

Simulation und Optimierung des Wärmedämmvermögens von PUR-Hartschaum

-

Wärme- und Stofftransport sowie mechanische Verformung

Von der Fakultät Verfahrenstechnik und Technische Kybernetik
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Kai-Erhard Wagner

aus Göppingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. P. Eyerer
Mitberichter: Prof. Dr. Ing. K. Schaber

Tag der mündlichen Prüfung: 02.04.2002

Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde
der Universität Stuttgart
2002

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Vorhersage und Verbesserung der Wärmedämmwirkung von geschlossenzelligen PUR-Hartschaumstoffen unter Berücksichtigung der gesamten Nutzungsdauer. Bei diesen Schaumstoffen verschlechtert sich die Wärmedämmwirkung langsam durch diffusiven Austausch von Treibmittel und Umgebungsluft. Die Simulation dieses Alterungsprozesses ermöglicht die Bereitstellung anwendungsbezogener Entscheidungshilfsmittel bei der Optimierung von Treibmittelzusammensetzung und Schaumstoffdichte.

Der zeitliche Verlauf des Alterungsprozesses wird auf der Grundlage einer ausführlichen Modellbildung für unterschiedliche Zellstrukturen, Schaumstoffdichten und Treibmittel vorhergesagt. Die Modellbildung berücksichtigt den Wärme- und Stofftransport im Schaumstoff und die damit einhergehende mechanische Belastung. Darauf aufbauend wurde ein Simulationsprogramm erstellt, welches eine numerische Lösung der Modellgleichungen und eine grafische Darstellung der Simulationsergebnisse ermöglicht.

Zur Bestimmung von Modellparametern sowie zur Modellvalidierung wurden verschiedene Meßverfahren entwickelt, unter anderem ein Aufbau zur Bestimmung effektiver Diffusionskoeffizienten und eine Apparatur zur Zellgasanalyse mittels Gaschromatographie.

Mit dem Simulationsprogramm werden zunächst Parametervariationen durchgeführt, um die Sensibilität einzelner Modellparameter abzuschätzen und allgemeingültige Vorgaben abzuleiten. Damit lassen sich jedoch noch keine sicheren Vorgaben für die Treibmittelzusammensetzung und die Schaumdichte formulieren. Dies ist erst unter Berücksichtigung der speziellen, bei der jeweiligen Anwendung vorliegenden Temperaturen und geometrischen Randbedingungen möglich.

Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, werden die Anwendungsbeispiele Gefriertruhe, Kühlschrank und Steildachisolierung untersucht. Zielsetzung für die Optimierung ist dabei die Minimierung der zusammengefassten Kosten für die Herstellung und die Nutzungsphase. Durch Verwendung anwendungsspezifischer Kostenmodelle werden Wertepaare für die bestmögliche Treibmittelzusammensetzung und Schaumdichte ermittelt.

So existieren bei Kühlmöbeln Einschränkungen für die Dämmschichtdicke. Infolgedessen dominieren dort die Energiekosten während der Nutzungsphase, so daß ein guter Schutz gegen diffusionsbedingte Alterung und Treibmittel mit niedriger Wärmeleitfähigkeit wie cyclo-Pentan zu bevorzugen sind. Im Gegensatz dazu müssen bei Anwendungen ohne Einschränkungen bei der Dämmschichtdicke, wie z.B. Dachisolierungen, die volumenbezogenen Rohstoffkosten minimiert werden. Dies ist durch Verwendung von Mischungen aus CO₂ und iso-Pentan möglich, die kostengünstig sind und aufgrund geringer Kondensationsneigung kleinere Schaumdichten ermöglichen.

Mischungen aus verschiedenen Pentanisomeren oder auch Sandwichkonstruktionen aus PUR-Schaumstoffen mit unterschiedlichen Treibmitteln weisen in den Simulationsrechnungen keine Vorteile gegenüber einfacheren Lösungen auf.

Abstract

The present paper describes the prediction and improvement of closed cell rigid polyurethane foam thermal conductivity in consideration of the respective applications total life time.

These foams show a continuous thermal insulation deterioration affected by a diffusive exchange of blowing agent and air components. The simulation of this ageing process should provide a tool for the blowing agent composition and foam density optimization.

The ageing process is predicted by a detailed modelling, including different cell structure, foam density and blowing agent. As well the in foam occurring heat and mass transfer and its effects on mechanical loads and deformation is involved. On this basis different computer programs were made, providing the model equations numerical solution and a calculation results graphic display.

In order to determine model parameters and to validate the model itself some measuring processes and devices have been developed, e.g. a mechanical strain based technique for determination of effective foam diffusion coefficients and a procedure for cell gas analysis by gas chromatography.

In a first step parameter variations are carried out to estimate the models sensibility towards these parameters and to find general trends of their influence. Nevertheless an exact prediction of optimal blowing agent composition or foam density is only possible by consideration of the respective applications temperatures and geometry.

Consequently the applications freezer, refrigerator and roof insulation are calculated. In this calculation the optimization objective is the expenses minimization of production and later on use in total sum. The optimal blowing agent composition and foam density are determined by using cost models considering the applications peculiarity.

For example freezer and refrigerators have dimensions limitations. Therefore the costs are dominated by the expense of electric energy during use phase. Here efficient diffusion barriers against ageing and low thermal conductivity (but usually expensive) blowing agents such as cyclo-pentane are demanded.

In contrast with this at applications with slight or no dimensions limitations, like the roof insulation, the volumetric production costs have to be minimized. This is possible by using a mixture of CO₂ and iso- or n-pentane, providing low blowing agent condensation and consequently low foam density and – simultaneously – low raw material costs.

Mixtures of different pentane isomers or sandwich structures of foams containing different blowing agents didn't show any substantial advantages in the carried out simulations.