热障陶瓷涂层材料对柴油机活塞的影响

李闯[1]，张翼[1]，胡定云[2]，蔡强[1]，邹润[1]，马伟凯[1]

（1.中北大学 机械与动力工程学院，太原 030051；2.中国北方发动机研究所（天津），天津 300400）

摘 要：目的 研究不同陶瓷材料对活塞温度和热应力的影响。**方法** 以氧化镁-部分稳定氧化锆陶瓷（Mg-PSZ）和氧化钇-部分稳定氧化锆陶瓷（Y-PSZ）两种材料为研究对象，在硅铝合金活塞顶部分别喷涂 Mg-PSZ 和 Y-PSZ 等离子体，分析讨论了两种不同涂层材料对活塞温度场和热应力场的影响，对比分析了有无陶瓷涂层活塞温度场和热应力场的变化。**结果** 和无涂层活塞相比，Mg-PSZ 涂层活塞和 Y-PSZ 涂层活塞的表面温度明显升高，其表面最高温度分别升高了 50.49%和 34.81%，但是对应的基体最高温度却分别下降了 28.49%和 17.34%。同时还发现，Mg-PSZ 涂层活塞和 Y-PSZ 涂层活塞具有相同的温度和热应力分布，并且其活塞基体和无涂层活塞也具有相同的温度和热应力分布。**结论** Mg-PSZ 涂层活塞和 Y-PSZ 涂层活塞都会导致活塞表面温度升高，应力增大，但是 Y-PSZ 对基体温度影响更大，Mg-PSZ 对热应力影响更大。

关键词：热障涂层；柴油机活塞；温度分布；热应力；氧化镁-部分稳定氧化锆陶瓷；氧化钇-部分稳定氧化锆陶瓷

中图分类号：TG174.453 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2017)02-0149-05

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.02.024

Effects of Thermal Barrier Ceramic Coating Materials on Diesel Engine Piston

LI Chuang[1], *ZHANG Yi*[1], *HU Ding-yun*[2], *CAI Qiang*[1], *ZOU Run*[1], *MA Wei-kai*[1]

(1.School of Mechanical and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2.China North Engine Research Institute (Tianjin), Tianjin 300400, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effects of different ceramic materials on the piston temperature and thermal stress. With MgO-partially stabilized zirconia ceramic (Mg-PSZ) and yttria-partially stabilized zirconia ceramic (Y-PSZ) as objects of study, plasmas Mg-PSZ and Y-PSZ were sprayed on the top of AlSi alloy piston. The effects of two different coating materials on piston temperature and thermal stress field were studied, contrastive analysis was performed to change of piston temperature field and thermal stress field with ceramic coating or not. Compared with the uncoated piston, surface temperature of Mg-PSZ coating piston and Y-PSZ coating piston increased obviously by 50.49% and 34.81% respectively while corresponding maximum substrate temperature decreased by 28.49% and 17.34% respectively. Meanwhile, distribution of temperature and thermal stress on the Mg-PSZ coating piston was same as that of Y-PSZ coating piston, so was the distribution of piston substrate and uncoated piston. Both the Mg-PSZ coating piston and Y-PSZ coating piston can lead to the increase of the surface temperature and the stress. Y-PSZ has greater impact on substrate temperature while Mg-PSZ has greater impact on stress.

收稿日期：2016-09-22；修订日期：2016-10-15

Received：2016-09-22；**Revised**：2016-10-15

作者简介：李闯（1992—），男，硕士研究生，主要研究方向为动力机械结构强度与动态设计。

Biography：LI Chuang(1992—), Male, Master, Research focus: structural strength and dynamic design of dynamic machine.

通讯作者：张翼（1969—），男，副教授，主要研究方向为发动机结构强度和可靠性研究。

Corresponding author: ZHANG Yi(1969—), Male, Associate professor, Professor, Research focus: structural strength and reliability research of engine.

KEY WORDS: thermal barrier coating; diesel engine piston; temperature distribution; thermal stress; MgO-partially stabilized zirconia ceramic; Yttria-partially stabilized zirconia ceramic

活塞作为发动机的“心脏”，其工作状况直接关系到发动机能否正常运转。现在追求发动机的高转速、高功率密度[1—2]，因此工作温度和最大爆发压力会越来越高，高温热循环会导致活塞开裂，形成裂纹，使活塞失效，而传统的活塞有时无法满足要求。由于陶瓷具有抗磨损、抗腐蚀、耐热冲击等优良性能，陶瓷涂层在工业中被广泛使用，其中热障陶瓷涂层活塞就是重要的应用之一[3—4]。陶瓷导热系数小，可以有效地降低热损失，提高热效率，当气缸的热损失降低后，更多的热量传递到排气系统，温度较高的废气循环可以降低 HC（碳氢）的排放；另一方面，高温燃气燃烧后产生的热量能够被陶瓷涂层有效地阻隔，传递到活塞基体的热量减少，降低了活塞基体的温度差，从而导致更小的热应力[5—7]。

工程常用的陶瓷涂层材料是氧化锆 ZrO_2[8]，但是纯氧化锆在高温热循环时会发生晶体的相变，造成材料的不稳定，为了消除该影响，使用部分稳定氧化锆（PSZ）代替纯氧化锆。但是传统的陶瓷材料易脆，而金属材料具有良好的韧性和塑性，为了改善陶瓷的韧性和强度，增强陶瓷的断裂韧性，通常将金属氧化物如氧化钇（Y_2O_3）、氧化镁（MgO）等作为添加剂添加到 PSZ 中制备成 Y-PSZ 和 Mg-PSZ，这种材料具有比单相陶瓷材料更好的抗机械疲劳性能和抗热循环疲劳性能，因此这种材料被成功地应用在如活塞、缸套等工作在高温热循环中的零件中[9—10]。在此背景下，本文以硅铝合金活塞为基体，在其顶面采用低温性能更好的低压等离子喷涂技术喷涂 Y-PSZ 和 Mg-PSZ，制成热障涂层活塞[11]，针对这两种不同材料涂层的活塞进行温度场和热应力场的有限元分析，得到了热障涂层活塞的温度场和热应力分布规律，并且对比分析有无陶瓷层活塞温度场和热应力场的变化，为今后热障涂层活塞的设计打下坚实的基础，并提供理论支持。

1 建立模型

利用 CAD 软件 Pro/E 建立了热障涂层活塞的三维模型，为方便计算对模型进行简化处理。此次分析建立了 5 层涂层，顶层分别是 Y-PSZ 或 Mg-PSZ 的陶瓷层，厚度为 0.4 mm，在硅铝合金基体和陶瓷层之间建立了 4 层过渡层，每层厚度均为 0.4 mm，并且对过渡层进行了数学离散化，假设过渡层每层材料是均匀的，其材料属性如表 1、表 2 所示[12]。

表 1 Mg-PSZ 涂层硅铝合金活塞的物性参数

Tab.1 The properties of the Mg-PSZ coatings piston with AlSi alloy

材料	导热系数 /(W·m^{-2}·K^{-1})	热膨胀系数 /(×10^{-6} K^{-1})	弹性模量/MPa	泊松比
硅铝合金基体	136	19.2	84 000	0.32
Mg-PSZ 陶瓷	0.8	8	46 000	0.2
过渡层一层	3.54	9.781	52 042	0.219
过渡层二层	10.45	11.102	56 526	0.233
过渡层三层	22.32	12.57	61 504	0.249
过渡层四层	42.54	14.328	67 470	0.268

表 2 Y-PSZ 涂层硅铝合金活塞的物性参数

Tab.2 The properties of the Y-PSZ coatings piston with AlSi alloy

材料	导热系数 /(W·m^{-2}·K^{-1})	热膨胀系数 /(×10^{-6} K^{-1})	弹性模量/MPa	泊松比
硅铝合金基体	136	19.2	84 000	0.32
Y-PSZ 陶瓷	2.05	10.7	22 000	0.25
过渡层一层	4.081	12.052	31 858	0.261
过渡层二层	11.556	13.055	39 174	0.269
过渡层三层	23.759	14.168	47 296	0.279
过渡层四层	45.697	15.502	57 030	0.289

1.1 材料物性参数

过渡层中的陶瓷含量服从公式（1）的指数函数分布[13]：

$$f(x)=\left(\frac{x}{h}\right)^{p} \tag{1}$$

式中：$f(x)$ 为涂层中陶瓷含量；x 为沿梯度层厚度方向的坐标，即每层涂层厚度的中间位置距离基体的距离；h 为涂层的总厚度；p 为梯度指数，文中 p=0.6。

根据复合材料的相关理论确定了导热系数用公式（2）计算得到[14]：

$$\lambda_c=\frac{\phi^2}{\frac{2\phi}{\lambda_f}+(1-2\phi)\lambda_m}+(1-2\phi)\lambda_f+\frac{2\phi(1-2\phi)}{\frac{\phi}{\lambda_f}+\frac{(1-\phi)}{\lambda_m}} \tag{2}$$

式中：λ_c 为过渡层的导热系数；λ_f 为陶瓷的导热系数；λ_m 为硅铝合金的导热系数；ϕ 为过渡层中陶瓷体积分数。

过渡层的弹性模量采用 Voigt 模型假定理论[15]，采用线性插值法来计算。

$$E_c=\phi_t E_t+\phi_k E_k \tag{3}$$

式中：E_c 为过渡层的弹性模量；ϕ_t 为陶瓷的体积分数；E_t 为陶瓷的弹性模量；ϕ_k 为硅铝合金基体的体积分数；E_k 为硅铝合金基体的弹性模量。

过渡层的热膨胀系数采用 Voigt 模型假定理论，采用线性插值法来计算。

$$\sigma_c = \phi_t \sigma_t + \phi_k \sigma_k \tag{4}$$

式中：σ_c 为过渡层的泊松比；ϕ_t 为陶瓷的体积分数；σ_t 为陶瓷的热膨胀系数；ϕ_k 为硅铝合金基体的体积分数；σ_k 为硅铝合金基体的热膨胀系数。

过渡层的泊松比采用 Voigt 模型假定理论，采用线性插值法来计算。

$$\nu_c = \phi_t \nu_t + \phi_k \nu_k \tag{5}$$

式中：ν_c 为过渡层的泊松比；ϕ_t 为陶瓷的体积分数；ν_t 为陶瓷的泊松比；ϕ_k 为硅铝合金基体的体积分数；ν_k 为硅铝合金基体的泊松比。

通过公式（1）—（5），计算出活塞各个涂层的材料参数，如表 1、表 2 所示。

1.2　建立有限元模型

图 1 是某 150 mm 缸径的增压柴油机活塞的有限元模型，考虑到计算时间以及活塞的对称性，此次分析采用二分之一模型，网格采用 20 节点四面体单元，顶层和过渡层的单元长度设置为 1 mm，硅铝合金基体的单元长度设置为 3 mm，采用自有划分，共有 1 522 055 个节点，898 147 个单元。

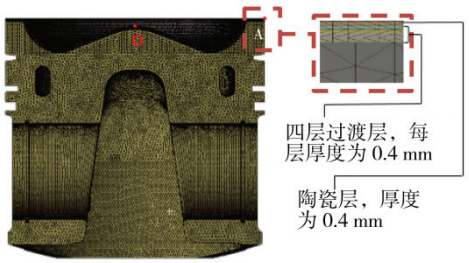


图 1　热障涂层活塞的有限元模型

Fig.1 Finite element model of the thermal barrier coating piston

1.3　活塞热边界条件

热能的传递有热对流、热辐射与热传导三种方式，而活塞中热能的传递主要是热对流中的对流传热，因此活塞的温度场分析一般采用第三类边界条件，即已知活塞表面和外界的对流换热系数以及活塞所处的环境温度，通过这些边界条件计算活塞的稳态温度场。由于活塞不仅仅是单一的热量传递，而且结构和所处环境又比较复杂，目前还无法找出一个通用公式计算活塞的对流换热系数，通常都以实验加以论证，具体做法是根据经验公式计算出一组边界条件的值并进行温度场分析，将分析结果与实验对比，然后再对边界条件不断进行修正直至达到实验结果的误差范围之内，将此边界条件作为温度场的最终边界条件。本文采用 Hohenberg 公式计算瞬时换热系数[16—17]：

$$h_{gas}(t) = \alpha V_c(t)^{-0.06} P(t)^{0.8} T(t)^{-0.4} \left(S_p + b\right)^{0.8} \tag{6}$$

式中：$h_{gas}(t)$为瞬时对流换热系数（$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$）；$V_c(t)$、$p(t)$、$T(t)$分别为瞬时气缸容积（$m^3$）、瞬时压力（MPa）和瞬时温度（K）；$S_p$ 为平均活塞速度（m/s）；α和 b 为修正系数，α=130，b=1.4。

活塞顶面的换热系数利用公式（7）计算：

$$h_{gm} = \frac{\int_0^{720} h_{gas}(t)\mathrm{d}\varphi}{720} \tag{7}$$

通过公式（6）和公式（7）计算了活塞不同位置的换热系数，如表 3 所示。

表 3　活塞不同位置的换热系数和温度

Tab.3 The piston temperature and heat transfer coefficient of different positions

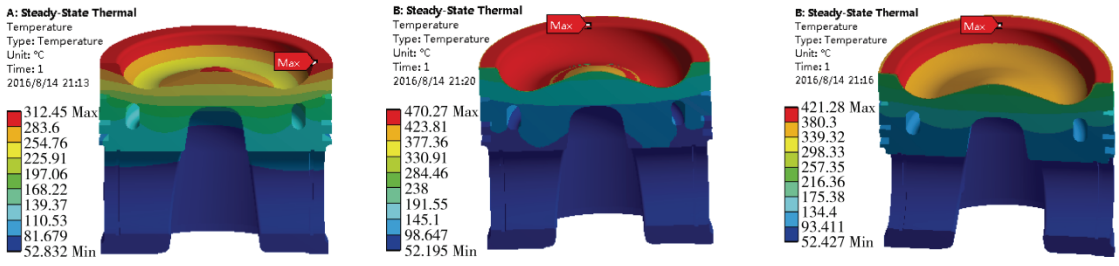
位置	换热系数/($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	温度/℃
顶面	1400	700
火力岸	693.8	72
第一环上沿	2482.7	72
第一环内沿	100.5	72
第一环下沿	3130.3	72
第一环岸	835.9	72
第二环上下沿	1143.8	72
第二环内沿	106.5	72
第二环岸	1047.5	72
第三环上下沿	909.6	72
第三环内沿	94.28	72
裙部	1053	72
内腔	3500	49
冷却油腔	2710	49

2　计算结果与分析

2.1　温度场计算结果及分析

通过有限元分析得到了活塞的温度场分布，如图 2 所示。从图 2a 可以发现活塞的最高温度在燃烧室喉口，最低温度在裙部下端，最高温度是 312.5 ℃，最低温度是 52.8 ℃，沿径向方向上，从活塞中心到燃烧室凹坑温度逐渐降低，然后从凹坑到燃烧室喉口温度逐渐升高，再从燃烧室喉口到外边缘温度逐渐降低，沿高度方向上，活塞温度分布呈现层状变化，自顶向下温度逐渐下降。

从图 2b—c 可以发现，Mg-PSZ 涂层和 Y-PSZ 涂层的活塞温度分布比较相似，最高温度均在活塞顶面，其值分别为 470.27 ℃和 421.28 ℃，但是 Mg-PSZ 涂层活塞的温度明显高于 Y-PSZ 的涂层活塞温度，并且都高于无涂层活塞的温度，对应的最高温度分别上



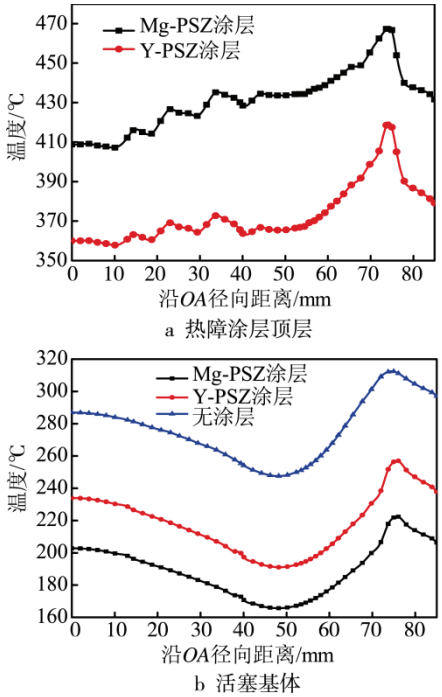
a 无涂层　　b Mg-PSZ涂层　　c Y-PSZ涂层

图 2　活塞温度分布

Fig.2 The temperature distribution of piston: a) uncoated; b) Mg-PSZ coating; c) Y-PSZ coating

升了 50.49%和 34.81%。还可以发现，Mg-PSZ 涂层活塞和 Y-PSZ 涂层活塞以及无涂层活塞的最高温度均出现在燃烧室喉口处，在图中用 Max 标出，这是由于该处位置是与燃气直接接触，燃烧时火焰最先达到，吸收了大量来自高温燃气的热量，同时活塞顶又受到周向的热流作用。

此次分析中，在活塞销的轴向对称面上定义了一条沿着 *OA*（包括喉口在内）径向距离的路径，如图 1 所示，路径的起始点 *O* 位于活塞顶面的中心，*A* 是活塞的顶面外边缘。图 3 是活塞顶层和基体以及无涂层活塞的温度变化曲线，可知基体的温度明显下降，这说明 Mg-PSZ 涂层和 Y-PSZ 涂层起到了隔热的作用，由于陶瓷的导热系数低，顶面燃气燃烧产生的热量被陶瓷层阻隔，导致传递到基体的热量明显减少，温度降低，Mg-PSZ 涂层活塞和 Y-PSZ 涂层活塞的基体温度分别为 223.48 ℃和 258.32 ℃，与无涂层活塞温度相比，其基体温度分别下降了 28.49%和 17.34%。同时 Mg-PSZ 涂层活塞基体和 Y-PSZ 涂层活塞基体的温度分布和无涂层活塞的温度分布一致，变化曲线几乎平行，由此可见涂层材料的变化导致了基体温度的下降，并不能影响基体的温度分布。



a 热障涂层顶层

b 活塞基体

图 3 沿 *OA* 径向距离活塞的温度变化

Fig.3 Temperature distribution of piston along the radial distance *OA*: a) top surface of thermal barrier coatings piston; b) substrate surface

2.2　热应力计算结果及分析

柴油机活塞一直在高温环境中工作，会受到较大的热负荷，由于活塞传热的不均匀性，再加之热障涂层活塞每层材料之间的力学性能差别较大，因此在涂层与涂层之间经常会产生大量的热量，继而导致较大的热应力，从而引发陶瓷的剥落，因此陶瓷层剥落是热障涂层活塞分析必须考虑的问题。通过计算发现，应力最大值均出现在过渡层第一层，并且 Mg-PSZ 涂层和 Y-PSZ 涂层的最大热应力值分别为 272.56 MPa 和 235.69 MPa，均在合理范围之内，不会导致陶瓷层的剥落，满足使用要求。

图 4 为沿着 *OA* 径向距离热障涂层活塞顶面和基体表面以及无涂层活塞表面的等效应力变化。从图 4a 可以发现，热障涂层活塞顶面的等效应力变化趋势相同，在活塞顶面中心区域附近，等效应力较小，然后等效应力逐渐上升，而到达凹坑附近时，等效应力达到一个峰值，然后逐渐减小。这是因为在活塞顶面中心区域下方就是活塞的内腔，而内腔导热系数大，带走的热量多，因而此处的温度差并不会发生太大变化，而在凹坑处由于距离冷却油腔较近，因此大量的热量都会向此处流过，但是由于陶瓷的导热系数小，因此带走的热量有限，继而会在此处产生较大的温度差，也导致热应力较大。同时还可以发现，无论陶瓷层材料是 Mg-PSZ 或 Y-PSZ，并且最大的等效应力均在凹坑左侧靠近中心区域处，其值分别为 142.919 MPa 和 120.674 MPa。

由图 4b 可以发现，无论 Mg-PSZ 或 Y-PSZ，其基体的等效应力变化趋势和无涂层活塞的等效应力变化趋势相同，而此次分析除了热障陶瓷涂层材料的差异之外并无不同，因此可以说明热应力与材料的热膨胀系数、弹性模量以及泊松比之间有密切联系。由于 Y-PSZ 的导热系数比 Mg-PSZ 的高，因此 Y-PSZ 涂层

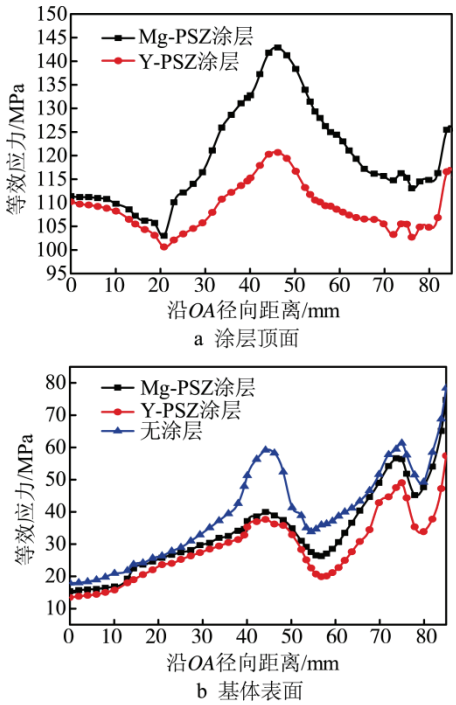


图 4　沿着 *OA* 径向距离活塞等效应力的变化

Fig.4 Thermal stress distributions of piston along the radial distance *OA*: a) piston crown; b) substrate surface

可以阻隔的热量比 Mg-PSZ 少，因此 Mg-PSZ 的活塞基体温度差要高于 Y-PSZ，所以对应的热应力 Mg-PSZ 活塞基体高于 Y-PSZ，但是和无涂层活塞相比，热应力均有所下降，并且 Y-PSZ 涂层活塞基体的热应力下降更明显。

3　结语

1）热障涂层对于降低活塞基体温度、减少热冲击对活塞的损伤、提高发动机的性能具有极其显著的效果。

2）Mg-PSZ 涂层活塞和 Y-PSZ 涂层活塞均可以不同程度地降低活塞基体温度，但是活塞顶的温度却会上升。和无涂层活塞相比，Mg-PSZ 涂层活塞顶层和 Y-PSZ 涂层活塞顶层的温度分别上升了 50.49%和 34.81%，但是对应的基体温度却分别下降了 28.49%和 17.34%。

3）无论是 Mg-PSZ 涂层活塞，还是 Y-PSZ 陶瓷涂层活塞，导致涂层可能剥落的最大热应力都在允许范围内，因此并不会出现陶瓷层的剥落。由于 Y-PSZ 的导热系数明显高于 Mg-PSZ，导致基体温度差也高于 Mg-PSZ 涂层活塞基体，因此热应力也略高于 Mg-PSZ 涂层活塞基体，但是均低于无涂层活塞热应力。

参考文献

[1] KULDEEP S, JAKHAR O P. The Behavior of Temperature on Insulated ($MgZrO_3$) Diesel Engine Piston with ANSYS [J]. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2014, 4(8): 692—695.

[2] KARTHIKEYA S. Performance and Emission Characteristics of the Thermal Barrier Coated SI Engine by Adding Argon Inert Gas to Intake Mixture[J]. Journal of Advanced Research, 2015, 38(6): 819—826.

[3] JALALUDIN H, ABDULLAH S, GHAZALI M J, et al. Experimental Study of Ceramic Coated Piston Crown for Compressed Natural Gas Direct Injection Engines[J]. Procedia Engineering, 2013, 68(12): 505— 511.

[4] 李志军, 王红英, 汤伟杰. 等离子喷涂 YPSZ 陶瓷梯度涂层的组织与抗热震性能[J]. 金属热处理, 2009, 34(8): 65—68.
LI Zhi-jun, WANG Hong-ying, TANG Wei-jie. Microstructure and Thermal Shock Resistance of YPSZ Gradient Coating Fabricated by Plasma Spraying[J]. Heat Treatment of Metals, 2009, 34(8): 65—68.

[5] SALMANA S, KÖSE R, LEVENT U, et al. An Investigation of Different Ceramic Coating Thermal Properties [J]. Materials and Design, 2006, 27(07): 585—590.

[6] EKREM B, MUHAMMET C. Thermal Analysis of a Ceramic Coating Diesel Engine Piston Using 3-D Finite Element Method[J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 202 (2): 398—402.

[7] MESUT D, MURAT K, ERGUN N, et al. The Effects of Coating Materials in Spark Ignition Engine Design[J]. Materials and Design, 2012, 36(12): 540—545.

[8] 肖巍, 闵捷, 孟令娟, 等. 纳米 Y-PSZ 基高温封严涂层微观结构的研究[J]. 表面技术, 2010, 39(3): 37—39.
XIAO Wei, MIN Jie, MENG Ling-juan, et al. Study on Microstucture of Nano Y-PSZ Based Seal Coating[J]. Surface Technology, 2010, 39(3): 37—39.

[9] 尹衍生, 李嘉. 氧化锆陶瓷及其复合材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
YIN Yan-sheng, LI Jia. Zirconia Ceramics and Composites [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.

[10] 吴利翔, 王宏建, 郭伟明, 等. 氧化锆增韧氧化铝基陶瓷刀具的制备及其切削性能[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(9): 1347—1351.
WU Li-xiang, WANG Hong-jian, GUO Wei-ming, et al. Preparation and Cutting Performance of Zirconia Toughening Alumina Matrix Cutting Tools [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44(9): 1347—1351.

[11] 朱军亮, 赵子鹏, 易同斌, 等. 低压等离子喷涂技术在功能性涂层的应用进展[J].表面技术, 2016, 45(1): 111—117.
ZHU Jun-liang, ZHAO Zi-peng, YI Tong-bing, et al. Progresses in Application of Low Pressure Plasma Spraying Technology in Functional Coatings[J]. Surface Technology, 2016, 45(1): 111—117.

[12] 肖汉宁, 高鹏召. 高性能结构陶瓷与其应用[M].北京: 化学工业出版社, 2004.
XIAO Han-ning, GAO Peng-zhao. High Performance Structural Ceramics and Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.

[13] BURKE W R. Space Application of Advance Structure Materials[J]. Esa Special Publication, 1990, 303: 97—105.

[14] 曾竟成, 罗青, 唐羽章. 复合材料理化性能[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998.
ZENG Jing-cheng, LUO Qing, TANG Yu-zhang. Physical and Chemical Properties of Composites[M]. Changsha: National Defense Science and Technology University Press, 1998.

[15] 周玉, 雷延. 全陶瓷材料学[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 2004.
LEI Yu, ZHOU Yan. All Ceramic Materials Science[M]. 2nd Edition.Beijing: Science Press, 2004.

[16] MUHAMMET C, MEHMET C. Temperature and Thermal Stress Analyses of a Ceramic-coated Aluminum Alloy Piston Used in a Diesel Engine[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014 (77): 11—18.

[17] MUHAMMET C. Thermo Mechanical Analysis of a Partially Ceramic Coated Piston Used in an SI Engine[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205: 3499—3505.