

บทที่ 4

สมบัติทางความร้อนของวัสดุ (Thermal Properties of Materials)

1. บทนำ (introduction)

สมบัติทางความร้อนเป็นการตอบสนองของวัสดุต่อปฏิบัติการทางความร้อน เช่น การดูดซับพลังงานของของแข็งในรูปของความร้อนด้วยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและขนาดพลังงานจะถ่ายเทไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าถ้าวัสดุมีสองบริเวณที่มีอุณหภูมิต่างกัน โดยวัสดุอาจเกิดการหลอมเหลวในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ความจุความร้อน การขยายตัวจากความร้อนและการนำความร้อนเป็นสมบัติทางความร้อนที่สำคัญของวัสดุของแข็งในการนำไปใช้งาน

2. ความจุความร้อน (heat capacity)

วัสดุของแข็งเมื่อได้รับความร้อนอุณหภูมิจะสูงขึ้นด้วยการดูดซับพลังงานบางส่วน ความจุความร้อนเป็นสมบัติที่แสดงถึงความสามารถของวัสดุในการดูดซับความร้อนจากบริเวณรอบนอก ซึ่งเป็นปริมาณพลังงานที่ต้องการในการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น ดังสมการ

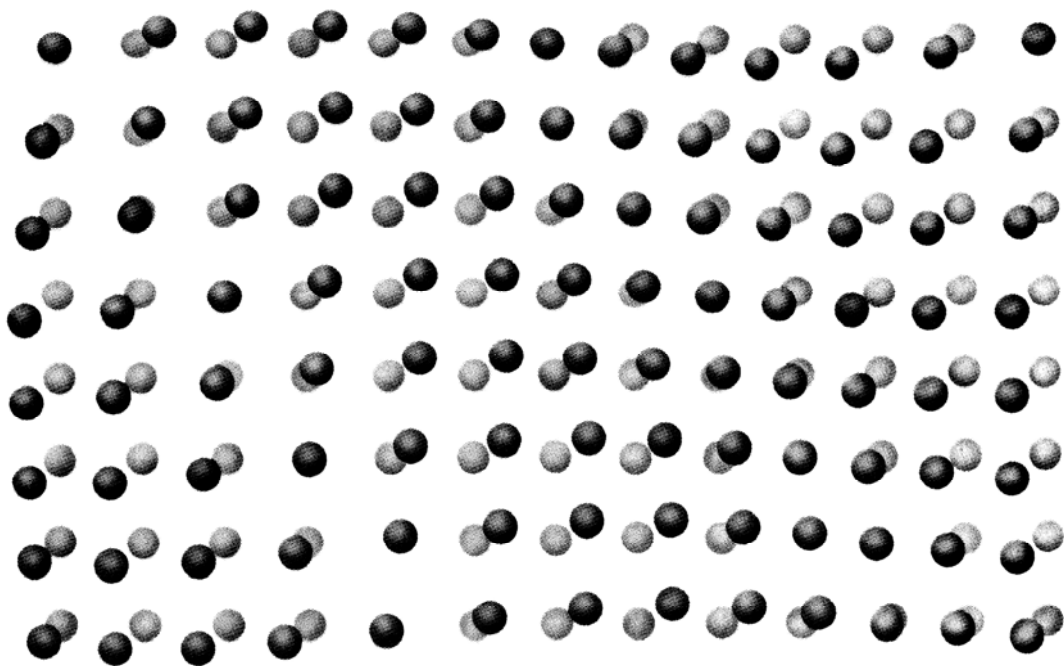
$$C = dQ / dT \quad (4.1)$$

เมื่อ C คือความจุความร้อน dQ คือพลังงานที่ต้องการในการทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป dT ปกติค่าความจุความร้อนจะระบุเป็นต่อหน่วยโมลของวัสดุ เช่น จูลต่อโมลเคลวิน (J/mol.K) หรือ แคลอรีต่อโมลเคลวิน (cal/mol.K) ความร้อนจำเพาะ (specific heat) บางครั้งใช้แสดงความจุความร้อนต่อหน่วยน้ำหนัก และมีหน่วยต่าง ๆ กัน เช่น จูลต่อกิโลกรัมเคลวิน (J/kg.K) หรือ แคลอรีต่อกรัมเคลวิน (cal/g.K) หรือ บีทียูต่อปอนด์ฟาเรนไฮต์ (Btu/lb_m.°F)

โดยทั่วไปมีสองวิธีในการวัดสมบัติความจุความร้อนของวัสดุ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมในการถ่ายเทความร้อน แบบแรกเป็นความจุความร้อนขณะปริมาตรของชิ้นทดสอบคงที่ค่าหนึ่งคือ C_v ส่วนอีกแบบหนึ่งเป็นความจุความร้อนขณะแรงดันภายนอกคงที่ C_p โดยค่า C_p จะมากกว่า C_v เสมอ แต่อย่างไรก็ตามสำหรับวัสดุของแข็งสองค่านี้ต่างกันน้อยมากที่อุณหภูมิห้องและที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

- ความจุความร้อนในรูปการสั่น (vibrational heat capacity)

ส่วนใหญ่พลังงานความร้อนของวัสดุของแข็งจะเป็นแบบเดียวกัน คือเป็นการเพิ่มขึ้นของพลังงานการสั่นของอะตอมแบบคงที่ที่ความถี่สูงด้วยระยะการสั่น (amplitude) ค่อนข้างต่ำ โดยในขณะที่สั่นอะตอมที่อยู่ติดกันจะถูกยึดไว้ด้วยพันธะระหว่างอะตอม การสั่นเหล่านี้จะประสานเข้าด้วยกันเกิดเป็นการเคลื่อนที่ของคลื่นผลึก ปรากฏการณ์นี้ได้แสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งอาจคิดได้เป็นคลื่นการยืดหยุ่นหรือคลื่นเสียงที่มีความยาวคลื่นสั้นและมีความถี่สูงมาก ซึ่งจะเคลื่อนผ่านผลึกด้วยความเร็วเสียง พลังงานความร้อนในรูปของการสั่นของวัสดุประกอบด้วยชุดของคลื่นการยืดหยุ่นที่มีช่วงของการกระจายตัวและความถี่ต่างๆกัน แต่มีเพียงบางพลังงานหรือบางควอนตัมเท่านั้นที่สามารถเคลื่อนผ่านได้ และควอนตัมเดี่ยวพลังงานการสั่นนี้เรียกว่า โฟนอน (phonon) โดยคลื่นการสั่นจะอยู่ในรูปของโฟนอนนี้ นอกจากนั้นคลื่นการสั่นและคลื่นการยืดหยุ่นเหล่านี้ยังทำให้เกิดการกระเจิงทางความร้อนของอิเล็กตรอนอิสระในระหว่างกระบวนการนำไฟฟ้า เช่นเดียวกับการถ่ายเทพลังงานในระหว่างกระบวนการนำความร้อน



● Normal lattice positions for atoms
● Positions displaced because of vibrations

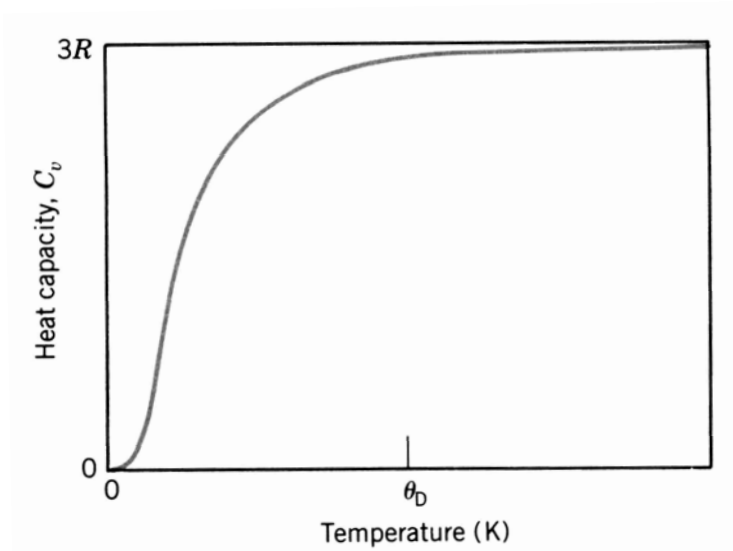
รูปที่ 4 . 1 แสดงลักษณะการเกิดคลื่นผลึกในรูปการสั่นของอะตอมในโครงผลึก

- อิทธิพลของอุณหภูมิต่อความจุความร้อน (temperature dependence of the heat capacity)

การเปลี่ยนแปลงของการกระจายตัวการสั่นต่ออุณหภูมิเทียบกับความจุความร้อนที่ปริมาตรคงที่ของวัสดุของแข็งที่เป็นผลึกค่อนข้างสูงได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 ซึ่งค่า C_v จะมีค่าเท่ากับศูนย์ที่ศูนย์องศาเคลวิน แต่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นคลื่นผลึกจะมีความสามารถในการเพิ่มพลังงานเฉลี่ย และที่อุณหภูมิต่ำความสัมพันธ์ระหว่าง C_v กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ T จะเป็นดังสมการที่ 4.2

$$C_v = AT^3 \quad (4.2)$$

เมื่อ A คือค่าคงที่อุณหภูมิอิสระเหนืออุณหภูมิที่เรียกว่า Debye, θ_D ซึ่งเป็นจุดที่ระดับค่า C_v เป็นอิสระจากอุณหภูมิที่ค่าประมาณ $3R$ เมื่อ R คือค่าคงที่แก๊ส อย่างไรก็ตามพลังงานทั้งหมดของวัสดุจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณพลังงานที่ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนไปหนึ่งองศา มีค่าคงที่ ค่าของ θ_D จะต่ำกว่าอุณหภูมิห้องสำหรับวัสดุของแข็งหลายชนิด และค่า C_v ของวัสดุของแข็งที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าประมาณ $25 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ ($6 \text{ cal/mol}\cdot\text{K}$) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงความร้อนจำเพาะจากการทดลองของวัสดุต่างๆ



รูปที่ 4.2 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อค่าความจุความร้อนที่ปริมาตรคงที่

Material	C_p (J/kg.K) ^a	α_1 [(°C) ⁻¹ x 10 ⁻⁶] ^b	k (W/m.K) ^c	L [Ω.W/(K) ² x 10 ⁻⁸]
Metals				
Aluminum	900	23.6	247	2.20
Copper	386	17.0	398	2.25
Gold	128	14.2	315	2.50
Iron	448	11.8	80	2.71
Nickel	443	13.3	90	2.08
Silver	235	19.7	428	2.13
Tungsten	138	4.5	178	3.20
1025 Steel	486	12.0	51.9	-
316 Stainless steel	502	16.0	15.9	-
Brass (70Cu-30Zn)	375	20.0	120	-
Kovar (54Fe-29Ni-17Co)	460	5.1	17	2.80
Invar (64Fe-36Ni)	500	1.6	10	2.75
Super Invar (63Fe-32Ni-5Co)	500	0.72	10	2.68
Ceramics				
Alumina (Al ₂ O ₃)	775	7.6	39	-
Magnesia (MgO)	940	13.5 ^d	37.7	-
Spinel (MgAl ₂ O ₄)	790	7.6 ^d	15.0 ^e	-
Fused silica (SiO ₂)	740	0.4	1.4	-
Soda-lime glass	840	9.0	1.7	-
Borosilicate (Pyrex) glass	850	3.3	1.4	-
Polymers				
Polyethylene (high density)	1850	106-198	0.46-0.50	-
Polypropylene	1925	145-180	0.12	-
Polystyrene	1170	90-150	0.13	-
Polytetrafluoroethylene (Teflon)	1050	126-216	0.25	-
Nylon 6,6	1670	144	0.24	-
Polyisoprene	-	220	0.14	-
Phenol-formaldehyde, Phenolic (Bakelite)	1590-1760	122	0.15	-

^a เปลี่ยนเป็น cal/g.K, คูณด้วย 2.39 x 10⁻⁴; และเปลี่ยนเป็น Btu/lb_m.°F, คูณด้วย 2.39 x 10⁻⁴

^b เปลี่ยนเป็น (°F)⁻¹, คูณด้วย 0.56

^c เปลี่ยนเป็น cal/s.cm.K, คูณด้วย 2.39 x 10⁻³; และเปลี่ยนเป็น Btu/lb_m.°F, คูณด้วย 0.578

^d หาค่าที่อุณหภูมิ 100 °C

^e เป็นค่าเฉลี่ยเหนือช่วงอุณหภูมิ 0-1000 °C

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ

- ความจุความร้อนในแบบอื่นๆ (other heat capacity contributions)

ความจุความร้อนทั้งหมดของของแข็งมาจากการรวมกลไกการดูดซับพลังงานแบบต่างๆ เข้าด้วยกัน แต่อย่างไรก็ตามความจุความร้อนแบบอื่นๆ ถือว่าเป็นส่วนน้อยเมื่อเทียบกับความจุความร้อนแบบการสั่น ความจุความร้อนในแบบอื่นๆ ได้แก่ความจุความร้อนทางไฟฟ้า ที่เป็นการดูดซับพลังงานด้วยการเพิ่มพลังงานจลน์ (kinetic energy) ของอิเล็กตรอน ซึ่งจะเกิดขึ้นเฉพาะกับอิเล็กตรอนอิสระเท่านั้น โดยจะถูกกระตุ้นจากชั้นบรรจุเต็ม (filled state) ไปยังชั้นว่าง (empty state) เหนือพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy) และในโลหะเฉพาะอิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้ระดับพลังงานเฟอร์มีเท่านั้นจึงจะเกิดการส่งผ่านนี้ได้ ซึ่งถือเป็นอิเล็กตรอนส่วนน้อย สำหรับวัสดุฉนวนและกึ่งตัวนำจะยังมีสัดส่วนของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นน้อยมาก ทำให้ความจุความร้อนทางไฟฟ้าไม่ค่อยมีความสำคัญ ยกเว้นที่อุณหภูมิใกล้ศูนย์องศาเคลวิน

3. การขยายตัวจากความร้อน (thermal expansion)

วัสดุของแข็งส่วนใหญ่จะเกิดการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนและหดตัวเมื่อลดอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงความยาวต่ออุณหภูมิของวัสดุของแข็งอาจเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{l_f - l_0}{l_0} = \alpha_l (T_f - T_0) \quad (4.3a)$$

หรือ

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha_l \Delta T \quad (4.3b)$$

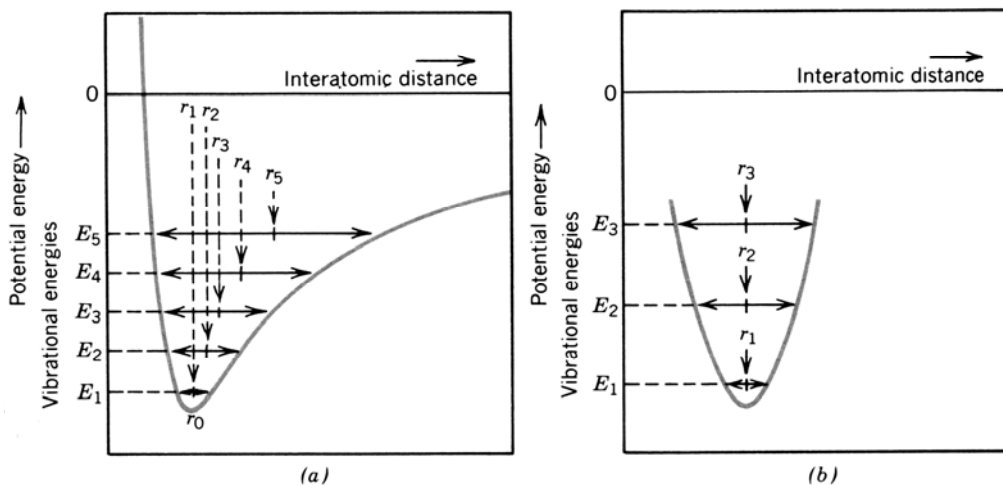
เมื่อ l_0 และ l_f คือความยาวเริ่มต้นและสุดท้ายเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนจาก T_0 ไปเป็น T_f ตามลำดับ ส่วนตัวแปร α_l คือสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อน (linear coefficient of thermal expansion) ซึ่งเป็นสมบัติที่แสดงถึงปริมาณการขยายตัวของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน และมีหน่วยเป็นส่วนกลับของอุณหภูมิ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ หรือ $^{\circ}\text{F}^{-1}$ แท้จริงแล้วการให้และการลดอุณหภูมิมิใช่ผลต่อการเปลี่ยนแปลงในทุกๆ ด้านของชิ้นงานในรูปของการเปลี่ยนแปลงปริมาตร โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของปริมาตรต่ออุณหภูมิอาจคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \alpha_v \Delta T \quad (4.4)$$

เมื่อ ΔV และ V_0 คือปริมาตรที่เปลี่ยนไปและปริมาตรเริ่มต้นตามลำดับ ส่วน α_v คือสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตรทางความร้อน ในหลายวัสดุค่า α_v จะไม่เป็นแบบเดียวกัน

เมื่อสังเกตในระดับอะตอมการขยายตัวทางความร้อนจะเป็นการเพิ่มขึ้นของระยะเฉลี่ยระหว่างอะตอม และสามารถทำความเข้าใจกับปรากฏการณ์นี้ได้ด้วยการพิจารณากราฟพลังงานศักย์ไฟฟ้าเทียบกับระยะห่างระหว่างอะตอมของวัสดุของแข็งดังรูปที่ 4.3a พบว่ากราฟมีลักษณะเป็นแอ่งของค่าศักย์ไฟฟ้าและมีระยะห่างระหว่างอะตอมสมดุลที่ 0 K (r_0) อยู่ที่ต่ำสุดของแอ่ง เมื่อให้ความร้อนสูงขึ้นเป็น T_1 T_2 T_3 และอื่นๆ พลังงานการสั่นจะเพิ่มขึ้นจาก E_1 เป็น E_2 E_3 ตามลำดับ ความสูงของคลื่นการสั่นเฉลี่ยของอะตอมจะสัมพันธ์กับความกว้างของแอ่งที่อุณหภูมินั้นๆ และระยะระหว่างอะตอมเฉลี่ยเท่ากับตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างเส้นกราฟซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิจาก r_0 เป็น r_1 r_2 r_3 และอื่นๆ ตามลำดับ

การขยายตัวทางความร้อนแท้จริงมาจากกราฟสมมาตรของแอ่งค่าพลังงานศักย์ไฟฟ้ามากกว่าความสูงของคลื่นการสั่นของอะตอมที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ กล่าวคือถ้ากราฟพลังงานศักย์ไฟฟ้าสมมาตรดังรูปที่ 4.3b จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของระยะระหว่างอะตอมสุทธิ นั่นคือวัสดุไม่มีการขยายตัวทางความร้อน



รูปที่ 4.3 a) กราฟระหว่างพลังงานศักย์กับระยะระหว่างอะตอม โดยระยะระหว่างอะตอมจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

b) กราฟระหว่างพลังงานศักย์กับระยะระหว่างอะตอมแบบสมมาตร ซึ่งระยะระหว่างอะตอมจะไม่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

สำหรับแต่ละวัสดุ โลหะ พอลิเมอร์และเซรามิก วัสดุที่มีพลังงานยึดเกาะระหว่างอะตอมสูงกว่าจะมีแอ่งของพลังงานศักย์ไฟฟ้าที่ลึกและแคบกว่า ทำให้การแยกออกของอะตอมต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลดลงและมีค่า α_1 น้อยกว่าดังตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของวัสดุต่างๆที่อุณหภูมิห้อง และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

- การขยายตัวของโลหะ

สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของโลหะบางชนิดในตารางที่ 4.1 มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 5×10^{-6} ถึง 25×10^{-6} ($^{\circ}\text{C}$)⁻¹ เนื่องจากการใช้งานบางอย่างความเสถียรของขนาดหรือรูปทรงของชิ้นงานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นหัวใจสำคัญ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาโลหะในกลุ่มโลหะผสมเหล็กนิกเกิลและเหล็กนิกเกิลโคบอลที่มีค่า α_1 เท่ากับ 1×10^{-6} ($^{\circ}\text{C}$)⁻¹ โดยมีชื่อทางการค้าว่า Kovar และ Invar หรือ Supper Invar (ตารางที่ 4.1) ซึ่งได้ออกแบบให้มีคุณลักษณะการขยายตัวใกล้เคียงกับวัสดุกลุ่มแก้ว borosilicate (หรือ Pyrex) ดังนั้นเมื่อทำการเชื่อมกับ Pyrex แล้วนำไปใช้งานในสภาวะที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงแรงเค้นจากความร้อนและการแตกหักบริเวณรอยเชื่อมที่อาจเกิดขึ้นได้

- การขยายตัวของเซรามิก

วัสดุเซรามิกหลายชนิดมีแรงพันธะระหว่างอะตอมที่ค่อนข้างแข็งแรงสังเกตได้จากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำ โดยอยู่ในช่วงประมาณ 0.5×10^{-6} ถึง 15×10^{-6} ($^{\circ}\text{C}$)⁻¹ สำหรับวัสดุเซรามิกที่ไม่เป็นผลึกและกลุ่มที่มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์จะมีค่า α_1 เป็นแบบเดียวกันส่วนเซรามิกในแบบอื่นๆ จะอยู่ในลักษณะที่ไม่เป็นแบบเดียวกัน และในความเป็นจริงวัสดุเซรามิกบางอย่างเมื่อได้รับความร้อน ในขณะที่เกิดการขยายตัวในส่วนอื่นๆจะเกิดการหดตัวในบางทิศทางของผลึก สำหรับแก้วอนินทรีย์สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี ส่วนซิลิกาที่ผ่านการหลอม (fused silica) เป็นแก้วซิลิกา (SiO_2) บริสุทธิ์สูงที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำคือ 0.5×10^{-6} ($^{\circ}\text{C}$)⁻¹ ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุมีความหนาแน่นการบรรจุอะตอมที่ต่ำ (low atomic packing density) ทำให้เกิดการขยายตัวระหว่างอะตอมได้น้อยและส่งผลทำให้การเปลี่ยนแปลงขนาดในระดับมหภาคมีน้อย

วัสดุเซรามิกที่ใช้ในสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนค่อนข้างต่ำและเป็นแบบเดียวกัน มิฉะนั้นวัสดุประเภทนี้จะเกิดการแตกหักจากการเปลี่ยนแปลงขนาดในทิศทางต่างๆ ไม่เท่ากันที่เรียกว่า thermal shock ซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

- การขยายตัวของพอลิเมอร์

วัสดุพอลิเมอร์บางชนิดมีการขยายตัวทางความร้อนสูงมากเมื่อได้รับความร้อนสังเกตจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวอยู่ในช่วงประมาณ 50×10^{-6} ถึง $400 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$ โดยพอลิเมอร์แบบเส้นและกึ่งจะมีค่า α สูงสุด เนื่องจากมีแรงพันธะอันตรึงระหว่างโมเลกุลที่อ่อนแอและมีการครอสลิงค์ต่ำสุด แต่ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจะลดลงเมื่อปริมาณของการครอสลิงค์เพิ่มขึ้น โดยพอลิเมอร์เทอร์โมเซตแบบเครือข่าย เช่น Bakelite จะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำสุด เนื่องจากพันธะระหว่างโมเลกุลส่วนใหญ่เป็นโควาเลนต์

4. การนำความร้อน (heat conductivity)

การนำความร้อนเป็นปรากฏการณ์การส่งผ่านความร้อนของวัสดุจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ สมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการส่งผ่านความร้อนของวัสดุนี้เรียกว่า การนำความร้อน ซึ่งสามารถนิยามด้วยเทอมสมการดังต่อไปนี้

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (4.5)$$

เมื่อ q คือถ่ายเทความร้อน (heat flux) เทียบกับเวลาและพื้นที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทาง การถ่ายเท k คือค่าการนำความร้อน และ dT/dx คือค่าระดับความต่างของอุณหภูมิ (thermal gradient) ตลอดแนววัสดุในทิศทางนำความร้อน q และ k มีหน่วยเป็น W/m^2 ($\text{Btu/ft}^2 \cdot \text{h}$) และ $\text{W/m} \cdot \text{K}$ ($\text{Btu/ft} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{F}$) ตามลำดับ สมการ 4.5 ใช้ได้เฉพาะขั้นการถ่ายเทความร้อนช่วง steady-state เท่านั้น ซึ่งเป็นช่วงที่การถ่ายเทความร้อนไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดยเครื่องหมายติดลบในสมการแสดงถึงทิศทางของการถ่ายเทความร้อนจากบริเวณอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ

- กลไกการนำความร้อน

วัสดุของแข็งจะส่งผ่านความร้อนด้วยคลื่นการสั่นของผลึกหรือโฟนอน (phonons) และด้วยอิเล็กตรอนอิสระ โดยการนำความร้อนจะสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับแต่ละกลไกในขณะที่ค่าการนำความร้อนทั้งหมดจะได้จากผลรวมของกลไกทั้งสองดังสมการ

$$k = k_l + k_c \quad (4.6)$$

เมื่อ k_l และ k_c คือการนำความร้อนจากการสั่นของผลึกและจากอิเล็กตรอนตามลำดับ โดยปกติตัวแปรหนึ่งจะมีอิทธิพลสูงกว่าอีกตัวแปรหนึ่งเสมอ พลังงานความร้อนที่สัมพันธ์กับโฟนอนหรือคลื่นผลึกจะถูกส่งผ่านในทิศทางเคลื่อนที่ของคลื่นผลึก โดย k_l เป็นผลลัพธ์ของการเคลื่อนที่ของโฟนอนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำในแนวขวางกับทิศทางเคลื่อนที่ของอุณหภูมิ

ส่วนอิเล็กตรอนอิสระมีส่วนร่วมในการนำความร้อนทางไฟฟ้า โดยอิเล็กตรอนอิสระของวัสดุบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงจะมีพลังงานจลน์สูงขึ้นแล้วเคลื่อนไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ขณะเดียวกันพลังงานจลน์บางส่วนจะถ่ายเทไปยังอะตอมในรูปของพลังงานการสั่น ทำให้เกิดการปะทะกับโฟนอนหรือกับมลทินอื่นในผลึก โดยสัดส่วนของ k_c ในค่าการนำความร้อนทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของอิเล็กตรอนอิสระ กล่าวคือจำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่เพิ่มขึ้นจะช่วยให้สามารถถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น

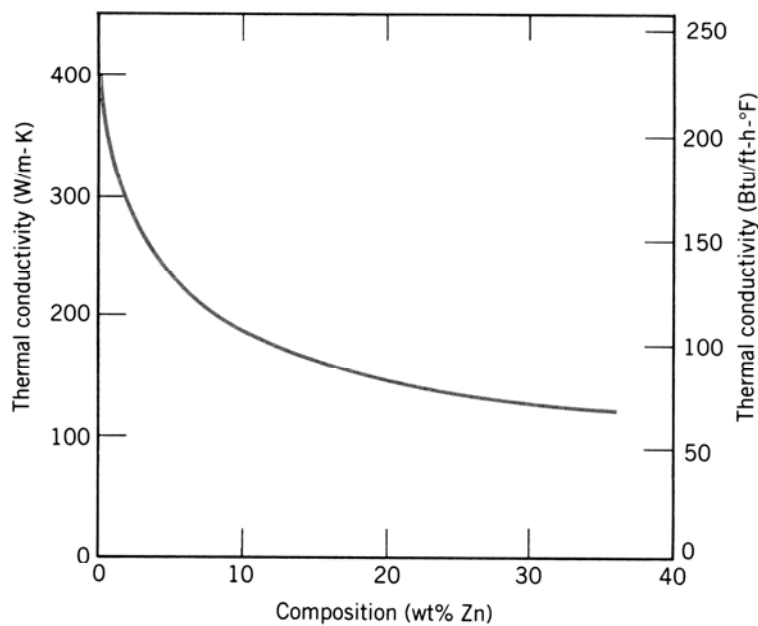
- การนำความร้อนของโลหะ

กลไกการถ่ายเทความร้อนด้วยอิเล็กตรอนในโลหะบริสุทธิ์สูงจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบโฟนอน เนื่องจากอิเล็กตรอนเกิดการกระเจิงได้ยากกว่าโฟนอนและมีความเร็วสูงกว่า ดังนั้นโลหะจึงเป็นตัวนำความร้อนที่ดีมาก เพราะมีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากที่จะสามารถร่วมกันนำความร้อน โดยค่าการนำความร้อนของโลหะบางชนิดได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 20 ถึง 400 W/m.K และเนื่องจากอิเล็กตรอนอิสระในโลหะบริสุทธิ์สามารถตอบสนองทั้งการนำไฟฟ้าและการนำความร้อน ในทางทฤษฎีคาดว่า การนำทั้งสองแบบสัมพันธ์กับกฎของ Wiedemann-Franz ดังสมการ

$$L = \frac{k}{\sigma T} \quad (4.7)$$

เมื่อ σ คือการนำไฟฟ้า T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ และ L คือค่าคงที่ ในทางทฤษฎีค่า L เท่ากับ $2.44 \times 10^{-8} \Omega \cdot W / (K)^2$ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยการถ่ายเทพลังงานทั้งหมดในโลหะจะเป็นแบบเดียวกันคืออาศัยอิเล็กตรอนอิสระ จากตารางที่ 4.1 พบว่าค่า L ของโลหะชนิดต่างๆ รวมทั้งค่าในทางทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกัน คือมีค่าประมาณสองถึงสาม

ธาตุผสมกับสิ่งเจือปนทำให้การนำความร้อนลดลง เนื่องจากอะตอมของธาตุผสมหรือสิ่งเจือปนจะประพฤติตัวเป็นศูนย์กลางการกระเจิง ทำให้ประสิทธิภาพการเคลื่อนของอิเล็กตรอนลดลง ดังที่แสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นกราฟการนำความร้อนของโลหะผสมทองเหลืองเทียบกับปริมาณธาตุผสมสังกะสี ผลกระทบนี้จะเป็นแบบเดียวกันกับเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งเป็นโลหะผสมสูง คือมีความต้านทานการนำความร้อนค่อนข้างสูง



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงอิทธิพลของปริมาณธาตุผสมต่อการนำความร้อนของโลหะผสม

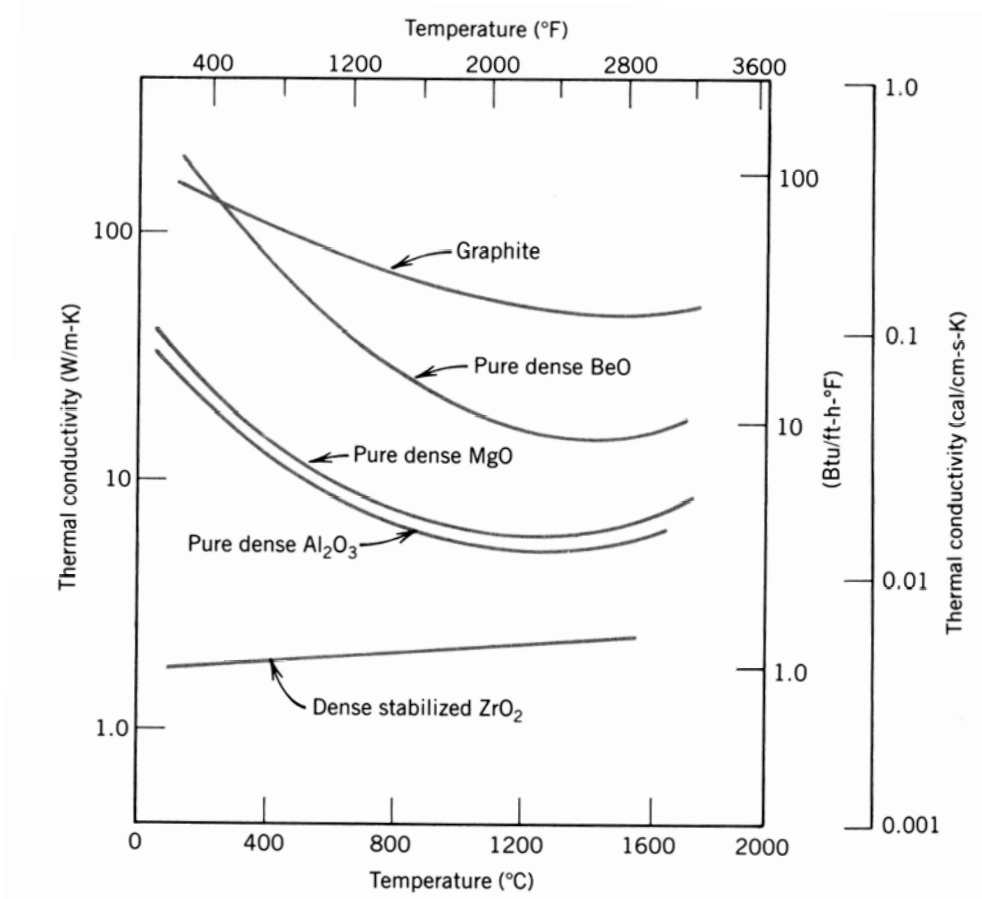
- การนำความร้อนของเซรามิก

วัสดุออกกลุ่มโลหะจะเป็นจำนวนความร้อนมากขึ้นตามจำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่ลดลง ทำให้การนำความร้อนมาจากโฟนอนเป็นหลัก นั่นคือ k_c มีค่าน้อยกว่า k_e แต่อย่างไรก็ตาม โฟนอนสามารถส่งผ่านพลังงานความร้อนได้น้อยไม่เหมือนกับอิเล็กตรอนอิสระ ประกอบกับโฟนอนยังเกิดการกระเจิงจากความบกพร่องของผลึก ซึ่งจะยิ่งทำให้การนำความร้อนลดลง

ค่าการนำความร้อนของวัสดุเซรามิกบางชนิดได้แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วงประมาณ 2 ถึง 50 W/m.K แก้วและเซรามิกอสัณฐานอื่นๆ จะมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าเซรามิกผลึก เนื่องจากโฟนอนจะเกิดการกระเจิงมากขึ้นจากโครงสร้างอะตอมอสัณฐานที่ไม่สม่ำเสมอและไม่ระเบียบ

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการกระเจิงจากการสั่นของผลึกจะมากขึ้น ทำให้การนำความร้อนของวัสดุเซรามิกลดลง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำดังรูปที่ 4.5 แต่ค่าการนำความร้อนจะกลับเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่อุณหภูมิสูง ทั้งนี้เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนของรังสี ด้วยรังสีอินฟราเรดจำนวนหนึ่งจะสามารถทำให้ความร้อนถ่ายเทผ่านวัสดุเซรามิกโปร่งใสได้ โดยประสิทธิภาพการนำความร้อนของกระบวนการนี้จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น

ความพรุนตัวในวัสดุเซรามิกมีอิทธิพลต่อการนำความร้อนค่อนข้างมาก ภายใต้สภาวะปกติค่าการนำความร้อนจะลดลงตามขนาดของรูอากาศที่ใหญ่ขึ้น เห็นได้จากวัสดุเซรามิกที่ใช้เป็นฉนวนความร้อนล้วนเป็นวัสดุพรุนตัว การส่งผ่านความร้อนผ่านรูอากาศในวัสดุปกติมีประสิทธิภาพต่ำและเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป เนื่องจากในรูอากาศมีอากาศที่มีค่าการนำความร้อนต่ำมากประมาณ 0.02 W/m.K และยิ่งกว่านั้นการพาความร้อนก็ไร้ประสิทธิภาพเช่นกัน



รูปที่ 4.5 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อค่าการนำความร้อนของวัสดุเซรามิกบางชนิด

- การนำความร้อนของพอลิเมอร์

การนำความร้อนของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ดังตารางที่ 4.1 มีค่าประมาณ 0.3 W/m.K สำหรับวัสดุพอลิเมอร์การถ่ายเทพลังงานเป็นแบบการสั่นและการหมุนของสายโซ่โมเลกุล ค่าการนำความร้อนขึ้นอยู่กับระดับความเป็นผลึก คือพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกสูงและมีโครงสร้างเป็นระเบียบจะมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าพอลิเมอร์แบบอสัณฐาน ทั้งนี้เนื่องจากการรบกวนกันสั่นของสายโซ่โมเลกุลในรูปของผลึกส่งผลต่อการนำความร้อนได้มากกว่า

บ่อยครั้งที่วัสดุพอลิเมอร์ถูกนำมาใช้เป็นฉนวนทางความร้อนเนื่องจากค่าการนำความร้อนต่ำเช่นเดียวกับวัสดุเซรามิก โดยสมบัติความเป็นฉนวนของพอลิเมอร์จะสูงขึ้นจากโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูอากาศเล็กๆ ที่เกิดจากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ (polymerization) ชนิดโฟม เช่น โฟมพอลิไสตรีนหรือที่เรียกว่า Styrofoam ซึ่งมักถูกนำมาใช้เป็นถ้วยกาแฟหรือฉนวนกันความร้อน เป็นต้น

5. แรงเค้นจากความร้อน (thermal stress)

แรงเค้นจากความร้อนเป็นแรงเค้นในวัสดุที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การทำความเข้าใจกับธรรมชาติและการเกิดแรงเค้นจากความร้อนเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากแรงเค้นเหล่านี้สามารถทำให้วัสดุเกิดการแตกหักและการเสียรูปถาวรที่ไม่พึงประสงค์

- แรงเค้นจากการหดและขยายตัวทางความร้อน

พิจารณาแท่งวัสดุของแข็งที่เป็นเนื้อเดียวกันและมีการขยายตัวแบบเดียวกันซึ่งได้รับความร้อนและการเย็นตัวแบบสม่ำเสมอ ในกรณีนี้จะไม่เกิดความต่างของอุณหภูมิของสองบริเวณ ทำให้การหดและขยายตัวเกิดขึ้นได้อย่างอิสระ ส่งผลให้แท่งวัสดุของแข็งปราศจากแรงเค้นจากความร้อน อย่างไรก็ตามแรงเค้นจากความร้อนอาจเกิดขึ้นได้ถ้ายึดปลายทั้งสองข้างของแท่งวัสดุแบบตายตัวจนไม่สามารถเกิดการเคลื่อนตัวในแนวแกน โดยขนาดของแรงเค้น σ ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหาได้ดังสมการ

$$\sigma = E\alpha_1(T_0 - T_f) = E\alpha_1\Delta T \quad (4.8)$$

เมื่อ E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นและ α_1 คือสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อน เมื่อให้ความร้อนกับแท่งวัสดุของแข็งคือ T_f สูงกว่า T_0 แรงเค้นที่เกิดขึ้นจะเป็นแรงเค้นอัด โดย

ตัวอย่างที่ 4.1

แท่งทองเหลืองถูกนำมาใช้งานในลักษณะที่ปลายทั้งสองข้างถูกยึดตายตัว และถ้าแท่งทองเหลืองปราศจากแรงเค้นที่อุณหภูมิห้อง $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถ้าวัดอุณหภูมิสูงสุดที่แท่งทองเหลืองจะมีแรงเค้นอัดไม่เกิน 172 MPa สมมุติโมดูลัสความยืดหยุ่นของทองเหลืองเท่ากับ 100 GPa

วิธีทำ

เนื่องจากแรงเค้นเป็นแรงเค้นอัดดังนั้น 172 MPa จะต้องมีค่าติดลบในสมการที่ 4.8 โดยอุณหภูมิเริ่มต้น T_0 คือ $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ และจากตารางที่ 4.1 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเชิงเส้นเท่ากับ $20 \times 10^{-6}\text{ }(^{\circ}\text{C})^{-1}$ ดังนั้นอุณหภูมิสุดท้าย T_f หาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} T_f &= T_0 - \frac{\sigma}{E\alpha_1} \\ &= 20\text{ }^{\circ}\text{C} - \frac{-172\text{ MPa}}{(100 \times 10^3\text{ MPa})(20 \times 10^{-6}\text{ }(^{\circ}\text{C})^{-1})} \\ &= 20\text{ }^{\circ}\text{C} + 86\text{ }^{\circ}\text{C} \\ &= 106\text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

- แรงเค้นจากความต่างของอุณหภูมิ

การกระจายของอุณหภูมิภายในวัสดุเมื่อให้ความร้อนหรือลดอุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับขนาด รูปทรง การนำความร้อนของวัสดุและอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยแรงเค้นทางความร้อนอาจเกิดขึ้นจากการที่วัสดุได้รับความร้อนหรือลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวด้านนอกมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเร็วกว่าด้านใน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดที่แตกต่างกันของสองบริเวณ ซึ่งจะทำให้การขยายและการหดตัวของปริมาตรภายในชิ้นงานเป็นไปอย่างไม่อิสระ ตัวอย่างเช่นเมื่อให้ความร้อนกับชิ้นทดสอบ

- การเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลัน (thermal shock) ของวัสดุเปราะ

สำหรับวัสดุเหนียวกลุ่ม โลหะและพอลิเมอร์ แรงเค้นจากความร้อนที่เกิดขึ้นภายใน ชิ้นงานอาจลดลงได้ด้วยการเกิดการเสียรูปแบบพลาสติก ซึ่งต่างจากวัสดุเปราะในกลุ่มของ วัสดุเซรามิกที่มีการเสียรูปแบบพลาสติกได้น้อยมาก ดังนั้นวัสดุเซรามิกจึงมีความเป็นไปได้ สูงกว่าในการเกิดการแตกเปราะอันเนื่องมาจากแรงเค้นจากความร้อนเมื่อเทียบกับวัสดุเหนียว การลดอุณหภูมิวัสดุเปราะอย่างรวดเร็วมีผลต่อการเกิดการแตกหักจากการเปลี่ยนอุณหภูมิ ฉับพลันได้มากกว่ากรณีของการเพิ่มอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากแรงเค้นที่พื้นผิวเป็น แรงเค้นดึงซึ่งจะมีโอกาสทำให้เกิดรอยร้าวและลุกลามจากบริเวณพื้นผิวเข้าไปในชิ้นงานจน เกิดการแตกหักได้มากกว่าแรงเค้นที่พื้นผิวที่เป็นแรงเค้นอัดจากกรณีของการเพิ่มอุณหภูมิ

ความทนทานของวัสดุต่อการแตกหักลักษณะนี้เรียกว่าความต้านทานการเปลี่ยน อุณหภูมิฉับพลัน (thermal shock resistance) สำหรับวัสดุเซรามิกที่มีการลดอุณหภูมิอย่าง รวดเร็ว ความต้านทานนี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับระดับความต่างของอุณหภูมิเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับ กลไกและสมบัติทางความร้อนของวัสดุ โดยเซรามิกที่มีความต้านทานการเปลี่ยนอุณหภูมิ ฉับพลันที่ดีจะต้องมีค่าความแข็งแรงการแตกหัก σ_f และค่าการนำความร้อนสูง ขณะเดียวกัน ต้องมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นและสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ความต้านทาน การแตกหักจากการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลันของวัสดุต่างๆ สามารถหาค่าได้โดยประมาณ จาก ค่าตัวแปรความต้านทานการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลัน TSR (thermal shock resistance) ดัง สมการ

$$TSR \cong \frac{\sigma_f k}{E\alpha_1} \quad (4.9)$$

การแตกหักจากการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลันสามารถป้องกันได้โดยการเปลี่ยนสภาวะ ภายนอกให้อยู่ในระดับที่มีอัตราการให้หรือการลดอุณหภูมิที่ลดลง และมีระดับความแตกต่าง

บางครั้งวัสดุเซรามิกจำเป็นต้องขจัดแรงเค้นทางความร้อน ทั้งนี้เพื่อปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงทางกลและคุณลักษณะทางแสงให้ดีขึ้น ซึ่งอาจทำได้โดยกระบวนการอบอ่อนทางความร้อน

6. สรุป (summary)

ในบทนี้ได้อธิบายเกี่ยวกับปรากฏการณ์ทางความร้อนที่สำคัญสามอย่างได้แก่การดูดซับความร้อน การขยายตัวทางความร้อน และการนำความร้อน ความจุความร้อนแสดงถึงปริมาณของความร้อนที่จำเป็นในการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นหนึ่งหน่วยต่อหนึ่งโมลของวัสดุ แต่ถ้าเทียบกับหนึ่งหน่วยน้ำหนักจะเรียกว่าความร้อนจำเพาะ พลังงานทั้งหมดที่ดูดซับโดยวัสดุของแข็งจะสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของพลังงานการสั่นของอะตอม นอกจากนั้นยังส่งผลต่อความจุความร้อนทั้งหมดรวมกับกลไกการดูดซับพลังงานแบบอื่นๆ เช่นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนอิสระที่เพิ่มขึ้น

สำหรับวัสดุของแข็งผลึกหลายชนิดที่อุณหภูมิใกล้กับศูนย์องศาเคลวิน ค่าความจุความร้อนที่วัดได้ที่มีปริมาตรคงที่จะปรับเปลี่ยนตามค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ยกกำลังสาม ในช่วงเกินอุณหภูมิ Debye ค่าของ C_v จะเป็นอิสระจากอุณหภูมิและมีค่าประมาณ $3R$

วัสดุของแข็งจะขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนและหดตัวเมื่อลดอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงความยาวจะเป็นสัดส่วนกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยค่าสัดส่วนคงที่ของการเปลี่ยนแปลงนี้เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุ การขยายตัวทางความร้อนสะท้อนในรูปของการเพิ่มขึ้นของระยะระหว่างอะตอมเฉลี่ย ซึ่งเป็นผลมาจากธรรมชาติที่ไม่สมมาตรของพลังงานศักย์เทียบกับแรงแรงของกราฟระยะระหว่างอะตอม โดยพลังงานพันธะระหว่างอะตอมยิ่งมากสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนจะยิ่งต่ำ

การส่งผ่านพลังงานความร้อนของวัสดุจากบริเวณอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำเป็นเทอมของการนำความร้อน สำหรับการส่งผ่านความร้อนในสภาวะหยุดนิ่ง (steady-state) การถ่ายเทความร้อนจะเป็นสัดส่วนกับระดับความต่างของอุณหภูมิตลอดแนวยาวในทิศทางที่ส่งผ่านความร้อน โดยค่าสัดส่วนคงที่นี้เป็นค่าการนำความร้อนของวัสดุ

สำหรับวัสดุของแข็งความร้อนจะถูกส่งผ่านโดยอิเล็กตรอนอิสระและคลื่นการสั่นของผลึกหรือโฟนอน ค่าการนำความร้อนที่สูงของวัสดุโลหะที่ค่อนข้างบริสุทธิ์เป็นผลเนื่องจากการมีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมาก ซึ่งมีประสิทธิภาพในการส่งผ่านพลังงานความร้อน ในทางกลับกันวัสดุเซรามิกและ พอลิเมอร์มีค่าการนำความร้อนต่ำเนื่องจากมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระต่ำ โดยการนำความร้อนส่วนใหญ่จะเป็นการส่งผ่านความร้อนของโฟนอน

แรงเค้นจากความร้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ซึ่งอาจนำไปสู่การแตกหักหรือการเกิดการเสียรูปแบบพลาสติกที่ไม่พึงประสงค์ได้ สองสาเหตุของแรงเค้นจากความร้อนคือการจำกัดการขยายตัวหรือการหดตัวทางความร้อนและระดับความต่างของอุณหภูมิตั้งแต่ในระหว่างการให้หรือลดอุณหภูมิ

การเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลัน (thermal shock) เป็นการแตกหักของวัสดุอันเนื่องมาจากแรงเค้นจากความร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว เนื่องด้วยเซรามิกเป็นวัสดุเปราะจึงมีความเสี่ยงอย่างมากในการเกิดความเสียหายลักษณะนี้ ความต้านทานการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลันของวัสดุต่างๆจะเป็นสัดส่วนกับความแข็งแรงการแตกหักและค่าการนำความร้อน และเป็นสัดส่วนกลับกับโมดูลัสความยืดหยุ่นและสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

7. คำถามท้ายบท (Questions)

1. จงหาพลังงานที่จำเป็นในการเพิ่มอุณหภูมิของแต่ละวัสดุจำนวนอย่างละ 5 kg (11 lb_m) ต่อไปนี้คืออะลูมิเนียม ทองเหลือง อลูมินาและพอลิस्टาไทรน จำนวน 5 kg จาก 20 เป็น 150 °C (68 เป็น 300 °F)
2. ชิ้นงานเหล็กกล้า 1025 ที่อุณหภูมิ 25 °C ได้รับความร้อน 125 Btu จะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็นเท่าไร
3. หาค่าความร้อนที่อุณหภูมิห้องภายใต้สภาวะความดันคงที่ของวัสดุต่อไปนี้ อะลูมิเนียม เงิน ทั้งสแตน และทองเหลืองร้อยละ 70 ทองแดง 30 สังกะสี พร้อมทั้งอธิบายเปรียบเทียบค่าความจุความร้อนของวัสดุต่างๆ เหล่านี้
4. ทองแดงมีค่าความจุความร้อนที่ปริมาตรคงที่ C_v เท่ากับ 0.38 J/mol-K ที่ 20 K และอุณหภูมิ Debye 340 K จงหาความจุความร้อนทองแดงที่ 40 และ 400 K
5. ค่าคงที่ A ในสมการที่ 4.2 เท่ากับ $12\pi^4 R/5\theta_D^3$ เมื่อ R คือค่าคงที่แก๊ซ และ θ_D คืออุณหภูมิ Debye (K) จงหาค่า θ_D ของอะลูมิเนียม กำหนดให้ความร้อนจำเพาะเท่ากับ 4.6 J/kg-K ที่ 15 K
6. อธิบายว่าทำไมค่า C_v ถึงเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิที่ใกล้ 0 K และเพราะเหตุใดที่อุณหภูมิสูงๆ ค่า C_v ถึงมีค่าค่อนข้างคงที่โดยไม่ขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอีก
7. ลวดทองแดงยาว 15 m (49.2 ft) ถูกทำให้เย็นลงจาก 40 เป็น -9 °C (104 เป็น 15 °F) ถามว่าความยาวของลวดจะเปลี่ยนไปเท่าไร
8. แท่งโลหะยาว 0.4 m (15.7 in.) ยึดออก 0.48 mm (0.019 in.) เมื่อให้ความร้อนจาก 20 เป็น 100 °C (68 เป็น 212 °F) จงหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเชิงเส้นของโลหะนี้
9. อธิบายการขยายตัวทางความร้อนโดยใช้กราฟพลังงานศักย์กับระยะระหว่างอะตอม
10. แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 ที่เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.988 mm ต้องมีอุณหภูมิเท่าไรถึงจะสามารถเสียบแท่งทั้งสแตนทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm โดยเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 25 °C

11. จงคำนวณการถ่ายเทความร้อน (heat flux) ตลอดแผ่นทองเหลืองหนา 7.5 mm (0.3 in.) เมื่ออุณหภูมิของสองด้านเท่ากับ 150 และ 50 °C (302 และ 122 °F) สมมติการไหลผ่านของความร้อนเป็นแบบ steady-state และหาว่ามีการสูญเสียความร้อนต่อชั่วโมงเท่าไร ถ้าแผ่นโลหะมีพื้นที่ผิว 0.5 m² (5.4 ft²) รวมทั้งถ้ามีการเพิ่มความหนาเป็น 15 mm (0.59 in.) จะมีการสูญเสียความร้อนต่อชั่วโมงเท่าไร
12. ทำไมการนำความร้อนของชิ้นงานผลึกเดี่ยวถึงมีค่าที่สูงกว่าแบบหลายผลึก และทำไมการนำความร้อนของเหล็กกล้าคาร์บอนจึงมีค่าสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม
13. ทำไมเซรามิกแบบผลึกจึงนำความร้อนได้ดีกว่าเซรามิกชนิดที่ไม่เป็นผลึก
14. เหตุใดวัสดุโลหะจึงมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าวัสดุเซรามิก
15. เหตุใดความพรุนตัวจึงทำให้การนำความร้อนในวัสดุเซรามิกและพอลิเมอร์ลดลง
16. ความเป็นผลึกในวัสดุพอลิเมอร์มีผลต่อการนำความร้อนอย่างไร เพราะเหตุใด
17. เพราะเหตุใดวัสดุเซรามิกจึงมีค่าการนำความร้อนลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วงแรก แต่กลับมีค่าสูงขึ้นอีกในช่วงหลังที่อุณหภูมิสูง
18. จงเปรียบเทียบว่าโลหะต่อไปนี้ชนิดไหนจะมีค่าการนำความร้อนสูงกว่ากัน
 - 18.1 เงินบริสุทธิ์กับเงินสเตอร์ลิง (เงินร้อยละ 92.5 และ ทองแดงร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนัก)
 - 18.2 ซิลิกาหลอมกับซิลิกาหลายผลึก
 - 18.3 Linear polyethylene (M_n 450000 g/mol) กับ lightly branched polyethylene (M_n 650000 g/mol)
 - 18.4 Atactic polypropylene (M_n 10⁶ g/mol) กับ isotactic polypropylene (M_n 5 x 10⁵ g/mol)
19. เหตุใดแรงเค้นจากความร้อนจึงเกิดขึ้นในวัสดุด้วยการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว และสำหรับการลดอุณหภูมิจะเกิดแรงเค้นประเภทใดที่ผิววัสดุ กลับกับในกรณีของการเพิ่มอย่างรวดเร็วจะเกิดแรงเค้นประเภทใดที่ผิววัสดุเพราะเหตุใด นอกจากนั้นทำไมวัสดุเซรามิกจึงแตกหักจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน (thermal shock) จากการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว

20. จงหาขีดจำกัดบนและล่างของค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิห้องของแมกนีเซียมออกไซด์ที่มีเศษส่วนปริมาตรความพรุนตัว 0.3
21. ถ้ำแห่งทองเหลืองยาว 0.35 m (13.8 in.) ได้รับความร้อนจาก 15 เป็น 85 °C (60 เป็น 185 °F) โดยที่ปลายทั้งสองไม่อ่อนตัว ให้ตอบคำถามต่อไปนี้ (สมมติที่ 15 °C ไม่มีแรงเค้นเกิดขึ้นในแท่งทองเหลือง)
- 21.1 แรงเค้นที่เกิดขึ้นในแท่งทองเหลืองเป็นประเภทใด และมีขนาดเท่าไร
- 21.2 จงหาขนาดแรงเค้นที่เกิดขึ้นถ้าเปลี่ยนความยาวแท่งทองเหลืองเป็น 1 m (39.4 in.)
- 21.3 ถ้ำลดอุณหภูมิแท่งทองเหลืองจาก 15 เป็น -15 °C (60 เป็น 5 °F) จะเกิดแรงเค้นประเภทใด และมีขนาดเท่าไร
22. เส้นลวดเหล็กกล้าถูกดึงด้วยแรงเค้น 70 MPa (10000 psi) ที่ 20 °C (68 °F) สมมติความยาวเส้นลวดไม่เปลี่ยนแปลง ถามว่าต้องให้ความร้อนกับเส้นลวดจนมีอุณหภูมิเท่าไรจึงจะลดแรงเค้นภายในเส้นลวดเป็น 17 MPa (25000 psi)
23. แท่งทรงกระบอกนิกเกิลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ยาว 100 mm ได้รับความร้อนจาก 20 เป็น 200 °C โดยที่ปลายทั้งสองไม่อ่อนตัว จงหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เปลี่ยนไป (อัตราส่วนพัวของของนิกเกิลเท่ากับ 0.31)
24. แท่งทรงกระบอกเหล็กกล้า 1025 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ยาว 175 mm ต้องลดอุณหภูมิจนมีอุณหภูมิเท่าไรจึงจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง 0.008 mm โดยที่ปลายทั้งสองไม่อ่อนตัว เริ่มต้นที่อุณหภูมิ 25 °C