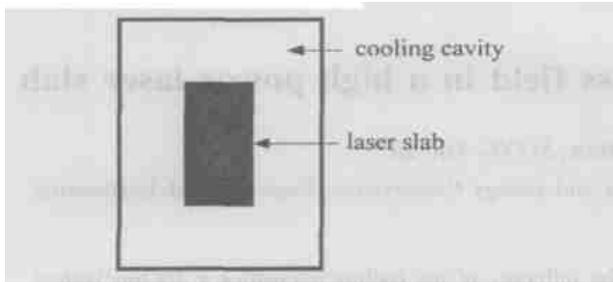


Fig. 1 Cross section of the laser slab and cooling cavity

激光振荡介质为板状 NdYAG 晶体,其几何尺寸为厚 1mm(x) × 高 4mm(y) × 长 30mm(z),如图2所示。连续抽运固体激光器中,振荡介质所吸收的

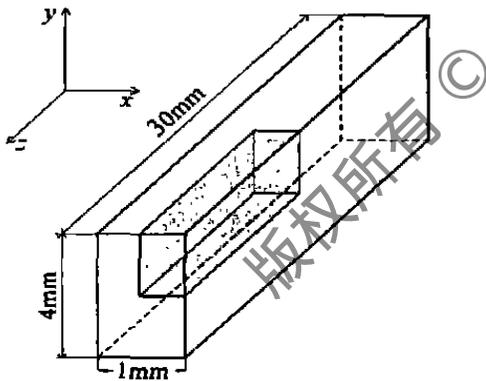


Fig. 2 Geometry of the laser slab(gray part presents the 1/8 slab, which is the computational domain)

抽运能量中只有部分作为激光输出,其余能量则转化为非均匀内热源方式存在于激光晶体中。激光介质内的传热为三维稳态导热问题,其控制方程及边界条件为:

$$\nabla(k \nabla T) + q(x, y, z) = 0 \quad (1)$$

$$k(\partial T / \partial n) |_{s} = h \cdot (T_c - T_s) \quad (2)$$

式中,下标 s 表示介质边界, T_s 为介质边界 s 处的局部温度, k 为介质的导热系数,随温度变化为^[2]:

$$k(T) = 1.9 \times 10^8 [\ln(5.33 \times T)]^{-7.14} - 33100/T \quad (3)$$

$q(x, y, z)$ 表示介质内热源。考虑到实际的固体激光器中光抽运腔的结构,以及本激光介质的几何形

状,假设抽运光从 x 方向均匀入射,并且在抽运腔多次反射,而忽略 y 方向上的抽运。所以,介质非均匀内热源为^[7]:

$$q_v = Q \cdot (\alpha/A) \cdot \frac{e^{-\alpha(X-x)} + e^{-\alpha}}{1 - e^{-\alpha A}} \quad (4)$$

式中, $Q = P \cdot \eta_h$ 为抽运光对激光介质的加热功率; P 为抽运功率; η_h 为转化为热能的份额; A 为激光介质的吸收面积; α 为激光介质的光吸收系数,单位为 m^{-1} 。

由于激光介质温度呈不均匀分布,必然存在热应力。根据应力应变关系的虎克定律,可以得到反映板状介质内部的热应力关系式为^[8]:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{(1+\nu)} \left[\epsilon_{ij} + \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \right) (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) \delta_{ij} - \left(\frac{1+\nu}{1-2\nu} \right) \alpha_p T \delta_{ij} \right] \quad (5)$$

式中, E 为杨氏模量; ν 为材料的泊松比; δ_{ij} 表示克鲁尼彻-迪尔塔符号; α_p 为材料的热膨胀系数,随温度变化为^[2]: $\alpha_p(T) = -1.78 \times 10^{-6} + 3.3 \times 10^{-8} T$ 。

2 数值模拟

由于抽运光在 x 方向均匀入射,介质完全对称,数值模拟中取介质的 1/8 进行计算,原点取在介质中心位置,如图2中灰色部分所示。所以,抽运面为 $x = 0.5mm$ 的面;上侧面为 $y = 2mm$ 的面;端面为 $z = 15mm$ 的面。计算中抽运加热功率 $Q = 100W \sim 400W$, 抽运面换热系数 $h_p = 10000W/(m^2 \cdot K)$ (对应常规水冷方式), 端面换热系数 $h_e = 50W/(m^2 \cdot K)$ (相当于空气对流), 流体温度 $T_c = 300K$ 。其它参数取值如下: $E = 300GPa$, $\alpha = 600/m$, $\nu = 0.3$ ^[2], $A = 240mm^2$ 。

3 结果与分析

由于激光介质上侧面的换热面积很小,许多研究者在采用如图1所示的冷却结构时,将其忽略,作为绝热边界条件处理。本文中通过三维控制(1)式~(5)式,研究上侧面的换热强度对介质温度场和热应力场的影响规律,并以激光介质的最大应力不超过激光介质的破碎应力(NdYAG材料所能承受的破碎应力大致在 130MPa ~ 260MPa 的范围^[1])为目标对热应力场进行优化。

3.1 上侧面换热系数 h_{top} 对介质最高温度和最大应力的影响

图3中给出加热功率 $Q = 100W$ 时介质最高温度 T_{max} 和最大应力 σ_{max} 随上侧面换热系数 h_{top} 的变

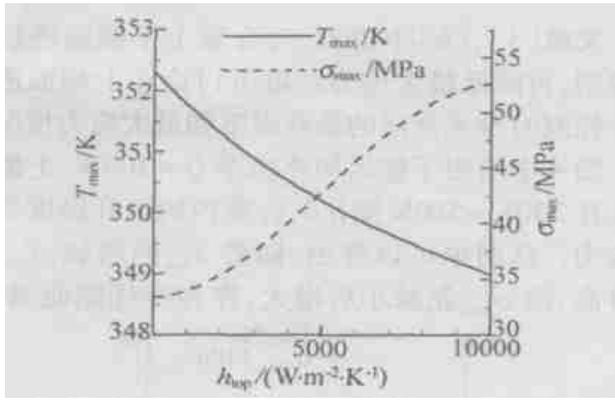


Fig. 3 Highest temperature and maximum thermal stress as functions of heat transfer coefficient on the top surface of the slab with $Q = 100 \text{ W}$

化规律。随着 h_{top} 的减小, T_{max} 逐渐增大, 而 σ_{max} 逐渐减小。与图 1 所示冷却结构相对应, $h_{top} = h_p = 10000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时, $T_{max} = 349.0 \text{ K}$, $\sigma_{max} = 53.1 \text{ MPa}$; 当 $h_{top} = 50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (相当于空气自然对流) 时, $T_{max} = 352.3 \text{ K}$, $\sigma_{max} = 33.8 \text{ MPa}$ 。侧面绝热即 $h_{top} = 0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时, $T_{max} = 352.4 \text{ K}$, $\sigma_{max} = 33.9 \text{ MPa}$ 。从 $h_{top} = 10000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 到 $50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 最高温度 T_{max} 仅升高 3.3 K , 而最大应力 σ_{max} 降低约 36.2% 。大家知道, 限制激光器功率的决定因素是介质的最大应力不超过介质的破碎应力。以最高温度稍有升高的代价大幅降低最大应力数值, 可以使激光介质的功率大幅增加。

下面, 就这一问题进行仔细分析。

由于所研究介质的 z 方向相对于 x, y 方向非常长, 可以视为无限长。因此, 简单起见, 将其温度分布 T 视为 x, y 平面的二维分布 $T(x, y)$, 表示为:

$$T(x, y) = T_a + T'(x, y) \quad (6)$$

式中, T_a 为平均温度, T' 表示局部温度偏离 T_a 的程度, 并有 $\int_A T'(x, y) dx dy = 0$ 。

表 1 中给出 $Q = 100 \text{ W}$ 时不同的 h_{top} 下介质内 T_{max} , σ_{max} , T_a 及 T' 的最小值的绝对值 $|T'_{min}|$ 。从表 1 中可以看出, 随着 h_{top} 的减小, T_a 逐渐升高, $|T'_{min}|$ 逐渐减小, 从而 σ_{max} 也随之减小。

Table 1 T_{max} , σ_{max} , T_a and $|T'_{min}|$ of the slab for different h_{top} ($Q = 100 \text{ W}$)

$h_{top}/$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	T_{max}/K	σ_{max}/MPa	T_a/K	$ T'_{min} /\text{K}$
50	352.3	33.8	348.7	7.3
1000	351.8	33.9	347.4	8.8
2000	351.3	34.1	346.2	10.2
3000	350.9	37.5	345.2	11.4

continue

$h_{top}/$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	T_{max}/K	σ_{max}/MPa	T_a/K	$ T'_{min} /\text{K}$
4000	350.5	40.7	344.3	12.5
5000	350.2	43.4	343.5	13.5
6000	349.9	45.8	342.8	14.3
7000	349.7	47.9	342.2	15.1
8000	349.4	49.9	341.6	15.8
9000	349.2	51.6	341.1	16.4
10000	349.0	53.1	340.6	17.0

而在采用理想模型(介质物性为常数、均匀内热源、一维问题)的情况下, 对板状介质而言, (1) 式简化为沿厚度 x 方向、含有内热源得一维导热方程, 即:

$$\nabla^2 T(x) = \frac{d^2 T(x)}{dx^2} = -\frac{q}{k} \quad (7)$$

边界条件同(2)式, q 为均匀内热源。

解得:

$$\begin{cases} T(x) = T_c + \frac{qx}{2h} + \frac{qx^2}{8k} - \frac{qx^2}{2k} = \\ T_0 - \frac{qx^2}{2k} = T_a + T'(x) \\ T_0 = T_c + \frac{qX}{2h} + \frac{qX^2}{8k} \\ T_a = T_0 - \frac{qX^2}{24k} \\ T'(x) = \frac{qX^2}{24k} [1 - 12(x/X)^2] \end{cases} \quad (8)$$

假定介质无限宽、无限长, 并采用平面应变、常物性假设($\epsilon = 0$), 可得:

$$\begin{cases} \sigma_{yy}(y) = 0 \\ \sigma_{xx}(y) = \sigma_{zz}(y) = -\frac{E\alpha_p}{1-\nu} \cdot T' = \\ \frac{q}{2M_s} \left[x^2 - \frac{X^2}{12} \right] \end{cases} \quad (9)$$

式中, X 为介质厚度, T_0 为中心温度, $M_s = (1 - \nu) k/E\alpha_p$ 。

由(9)式可知, 在理想模型下, 介质的最大应力出现在 T'_{min} 处, 即介质抽运面 $x = X$ 处。 $|T'_{min}|$ 越大, 应力值越高。由此可以看出, 在本文中所取的实际模型下, 其最大应力值的变化也基本是由 $|T'_{min}|$ 的变化来决定。一般来说, $|T'_{min}|$ 越大, σ_{max} 越大。

T_a 和 $|T'_{min}|$ 随 h_{top} 的变化规律不同, 主要是由于 $x = X$ 处的温度 $T(X)$ 主要由 h_p 来控制, 随着 h_{top} 的减小, 其升高的速度没有介质平均温度快。因此,

$|T'_{min}|$ 随着 h_{top} 的减小而减小, σ_{max} 也随之减小。

表 2 中给出不同功率、不同 h_{top} 下介质内最高温度和最大应力及其升/降幅。从表中可知,随着功率的增大,最优 h_{top} 也有所增加。当 $Q=100\text{ W}$ 时,最优 $h_{top}=50\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; 当 $Q=200\text{ W}, 300\text{ W}$ 时,最优 $h_{top}=1000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; 当 $Q=400\text{ W}$ 时, $h_{top}=2000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。由以上结果可知,最优 h_{top} 并不为 0。因而,传统的上侧面绝热处理方式在本文中激光介质的抽运方式(双向侧面抽运)和冷却方式(抽运面水冷)下效果并非最佳,这与文献[6]中的结论一致。

Table 2 T_{max} and σ_{max} of the slab under different h_{top} and Q

Q/W	$h_{top}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	T_{max}/K	σ_{max}/MPa	$\Delta T_{max}/\text{K}$	reduced σ_{max}
100	50	352.3	33.8	3.3	36%
	10000	349.0	53.1		
200	1000	404.7	90.5	5.5	32%
	10000	399.2	132.8		
250	1000	431.3	127.4	6.7	30%
	10000	424.6	182.6		
300	1000	458.1	169.9	8.1	29%
	10000	450.0	239.0		
400	2000	510.2	273.6	8.8	26%
	10000	501.4	372.3		

从表中还可以看出,采用图 1 所示的常规冷却结构,当 $Q=200\text{ W}$ 时, $\sigma_{max}=132.8\text{ MPa}$, 已超过介质许用应力的下限;而采用最优 h_{top} 时, σ_{max} 仅为 90.5 MPa , 远低于许用应力的下限。因此在同样的抽运功率下,上侧面采用最优 h_{top} 可以保证介质正常工作。当 $Q=250\text{ W}$ 时,常规水冷下的 σ_{max} 达 182.6 MPa , 已近介质许用应力上限,激光介质的正常工作无法保证;而采用最优 h_{top} 时, σ_{max} 仅为 127.4 MPa , 低于许用应力的下限。所以,以介质能够承受的破碎应力下限为标准,通过上侧面采用最优 h_{top} , 激光介质的抽运功率可以从 200 W 增加到 250 W 左右。

另外,表中结果还显示,在 $h_p=10000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、 $Q\geq 300\text{ W}$ 的情况下,即使采用最优 h_{top} , 最大应力仍然高于介质的许用应力下限。所以上侧面的换热状况只能在一定范围内改善介质的应力分布。为了最大限度的改善介质的工作状况,需要同时考虑控制抽运面的换热状况。

3.2 上侧面的温度控制对介质最高温度和最大应力的影响

文献[3], [6]中提到,对介质上下侧面进行温度控制,可降低最大应力。以下讨论在上侧面进行温度控制时激光介质的最高温度和最大应力情况。

图 4 中给出了抽运加热功率 $Q=100\text{ W}$ 、上侧面温度在 $330\text{ K}\sim 360\text{ K}$ 变化时介质内的最高温度和最大应力。从图中可以看出,随着 T_{top} 的增加, T_{max} 逐渐升高,而 σ_{max} 先减小后增大,存在最优侧面温度。

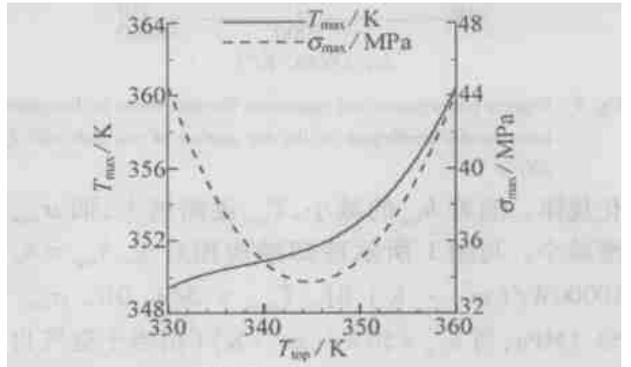


Fig. 4 Variations of highest temperature and maximum thermal stress with top surface temperature($Q=100\text{ W}$)

表 3 中给出了不同 T_{top} 下介质内的 T_{max} , σ_{max} , T_a 及 $|T'_{min}|$ 。由表可见,随着 T_{top} 的增加, $|T'_{min}|$ 先减小后增大,所以 σ_{max} 也随之先减小后增大。 $T_{top}=348\text{ K}$ 时, $T_{max}=352.2\text{ K}$, σ_{max} 达到最小值 33.8 MPa 。这个结果与 $Q=100\text{ W}$ 时,采用最优 h_{top} 时所得到的结果基本一致。表 4 中给出了不同加热功率下,上侧面

Table 3 T_{max} , σ_{max} , T_a and $|T'_{min}|$ of the slab under different T_{top} ($Q=100\text{ W}$)

T_{top}/K	T_{max}/K	σ_{max}/MPa	T_a/K	$ T'_{min} /\text{K}$
330	349.4	44.2	341.6	12.5
335	350.2	39.2	343.5	10.4
340	351.0	34.3	345.4	8.6
345	351.8	33.9	347.3	7.4
348	352.2	33.8	348.4	7.1
350	352.8	34.7	349.2	7.5
355	356.2	39.3	351.0	8.8
360	360.4	43.9	352.8	10.0

Table 4 T_{max} and σ_{max} of the slab under optimum h_{top} and optimum T_{top} with different Q

Q/W	100	200	300	400
optimum $h_{top}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	50	1000	1000	2000
case1 T_{max}/K	352.3	404.7	458.1	510.2
σ_{max}/MPa	33.8	90.5	169.9	273.6
optimum T_{top}/K	348	393	437	468
case2 T_{max}/K	352.2	405.0	458.1	509.9
σ_{max}/MPa	33.8	90.5	169.9	273.5

采用最优 h_{top} 和最优 T_{top} 时的介质的最高温度和最大应力。从表中可以看出, 两者结果也基本一致。所以可以认为, 通过对上侧面的温度控制可以获得其采用最优 h_{top} 时的效果。由于上侧面的换热系数与冷却结构等多种因素相关, 对应不同的加热功率, 将其控制到不同的换热系数难度较大, 而温度控制相对可以做到较高精度, 更容易实现。关于上侧面温度控制的实验技术有待进一步的研究。

4 结 论

用数值模拟的方法研究了固体激光介质在不同加热功率下, 抽运面采用常规冷却技术时, 上下侧面换热强度对激光介质最高温度及最大应力的影响情况。

结果表明: (1) 介质的最高温度和最大应力随上下侧面换热系数而变化, 并存在最优换热系数。采用最优换热系数时, 最高温度稍有升高, 但最大应力值大幅降低, 从而可保证介质在更高的抽运功率下正常工作; (2) 任何功率下, 最优换热系数均不为 0, 因而采用传统的绝热处理方式并不能获得最佳效果; (3) 对介质的上下侧面进行温度控制时, 随着侧面温度的增加, 介质内最高温度逐渐增加, 而最大应

力先减小后增大, 所以存在最优侧面温度; (4) 不同功率下, 上下侧面采用最优温度时介质内的最高温度和最大应力, 与对应功率下上下侧面采用最优换热系数时的结果基本一致。所以, 实际应用中可通过采用精度更高、更易实现的温度控制法来实现降低最大应力的目的。

参 考 文 献

- [1] WEBER R, NEUENSCHWANDER B, DONALD M M *et al.* Cooling schemes for longitudinally diode laser pumped Nd:YAG rods [J]. IEEE J Q E, 1998, 34(6): 1046~ 1053.
- [2] BROWN D C. Nonlinear thermal and stress effects and scaling behavior of YAG slab amplifiers [J]. IEEE J Q E, 1998, 34(12): 2393~ 2402.
- [3] MUDGE D, OSTERMEYER M, VEITCH P J *et al.* Power scalable TEM₀₀ CW Nd:YAG laser with thermal lens compensation [J]. IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(4): 643~ 649.
- [4] XIE W J, TAM S C, YANG H R *et al.* Optimum convective heat transfer coefficient for diode pumped laser slabs [J]. Optics and Laser Technology, 1999, 31(5): 387~ 391.
- [5] TSUNEKANE M, TAGUCHI N, INABA H. Improvement of thermal effects in a diode end pumped, composite Tm:YAG rod with undoped ends [J]. Appl Opt, 1999, 38(9): 1788~ 1791.
- [6] 董 群, 吕百达, 邵怀宇 *et al.* 二极管侧泵浦板条固体激光器的热效应研究 [J]. 强激光与粒子束, 1997, 9(4): 611~ 616.
- [7] 王军荣, 闵敬春, 宋耀祖. 板状激光振荡介质温度场和应力场的数值模拟 [J]. 工程热物理论, 2003, 24(5): 855~ 857.
- [8] 竹内洋一郎. 热应力 [M]. 北京: 科学出版社, 1977. 49~ 51.

• 简 讯 •

敬告作者

投稿时请注意:

1. 为了方便联系, 请提供确切的通信地址、单位名称、部门、电话、E-mail 等信息。

2. 应加强对摘要的撰写! 摘要是文章的真正概要, 应该全面、简要: 减少背景类的知识介绍; 不要用修饰语; 不要出现方程、图、表、参考文献、特殊字符等。作者应组织好文章的主要概念并清楚、简要地表达出来, 才能实现摘要应有的作用, 传达重要的可检索信息。

一般的研究性论文其摘要必须包括被报道的研究项目的目的、使用方法、结果和结论, 不应太短; 也不要重复标题中已给出的内容; 不要使用多余的词语, 如“据报道……”, 或“大量的研究表明”; 摘要中不要写作者将来的打算。

对于文献综述, 只需简要说明文章的内容, 而不报道文章中使用的方法及得出的结果。

对于发展现状综述, 除了陈述文章的主题范围外, 还要给出文章得出的结论。

3. 英文摘要相当重要! 最好是中英文一致。原则是平铺直叙。

4. 英文版稿件中应有中文题目、作者姓名、单位、摘要、关键词、中图分类号。

投稿时请注意“投稿”字样! 谢谢合作!