



Experiment study on thermal mixing performance of HTR-PM reactor outlet

Yangping Zhou^{a*1}, Pengfei Hao^b, Fu Li^a, Lei Shi^a, Feng He^b, Yujie Dong^a, Zuoyi Zhang^{a,a} *Institute of Nuclear and New Energy Technology, Collaborative Innovation Center of Advanced Nuclear Energy Technology, the Key Laboratory of Advanced Reactor Engineering and Safety, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China,* ^b *School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 March 2015

Received in revised form 1 March 2016

Accepted 7 March 2016

Available online 28 March 2016

ABSTRACT

A model experiment is proposed to investigate the thermal mixing performance of HTR-PM reactor outlet. The design of the test facility is introduced, which is set at a scale of 1:2.5 comparing with the design of thermal mixing structure at HTR-PM reactor outlet. The test facility using air as its flow media includes inlet pipe system, electric heaters, main mixing structure, hot gas duct, exhaust pipe system and I&C system. Experiments are conducted on the test facility and the values of thermal-fluid parameters are collected and analyzed, which include the temperature, pressure and velocity of the flow as well as the temperature of the tube wall. The analysis results show the mixing efficiency of the test facility is higher than that required by the steam generator of HTR-PM, which indicates that the thermal mixing structure of HTR-PM fulfills its design requirement.

© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.

Zusammenfassung

Ein Modellversuch zur Untersuchung der thermischen Mischleistung am Ausgang des HTR-PM wird vorgeschlagen. Die Auslegung der Prüfeinrichtung wird vorgestellt, die im Maßstab 1: 2,5 der Konstruktion der thermischen Mischanordnung am HTR-PM-Ausgang liegt. Die Prüfanlage mit Luft als Strömungsmedium umfasst Einlassrohrsystem, elektrische Heizungen, Hauptmischer, Heißgasleitung, Abgasrohrsystem und I & C-System. Experimente werden an der Testanlage durchgeführt und die Werte der thermischen Flußparameter werden gesammelt und analysiert, die die Temperatur, den Druck und die Geschwindigkeit der Strömung sowie die Temperatur der Rohrwandung einschließen. Die Analyseergebnisse zeigen, dass die Mischleistung der Testanlage höher ist als die, die vom Dampferzeuger des HTR-PM benötigt wird, was anzeigt, dass die thermische Mischstruktur (Wärmemischer) des HTR-PM ihre konstruktive Anforderung erfüllt.

© 2016 Elsevier B.V. Alle Rechte vorbehalten.

1. Introduction

In December 2012, Pebble-bed Module High

1. Einleitung

Im Dezember 2012 startete der modulare

¹ * Corresponding author. Tel.: +86 10 62783555; fax: +86 10 62771150. E-mail address: zhouyp@mail.tsinghua.edu.cn (Y. Zhou).

Temperature gas-cooled Reactor (HTR-PM) (Dong and Gao, 2006; Zhang et al., 2009), one of Chinese National S&T Major Projects, started its First Concrete Date (FCD) in Rongcheng, Shangdong Province. HTR-PM is the world's first fourth-generation commercial nuclear power plant with high thermal efficiency and inherent safety features. In China, Tsinghua University is now conducting the studies for developing and validating the key equipment and technologies related to the demonstration project based on the HTR-10-project (10MW High Temperature Gas-cooled Test Reactor) (Wu et al., 2002; Xu and Zuo, 2002).	gasgekühlter Kugelbett- Hochtemperatur- Reaktor (HTR-PM) (Dong und Gao, 2006, Zhang et al., 2009), eins der chinesischen National S & T Major Projects, seinen ersten Betonguss (FCD) in Rongcheng, Provinz Kanton. HTR-PM ist das weltweit erste kommerzielle Kernkraftwerk der vierten Generation mit hohem thermischen Wirkungsgrad und inhärenten Sicherheitsmerkmalen. In China führt die Tsinghua-Universität nun die Studien zur Entwicklung und Validierung der wichtigsten Komponenten und Technologien im Zusammenhang mit dem Demonstrationsprojekt auf Basis des HTR-10-Projekts (gasgekühlter 10MW Hochtemperatur- Testreaktor) durch (Wu et al., 2002; Xu und Zuo, 2002).
For High Temperature Gas-cooled Reactor (HTR), the radial temperature difference of the coolant helium out of the cylindrical reactor core is up to above 100°C. In addition, much higher temperature difference can be introduced to the main coolant flow by the small cold leakages into the bottom of reactor vessel. In order to ensure the technical feasibility and safety of steam generator by limiting the thermal loads on the heat-exchanging component, a thermal mixing structure is proposed to mix the coolant helium out of the reactor. Usually, the thermal mixing structure consists of three components: narrow cross channel, hot gas chamber and hot gas duct where the temperature difference of coolant is reduced through a turbulent mixing process. Due to the complexity of the flow path and high speed turbulence with Reynolds number exceeding 10^5, the accurate performance of thermal mixing structure is difficult to be obtained through pure numerical calculation. In order to validate the design of the thermal mixing structure, usually a scale or full size experiment is applied to study its thermal mixing performance and pressure drop by combining related numerical calculation.	Beim gasgekühlten Hochtemperatur-Reaktor (HTR) reicht die radiale Temperaturdifferenz des Helium-Kühlmittels beim Verlassen des zylindrischen Reaktorkerns bis über 100°C. Außerdem können die kleinen Kaltleckagen im Boden des Reaktorkessels zu einer noch viel höheren Temperaturdifferenz im Hauptkühlmittelstrom führen. Um die technische Realisierbarkeit und Sicherheit des Dampferzeugers durch Begrenzung der thermischen Belastungen an der Wärmetauschkomponente zu gewährleisten, wird ein Wärmemischer vorgeschlagen, um das Kühlmittel Helium am Reaktorausstritt zu mischen. In der Regel besteht der Wärmemischer aus drei Komponenten: schmaler Kreuzkanal, Heißgaskammer und Heißgaskanal, bei dem die Temperaturdifferenz des Kühlmittels durch einen turbulenten Mischprozess reduziert wird. Aufgrund der Komplexität des Strömungsweges und der Hochgeschwindigkeits-Turbulenz mit einer Reynolds-Zahl von mehr als 10^5 ist die genaue Leistung des Wärmemischers durch reine numerische Berechnung schwer zu ermitteln. Um das Design des Wärmemischers zu validieren, wird üblicherweise ein Experiment im Mastab bis 1 zu 1 durchgeführt, um seine Mischleistung und den Druckabfall zu untersuchen, indem die entsprechende numerische Berechnung kombiniert wird.
The air simulation tests in a 1:2.9 scaled plexiglass model were conducted to evaluate the mixing performance of the hot gas header and the hot gas duct of the HTR-module reactor (Damm and Wehrlein, 1992). For High-Temperature engineering	Die Luft-Simulationstests in einem 1: 2,9 Plexiglas-Modell wurden durchgeführt, um die Mischleistung des Heißgaskopfes und des Heißgaskanals des HTR-Modulreaktors zu bewerten

Test Reactor (HTTR), thermal hydraulic tests on the core and core-bottom structure were carried out on the Helium Engineering Demonstration Loop (HENDEL) under simulated reactor operating conditions (Inagaki et al., 1990, 1992, 2004). Thermal mixing performance of the coolant in the hot gas chamber of HTR-10 is experimentally investigated on a 1:1.5 scale model with air (Huang, 1995; Yao et al., 2002).

Due to the rapid development of software and hardware of computer science and related fields, especially CFD (Computational Fluid Dynamics), numerical simulation is also carried out to analyze the thermal mixing performance of HTR reactor outlet. The flow field in the hot gas chamber of HTR reactor is studied with CFX5 software (Wang et al., 2006). Analysis of the flow field indicates that the turbulent twisting flow results in the high thermal mixing efficiency. With the CFD software, several turbulent models, such as the classical k-e model, advance two-equation models and Reynolds-stress model are compared by considering their accuracy for simulating the related flow in the mixing structure (Von Lavante and Laurien, 2007).

This paper introduces the design of the test facility which is applied to evaluate the performance of thermal mixing structure at HTR-PM reactor outlet. Then, results of three kinds of experiments are demonstrated, which includes

- experiments of constant flow rate versus variable temperature difference,
- constant temperature difference versus variable flow rate as well as
- constant temperature difference and constant flow rate versus variable hot/cold flow ratio.

Finally, some conclusions are given based on the experiment results.

(Damm und Wehrlein, 1992). Für den Hochtemperatur-Testreaktor (HTTR) wurden thermische hydraulische Prüfungen an der Struktur von Core und Boden mit der Helium Engineering Demonstrationsschleife (HENDEL) unter simulierten Reaktorbetriebsbedingungen durchgeführt (Inagaki et al., 1990, 1992, 2004). Die thermische Mischleistung des Kühlmittels in der Heißgaskammer des HTR-10 wird experimentell auf einem 1: 1,5-Modell mit Luft untersucht (Huang, 1995, Yao et al., 2002).

Durch die rasante Entwicklung von Software und Hardware in der Informatik und verwandten Bereichen, insbesondere bei CFD (Computational Fluid Dynamics), wird auch eine numerische Simulation durchgeführt, um die thermische Mischleistung des HTR-Ausgangs zu analysieren. Das Strömungsfeld in der Heißgaskammer des HTR wird mit CFX5-Software untersucht (Wang et al., 2006). Die Analyse des Strömungsfeldes zeigt an, dass die turbulente Verdrehungsströmung zu einer hohen Wärmedurchmischung führt. Mit der CFD-Software werden mehrere Turbulenz-Modelle, wie das klassische k-e-Modell, fortschrittliche zwei-Gleichungsmodelle und das Reynolds-Stressmodell verglichen, indem man ihre Genauigkeit für die Simulation des entsprechenden Flusses im Wärmemischer berücksichtigt (von Lavante und Laurien, 2007).

In diesem Papier wird das Design der Prüfeinrichtung vorgestellt, die zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des Wärmemischers am HTR-PM-Ausgang eingesetzt wird. Dann werden die Ergebnisse drei verschiedener Experimente demonstriert, und zwar:

- mit konstanter Durchflussrate gegenüber variabler Temperaturdifferenz,
- konstanter Temperaturdifferenz gegenüber variabler Durchflussrate sowie
- konstanter Temperaturdifferenz und Durchflussrate gegenüber variablem heiß-/kalt-Durchflussverhältnis.

Schließlich werden einige Schlussfolgerungen auf Grundlage der Test-Ergebnisse gezogen.

2. Main parameters of test facility

The design criteria and the main parameters

2. Hauptparameter der Prüfeinrichtung

Die Designkriterien und die Hauptparameter der

of the test facility are determined according to the self-modeling and similarity analysis (Zhou et al., 2011, 2014). The test facility is set as a scale of 1:2.5 compared with the design of thermal mixing structure at HTR-PM reactor outlet. The experiment uses air instead of helium as the working fluid. The main parameters of the model experimental system and the mixing structure of HTR-PM under rated condition are shown as Table 1. The aluminum alloy (ZL101A) is chosen as internal structural material of the installation because its important physical characters, such as density, specific heat capacity and thermal conductivity, etc., are close to those of the graphite adopted in HTR-PM. In addition, the aluminum alloy has some additional advantages such low density and easy processing.	Testanlage werden nach der Selbstmodellierung und Ähnlichkeitsanalyse bestimmt (Zhou et al., 2011, 2014). Die Prüfeinrichtung wird im Maßstab 1: 2,5 im Vergleich zur Konstruktion des Wärmemischers am HTR-PM-Ausgang eingestellt. Das Experiment verwendet Luft anstelle von Helium als Arbeitsflüssigkeit. Die Hauptparameter des Modellversuchs-Systems und der Wärmemischer des HTR-PM unter Nennbedingungen sind in Tabelle 1 dargestellt. Als Material für die innere Struktur der Anlage wird die Alu-Legierung (ZL101A) gewählt, da ihre wichtigen physikalischen Größen wie Dichte, spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit usw. nahe denen des im HTR-PM eingesetzten Graphits liegen. Darüber hinaus hat die Alu-Legierung zusätzliche Vorteile wie niedrige Dichte und einfache Verarbeitung.
Prandtl number and Reynolds number are found to be the two main parameters influencing the thermal mixing performance of the related structures by previous studies (Damm and Wehrlein, 1992; Inagaki et al., 1992; Yao et al., 2002; Zhou et al., 2011). Usually the mixing structure of the test facility is similar in geometry with that of real HTR. In this situation, Prandtl number and Reynolds number of the flow in hot gas duct are adopted as the key measures to indicate the similarity between the real mixing structure and the test structure. In this section, the Prandtl number, Reynolds number and other parameters are related with the flow in hot gas duct unless additional notification. For our study, the similarity of Prandtl numbers between HTR-PM and test facility is excellent since the Prandtl number of air at experiment condition is close to that of helium in HTR-PM.	Frühere Studien zeigten, dass die Prandtl- und Reynolds-Zahl die Hauptparameter sind, die Einfluss auf die thermische Mischleistung der betreffenden Strukturen haben (Damm und Wehrlein, 1992, Inagaki et al., 1992, Yao et al., 2002, Zhou et al., 2011). Gewöhnlich ist die Geometrie des Mischers der Testanlage ähnlich der des echten HTR. Dabei werden die Prandtl- und Reynolds-Zahl der Strömung im Heißgas-Kanal als die wichtigsten Indikatoren für die Ähnlichkeit zwischen dem realen Mischer und dem Testmischer übernommen. In diesem Abschnitt korrelieren die Prandtl-, die Reynolds-Zahl und andere Parameter mit der Strömung im Heißgas-Kanal, wenn nicht anders vermerkt. Für unsere Studie ist die Ähnlichkeit der Prandtl-Zahlen zwischen HTR-PM und Testanlage hervorragend, da die Prandtl-Zahl der Luft unter Experimentbedingungen nahe der von Helium in HTR-PM liegt.
Reynolds number of the flow in hot gas duct can be more than 3×10^6 for some HTRs such as HTR-PM, and therefore it is difficult to make a test facility get the same Reynolds number. The main reason is that the Mach number of flow in the test facility will become much higher where the compressibility of the airflow will severely hurt its similarity with the helium flow in the real HTR where the Mach number of the helium flow is only around 0.03.	Die Reynolds-Zahl der Strömung im Heißgas-Kanal kann für einige HTRs, wie eben den HTR-PM, mehr als 3×10^6 betragen, Daher ist es schwierig, auf einer Test-Anlage die gleiche Reynolds-Zahl zu erreichen. Der Hauptgrund dafür ist, dass die Machzahl der Strömung in der Testanlage viel höher wird, wo die Kompressibilität des Luftstroms seine Ähnlichkeit mit dem Heliumfluss im realen HTR, wo die Machzahl des Heliumflusses nur etwa 0,03 beträgt, stark beeinträchtigt.

Table 1

Main parameters of test facility and HTR-PM under rated condition.

Parameter	HTR-PM	Test facility
Pressure (MPa)	7	0.1
Diameter of hot gas duct (mm)	750	300
Flow media	Helium	Air
Quality flow rate (kg/s)	96	5
Flow rate in hot gas duct (m/s) (rated)	66.47	68.63
Mach number of flow in hot gas duct	0.033	0.185
Temperature in hot gas duct (°C)	750	70
Viscosity of flow in hot gas duct (10^{-5} Pas)	4.45	1.99
Reynolds number of flow in hot gas duct (10^6)	3.67	1.03 (0.23–1.05)
Prandtl number of flow in hot gas duct	0.667	0.694

*

Thus, the maximum Reynolds number of the model experiment is usually around 1.0×10^6 . The previous study related with HTR-module indicated that the mixing performance would decrease slightly when extrapolating the situation of low Reynolds number (1.6×10^6) in the model experiment to the situation of high Reynolds number (3.2×10^6) in the real **HTR-module** (Damm and Wehrlein, 1992). The study on HTTR also showed that the thermal mixing performance with a low Reynolds number of the experiment condition are close to that with a high Reynolds number of real HTTR based on theoretical analysis and experiments (Inagaki et al., 1990, 1992, 2004). In addition, the results of experiment on HTR-10 revealed that thermal mixing performance would become approximately stable when the Reynolds number was higher than around 2×10^5 (Yao et al., 2002). Some simulation calculation (Wang et al., 2006; Zhou et al., 2014) also confirmed this situation.

Somit beträgt die maximale Reynolds-Zahl des Modellversuchs üblicherweise etwa $1,0 \times 10^6$. Die bisherige Studie, die mit dem HTR-Modul zusammenhängt, zeigte, dass die Mischleistung beim Extrapolieren der Situation der niedrigen Reynolds-Zahl ($1,6 \times 10^6$) im Modellversuch leicht abnehmen würde, verglichen mit der Situation der hohen Reynolds-Zahl ($3,2 \times 10^6$) im realen HTR-Modul (Damm und Wehrlein, 1992). Die Studie über den HTTR zeigte auf der Grundlage theoretischer Analysen und Experimente (Inagaki et al., 1990, 1992, 2004) auch, dass die Wärmemischleistung mit einer niedrigen Reynolds-Zahl unter Testbedingungen nahe der beim realen HTTR mit einer hohen Reynolds-Zahl liegt. Darüber hinaus zeigten die Testergebnisse auf dem HTR-10, dass die thermische Mischleistung annähernd stabil würde, wenn die Reynolds-Zahl höher wäre als etwa 2×10^5 (Yao et al., 2002). Einige Simulationsberechnungen (Wang et al., 2006, Zhou et al., 2014) bestätigten diese Situation ebenfalls.

This phenomenon can also be found according to theory analysis (Inagaki et al., 1990; Zhou et al., 2011). For incompressible turbulent flow under steady-state conditions, the energy equation can be given as following with non-dimensional variables:

Dieses Phänomen kann auch mit theoretischer Analyse gefunden werden (Inagaki et al., 1990, Zhou et al., 2011). Für die inkomprimierbare turbulente Strömung unter stationären Zuständen kann die Energiegleichung mit nichtdimensionalen Variablen gegeben werden, wie folgt:

$$\overline{U}_i^* \frac{\partial \overline{T}^*}{\partial X_i^*} = \left(\frac{1}{Re Pr} + \frac{1}{Re Pr_t} \frac{\nu_t}{\nu} \right) \frac{\partial^2 \overline{T}^*}{\partial X_i^{*2}} \quad (1)$$

where,

U indicates the flow rate;

T indicates the temperature;

X indicates the coordinate;

Re is the Reynolds number;

Pr is the Prandtl number;

ν indicates the kinematic viscosity with unit of m^2/s ;

superscript $*$ indicates the non-dimensional variable;

- indicates the time-averaged value; subscript

i indicates the direction of coordinate whose values are 1, 2 and 3;

subscript t indicates the turbulent parameter.

wobei

U die Strömungsgeschwindigkeit anzeigt;

T die Temperatur;

X die Koordinate;

Re ist die Reynolds-Zahl;

Pr ist die Prandtl-Zahl;

ν zeigt die kinematische Viskosität in m^2/s an;

hoch $*$ bezeichnet die nichtdimensionale Variable;

- gibt den zeitlich gemittelten Wert an;

i gibt die Koordinatenrichtung mit Werten 1, 2 und 3 an;

tief t ist der Turbulenz-Parameter.

If all channels in the two mixing structure (test facility and HTR-PM) are independently considered, a statistics work based on the previous work (Zhou et al., 2014) shows that all of the Reynolds numbers of the flow in all channels are above 3.0×10^4 under the rated condition. Because there is no clear answer for the value of ν_t/ν for the flow in the complex mixing structure, the situation of fully developed turbulence in the center of a pipe can be adopted here (Inagaki et al., 1990; Zhou et al., 2011) where Reynolds number should be bigger than 5×10^3 :

Wenn man alle Kanäle in den beiden Mischern (Testanlage und HTR-PM) unabhängig voneinander betrachtet, so zeigt eine Statistikaarbeit auf Grundlage bisheriger Arbeiten (Zhou et al., 2014), dass alle Reynoldszahlen der Strömung in allen Kanäle mehr als $3,0 \times 10^4$ unter dem Nennzustand liegen. Weil es keine klare Angabe für den Fluß-Wert ν_t/ν in dem komplexen Mischer gibt, kann hier die Situation voll entwickelter Turbulenz in der Rohrmitte angenommen werden (Inagaki et al., 1990, Zhou et Al., 2011) wo die Reynolds Zahl größer als 5×10^3 sein sollte:

$$\frac{\nu_t}{\nu} = a Re^n, \quad a = 0.01 - 0.1, \quad n = 7/8 - 1 \quad (2)$$

where, n increases with the increase of Reynolds number and a is a constant. Here, the conservative value of $7/8$ for n is used, and then we can get:

wo n sich mit dem Anstieg der Reynoldszahl erhöht und a eine Konstante ist. Hier wird der konservative Wert von $7/8$ für n verwendet und dann erhalten wir:

$$\overline{U}_i^* \frac{\partial \overline{T}^*}{\partial X_i^*} = \left(\frac{1}{Re Pr} + \frac{a Re^{7/8}}{Re Pr_t} \right) \frac{\partial^2 \overline{T}^*}{\partial X_i^{*2}} \quad (3)$$

Since Pr and Pr_t are all around 1 and Re is bigger than 5×10^3 , this equation can be changed to following which is similar to the previous work (Inagaki et al., 1990):

Da Pr und Pr_t alle um 1 liegen und Re größer als 5×10^3 ist, kann diese Gleichung auf folgendes geändert werden, was der vorherigen Arbeit ähnlich ist (Inagaki et al., 1990):

$$\overline{U}_i^* \frac{\partial \overline{T}^*}{\partial X_i^*} = a Re^{-1/8} Pr_t^{-1} \frac{\partial^2 \overline{T}^*}{\partial X_i^{*2}} \quad (4)$$

For the rated condition of HTR-PM, the Reynolds number equals to 3.67×10^6 and Pr_t equals to around 0.85 (Launder and Spalding, 1974), then we can get:

Für den Nennzustand des HTR-PM entspricht die Reynolds-Zahl $3,66 \times 10^6$ und Pr_t entspricht etwa 0,85 (Launder und Spalding, 1974). Damit erhalten wir:

$$\overline{U}_i^* \frac{\partial \overline{T}^*}{\partial X_i^*} = 0.178a \frac{\partial^2 \overline{T}^*}{\partial X_i^{*2}} \quad (5)$$

For the rated condition of test facility, the Reynolds number equals to around 1×10^6 and Pr_t equals to around 0.85, then we can get

Für den Nennzustand der Testanlage entspricht die Reynoldszahl etwa 1×10^6 und Pr_t entspricht etwa 0,85, so erhalten wir:

$$\overline{U}_i^* \frac{\partial \overline{T}^*}{\partial X_i^*} = 0.209a \frac{\partial^2 \overline{T}^*}{\partial X_i^{*2}} \quad (6)$$

In addition, the value n is close to 1 rather than $7/8$ if Reynolds number is bigger than 5×10^5 according to Eq. (2) and, therefore, the difference of non-dimensional temperature distributions between the mixing structures of HTR-PM and test facility will become even smaller. In this way, it can be concluded that the thermal mixing performance of test facility can credibly reflect the performance of mixing structure at HTR-PM reactor outlet, which is similar with the previous studies (Damm and Wehrlein, 1992; Inagaki et al., 1992; Yao et al., 2002; Wang et al., 2006).

Darüber hinaus ist der Wert n anstatt $7/8$ nahe bei 1, wenn die Reynolds-Zahl größer als 5×10^5 nach Gl. (2) ist. Damit wird der Unterschied nichtdimensionaler Temperaturverteilungen zwischen dem HTR-PM-Mischer und der Testanlage noch kleiner. Auf diese Weise kann man schließen, dass die thermische Mischleistung der Testapparatur die Leistungsfähigkeit des Mixers am HTR-PM-Ausgang glaubwürdig widerspiegeln kann, was zu den bisherigen Studien ähnlich ist (Damm und Wehrlein, 1992, Inagaki et al. 1992, Yao et al., 2002, Wang et al., 2006).

3. Structure of model experiment system

The overall design is shown as Fig. 1 which is determined with the calculation analysis by considering the size of experiment site and equipment. The whole test facility can be divided as three regions: inlet room, main experiment room and exhaust room.

3.1. Inlet room

The inlet room is used to place the air blowers and their control cabinet, whose inner wall are installed with wooden acoustic boards for heat insulation and sound absorption. There are three air blowers and their corresponding frequency transformers in this room. Two big blowers provide air to hot gas branch and cold gas branch, respectively, and the small one provides air to the branch simulating the leakage flow. The shock absorbers are equipped at the bottom of the blowers and the metallic bellows are applied to connect the outlet of blowers and following stainless steel pipeline in order to eliminate the influence of shock of the blowers to other components of the installation. The metal filters are installed on the windows of the inlet room and the inlet of the blowers in order to ensure the safety and accuracy of the sensors in the test facility by removing the dust in the air.

3.2 Thermal mixing test facility

The whole test facility (Fig. 1) for thermal mixing includes: inlet pipe system, electric heaters, main mixing structure, hot gas duct, exhaust pipe system and I&C system. Most equipment is installed in the main experiment building except some components of inlet system and exhaust system.

The inlet system consists of air blowers, their control cabinet and related pipeline and valves. The inlet air mainly consists of a hot gas branch and a cold gas branch. For the hot gas branch whose flow indicated by the red arrows in Fig. 1, the air flows from the outlet of the air blower to the high power electric heater, and then goes into main mixing structure through the central inlet of it after being heated by the electric heater. In the cold gas branch whose flow indicated by the green arrows in Fig. 1, the air flows from another air blower to the low power

3. Aufbau des Modellversuchs-Systems

Die Gesamtgestaltung ist in Fig. 1 dargestellt, die mit der Berechnungsanalyse unter Berücksichtigung der Größe der Versuchsstätte und der Ausrüstung bestimmt wird. Die gesamte Testanlage kann man als drei Regionen verstehen: Einlass, Hauptversuchsraum und Abblasraum.

3.1. Einlass

Im Einlassraum sind die Luftgebläse und deren Schaltschrank untergebracht. Seine Innenwände sind mit hölzernen Akustikplatten zur Dämmung von Schall und Wärme ausgekleidet. In diesem Raum befinden sich drei Luftgebläse mit zugehörigen Frequenzwandlern. Zwei große Gebläse liefern Luft zum Heißgas- bzw. Kaltgaszweig. Der kleine liefert Luft für die Leckstromsimulation. Die Stoßdämpfer sind an der Unterseite der Gebläse angeordnet. Metallbälge verbinden den Ausgang der Gebläse mit der Edelstahlrohrleitung, um den Einfluss von Gebläse-Erschütterungen auf andere Komponenten zu verhindern. Metallfilter an den Fenstern des Einlassraums und am Gebläse-Eingang gewährleisten die Sicherheit und Genauigkeit der Sensoren in der Testanlage, indem sie den Staub aus der Luft entfernen.

3.2 Testanlage zur Wärmemischung

Die gesamte Testanlage (Fig. 1) für die Wärmemischung umfasst: Einlassrohrsystem, elektrische Heizungen, Hauptmischer, Heißgasleitung, Abgasrohrsystem und I & C-System. Die meisten Komponenten sind im Hauptversuchsbauwerk installiert, mit Ausnahme einiger Komponenten des Einlasssystems und der Abgasanlage.

Das Einlasssystem besteht aus Luftgebläsen, deren Schaltschrank und zugehörigen Rohrleitungen und Ventilen. Die Einlassluft besteht hauptsächlich aus einem Heißgas- und einem Kaltgaszweig. Für den Heißgas-Zweig, dessen Strömung durch die roten Pfeile in Fig. 1 angedeutet ist, strömt die Luft aus dem Auslaß des Luftgebläses zu der Hochleistungs-Elektroheizung und fließt nach der el. Aufheizung über den zentralen Einlaß in den Hauptmischer. In dem Kaltgaszweig, dessen Strömung durch die grünen Pfeile in Fig. 1 angedeutet ist, strömt die Luft von einem anderen Luft-

electric heater, and then goes into the main mixing structure through the surrounding inlets of it without being heated by the electric heater. The hot air and cold air are mixed in the main mixing structure, and then flow to the pipelines in the exhaust room through the exhaust pipe system. Finally, the air is exhausted through the chimney on the exhaust room. The flow of exhausted air is indicated by yellow arrows in Fig. 1.

The I&C system consists of main control station, local control devices, sensors and related wiring, which mainly is used for operation control of the test facility and collection of experiment data. Various sensors are connected with several data acquisition cards produced by NI (National Instruments) which are installed in two main control stations.

gebläse zu dem schwachen elektrischen Heizelement und fließt dann ohne (weitere) el. Aufheizung durch die peripheren Einlässe in den Hauptmischer. Die heiße und die kalte Luft werden in diesem gemischt und fließen dann durch das Abgasrohrsystem zu den Rohrleitungen im Abgasraum. Schließlich wird die Luft durch den Schornstein auf dem Abgasraum ausgeblasen. Die Strömung der Abluft ist in Fig. 1 durch gelbe Pfeile angedeutet.

Das I & C-System besteht aus der Hauptsteuerung, den lokalen Steuergeräten, den Sensoren und der zugehörigen Verdrahtung, die hauptsächlich für die Steuerung der Prüfeinrichtung und die Daten-Erfassung verwendet wird. Verschiedene Sensoren sind mit mehreren Datenerfassungskarten von NI (National Instruments) verbunden, die in zwei Hauptsteuerstationen installiert sind.

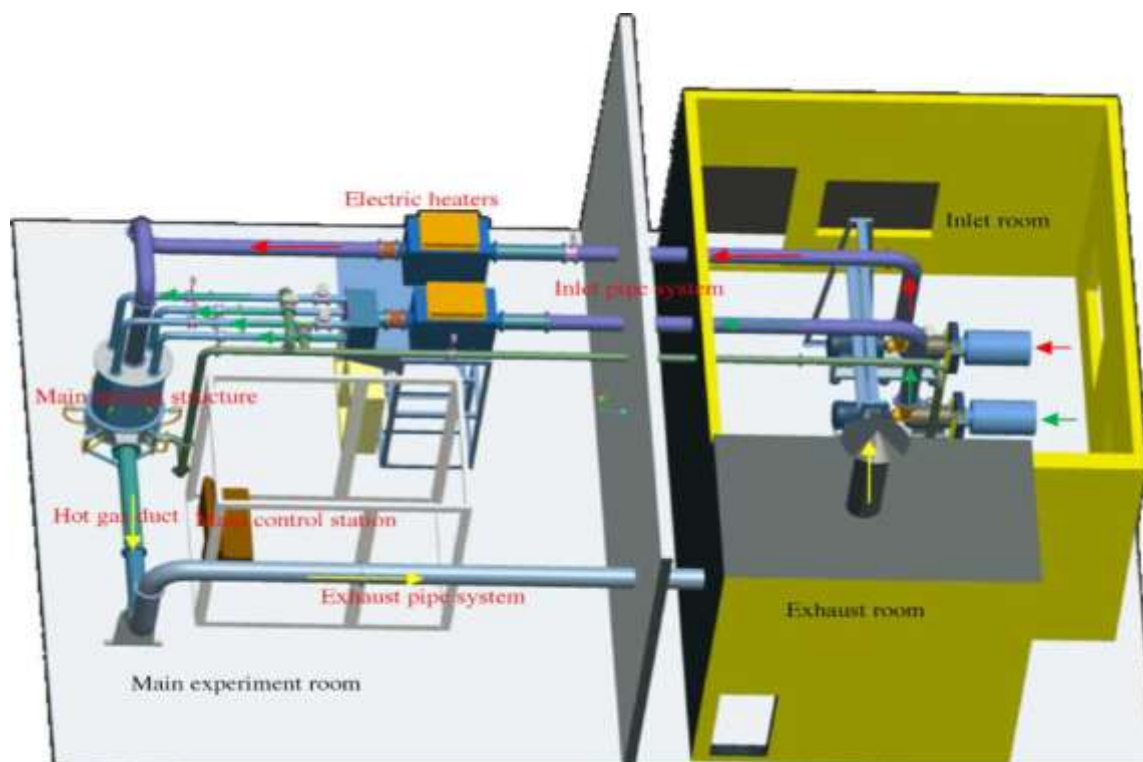


Fig. 1. Overall design of test facility.



Fig. 2. Main mixing

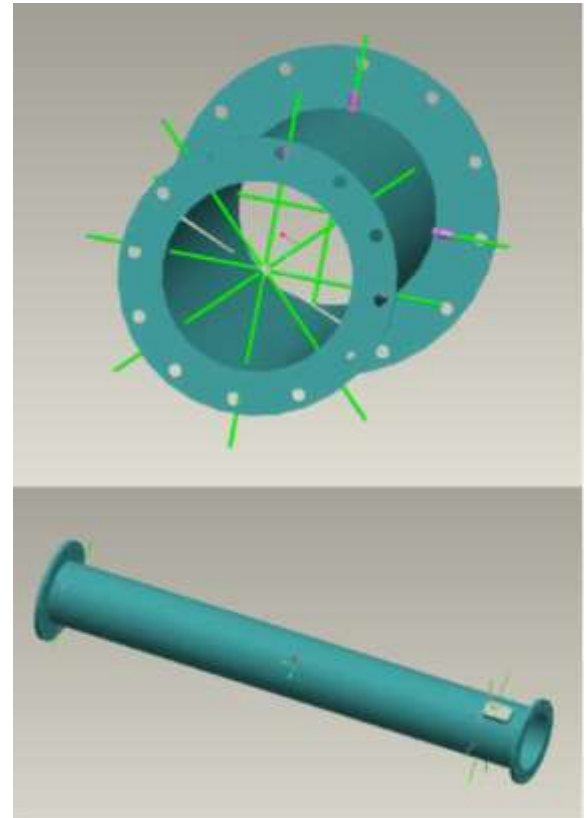


Fig. 3. Design of hot gas

3.3 Main mixing structure

The main mixing structure is the key component of test facility which consists of the inlet chamber, the narrow cross channel and the hot gas chamber which is shown as Fig. 2. The air of hot gas branch and cold gas branch flows into the inlet chamber through the big central inlet and the four small surrounding inlets at the upper cap, respectively. The inlet chamber mainly consists of an inner sleeve and an outer sleeve, which separate the hot air and cold air before entering the main mixing structure. The narrow cross channel includes two set of horizontal channels and three set of vertical channels which are established by three layers (inner annular part) or four layers (outer annular part) of aluminum blocks. The air flows through the narrow inlet between the petal-shape aluminum blocks into the annular plenum of hot gas chamber at the bottom of the main mixing structure. Another branch of hot gas flows to the narrow inlet

3.3 Hauptmischer

Der Hauptmischer ist die Schlüsselkomponente der Testanlage aus Einlasskammer, schmalen Kreuzkanal und Heißgaskammer, die in Fig. 2 dargestellt ist. Die Luft des Heiß- wie des Kaltgaszweiges strömt durch den großen zentralen und die vier kleinen umliegenden Einlässe an der oberen Abdeckung in die Einlasskammer. Die Einlasskammer besteht im Wesentlichen aus einer Innen- und einer Außenhülle, die die heiße Luft und die kalte Luft vor dem Eintritt in den Hauptmischer trennen. Der schmale Kreuzkanal umfasst zwei Sätze horizontaler und drei Sätze vertikaler Kanäle, die durch drei (innerer Ring) oder vier Schichten (äußerer Ring) von Aluminiumblöcken gebildet werden. Die Luft strömt durch den schmalen Einlass zwischen den blütenblattförmigen Aluminiumblöcken in das ringförmige Plenum der Heißgaskammer am Boden des Hauptmischers. Ein weiterer Zweig des Heißgases fließt zum en-

through the central hole filled with small balls which simulates the tube for unloading the fuel sphere. After being collected at hot gas chamber, the air flows to hot gas duct through the inlet of it. The outside surface of the main mixing structure is covered with thermal insulators to reduce heat losses to the atmosphere. The gaps between outsider sleeve of the main mixing structure and aluminum blocks as well as the gaps between aluminum blocks themselves are filled with rubber seals to prevent the linkage to the hot gas chamber through these gaps.	gen Einlass durch das zentrale Loch, das mit kleinen Kugeln gefüllt ist, die das Entladerohr für die Brennstoffkugeln simulieren. Nach dem Sammeln in der Heißgaskammer fließt die Luft durch den Einlaß in die Heißgasführung. Die Außenfläche des Hauptmischers ist mit Wärmedämmern verkleidet, um Wärmeverluste in die Atmosphäre gering zu halten. Die Zwischenräume zwischen der Außenhülle des Hauptmischers und den Aluminiumblöcken sowie die Lücken zwischen den Aluminiumblöcken selbst sind mit Gummidichtungen gefüllt, um eine Verbindung durch diese Lücken zur Heißgaskammer zu verhindern.
<i>3.4. Hot gas duct</i> Fig. 3 shows the design of the hot gas duct which is made of stainless steel pipe. The hot gas duct connects the upstream hot gas chamber and the downstream exhaust pipe with pipe flanges. Four sets of thermocouple assemblies are installed in the cross section at the entrance of hot gas duct each of which consists of five thermocouples in a small tube. In addition, eight sets of them are installed at the exit of hot gas duct. At the exit of hot gas duct, there are two sets of pitometers and several pressure sensors to get the velocity and the pressure of the air flow there.	<i>3.4 Heißgasführung</i> Fig. 3 zeigt den Aufbau des Heißgaskanals, der aus rostfreiem Stahlrohr besteht. Der Heißgaskanal verbindet die vorgeschaltete Heißgaskammer und das nachgeschaltete Abgasrohr mit Rohrflanschen. Im Querschnitt am Eingang des Heißgaskanals befinden sich vier Sätze von Thermoelement-Baugruppen. Jeder besteht aus fünf Thermoelementen in einem kleinen Rohr. Darüber hinaus sind acht solcher Sätze am Ausgang des Heißgaskanals installiert. Am Ausgang des Heißgaskanals befinden sich zwei Sätze von Pitometern² und mehrere Drucksensoren, um Geschwindigkeit und Druck des Luftstroms dort zu messen.
<i>3.5. Measurement system</i> The thermal-fluid parameters needed for the thermal mixing experiment includes: air flow rate, air temperature, wall temperature, air pressure and air velocity. Table 2 shows the information for various sensors adopted in this test facility. The big number (up to around 160) of sensors requires the combination of data management block. Thus, the National Instrument (NI) data acquisition module and LabVIEW software are applied to fulfill the high requirement of reliable signal collection especially for temperature.	<i>3.5 Mess-System</i> Die für den thermischen Mischversuch benötigten thermischen Fluidparameter umfassen: Luftmenge und -temperatur, Wandtemperatur, Luftdruck und -geschwindigkeit. Tabelle 2 zeigt die Informationen für verschiedene Sensoren, die in dieser Testanlage verwendet wurden. Die große Zahl (bis zu etwa 160) der Sensoren erfordert die Kombination von Datenmanagement Block³. Um die hohen Anforderungen an eine zuverlässige Signalsammlung, insbesondere für die Temperatur, zu erfüllen, werden das NI-Datenerfassungsmodul und die LabVIEW Software eingesetzt.

² Geschwindigkeitsmesser für Strömung, wie in der Schifffahrt

³ Unklarer Begriff

Sensor	Range	Precision	No.	Type
Vortex flowmeter	350–4000 m ³ /h	1.5%FS	1	LUGB-2330
Pressure sensor	1100–160,000m ³ /h	1.5%FS	5	LUGB-2315
Differential pressure sensor	20 KPa	0.2%FS	18	CYG1601
Thermocouple	5 KPa	0.3%FS	8	ALPHA168P
Thermal resistor	-40 °Cto 250 °C	0.2 °C	110	T
	-50 °Cto300 °C	0.2 °C	15	Pt100

4. Results of experiment

The experiment is carried out to get the value of various parameters for thermal mixing of HTR-PM reactor outlet on the test facility mentioned above. There are three series of experiments:

- constant flow rate versus variable temperature difference at inlet,
- constant inlet temperature difference versus variable flow rate as well as
- constant temperature difference and flow rate versus variable hot/cold flow ratio at inlet.

4. Ergebnisse der Tests

Die Tests werden durchgeführt, um den Wert der verschiedenen Parameter für die Wärmemischung des HTR-PM-Ausgangs auf der oben erwähnten Testanlage zu erhalten. Es gibt drei Versuchsreihen:

- konstante Durchflussrate vs. variabler Temperaturdifferenz am Einlass,
- konstante Einlass-Temperaturdifferenz vs. variabler Durchflussrate sowie
- konstanter Temperaturdifferenz und Durchflussmenge vs. variablem Heiß- / Kaltflussverhältnis am Einlass.

4.1. Experiments of constant flow rate versus variable temperature difference at inlet

In this series of experiments, the flow rates of hot gas branch and cold gas branch keep constant at rated value of 2.5 kg/s and the temperature differences between them are changed from 30 °C to 100 °C with a step of 10 °C. Table 3 shows the experiment result at various temperature differences. Fig. 4 indicates the performance of thermal mixing at the outlet of hot gas duct versus the temperature differences. The performance of thermal mixing are indicated with temperature as the following equation:

4.1. Experimente bei konstanter Durchflussmenge vs. variabler Einlass-Temperaturdifferenz.

In dieser Versuchsreihe bleiben die Strömungsgeschwindigkeiten von Heiß- und Kaltgaszweig beim Nennwert von 2,5 kg/s konstant und die Temperaturunterschiede zwischen ihnen werden von 30°C auf 100°C in Schritten von 10°C verändert. Tabelle 3 zeigt das Ergebnis bei verschiedenen Temperaturunterschieden. Fig. 4 zeigt die thermische Vermischungsleistung am Heißgasauslass gegenüber den Temperaturdifferenzen. Die thermische Mischleistung abh. von der Temperatur wird als die folgende Gleichung angegeben:

$$\eta_t = \left(1 - \frac{|\Delta t_o|_{\max}}{|\Delta t_i|} \right) 100\% \quad (7)$$

where, Δt_o indicates the temperature difference at the cross section of hot gas duct outlet with unit of °C; Δt_i indicates the temperature difference between hot gas branch and cold gas branch with unit of °C.

wo Δt_o die Temperaturdifferenz in °C am Querschnitt des Heißgasdurchlasses anzeigt; Δt_i gibt die Temperaturdifferenz zwischen Heiß- und Kaltgaszweig in °C an.

It can be found that the performance of thermal mixing is constant at around 98% with the change of the temperature differences indicating that the air is mixed well through the main mixing structure and hot gas duct of the test facility at the experiment conditions.

4.2 Experiments of constant temperature difference versus variable flow rate at inlet

In this series of experiments, the temperature difference between hot gas branch and cold gas branch keeps constant as 100 °C and the flow rates of hot gas branch and cold gas branch are changed by adjusting the rotation rates of the two blowers. Table 4 shows the experiment result at different flow rates. Fig. 5 indicates the performance of thermal mixing at the outlet of hot gas duct versus the Reynolds number of air flow in the hot gas duct.

It can be found that the performance of thermal mixing is constant at around 98% with the change of the flow rate in hot gas duct indicating that the air is mixed well through the main mixing structure and hot gas duct of test facility at the experiment conditions. The stable mixing performance with Reynolds numbers from around 2.5×10^5 to 1.0×10^6 accords with the results of related analysis in Section 2.

Man kann zeigen, dass die Wärmemischleistung bei der Änderung der Temperaturdifferenzen mit etwa 98% konstant bleibt. Das zeigt, dass die Luft durch den Hauptmischer und den Heißgaskanal der Testanlage unter Versuchsbedingungen gut vermischt wird.

4.2 Versuche mit konstanter Temperatur-differenz vs. variabler Einlass-Durchflussmenge

In dieser Versuchsreihe bleibt die Temperaturdifferenz zwischen Heißgas- und Kaltgaszweig konstant bei 100°C und die Durchflussmengen von Heiß- und Kaltgaszweig werden durch Einstellen der Drehzahlen beider Gebläse verändert. Tabelle 4 zeigt das Ergebnis bei unterschiedlichen Durchflussraten. Fig. 5 zeigt die Leistung des thermischen Mischens am Heißgaskanal-Auslaß gegenüber der Reynolds-Zahl der Luftströmung im Heißgaskanal.

Es wird gefunden, dass die Leistung des thermischen Mischens bei Änderung der Durchflussrate der Heißgasleitung konstant um etwa 98% liegt. Das zeigt, dass die Luft durch den Hauptmischer und den Heißgaskanal der Testanlage unter Versuchsbedingungen gut gemischt wird. Die stabile Mischleistung mit Reynolds-Zahlen von rund $2,5 \times 10^5$ bis $1,0 \times 10^6$ entspricht den Ergebnissen der entsprechenden Analyse in Abschnitt 2.

Table 3

Experiment results with constant flow rate versus variable temperature difference.

Hot gas		Cold gas		Cross section at outlet	
Flow (kg/s)	Temp. (°C)	Flow (kg/s)	Temp. (°C)	Max. temp. (°C)	Min. temp. (°C)
2.55	60.0	2.51	28.0	43.66	42.87
2.52	69.7	2.47	31.2	50.18	49.33
2.50	80.5	2.47	31.3	55.40	54.48
2.51	89.9	2.48	29.7	59.48	58.51
2.49	100.0	2.45	31.8	65.59	64.53
2.48	110.0	2.46	31.1	70.17	69.06
2.45	120.0	2.45	29.6	74.18	72.90
2.44	129.7	2.44	28.9	78.57	77.13

Table 4

Experiment results with constant temperature difference versus variable flow rate.

Hot gas		Cold gas		Cross section at outlet	
Flow (kg/s)	Temp. (°C)	Flow (kg/s)	Temp. (°C)	Max. temp. (°C)	Min. temp. (°C)
0.56	110.0	0.58	10.5	63.01	61.14
0.84	109.6	0.85	9.6	59.67	57.89
1.11	110.6	1.10	11.5	59.80	57.94
1.39	113.6	1.40	14.2	63.40	61.54
1.73	111.9	1.70	12.2	62.30	60.61
1.95	121.5	1.92	21.1	71.07	69.41
2.30	120.1	2.36	21.0	69.74	68.22
2.52	128.1	2.48	28.5	77.92	76.39

4.3 Experiments of constant temperature difference and constant total flow rate versus variable hot/cold flow ratio at inlet

In this series of experiments, the temperature difference between hot gas branch and cold gas branch keeps constant as 100 °C and the total flow rate of hot gas branch and cold gas branch keeps at around 3.1 kg/s while the flow ratio between hot gas branch and cold gas branch is changed. Table 5 shows the experiment results at different flow ratios. Fig. 6 indicates the performance of thermal mixing of the mixing structure versus the different flow ratios between hot gas flow and cold gas flow.

It can also be found that the performance of thermal mixing is constant at around 98% with the change of the flow ratios which indicates the air is mixed well.

4.3 Experimente mit konstanter Temperaturdifferenz und konstanter Gesamtdurchflussrate vs. variablem Heiß- / Kaltflussverhältnis am Einlass

In dieser Versuchsreihe bleibt die Temperaturdifferenz zwischen Heißgas- und Kaltgaszweig konstant bei 100°C und die Gesamtströmungsgeschwindigkeit des Heißgas- und des Kaltgaszweigs bei etwa 3,1 kg/s, während das Strömungsverhältnis zwischen Heißgas- und Kaltgaszweig wechselt. Tabelle 5 zeigt die Versuchsergebnisse bei unterschiedlichen Strömungsverhältnissen. Fig. 6 zeigt die thermische Mischleistung der Mischstruktur bei unterschiedlichen Strömungsverhältnissen zwischen Heißgas- und Kaltgasstrom.

Auch wird beobachtet, dass die thermische Mischleistung bei der Änderung der Durchflussverhältnisse um etwa 98% konstant bleibt, was anzeigt, dass die Luft gut vermischt wird.

4.4. Discussions of experiment results

According to results of three series of experiments,

- constant flow rate versus variable temperature difference,
 - constant temperature difference versus variable flow rate as well as
 - constant temperature difference and total flow rate versus variable flow ratio,
- the thermal mixing efficiencies in all experiments are around 98% among which the lowest one is 97.53%.

4.4. Diskussionen der Versuchsergebnisse

Nach den Ergebnissen dreier Versuchsreihen,

- konstante Durchflussrate vs. variabler Temperaturdifferenz,
 - konstante Temperaturdifferenz vs. variabler Durchflussrate sowie
 - konstante Temperaturdifferenz und Gesamtdurchflussrate vs. variabler Durchflussmenge
- liegen die thermischen Mischwirkungsgrade bei allen Versuchen bei etwa 98%. Die niedrigste ist 97,53%.

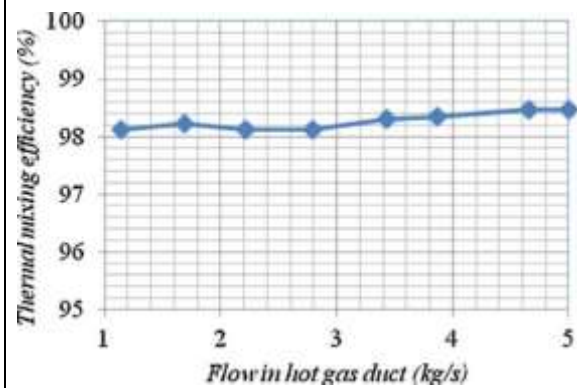
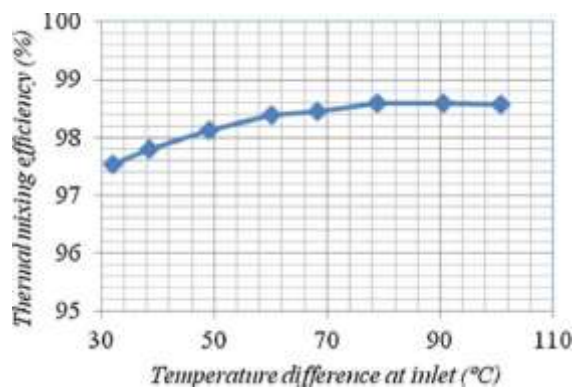


Fig. 5. Mixing performance versus air flow rate in hot gas duct.

Table 5

Experiment results with constant temperature difference and total flow rate versus variable hot/cold flow ratio.

gas	Hot		Cold gas		Cross section at outlet	
	Flow (kg/s)	Temp. (°C)	Flow (kg/s)	Temp. (°C)	Max. temp. (°C)	Min. temp. (°C)
	0.61	128.0	2.42	28.4	48.77	46.34
	1.02	122.4	2.06	22.2	55.44	54.19
	1.22	123.9	1.90	24.9	62.89	61.55
	1.57	122.9	1.54	22.7	72.65	70.81
	1.91	114.6	1.25	14.3	74.57	72.87
	2.13	113.2	1.05	13.6	79.81	78.16

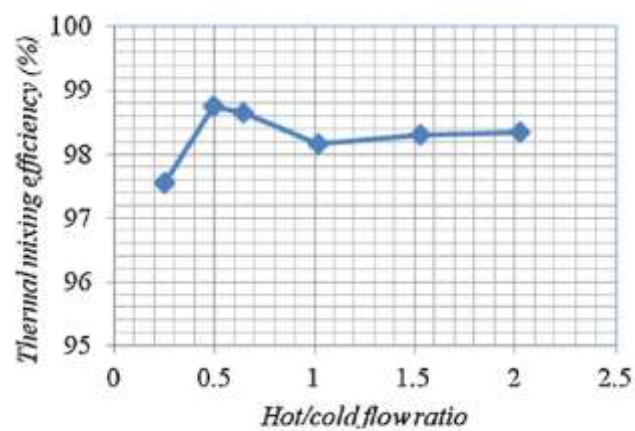


Fig. 6. Mixing performance versus hot/cold flow ratio.

The highest temperature deviation of helium at

Die höchste Temperaturabweichung des Helium

the reactor outlet of HTR-PM is around 150°C while the inlet temperature of steam generator is limited to within $\pm 15^\circ\text{C}$ which indicates the mixing efficiency should be above 80%. In this way, the experiment results show the mixing structure can fulfill the requirement. Even if the leakage out of the reactor is considered and its lowest possible temperature is 250 °C, the mixing efficiency should be above 94.5% which is still obviously lower than the experiment results. At the same time, there are some pipes and cavities between the outlet of hot gas duct and the inlet of steam generator which will result in the further mixing of helium. Based on the discussions mentioned above, it can be concluded that mixing structure at HTR-PM reactor outlet can fulfill the requirements for thermal mixing even under conservative assumptions according the experiment results.	am Ausgang des HTR-PM beträgt etwa 150°C, während die Eintrittstemperatur des Dampferzeugers auf $\pm 15^\circ\text{C}$ begrenzt ist, was anzeigt, dass die Mischwirkung über 80% liegen dürfte. Auf diese Weise zeigen die Versuchsergebnisse, dass der Mischer die Anforderungen erfüllen kann. Auch wenn die Leckage aus dem Reaktor in Betracht gezogen wird und die niedrigste mögliche Temperatur 250 ° C beträgt, dürfte die Mischleistung über 94,5% liegen, was offensichtlich noch niedriger ist als die Ergebnisse des Experiments. Überdies gibt es einige Rohre und Hohlräume zwischen dem Auslaß des Heißgaskanals und dem Einlaß des Dampferzeugers, die zu einer weiteren Vermischung von Helium führen werden. Basierend auf den oben erwähnten Diskussionen kann man schließen, dass die Mischstruktur am HTR-PM-Ausgang auch unter konservativen Annahmen nach den experimentellen Ergebnissen die Anforderungen an die thermische Vermischung erfüllen kann.
5. Conclusions By using the designed and constructed test facility, the experiments are carried out to get the values of various parameters for analysis of the efficiency of mixing structure at HTR-PM reactor outlet. There are three series of experiments: • constant flow rate versus variable temperature difference, • constant temperature difference versus variable flow rate as well as • constant temperature difference and total flow rate versus variable hot/cold flow ratio. The analysis of experiment results shows the mixing efficiencies of all experiments are around 98%. Compared with the required mixing efficiency (94.5%) based on the temperature deviation at reactor outlet and the temperature limitation at inlet of steam generator, it can be concluded that the thermal mixing structure at HTR-PM reactor outlet can fulfill the requirement of thermal mixing.	5. Schlussfolgerungen Durch Einsatz der Konstruktion und des Baus der Testanlage werden Versuche durchgeführt, um Werte verschiedener Parameter zur Analyse der Mischerleistung am HTR-PM-Ausgang zu erhalten. Es gibt drei Versuchsreihen: • konstante Durchflussrate vs. variabler Temperaturdifferenz, • konstante Temperaturdifferenz vs. variabler Durchflussrate sowie • konstante Temperaturdifferenz und Gesamtdurchflussrate vs. variabler heiß/kalt-Durchflussmenge Die Analyse der Versuchsergebnisse zeigt, dass die Mischwirkungsgrade aller Experimente etwa 98% betragen. Gegenüber dem erforderlichen Mischwirkungsgrad (94,5%) auf Basis der Temperaturabweichung am Reaktorausgang und der Temperaturbegrenzung am Dampferzeuger-Einlass kann festgestellt werden, dass der Wärmemischer am HTR-PM-Reaktorauslass die Forderung nach thermischem Mischen erfüllen kann.
Acknowledgment The work of this paper is sponsored by Chinese Major National S&T (ZX069).	
References	

- Damm, G., Wehrlein, R., 1992. Simulation tests for temperature mixing in a corebottom model of the HTR-module. *Nucl. Eng. Des.* 137, 97–105.
- Dong, Y.J., Gao, Z.Y., 2006. Thermal-hydraulic feasibility analysis on uprating the HTR-PM. *Nucl. Eng. Des.* 236 (5–6), 510–515.
- Huang, Z.Y., 1995. *Mixing Characteristics of Hot Gas Plenum of 10MW High Temperature Gas-Cooled Reactor*. Tsinghua University, Beijing (in Chinese).
- Inagaki, Y., Kunugi, T., Miyamoto, Y., 1990. Thermal mixing test of coolant in the corebottom structure of a high temperature engineering test reactor. *Nucl. Eng. Des.* 123, 77–86.
- Inagaki, Y., Kunitomi, K., Miyamoto, Y., Ioka, I., Suzuki, K., 1992. Thermal-hydraulic characteristics of coolant in the core bottom structure of the high-temperature engineering test reactor. *Nucl. Technol.* 99 (1), 90–103.
- Inagaki, Y., Hino, R., Kunitomi, K., Takase, K., Ioka, I., Maruyama, S., 2004. R&D on thermal hydraulics of core and core-bottom structure. *Nucl. Eng. Des.* 233, 173–183.
- Lauder, B.E., Spalding, D.B., 1974. The numerical computation of turbulent flows. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 3, 269–289.
- Von Lavante, D., Laurien, E., 2007. Comparison of turbulence models for the simulation of hot gas mixing in the lower plenum of pebble-bed type high-temperature reactors. *Proceedings of NURETH-12*, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
- Wang, J.H., Bo, H.L., Jiang, S.Y., Huang, Z.Y., 2006. Numerical simulation of flow field in hot gas chamber of high-temperature gas-cooled reactor. *At. Energy Sci. Technol.* 40 (3), 262–266 (in Chinese).
- Wu, Z.X., Lin, D.C., Zhong, D.X., 2002. The design feature of the HTR-10. *Nucl. Eng. Des.* 218 (1), 25–32.
- Xu, Y.H., Zuo, K.F., 2002. Overview of the 10MW high temperature gas cool test module project. *Nucl. Eng. Des.* 218 (1–3), 13–23.
- Yao, M.S., Huang, Z.Y., Ma, C.W., Xu, Y.H., 2002. Simulating test for thermal mixing in the hot gas chamber of the HTR-10. *Nucl. Eng. Des.* 218 (1–3), 233–240.
- Zhang, Z.Y., Wu, Z.X., Wang, D.Z., Xu, Y.H., Sun, Y.L., Li, F., Dong, Y.J., 2009. Current status and technical description of Chinese 2×250 MWth HTR-PM demonstration plant. *Nucl. Eng. Des.* 239 (7), 1212–1219.
- Zhou, Y.P., Li, F., Hao, P.F., He, F., 2011. Similarity analysis for hot gas mixing experiment of outlet of HTR-PM reactor core. *At. Energy Sci. Technol.* 45 (10), 1208–1214 (in Chinese).
- Zhou, Y.P., Li, F., Hao, P.F., He, F., Shi, L., 2014. Thermal hydraulic analysis for hot gas mixing structure of HTR-PM. *Nucl. Eng. Des.* 271, 510–514.

