Metalle im Grenzbereich

Thermomechanische Charakterisierung von Metallen unter extremen Bedingungen mit dem Laservibrometer

Im Rahmen eines britischen Programms zur Entwicklung von Hochleistungs-Targets für eine Neutrino-Fabrik wurde eine neue dynamische Methode zur thermomechanischen Charakterisierung möglicher Target-Materialien (Wolfram, Tantal und Molybdän) entwickelt.

Diese Metalle sollen in Targets zukünftiger Hochleistungs-Teilchenbeschleuniger verwendet werden, wo sie häufig einer Kombination aus hohen mechanischen Belastungen und sehr hohen Temperaturen ausgesetzt sind. Um die Lebenserwartung der Targets und von Komponenten des Target-Systems in solchen Umgebungen abschätzen zu können, müssen die Materialien unter extremen Bedingungen getestet werden.

Versuchsaufbau

Bei dieser Methode wird ein dünner Draht des zu testenden Materials mit einem starken Strompuls beaufschlagt und aufgeheizt. Der Strompuls wird mit Hilfe der Stromversorgung der Magneten des Teilchenbeschleunigers erzeugt (Bild 1). Die Metalldrähte befinden sich in einer Vakuum-Kammer, um nicht zu oxidieren. Damit der Impuls eine ausreichende thermische Belastung generieren kann, muss der Draht sehr dünn sein (weniger als 1 mm Durchmesser). Mit Hilfe einer geeigneten Impulswiederholrate werden die Drähte während des Versuchs auf 2.650°C erhitzt. Ein Einpunkt-Laservibrometersystem, bestehend aus einem OFV-534 Messkopf und einem OFV-5000 Vibrometer-Controller, misst die radialen sowie longitudinalen Schwinggeschwindigkeiten und -wege der Drähte, letztere durch Messung auf der Drahtspitze. Drei unterschiedliche Vibrometer-Decoder (VD-02, VD-05 und DD-300) decken den gesamten Amplituden- und Frequenzbereich der Schwingungen ab. Ein optisches Pyrometer erfasst die Drahttemperatur am Ort der Vibrometer-Messung.



Ergebnisse

Bild 3 zeigt die radiale Schwinggeschwindigkeit des Wolframdrahtes, gemessen mit dem Laservibrometer bei unterschiedlichen Temperaturen. Bei t = 0 startet der Strompuls, der Draht beginnt zu kontrahieren und sich auszudehnen. Nach etwa 1 µs erreicht der Draht eine neue Nullage und beginnt um diese Position zu oszillieren. Die Zeitskala in Bild 3 beginnt mit t < 0, um den relativ geringen Rauschpegel des Vibrometers zu illustrieren. Experimentelle Daten und Rechenwerte des Finite-Elemente-Modells (LS-DYNA) zeigen eine sehr gute Korrelation. Aus der Frequenz der radialen Schwingungen lassen sich anschließend die Elastizitätsmodule des Drahtmaterials als Funktion der Temperatur extrahieren. Bild 4 zeigt einen Vergleich der Messwerte für Wolfram Elastizitätsmoduln aus anderen Quellen.

Zur Bestimmung der Dehngrenze wird die Stromstärke im Draht schrittweise erhöht, bis der Draht anfängt sich zu biegen oder zu knicken. Die vom Vibrometer erfasste radiale Oberflächengeschwindigkeit (siehe Bild 3) wird verwendet, um die Dehnungsgeschwindigkeit während des Tests zu ermitteln. Der Vibrometer-Messkopf besitzt eine Hochgeschwindigkeitskamera, welche die Dehnung des Drahtes aufzeichnet. Es ist zu beobachten, dass das Signal der radialen Schwinggeschwindigkeit mit beginnender plastischer Verformung zunehmend verrauscht. Die visuelle Beobachtung zusammen mit der Änderung der Signalqualität zeigt also an, dass der Draht dem Reißen nahe ist. Bild 5 zeigt die mechanische Spannung, die nötig ist, um Drähte aus Molybdän, Wolfram und Tantal bei verschiedenen Temperaturen zum Reißen zu bringen.

Schlussfolgerungen

Verschiedene als Target für die Neutrino-Erzeugung geeignet erscheinende Materialien wurden unter Bedingungen getestet, die beim Betrieb des Beschleunigers herrschen. Hierzu wurde eine neue dynamische Methode zur thermomechanischen Charakterisierung von Materialien unter extremen Bedingungen entwickelt. Dieses Verfahren kann dabei helfen, die Konsistenz verschiedener grundlegender Modelle zu überprüfen.



Bild 1: Versuchsaufbau. Koaxialkabel (1) leiten den Strompuls vom Netz in ein einzelnes Kabel (2), das mit dem Prüfdraht verbunden ist. Der Draht ist in einer Vakuumkammer (3) befestigt. Mit einem Laservibrometer (4) werden die Schwingungen des Drahts gemessen.

Autoren · Kontakt Dr. Goran Škoro, Dr. J. R. J. Bennett, Dr. T. R. Edgecock goran.skoro@stfc.ac.uk ISIS Facility, STFC, Rutherford Appleton Laboratory, Harwell Oxford, UK www.isis.stfc.ac.uk

Danksagung

Diese Arbeit wurde vom Science and Technology Facilities Council (UK) unterstützt.



Bild 2: Aufnahme eines 0,75 mm starken Wolframdrahts während der Messung (a) und vergrößerte Darstellung der Befestigung des Drahts (b)



Bild 3: Gemessene (rot) und berechnete (blau) radiale Schwinggeschwindigkeiten eines 0,5 mm starken Wolframdrahts bei verschiedenen Temperaturen



Bild 4: Vergleich der aktuellen Messergebnisse (rot) mit früheren Werten für den Elastitizitätsmodul von Wolfram



Bild 5: Dehngrenze in Abhängigkeit von der Temperatur für Tantal- sowie Wolfram- und Molybdän-Draht, letztere mit Angabe der charakteristischen Dehnungsgeschwindigkeit