

## 电弧风洞模拟 ZnS 红外窗口表面温度响应

袁 竭, 隆永胜, 赵顺洪, 周 玮, 杨 斌

(中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

**摘 要:** 为了开展红外窗口地面试验研究, 需用电弧风洞准确模拟出红外窗口表面温度响应过程, ZnS 具有红外透明性, 地面流场模拟试验中, 在不影响其流场状态情况下较难获得其表面温度, 因此无法模拟出红外窗口的温度响应过程。介绍了在电弧风洞上模拟 ZnS 红外窗口表面温度响应的方法, 首先使用与 ZnS 相似热物性参数的 2Cr13 获得表面温度, 接着模拟出红外窗口流场状态及温度响应过程, 最后通过电弧风洞流场试验进行验证。研究表明: 在 150~250℃ 温度区间, 2Cr13 与 ZnS 在电弧风洞流场试验中的温度响应一致。使用与 ZnS 相似热物性参数的 2Cr13 测试 ZnS 表面温度实现电弧风洞模拟 ZnS 表面温度响应具有一定可行性。

**关键词:** ZnS; 2Cr13; 红外透明性; 电弧风洞

**中图分类号:** TJ76 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0604001

## Simulation of ZnS infrared window surface temperature response by arc-heated wind tunnel

Yuan Jie, Long Yongsheng, Zhao Shunhong, Zhou Wei, Yang Bin

(Hypervelocity Aerodynamics Institute of China Aerodynamics Research and Development Center,  
Mianyang 621000, China)

**Abstract:** In order to develop related researches of infrared window, it is necessary to simulate surface temperature response of infrared window exactly. As the property of infrared transparency, it is hard to obtain the surface temperature of ZnS without disturbing the flow field, thus it is not possible to simulate the temperature response process of infrared window. A method was introduced to simulate the surface temperature response of ZnS infrared window by arc-heated wind tunnel. First, the surface temperature of ZnS was measured by using 2Cr13 which had similar thermophysical properties with ZnS. Then, the temperature response process of infrared window was simulated. Finally, several tests were taken to identify this method by arc-heated wind tunnel. The result shows that 2Cr13 and ZnS have the same temperature response properties when tested in arc-heated wind tunnel flow field at temperatures between 150–250 °C. It is reliable to measure the surface temperature of ZnS by using 2Cr13 which has similar thermophysical properties with ZnS in arc-heated wind tunnel simulation test.

**Key words:** ZnS; 2Cr13; infrared transparency; arc-heated wind tunnel

收稿日期: 2016-10-10; 修订日期: 2016-11-20

作者简介: 袁竭(1987-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事气动防热试验方面的研究。Email: yuanjie2005@163.com

## 0 引言

ZnS 是一种重要的宽禁带 II-VI 族发光材料<sup>[1]</sup>, 作为一种宽禁带化合物半导体材料, 具有热红外透明性、荧光和磷光等独特的光物理特性<sup>[2-5]</sup>, 在光致发光和电致发光器件、太阳能电池激光器等领域有着重要的用途, 特别是 ZnS 具有热红外透明性, 可应用于超音速导弹的红外窗口, 在航空航天领域具有不可替代的作用<sup>[3-8]</sup>。

要开展红外窗口热结构研究、热辐射对导引头的影响研究、光传输特性研究等, 都需要开展地面电弧风洞试验, 其中模拟出红外窗口飞行时温度响应过程是研究的关键点, 然而 ZnS 具有红外透明性, 很难获得其表面温度<sup>[9,11]</sup>。常规的非接触式测温设备如红外成像仪、比色高温计等都因为 ZnS 具有红外光透性而无法应用; 接触式测温设备如热电偶等会影响 ZnS 表面的流场状态。因此, 研究流场中 ZnS 表面温度测试技术对航空航天武器型号的研制具有重要意义<sup>[12-13]</sup>。文中介绍了在电弧风洞上模拟 ZnS 红外窗口表面温度响应的方法。

## 1 ZnS 表面测温技术思路

ZnS 作为红外窗口在武器型号上应用较广, 武器抛罩的 10 s 时间内 ZnS 受气流的干扰温度迅速上升, 150~250℃温升特别剧烈, 对 ZnS 强度是较大的考验, 模拟 ZnS 在该温度区间的温升过程是武器型号验证的重要工作之一。测量流场中 ZnS 表面温度, 使用接触式测量方法会影响流场, 因此, 考虑使用非接触方式的测量; 而 ZnS 热红外透明性限制了非接触式测量。文中使用与 ZnS 具有相似热物性参数的 2Cr13 钢板替代 ZnS 进行表面温度测量。表 1 给出了 2Cr13 与 ZnS 的物理参数, 2Cr13 参数来源于参考文献[15], ZnS 参数来源于制造厂家, 从表 1 可知: 2Cr13 与 ZnS 在 100~250℃热导系数及比热容相近, 同时密度约  $7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 因此 100~250℃温度区间在外部流场一定的情况下, 两者内外表面的温度响应也应该相近。2Cr13 钢板不具备热红外透明性, 使用与 ZnS 相同形貌的 2Cr13 钢板在流场中进行试验, 通过红外热像仪测试 2Cr13 钢板表面温度间接

获得 ZnS 在流场中的表面温度, 并监测 2Cr13 钢板及 ZnS 背面温度响应是否一致, 以验证表面温度测试的准确性。

表 1 ZnS 及 2Cr13 热导率及比热容<sup>[15]</sup>

Tab.1 Heat conductivity and specific heat capacity of ZnS and 2Cr13

Temperature/ ℃	Heat conductivity /W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>		Specific heat capacity /J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	
	ZnS	2Cr13	ZnS	2Cr13
25	24.9	-	459	460
50	24.2	-	468	-
100	22.8	22.2	484	-
150	21.5	-	502	-
200	20.2	23.4	517	-
250	19.04	-	534	-
300	17.96	24.7	550	511
350	16.98	-	566	-
400	16.1	25.5	582	532
450	15.33	-	598	-
500	14.69	26.4	616	548
550	14.15	-	632	-
600	13.74	-	649	574

## 2 ZnS 表面测温技术验证研究

### 2.1 2Cr13 发射率标定

如图 1 所示, 将 2Cr13 钢板放置在加热板上, 钢板长×宽×厚为 120 mm×80 mm×15 mm, 其表面粗糙度 Ra 小于 3.6, 钢板在常温下静放一段时间, 通

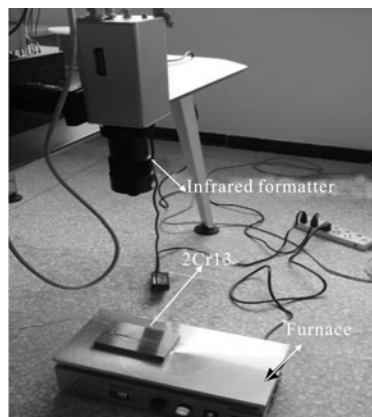


图 1 2Cr13 发射率标定

Fig.1 2Cr13 emissivity calibration

过加热板将 2Cr13 钢板加热到设定温度,同时在 2Cr13 钢板表面焊接热电偶,将热电偶连接到数据采集系统上读取 2Cr13 钢板热电偶温度  $T_0$  [16]。在 2Cr13 钢板正上方安装了 LumaSpec RT 红外热像仪,通过红外热像仪检测热电偶测试点处的热像仪温度  $T_f$ ,调整红外热像仪发射率  $\varepsilon$  使热像仪温度  $T_f$  与热电偶温度  $T_0$  相等,获得 2Cr13 钢板在该温度下的发射率  $\varepsilon$ 。

改变加热板的温度,测得不同温度下 2Cr13 钢板的发射率,如图 2 所示。从图 2 可知:随着温度的增加,2Cr13 发射率先迅速降低,随后缓慢降低,最后趋于稳定。当温度从 100 °C 增加到 150 °C 时,发射率从 0.292 迅速降低到 0.155;温度从 150 °C 增加到 250 °C 时,发射率从 0.155 缓慢降低到 0.145;当温度大于 250 °C 时,发射率趋于常数 0.135。

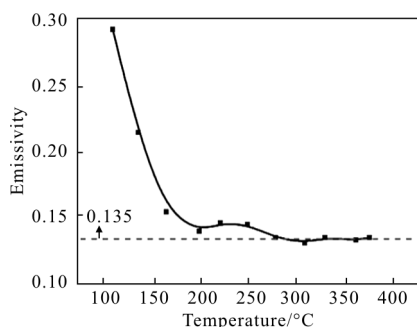


图 2 2Cr13 不同温度下的发射率

Fig.2 2Cr13 emissivity at different temperatures

发射率是物体本身的热物性之一,影响其数值的因素较多,如导电性能、粗糙度、辐射方向、微观结构、杂质缺陷、表面氧化程度等。温度对发射率的影响可以转化为温度对电阻率的影响。材料类型不同,温度对其发射率的影响也不相同。金属的电阻率是由于金属中原子对电子的散射形成的。金属的电阻率一般随温度升高而增大,电阻率增大的结果通常使大多数金属材料的发射率随温度增加而增加。克罗塞(Kruse)等人认为:大多数金属发射率近似地随其绝对温度成正比增大,而比例常数随金属在标定的基本温度下电阻率的平方根变化。如图 2 所示,2Cr13 发射率随着温度的增加反而降低,这与 2Cr13 钢板表面的氧化皮相关;2Cr13 虽然是不锈钢,但其表面氧化是一直存在的,即使是在常温下也发生氧化,其氧化层从外到里依次是  $Fe_2O_3$ 、

$Fe_3O_4$ 、 $FeO+Fe_3O_4$  和  $Cr_2O_3$ , 在常温下其厚度为 0.1~0.3  $\mu m$ , 高温充分氧化后其厚度大于 50  $\mu m$ , 其中  $Cr_2O_3$  层最厚,因此,在测试 2Cr13 钢板发射率时,其表面氧化层一直存在,一般非氧化的不锈钢发射率为 0.05~0.07, 而试验测试 2Cr13 发射率 100 °C 为 0.292, 也说明了 2Cr13 钢板表面氧化皮的存在[17]; 另外,量子理论研究表明[18]:物质吸收和发射红外光的实质是分子偶极矩的变化与光的震荡电场相互作用的结果,当红外辐射光子频率与晶体内部晶格或自由电子振动频率相当时,强烈耦合吸收和辐射红外波,红外短波区的辐射主要与电子跃迁有关,红外长波区的辐射主要与晶格振动相关,金属材料辐射主要与电子跃迁有关,温度增高电子跃迁越活跃,其跃迁的能级越多,具有更宽的能带,可以吸收更宽波段的红外线,所以发射率增高,非金属材料辐射主要与晶格振动相关,温度增高晶格振动频率越高,与一些频率红外长波段失耦合,损失一些红外长波段的吸收,所以发射率降低;2Cr13 钢板的氧化是一个缓慢的过程,一般在高温下保温 3 h 以上,其氧化程度才会出现明显的变化,试验测试不同温度 2Cr13 钢板发射率的时间较短,各温度下 2Cr13 钢板表面氧化层的氧化程度相近,因此,影响其发射率的主要因素是氧化皮的温度,  $Fe_2O_3$ 、 $Fe_3O_4$ 、 $FeO+Fe_3O_4$  和  $Cr_2O_3$  为典型的金属氧化物,其发射率随温度增高而降低,因此,2Cr13 钢板表面的氧化皮使得其发射率随着温度的增加而降低。

## 2.2 电弧风洞流场试验

为验证电弧风洞试验状态下,2Cr13 钢板的热响应与 ZnS 热响应是否相同,将 2Cr13 钢板与 ZnS 放在相同的电弧风洞试验状态下试验,并分别测试 2Cr13 钢板与 ZnS 背面温度,比较、分析两者背面温度响应是否相同,具体方法如下。

首先加工了与 ZnS 相同形状的 2Cr13 钢板,其形状为长方形板,长×宽×厚为:120 mm×80 mm×15 mm,板的四个角具有半径 R5 mm 的倒角,将 2Cr13 钢板安装在 1:1 的飞行器模型上。由于要模拟的飞行状态为俯冲段,飞行器巡航段使 2Cr13 红外窗口具有 120 °C 的表面温度和 80 °C 的背面温度,因此,将 2Cr13 钢板通过预设的热风枪将表面预热到 120 °C,背面预热到 80 °C 且达到稳定后开展电弧风洞流场试验,如图 3 所示。2Cr13 钢板与喷管形成一定攻角,

从电弧风洞喷出的热流加热钢板形成流场,2Cr13 钢板表面正上方设置红外热像仪,背面布置热电偶<sup>[9]</sup>。

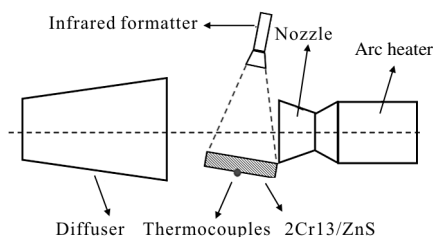


图 3 电弧风洞流场试验示意图

Fig.3 Diagram of flow field experiment by arc-heated wind tunnel

另外,为验证红外热像仪在电弧风洞下测试 2Cr13 表面温度的准确性,通过测试流场热流密度验证。在 2Cr13 钢板背面钻一个  $\phi 2\text{ mm}$  孔距离表面 1 mm,并布置热电偶,如图 4 所示。

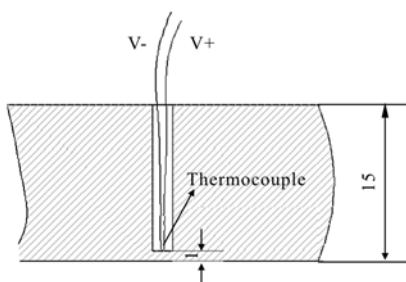


图 4 近表面温度检测示意图

Fig.4 Diagram of measuring the near-surface temperature

经过两车次重复试验获得 2Cr13 表面红外热像仪温度及背面热电偶温度数据,两车次分别记为 2Cr13-1,2Cr13-2。红外热像仪的发射率设置为在 150~250℃ 区间,红外热像仪发射率设置为 0.15,当温度升高到 250℃ 后,使用发射率 0.135 修正热像仪温度。图 5 给出了 2Cr13 距离表面 1 mm 处热电偶测试温度  $T_1$  与对应点表面红外热像仪温度  $T_f$  的温升曲线。钢板在流场中的温升过程是一个典型的非稳态传热过程,要精确求得钢板表面温升初始阶段的热流具有较大难度,为粗略估计表面热流,笔者进行了以下近似处理,由于钢板表面温度较均匀,可以将表面红外热像仪温度  $T_f$  与热电偶温度  $T_1$  之间的热传递近似为  $\Phi 2\text{ mm}\times 1\text{ mm}$  圆柱的一维传热,同时由于钢板是热的良导体,厚度方向的温度分布近似为  $T_f\sim T_1$  的线性分布,则对于单位面积长度为  $L$  的圆柱,距离表面  $x\text{ mm}$  处的温度为  $T_f - \frac{T_f - T_1}{L}x$ ,圆柱所含热量为:

$$\int_0^L \rho C_p (T_f - \frac{T_f - T_1}{L}x) dx \quad (1)$$

式中: $\rho$  为钢板密度; $C_p$  为钢板热容,将公式(1)对时间  $t$  进行求导得到流入圆柱体的热流密度:

$$\frac{1}{2} \rho C_p L \left( \frac{dT_f}{dt} + \frac{dT_1}{dt} \right) \quad (2)$$

将图 5 对时间  $t$  进行求导得到温升速率  $\frac{dT_f}{dt}$ 、

$\frac{dT_1}{dt}$ ,将温升起点速率代入公式(2),可得温升起点

2Cr13 的表面热流为 0.753 MW/m<sup>2</sup>。

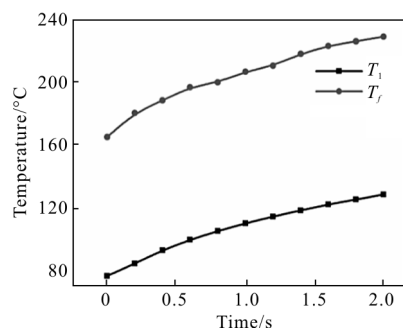


图 5 距离表面 1mm 处热电偶温度  $T_1$  与对应点表面红外热像仪温度  $T_f$  的温升曲线

Fig.5 Temperature rise curves of  $T_1$  (temperature at 1mm distance from surface) and  $T_f$  (the surface temperature measured by thermal infrared imager)

同时加工了与 ZnS 相同形状的 2Cr13 钢板,并在钢板上布置了热流密度传感器和压力传感器,使用热流密度传感器测试热流密度,如图 6 所示。

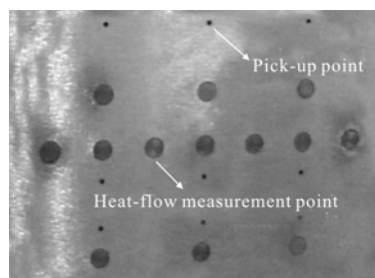


图 6 热流密度传感器及压力传感器

Fig.6 Heat flux density sensor and pressure sensor

热流传感器为 5 mm×8 mm 的纯铜圆柱,圆柱一端与流场接触,另一端焊接热电偶,检测其温升情况。将传感器送入电弧风洞流场中保持 2 s,得到热流密度传感器热电偶响应温度,如图 7 所示。热流密度公式如下:

$$q = C_p L \rho \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

式中： $C_p$  为纯铜定压热熔； $L$  为圆柱长度； $\rho$  为纯铜密度； $\frac{dT}{dt}$  为热电偶温升速率。取温升起点速率，经计算可得热流密度为  $0.837 \text{ MW/m}^2$ ，约大于前面测得热流密度  $0.753 \text{ MW/m}^2$ ，后者因为没有考虑 2Cr13 背面与空气的热交换损失，所以测得值偏低，因此，验证了红外热像仪在电弧风洞状态下所获得温度的准确性。

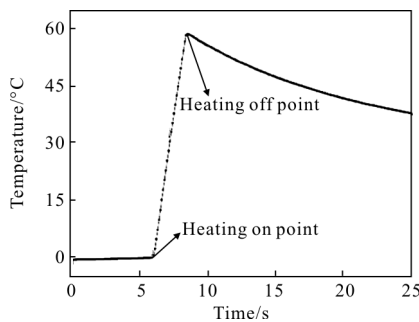


图 7 热流传感器背面热电偶温升曲线

Fig.7 Temperature rise curve of heat flux density sensor's reverse side

使用 ZnS 替换 2Cr13 钢板，在电弧风洞流场中开展相同的流场试验，ZnS 背面温度监测通过弹簧片将热电偶压在 ZnS 背面，监测 ZnS 背面温度响应情况，如图 8 所示。与 2Cr13 钢板试验一样，为了减少气流冲刷 ZnS 红外窗口造成的振动，同时减少飞行器模型对 ZnS 红外窗口的热影响，所以在 ZnS 边沿装了一圈隔热减震套。ZnS 在电弧风洞状态下重复试验 3 车次，分别记为 ZnS-1、ZnS-2、ZnS-3，获得其背面温度响应。

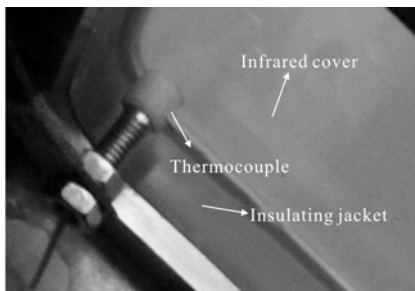


图 8 ZnS 电弧风洞流场试验背面温度监测

Fig.8 Reverse temperature monitoring of ZnS reverse side during arc-heated wind tunnel flow field experiment

### 3 结果及分析

在电弧风洞流场中分别进行的 2Cr13 钢板 2 车次试验及 ZnS 的 3 车次试验，取背面相同位置处热电偶温升曲线，如图 9 所示。由图 9 可知：ZnS 背面温度与 2Cr13 温度温升趋势相似，温升阶段其温升速率一致；另外，ZnS 与 2Cr13 钢板在不同初始温度下，其温升速率保持不变，初始温度对温度响应影响较小。

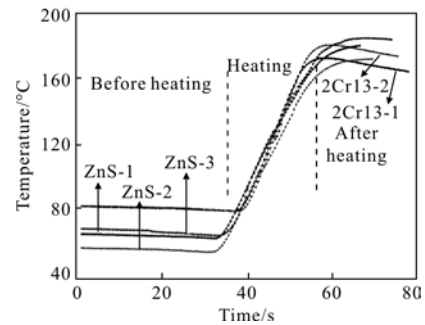


图 9 ZnS 与 2Cr13 电弧风洞流场试验背面温度响应曲线

Fig.9 Temperature response curves of ZnS and 2Cr13

during arc-heated wind tunnel flow field experiment

综上所述，在电弧风洞流场试验中，2Cr13 与 ZnS 背面温度响应一致，而两者具有相似的热物性参数，2Cr13 钢板表面温度可以近似为 ZnS 表面温度，使用 2Cr13 钢板表征 ZnS 表面温度，ZnS 在电弧风洞流场中试验时其表面温度分布与红外热像仪监测的 2Cr13 表面温度一致，如图 10 所示。使用 2Cr13 表征 ZnS 表面温度实现电弧风洞模拟 ZnS 红外窗口表面温度响应是可行的。

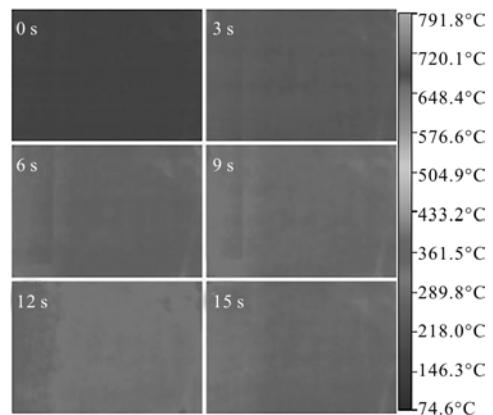


图 10 2Cr13 电弧风洞流场中温升不同时间表面红外热像图

Fig.10 Thermal infrared image of 2Cr13 surface at different temperature rise time during arc-heated wind tunnel flow field experiment

## 4 结 论

综上所述,得出以下结论:

(1) 2Cr13 发射率随温度升高而降低, 温度大于 250℃时,发射率趋于常数 0.135;

(2) 电弧风洞流场试验中,ZnS 背面温度与 2Cr13 温度温升趋势相似,温升阶段其温升速率一致;

(3) ZnS 与 2Cr13 钢板在不同初始温度下,其温升速率保持不变,初始温度对其温度响应影响较小;

(4) 对于温度区间 150~250℃,使用与 ZnS 相似热物性参数的 2Cr13 标定流场中 ZnS 表面温度实现电弧风洞模拟 ZnS 红外窗口表面温度响应,具有一定可行性。

### 参考文献:

[1] Bevilacqua G, Martinelli L, Vogel E E, et al. Jahn-Teller effect and the luminescence spectra of  $V^{2+}$  in ZnS and ZnSe [J]. *Phys Rev B*, 2002, 66(15): 155338.

[2] Choi Y I, Lee S, Kim S K. Fabrication of ZnO, ZnS, Ag-ZnS, and Au-ZnS microspheres for photocatalytic activities, CO oxidation and 2-hydroxyterephthalic acid synthesis[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 675: 46-56.

[3] Fang X S, Zhang L. One-dimensional (1D) ZnS nanomaterials and nanostructures [J]. *Journal Material Science and Technolog*, 2006, 22(6): 721-736.

[4] Mendil R, Ben Ayadi Z, Djessas K. Effect of solvent medium on the structural, morphological and optical properties of ZnS nanoparticles synthesized by solvothermal route [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 678: 87-92.

[5] Vlasenko N A. On nature of centers responsible for inherent memory in ZnS: Mn thin film electroluminescent devices[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2000, 216(1): 249-255.

[6] Trung D Q, Thang P T, Hung N D. Structural evolution and optical properties of oxidized ZnS microrods [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 676: 150-155.

[7] Wang R R, Liang H F, Hong J Q. Hydrothermal synthesis of cobalt-doped ZnS for efficient photodegradation of methylene blue [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2016, 325: 62-67.

[8] Manzoor K, Aditya V. Enhanced electroluminescence properties of doped ZnS nanorods formed by the self-assembly of colloidal nanocrystals [J]. *Solid State Communications*, 2005, 135(1-2): 16-20.

[9] Clark S J, Segall M D, Pickard C J. First principles methods using CASTEP[J]. *Zeitschrift Fuer Kristallographie*, 2005, 220 (5-6): 567-570.

[10] Matsui M, Ikemoto T, Takayanagi H. Evaluation of plume characteristics of arc-heaters with various oxygen injection systems[J]. *Vacuum*, 2006, 80: 11-12.

[11] Wang Yahui, Wang Qiang, Zhang Baichuan, et al. Evaluation method for aero-thermo-radiation effect of IR window [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45 (2): 0204001. (in Chinese)  
王亚辉, 王强, 张伯川, 等. 红外窗口气动热辐射效应评估方法[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(2): 0204001.

[12] Hsiung G Y, Hsueh H P, Wu L H. Vacuum systems for the TPS accelerator[J]. *Vacuum*, 2015, 121: 245-249.

[13] Jayaseelan D D, Xin Y, Vandepierre L. Development of multi-layered thermal protection system (TPS) for aerospace applications [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 79: 392-405.

[14] Chen Y Y. Luminescent mechanisms of ZnS: Cu and ZnS: Cu: Al phosphors[J]. *Thin Solid Films*, 2001, 329(1): 50.

[15] Khaparde R, Acharya S. Effect of isovalent dopants on photodegradation ability of ZnS nanoparticles [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2016, 163: 49-57.

[16] Wu Wei, Chen Guiming, Zhao Na, et al. Experimental study on the groove surface texture processed by laser on the surface of high-speed steel[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0206008. (in Chinese)  
武伟, 陈桂明, 赵娜, 等. 激光在高速钢表面加工沟槽表面织构的实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(2): 0206008.

[17] Xia Lingqin. Composition of oxide scale on 430 stainless steel surface and interface bonding strength [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010. (in Chinese)  
夏伶勤. 430 不锈钢表面氧化皮组成与界面结合强度的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2010.

[18] Zhang Y, Wen D. Effect of RE/Ni (RE=Sm, Gd, Eu) addition on the infrared emission properties of Co-Zn ferrites with high emissivity [J]. *Materials Science & Engineering B*, 2010, 172 (3): 331 - 335.

[19] Liu Zhongyu, Zhang Tao, Wang Ping, et al. Topology optimization design for main frame of infrared seeker's stabilization platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0218001. (in Chinese)  
刘仲宇, 张涛, 王平, 等. 红外导引头稳定平台主框架拓扑优化设计[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(2): 0218001.