

管道插接焊缝位置及焊枪位姿建模

任福深^{1,2}, 陈树君¹, 殷树言¹, 管新勇¹

(1. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100022;
2. 大庆石油学院 机械科学与工程学院, 黑龙江 大庆 163318)



任福深

摘 要: 管道插接相贯线焊缝是典型的、复杂的空间焊缝。针对弧焊机器人工作的特殊要求, 在不失一般性的基础上, 建立了焊缝位置及焊枪位姿的数学模型, 以坐标系的形式定量描述了焊缝及焊枪的位置和方向, 确定了能够准确描述焊枪姿态的参数: 工作角、行走角和自转角, 并给出了计算方法。通过对相贯线焊缝特征的分析, 发现相贯线上任意点的切线始终与过该点的两个圆柱切平面的交线重合, 在此基础上提出了一种简单的建立焊缝特征矩阵的计算方法。该模型对管道插接具有通用性, 对焊接工艺的建模与仿真以及机器人焊接的建模与离线编程具有重要意义。

关键词: 弧焊机器人; 相贯线焊缝; 焊缝位置模型; 焊枪位姿模型

中图分类号: TP242.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2008)11-0033-04

0 序 言

管道插接相贯线焊缝是典型的、复杂的空间焊缝。弧焊机器人焊接时, 焊枪是以一定的姿态沿着焊缝作相对运动的。由于焊接位置的不同, 重力对熔池起的作用也不同, 是影响焊接质量的重要工艺因素。生产实践表明, 焊缝处于平焊或船形焊接位置时最有利于焊缝良好成形, 焊缝偏离平焊位置越多, 越难以保证焊接质量, 而焊枪相对于焊缝的姿态同样影响焊接质量。许多学者对该类型的焊缝模型进行了研究, 取得了一定的成果^[1-3]。目前的研究对象多是基于管道正交和无偏置管道相交, 然而在实际焊接中, 难免会出现微小管道偏置或倾斜, 焊缝模型也会发生变化, 影响焊接模型的精确性。因此, 研究管道插接一般模型, 并且建立一套适合于离线编程的焊缝及焊枪姿态模型, 无论从理论研究还是用于指导生产都非常重要。

1 焊接位置及焊枪方位的定义

弧焊机器人焊接过程中, 焊枪始终以一定的姿态沿着焊缝作相对运动, 由于机器人运动的复杂性, 通常采用焊缝坐标系相对世界坐标系的特征矩阵来

描述焊缝姿态, 然后建立焊缝坐标系和焊枪坐标系的位姿关系, 进而得到焊缝坐标系、焊枪坐标系和世界坐标系间的相对关系, 实现机器人的运动控制。焊缝在三维空间中只是一条曲线, 其焊接位置参数由 6 个独立变量组成, 实际焊接过程中, 只有焊缝倾角和焊缝转角这 2 个独立变量影响焊接质量, 工程中把这两个变量称为焊接位置。

针对管道插接焊缝的特点, 同时兼容国家标准 GB/T3375—1994 和焊接词典中已经给出的焊接位置的定义, 提出该系统的一些重要参数的定义, 几何关系如图 1 所示。

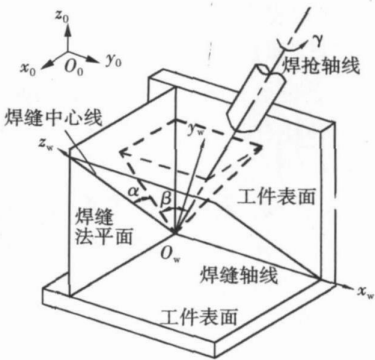


图 1 焊接模型
Fig. 1 Welding model

度共线但方向相反, x_0, y_0 轴依据右手定则来确定。 z_0 轴的具体位置的确定, 要考虑简化机器人坐标变换计算量。

定义 2 焊缝坐标系 $O_w x_w y_w z_w$: 原点 O_w 位于焊缝上当前焊点, 有间隙时, 为间隙上部的中点, x_w 轴为焊缝在当前焊接点处沿焊接方向的切线方向, z_w 轴为构成焊缝的两表面(开坡口时, 为坡口两侧面)在当前焊接点处外法线的角平分线, 对于 V 形和 J 形坡口, 取坡口上下中点连线, 方向由焊缝指向外面。

定义 3 焊缝倾角 θ : 焊缝轴线方向与水平面所成的角, 即 x_w 轴与 $x_0 O_0 y_0$ 面所成的角, 取值范围 $[-\pi, \pi]$, 上坡为正, 下坡为负。考虑到在空间全位置焊接过程中, 如果焊接方向始终保持不变, 整周焊接时会出现焊缝倾角相同的两个位置, 例如在垂直布置的环形焊缝中, 均会有两处位置具有相同的焊缝倾角, 然而此时这两点的熔池受重力特征完全不同, 因而要加以区分, 因此取值范围定为 $[-\pi, \pi]$ 。

定义 4 焊缝转角 ϕ : 坡口的二等分面与重力的反方向所成的角。即 z_0 轴与 $x_w O_w y_w$ 面所成的角, 取值范围 $[0, 2\pi]$ 。

对于焊缝倾角和焊缝转角的定义与国家标准 GB/T3375 — 1994 规定基本一致, 只是对取值范围做了一定的修改。针对空间全位置焊接的特征, 在规定上述参数的取值范围时主要针对以下两点着重考虑: (1) 为了实现机器人的自动焊接, 要求参数能够完整地、准确地、唯一地描述焊缝的空间位置。(2) 要描绘出空间焊缝中不同的焊接位置, 熔池受重力影响的不同特征。焊缝倾角和焊缝转角具体求法, 可以参考文献[4]。

焊枪位姿是指焊枪坐标系相对于焊缝坐标系的位姿, 包含位置和姿态两个方面。通常焊枪(焊丝)末端位于焊接点, 即焊接时焊枪坐标系的原点与焊缝坐标系的原点是重合的。由于焊接电弧可以近似的作为一个回转体, 所以, 在确定焊枪姿态的 3 个独立变量中, 只有 2 个会影响到焊接质量, 也就是工程上焊枪(或焊丝、焊条、电极)的工作角和行走角。

定义 5 工作角 α : 焊丝轴线在焊缝法平面上的投影与焊缝中心线所成的角。焊缝坐标系的 z_w 轴与焊枪轴线在焊缝法平面 $y_w O_w z_w$ 上的投影所成的角。

定义 6 行走角 β : 焊丝轴线与焊缝法平面所成的角。焊枪轴线与焊缝法平面 $x_w O_w z_w$ 所成的角。

以上 6 个定义是弧焊机器人焊接中必备的, 其中焊缝倾角、焊缝转角、焊枪的工作角和行走角是影

响焊接质量的关键因素, 焊缝倾角和焊缝转角描述了焊接点的位置信息, 工作角和行走角描述了焊枪工作时的姿态信息, 根据不同的焊接位置, 以确定不同的焊枪姿态。

2 管道插接焊缝数学模型

在生产实际中, 圆柱管道之间的连通是较为广泛的管接连接方式之一, 形成较为复杂的相贯线焊缝。为了不失一般性, 设两个管柱采用偏置斜交方式连接。如图 2 所示, R 和 r 分别为主管和支管的半径(通常 R 为主管的内径, r 为支管的外径), 以下称之为主管和支管, θ 为相贯角, σ 为偏心距。主、支管分别采用 x_1, y_1, z_1 和 x_2, y_2, z_2 的直角坐标系, O_1 和 O_2 分别为两个坐标系的原点, O_2 在 x_1, y_1, z_1 坐标系中的坐标为 $(0, \sigma, 0)$ 。

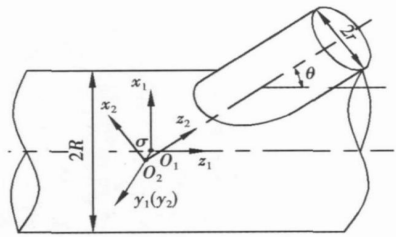


图 2 管道插接模型示意图
Fig 2 Model of intersecting pipes

2.1 相贯线方程位置模型

根据已知条件建立两个圆柱的相贯线方程, 即

$$\left. \begin{aligned} x_1^2 + y_1^2 &= R^2 \\ x_2^2 + y_2^2 &= r^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由于支管上相贯点的坐标 z_1 可随其圆周角做 360° 的圆周运动, 根据两坐标系空间位置关系结合式(1), 可以得到相贯线分别在两个坐标系中的的位置模型, 即

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \sqrt{R^2 - (r \sin \omega t + \sigma)^2} \\ y_1 &= r \sin \omega t + \sigma \\ z_1 &= \frac{-r \cos \omega t + \cos \theta \sqrt{R^2 - (r \sin \omega t + \sigma)^2}}{\sin \theta} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$
$$\left. \begin{aligned} x_2 &= r \cos \omega t \\ y_2 &= r \sin \omega t \\ z_2 &= \sqrt{R^2 - (r \sin \omega t + \sigma)^2} / \sin \theta - r \operatorname{ctg} \theta \cos \omega t \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2.2 相贯线焊缝特征模型

确定焊缝的特征模型主要是确定焊缝坐标系相

对世界坐标系的特征矩阵, 其中难点在于确定焊缝坐标系中的 z_w 轴。通过 CAD 模型提取焊缝参数的应用研究较多, 具有一定的通用性, 文献[2] 利用 MATLAB 工具软件最终实现了圆柱正交焊缝特征矩阵的数学模型。然而利用外部函数会加重控制系统的负担, 尤其是在不采用上位机参与计算的情况下。通过分析发现, 相贯线上任意点的切线, 始终与过该点的两个圆柱切平面的交线重合, 根据此发现可以简单的通过坐标系变换建立焊缝特征矩阵, 如图 3 所示。

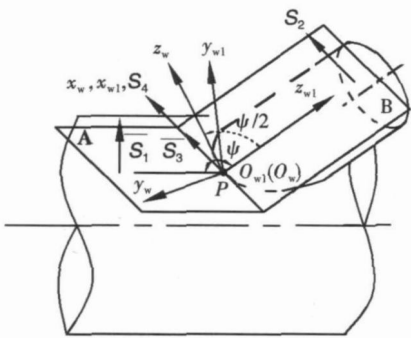


图 3 管道插接坐标系示意图

Fig. 3 Coordinate system of intersecting pipes

设过相贯线上 P 点且与主管相切的平面 A 的法线矢量为 $S_1(X_1, Y_1, Z_1)$, 与支管相切的平面 B 的法线矢量为 $S_2(X_2, Y_2, Z_2)$, 根据式(1)和式(2)可求得两个切平面的法线矢量 S_1 和 S_2 , 即

$$\psi = \cos^{-1} \left[\frac{\cos \theta \cos \omega t \sqrt{R^2 - (r \sin \omega t + \sigma)^2} - \sin \omega t (r \sin \omega t + \sigma)}{R} \right] \tag{9}$$

根据上面的分析结果, 首先建立焊缝辅助坐标系。定义焊缝辅助坐标系 $O_{w1}x_{w1}y_{w1}z_{w1}$: 原点 O_{w1} 位于焊缝上当前焊接点(上述的 P 点), x_{w1} 轴为相贯线上该点的切线且方向指向焊接方向, z_{w1} 轴为相贯线的法平面与支管切平面的交线, 方向由焊缝指向外面, y_{w1} 轴方向可以根据右手定则来确定。

根据辅助坐标系的定义可知, x_{w1} 坐标轴的矢量为 S_4 , z_{w1} 坐标轴的矢量为 $S_5(X_5, Y_5, Z_5)$, 设 y_{w1} 的坐标轴矢量为 $S_6(X_6, Y_6, Z_6)$ 。 S_5 可以由支管切平

$${}^0_w T = \begin{bmatrix} X_4 & Y_4 \cos(\frac{\psi}{2}) + Z_4 \sin(\frac{\psi}{2}) & -Y_4 \sin(\frac{\psi}{2}) + Z_4 \cos(\frac{\psi}{2}) & P_{wx} \\ X_5 & Y_5 \cos(\frac{\psi}{2}) + Z_5 \sin(\frac{\psi}{2}) & -Y_5 \sin(\frac{\psi}{2}) + Z_5 \cos(\frac{\psi}{2}) & P_{wy} \\ X_6 & Y_6 \cos(\frac{\psi}{2}) + Z_6 \sin(\frac{\psi}{2}) & -Y_6 \sin(\frac{\psi}{2}) + Z_6 \cos(\frac{\psi}{2}) & P_{wz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \frac{\sqrt{R^2 - (r \sin \omega t + \sigma)^2}}{R} \\ Y_1 &= \frac{r \sin \omega t + \sigma}{R} \\ Z_1 &= 0 \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

$$\left. \begin{aligned} X_2 &= \cos \theta \cos \omega t \\ Y_2 &= \sin \omega t \\ Z_2 &= -\sin \theta \cos \omega t \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

设平面 A 和平面 B 的相交线的矢量为 $S_3(X_3, Y_3, Z_3)$, 根据两平面相交线求法可得

$$X_3 = \begin{vmatrix} Y_1 & Z_1 \\ Y_2 & Z_2 \end{vmatrix}, Y_3 = \begin{vmatrix} Z_1 & X_1 \\ Z_2 & X_2 \end{vmatrix}, Z_3 = \begin{vmatrix} X_1 & Y_1 \\ X_2 & Y_2 \end{vmatrix} \tag{6}$$

设过点 P 的相贯线的切线矢量为 $S_4(X_4, Y_4, Z_4)$, 根据式(2)则有

$$\left. \begin{aligned} X_4 &= -\frac{r \cos \omega t (r \sin \omega t + \sigma)}{\sqrt{R^2 - (r \sin \omega t + \sigma)^2}} \\ Y_4 &= r \cos \omega t \\ Z_4 &= \frac{r \sin \omega t \sqrt{R^2 - (r \sin \omega t + \sigma)^2} + r \cos \theta \cos \omega t (r \sin \omega t + \sigma)}{\sin \theta \sqrt{R^2 - (r \sin \omega t + \sigma)^2}} \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

联立式(6)和式(7)则有

$$\frac{X_4}{X_3} = \frac{Y_4}{Y_3} = \frac{Z_4}{Z_3} = \frac{Rr}{\sin \theta \sqrt{R^2 - (r \sin \omega t + \sigma)^2}} \tag{8}$$

因为上述两条直线均过 P 点, 所以相贯线上点 P 的切线与两圆柱切平面的相交线重合。那么此时过点 P 作相贯线法平面, 两圆柱切平面与该法平面的交线的夹角, 就是该点的二面角。设二面角为 ψ 则

面 B 和过 P 点法平面之间的交线确定, 根据两平面相交线求法可得

$$X_5 = \begin{vmatrix} Y_2 & Z_2 \\ Y_4 & Z_4 \end{vmatrix}, Y_5 = \begin{vmatrix} Z_2 & X_2 \\ Z_4 & X_4 \end{vmatrix}, Z_5 = \begin{vmatrix} X_2 & Y_2 \\ X_4 & Y_4 \end{vmatrix} \tag{10}$$

y_{w1} 轴方向可以根据右手定则来确定。

将辅助坐标系绕 x 轴旋转 $\psi/2$, 便可以得到焊缝坐标系 $O_w x_w y_w z_w$, 即得到了焊缝坐标系相对于世界坐标系的特征矩阵

2.3 焊枪姿态模型

式(11)描述了焊缝的特征, 机器人焊接时, 根据焊缝不同点的位置来实时调整焊枪的姿态。此时分为两种运算过程。一种是根据焊缝位置结合工艺要求预定焊枪的工作角、行走角和自转角, 然后利用式(12)求得焊枪相对于焊缝坐标系的位姿矩阵, 即

$${}^0_tT = \text{Trans}({}^w p_t) \circ \text{Rot}(z, \gamma) \circ \text{Rot}(y, \beta) \circ \text{Rot}(x, \alpha)$$

(12)

式中: $\text{Trans}({}^w p_t)$ 为平移算子^[5]; ${}^w p_t$ 为确定焊枪坐标系原点在焊缝坐标系中位置的列矢量, 即

$${}^w p_t = [p_{twx}, p_{twy}, p_{twz}, 0]^T$$

那么焊枪坐标系相对于世界坐标系的位姿矩阵为

$${}^0_tT = {}^0_wT \circ {}^w_tT$$

(13)

反之, 如果已知焊枪坐标系相对于焊缝坐标系的位姿矩阵, 则可以按照求解欧拉角的通用方法^[5] 计算出焊枪当前的行走角、工作角和自转角。设

$${}^w_tT = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_{twx} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_{twy} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_{twz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(14)

则由式(13)和式(14)得

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \text{Atan2}(r_{32}/\cos\beta, r_{33}/\cos\beta) \\ \beta &= \text{Atan2}(-r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2}) \\ \gamma &= \text{Atan2}(r_{21}/\cos\beta, r_{11}/\cos\beta) \end{aligned} \right\}$$

(15)

式中: $\text{Atan2}(y, x)$ 为双参变量的反正切函数, 可以根据 x 和 y 的符号求得的角的方位。

3 仿真试验

在 Visual C++ 开发平台上, 利用 OpenGL 技术开发了一套管道插接焊接机器人的仿真系统, 如图4 所示。

在该系统中, 首先按一般性要求确定管道的参数, 然后根据 Denavit 和 Hartenberg 提出的通用方法^[5] 建立机器人的运动学方程。将上述的模型和算法引入到仿真系统中, 仿真结果显示焊枪顶端的运动曲线形状和位置与两管相交线完全吻合, 焊枪的姿态也与设定值完全相同, 因此证明了文中模型和

算法的正确性。

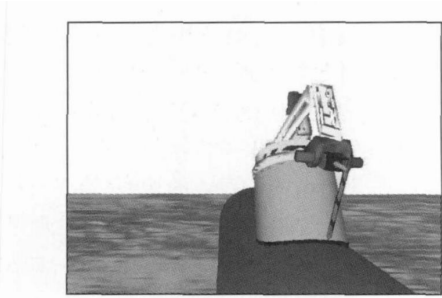


图 4 弧焊机器人仿真
Fig 4 Simulation of welding robot

4 结 论

(1) 从空间焊缝的角度出发, 建立了适用于弧焊机器人焊接的管道插接焊缝位置模型, 该模型具有一定的通用性和实用性。

(2) 提出了一种简单的、易于计算的焊缝特征矩阵的建立方法, 给出了管道插接中焊枪姿态的计算方法。该方法可用于弧焊机器人的离线编程及计算机仿真等领域。

参考文献:

[1] 王克鸿, 刘 永, 余 进. 弧焊机器人典型工件建模与姿态规划研究[J]. 电焊机, 2006, 33(6): 29—32.
[2] 王晓峰, 陈焕明, 江淑园. 焊接位姿参数定义的讨论及典型工件的建模[J]. 南昌航空工业学院学报(自然科学版), 2006, 26(2): 24—28.
[3] 陈志翔, 卢振洋, 殷树言, 等. 焊缝位姿及焊枪位姿的模型[J]. 机械工程学报, 2003, 39(7): 59—62.
[4] 何广中, 高洪明, 吴 林. 基于焊接位置数学模型的变位机逆运动学算法[J]. 机械工程学报, 2006 42(6): 86—91.
[5] John J. Craig. 机器人学导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

作者简介: 任福深, 男, 1976 年出生, 讲师, 博士研究生。研究方向为工业机器人控制、机器人焊接技术、焊接自动化与智能化。发表论文 10 余篇。

Email: renfushen@126.com

arc in understanding physical property of hyperbaric welding arc and seeking improvement of the quality of underwater hyperbaric welding. The spectral diagnostics was introduced, and the TIG welding arc in high-pressure was analyzed. A set of feasible method of high-pressure arc temperature measurement was established. The welding arc temperature in high-pressure was analyzed, and the function between the environment pressure and the arc temperature was established. The experimental result was analyzed. This research is significant and valuable to the study of hyperbaric welding arc physics.

Key words: arc; hyperbaric welding; temperature; spectral diagnostics

Improvement on numerical analysis precision of surface deformation of molten pool in fully-penetrated GTAW ZHAO Ming, ZHAI Lei, SUN Yongxing (College of Mechanical & Electronic Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China). p21—24

Abstract: The improvement was made to solve the problems existing in present numerical models of fully-penetrated GTAW (gas tungsten arc welding) weld pool surface deformation. Based on the complete and correct equations of both top and back surfaces deformations of molten pool and the more accurately predicted weld pool geometry, the fully-penetrated molten pool surface deformation at the quasi-steady state were numerically calculated and discussed. The calculated results were verified by experiments. The results indicate that this study solves the problems of the lesser predicted molten pool surface deformation in literatures and improves the numerical analysis precision of molten pool surface deformation.

Key words: surface deformation; fully-penetrated molten pool; precision improvement; numerical simulation

Residual distortion of thin-plate weldments controlled by rotating extrusion LI Jun, YANG Jianguo, WENG Lulu, FANG Hongyuan (State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p25—28

Abstract: A new technology was proposed to control residual distortion of thin-plate weldments with rotating extrusion. Extrusion force with is exerted by rotary action of an extrusion head on weld and zone near the weld to form the tensile plastic strain, which can counteract the welding-induced residual compressive plastic strain, and reduce or even eliminate the welding residual distortion. The surface of weld processed by this method is flat and smooth, and the stress concentration in the weld is decreased obviously. Experimental results showed that this technology can decrease the welding residual distortion of thin-plate weldments to below 3% of that of conventional weldments. The control effect of welding residual distortion has relation to some technical parameters. A good control effect of welding distortion can be acquired only when all kinds of technological parameters are matched properly.

Key words: rotating extrusion; welding; thin plate; distortion

Effect of supersonic fine particles bombarding on oxidation behavior of MCrAlY coating JI Zhaoxue, WANG Minzhuang, FENG Ribao, WANG Zhiping (College of Sciences, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China). p29—32

Abstract: MCrAlY bonding coating was deposited on GH99 high-temperature alloy using atmospheric plasma spraying (APS). The influence of supersonic fine particles bombarding on microstructure and thermally grown oxide of MCrAlY coating was investigated, and the interface, phase constituents and the evolution of the coating exposed at 1 100 °C for different times was evaluated by SEM, XRD and glow discharge spectroscopy. The experimental results showed that the oxide particles were fine through supersonic treating, then Al₂O₃ scale formed quickly on MCrAlY surface, and Ni and Cr were prevented from oxidizing. For this reason, the formation of Ni (Cr, Al)₂O₄ can be avoided and flaw decreases, so that the high-temperature oxidation resistance of coating is improved.

Key words: thermal barrier coatings; supersonic fine particles bombarding; thermally grown oxide; plasma spraying; MCrAlY bond coat

Modeling on weld position and welding torch pose in welding of intersected pipes REN Fushen^{1,2}, CHEN Shujun¹, YIN Shuyan¹, GUAN Xinyong¹ (1. School of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. School of Mechanical Science and Engineering, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, Heilongjiang, China). p33—36

Abstract: The welding seam of intersected pipes is a typical and complicated space welding seam. The models of weld position and welding torch pose were founded for arc welding robot, and their position and pose were described precisely and quantificationally by coordinates. Then, the welding torch orientations were described by work angle, traveling angle and rotation angle, and the calculation methods were presented. A new simple method of calculation is put forward to establish the coordinate system of welding seam according to the characteristic analysis that any tangent through the point on intersection line coincides with the intersection line of two cylinder sections at this point. The model is general to the intersected pipes and it has significance for modeling on weld position and welding torch pose, simulating and off line programming for robot welding.

Key words: arc welding robot; intersection weld; model of weld position; model of welding torch pose

Analysis on microstructure and high temperature stability of nanostructured thermal barrier coatings WANG Hongying¹, HAO Yunfei^{1,2}, CHEN Hui², TANG Weijie¹ (1. Industry Center, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 2. Material Science and Engineering College, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China). p37—40

Abstract: Nanostructured thermal barrier coatings (TBCs) have been prepared by air plasma spraying using reconstituted nano-