

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان
مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com





آنالیز حرارتی افتراقی

(DTA)

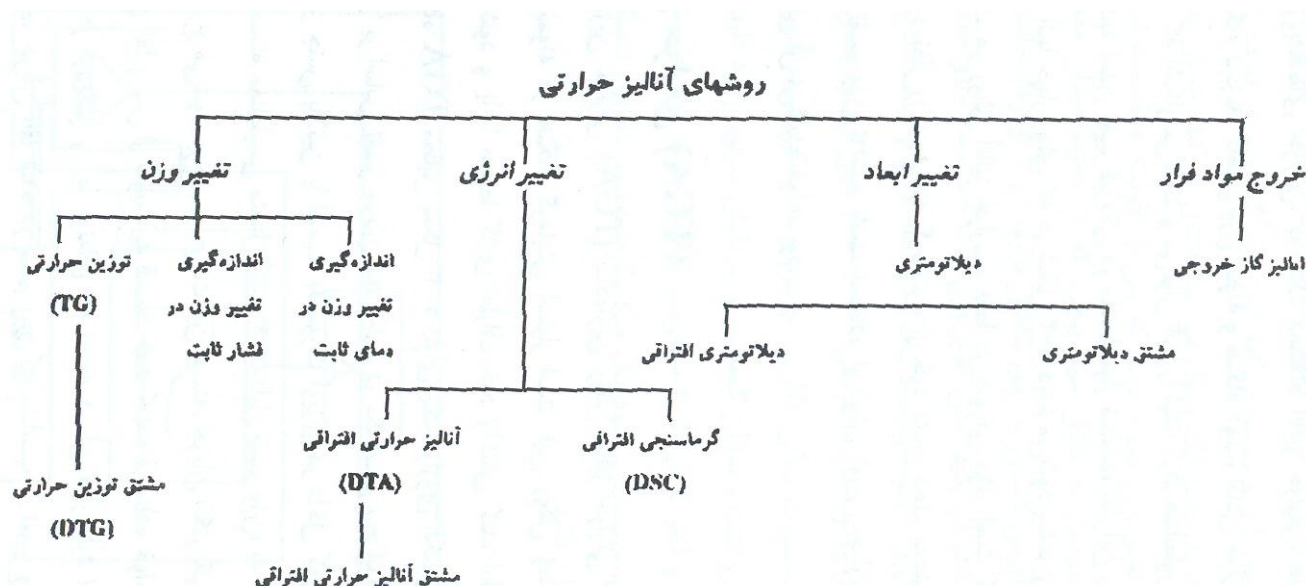
www.iran-mavad.com

مرجع دانلود رایگان مهندسی مواد و متالورژی

فهرست:

1- مقدمه.....	2
2- آنالیز حرارتی DTA.....	2
1-2- طراحی دستگاه.....	2
2-2- کالیبره کردن دستگاه DTA.....	5
3- دسته بندی انواع استحاله ها و شکل پیک DTA آنها.....	5
3-1- استحاله های برگشت پذیر.....	5
4- مقدمه ای بر کاربرد های DTA.....	7
5- عوامل مؤثر بر شکل و نتایج آنالیز حرارتی.....	12
6- فهرست منابع.....	16

آنالیز حرارتی یک روش آزمایشی و صنعتی برای آنالیز و بررسی تغییرات می باشد. هر واکنش شیمیایی و یا فیزیکی با تغییراتی در قطعه همراه است. این تغییرات شامل تغییرات حرارتی، وزنی، الکتریکی و ... می باشد. اصولاً در آنالیز حرارتی چندین روش وجود دارد که هر یک بسته به خصوصیتی از نمونه که مورد نظر است، کارایی دارد. روشهای آنالیز حرارتی از دو جنبه برای پژوهشگران و صنعت کاران اهمیت دارند. نخست آنکه به کمک این روشها، می توان شناسایی مواد را به ویژه هنگامی که روشهایی مانند پراش سنجی پرتو X و مطالعات میکروسکوپی توانایی ارزیابی نهایی را ندارند، تکمیل نمود. این حالت به ویژه در مورد مواد اولیه و ترکیبهای چند جزئی بسیار مفید است. دوم آنکه به کمک روشهای آنالیز حرارتی می توان رفتار مواد را با افزایش دما بررسی کرد. این نوع مطالعات نیز از نظر طراحی فرایند تولید و کاربرد محصول، اهمیت زیادی دارد. در شکل 1 انواع روشهای آنالیز حرارتی را مشاهده می کنید [1 و 2].

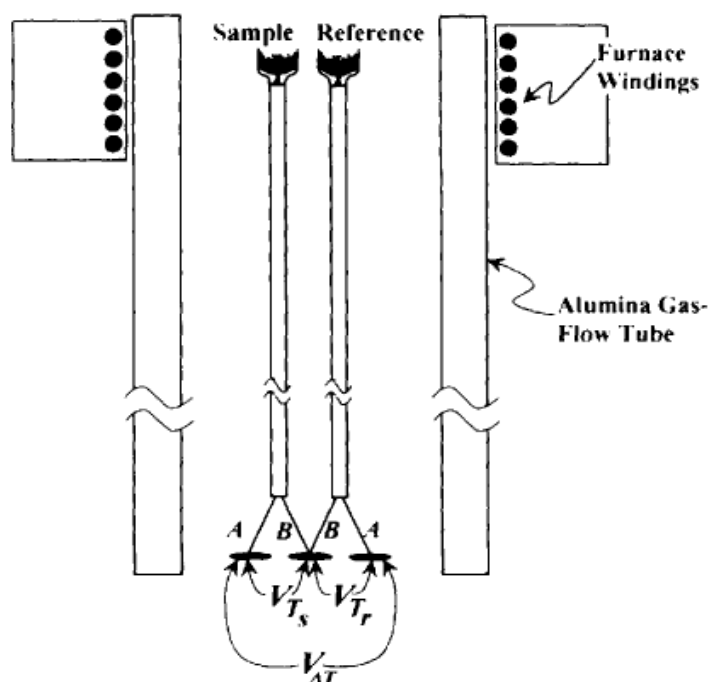


شکل 1: انواع روشهای آنالیز حرارتی [2]

2- آنالیز حرارتی افتراقی (DTA):

1-2- طراحی دستگاه:

شکل 2 شماتیک آنالیزور DTA^1 را به تصویر کشیده است. دستگاه اختلاف دمایی بین نمونه کاری و نمونه شاهد یا مرجع را که تحت برنامه دمایی یکسانی قرار گرفته اند، نشان می دهد. نمونه شاهد دارای جرم حرارتی یکسانی با نمونه کاری بوده و در رنج دمایی مورد بررسی نباید تحت استحاله خاصی قرار گیرد و معمولاً از پودر کوراندوم یا آلومینای آلفا به عنوان نمونه شاهد استفاده می شود. اختلاف دمایی بین این دو نمونه توسط ترموکوپل هایی که در کنار بوت‌ها حاوی دو نمونه قرار گرفته اند، اندازه گیری می شود. دمای نمونه و شاهد به ترتیب بر اساس ولتاژهای V_{Tr} و V_{Ts} برآورد می شود.

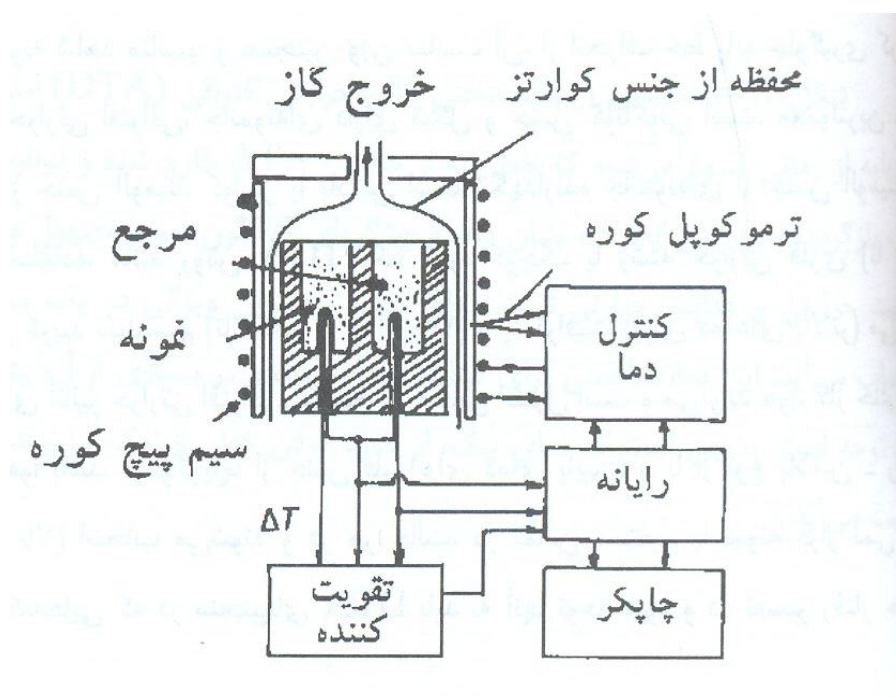


شکل 2: شماتیک دستگاه DTA [1]

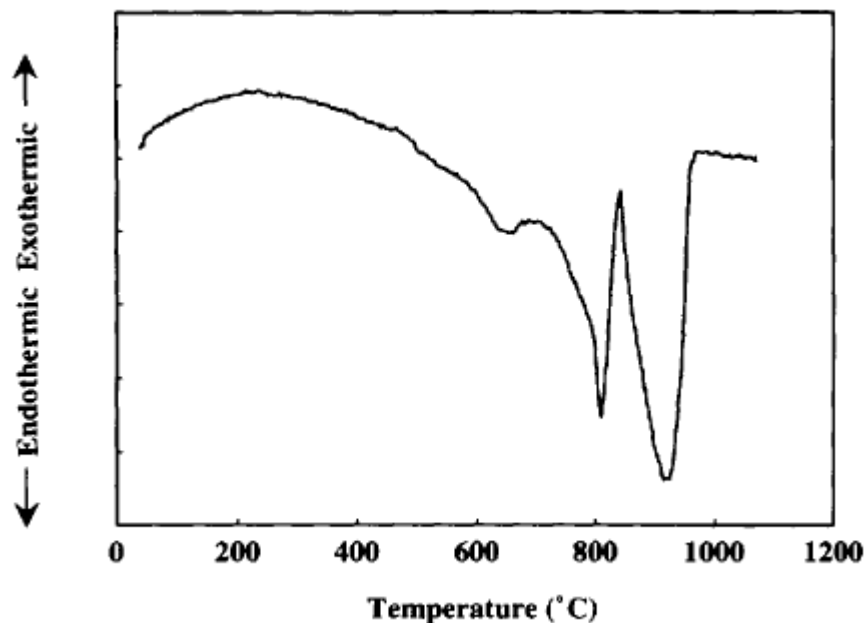
شکل 3 نمای بهتری از این دستگاه را نشان می دهد. نوع ترموکوپلهایی که برای این کار استفاده می شوند بسیار مهمند و باید دارای حساسیت دمایی مناسبی باشند چرا که اختلاف دمایی در برخی موارد بسیار ناچیز است. اگر اندازه گیری در دماهای بالا مثلاً 1200 درجه سانتی گراد صورت گیرد، ترموکوپل نوع K نسبت به ترموکوپلهای پلاتینیومی نوع S و R مناسبتر است. البته ترموکوپل نوع K تحت سیکلهای حرارتی سریع اکسید می گردد و در برخی مواقع نیاز است تا با ترموکوپل های بر پایه پلاتینیم جایگزین شود. از دیگر اجزاء حساس دستگاه DTA، تقویت کننده های سیگنالهای ترموکوپل ها هستند که ولتاژهای بسیار کوچک را با حذف نویس ها، تقویت می کنند. به منظور اندازه گیری دقیق دما نیاز به یک محیط با دمای سردتر داریم.

¹: Differential Thermal Analysis

زمانی که نمونه تحت استحاله قرار می گیرد، گرما جذب (endothermic) یا آزاد میکند (exothermic). پس زمانی که دمای نمونه از شاهد پایین تر باشد این اختلاف دما به صورت یک پیک گرماگیر در نمودار ΔT بر حسب زمان خود را نشان می دهد. شکل 4 نمودار DTA تجزیه دولومیت را نشان می دهد. اگر نمونه و شاهد تحت سرعت گرمایش ثابتی قرار گیرند می توان محور افقی را بر حسب دما مدرج نمود چرا که در این حالت دما با زمان در ارتباط است.



شکل 3: نمایش دستگاه DTA [2]



شکل 4: نمودار DTA تجزیه دولومیت $(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)$ [1]

(The endotherm peaked at 650°C corresponds to the decomposition of free MgCO_3 in magnesitic dolomite. The endotherm peaked at 805°C coincides with the decomposition of dolomite: $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 = \text{CaCO}_3 + \text{MgO} + \text{CO}_2$. The final endotherm peaked at 920°C corresponds to the decomposition of calcite (freed from the previous dolomite decomposition): $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$)

اگر ارتباط مناسبی بین المنت های حرارتی و اتصالات ترموکوپل نمونه یا شاهد باشد، سیستم کنترل را می توان با دقت بالایی بر روی یکی از دماهای نمونه یا شاهد تنظیم نمود. اما اگر بین المنت و ترموکوپل ها عایق باشد، از یک ترموکوپل کنترل جداگانه در کنار سیم پیچ کوره استفاده می شود. حضور عایق باعث می شود تا حرارت یکنواختی به نمونه و شاهد برسد و در ضمن به خروج دودها و گازهای واکنشی منجر می شود. جانمونه هایی که برای نگهداری نمونه ها استفاده می شوند معمولاً از جنس آلومینا، کوارتز یا پلاتین هستند [1].

2-2- کالیبره کردن دستگاه DTA:

چنانچه قبلاً هم ذکر شد، دستگاههای آنالیز حرارتی بایستی توسط موادی با ویژگی های شناخته شده کالیبره شوند. با استفاده از نقطه ذوب فلزات خالص می توان DTA را کالیبره نمود. جدول 1 دمای و انرژی ذوب برخی از مواد استاندارد را نشان می دهد. با استفاده از نرم افزارهای ویژه می توان عمل کالیبره کردن را با دقت بالایی انجام داد [1].

جدول 1: استانداردهای کالیبراسیون DTA/DSC [1]

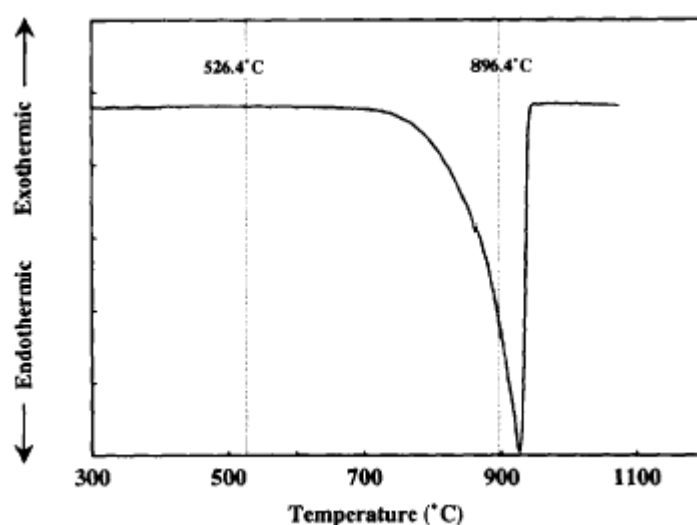
Standard	Transition Point (°C)	Transition Energy (J/g)
Indium	156.60	28.45
Tin	231.88	60.46
Lead	327.47	23.01
Zinc	419.47	108.37
Potassium Sulfate	585.0 +/-0.5	33.26
Potassium Chromate	670.5 +/- 0.5	35.56

3- دسته بندی انواع استحالها ها و شکل پیک DTA آنها:

3-1- استحالها های برگشت پذیر:

یکی از انواع این استحالها در این جا توضیح داده می شود.

تجزیه: در شکل 5 منحنی DTA تجزیه کربنات کلسیم نشان داده شده است. دمای تجزیه ترمودینامیکی این ماده 526.4 درجه سانتی گراد است، ولی به دلیل شرایط سینتیکی و فشار بخار CO_2 این واکنش به دمای 896.4 درجه منتقل شده است که در آن $P_{\text{CO}_2} = 1 \text{ atm}$ است [1].

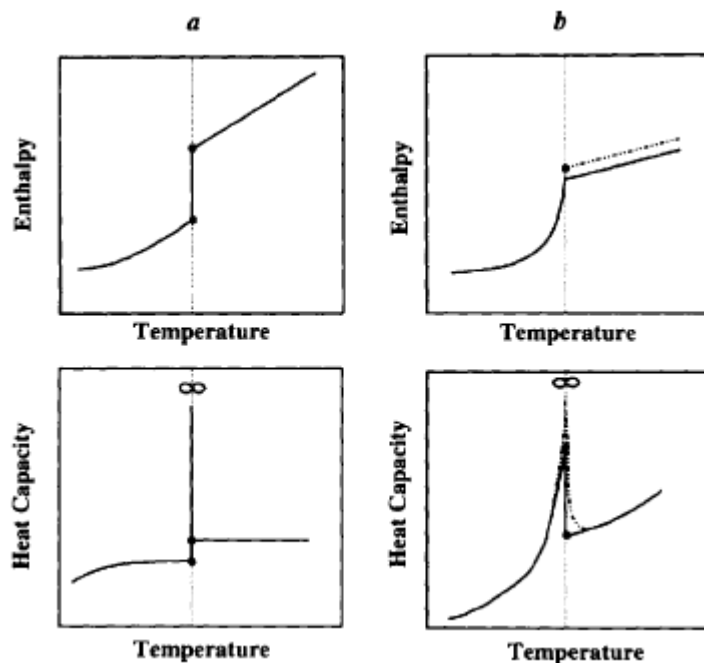


شکل 5: منحنی DTA تجزیه کربنات کلسیم [1]

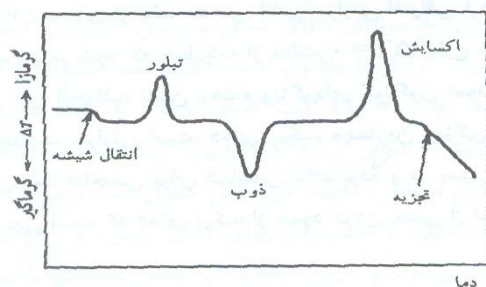
3-2- واکنش های درجه اول و بالاتر:

اگر انرژی آزاد گیبس در دمای استحالها غیر پیوسته باشد، واکنش درجه اول است. در غیر اینصورت درجه واکنش بالاتر خواهد بود. نمونه هایی از واکنش های درجه اول شامل تبخیر، تصعید و انجماد است. بسیاری از واکنش های پلیمریک حالت جامد نیز در دسته واکنش های درجه اول قرار می گیرند. گرمای نهان یا شدت پیک DTA برای واکنش های درجه اول با افزایش شدت تغییرات ساختاری در ضمن استحالها، افزایش می یابد [1 و 4].

انتقالات درجه بالاتر دارای تغییرات ساختاری یا نبوده و یا مقدار آن بسیار ناچیز است. واکنش های درجه 2 و لاندرا در این مجموعه قرار می گیرند. نمونه ای از انتقالات درجه 2، انتقال به حالت ابرسانی در دماهای بسیار پایین -265.96 است و نمونه ای از انتقال لاندرا، انتقال به حالت فرومغناطیس در دمای کوری است. شکل 6 این تغییرات را به خوبی نشان می دهد.



شکل 6: تغییرات آنتالپی و ظرفیت گرمایی برای واکنش های (a) درجه اول و (b) درجه دوم و لاندرا (نقطه چین) [1]
در استحاله درجه اول و لاندرا، ظرفیت گرمایی بی نهایت به دست می آید.



شکل 7: مقایسه پیکهای رویدادهای گوناگون حرارتی در روش DTA [2]

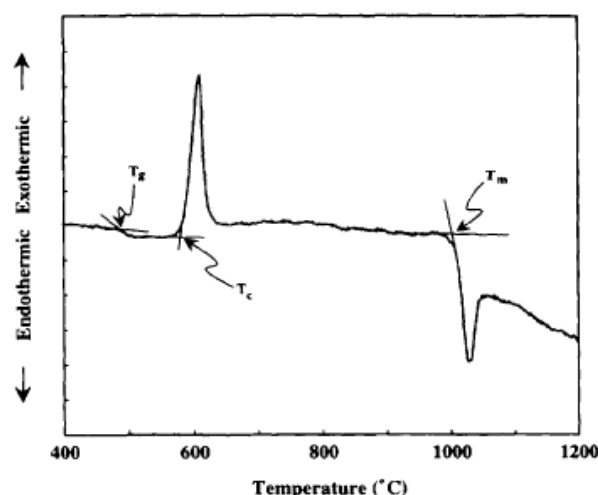
4-مقدمه ای بر کاربرد های DTA:

با استفاده از دستگاههای DTA می توان اطلاعاتی در مورد اتفاقات رخ داده در حین فرایند های حرارتی در مواد مختلف پیدا کرد.

در ادامه به چند مورد از کاربردهای DTA، اشاره می شود.

1- مطالعه مواد اولیه سرامیکی: بیشتر مواد سرامیکی در هنگام افزایش دما، تغییر ساختار یا تجزیه حرارتی دارند و بنابراین به کمک روش DTA می توان اطلاعات تکمیلی و مفیدی را به دست آورد. باید توجه کرد که شناسایی این مواد، به ویژه زمانی که ناخالص هستند، فقط به کمک روش XRD امکانپذیر نیست و منحنی های DTA می توانند در تصمیم گیری نهایی و شناسایی کامل سرنوشت ساز باشند. پس روش DTA می تواند به عنوان یک روش تکمیلی در کنار XRD و سایر روشهای آنالیز ایفای نقش کند. البته این روش در مطالعه مواد فلزی و بخصوص آلیاژهای حافظه دار بسیار کاربرد دارد [2و5و6].

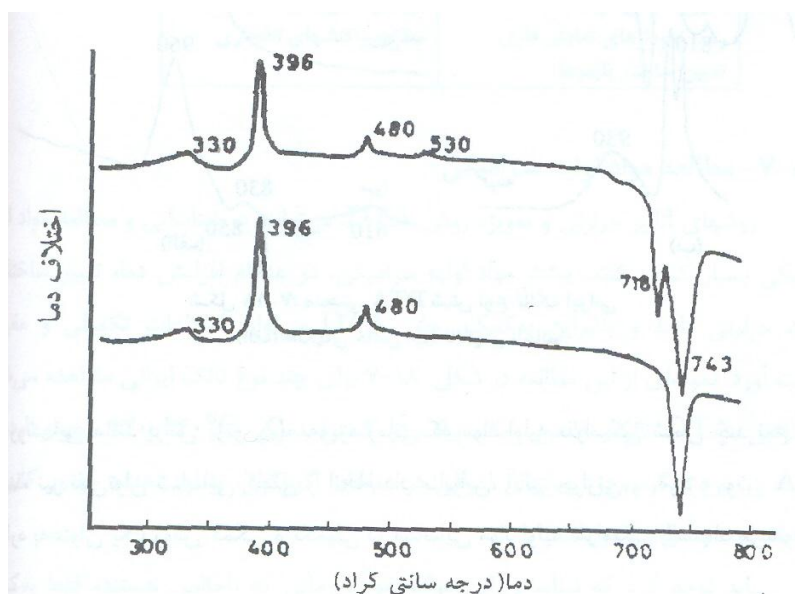
2- مطالعه تبلور شیشه ها و شیشه- سرامیکها: نمونه ای از این مطالعات در شکلهای 8 و 9 نشان داده شده است. شکل 8 منحنی DTA شیشه ای را نشان می دهد. پیک ها به ترتیب انتقال به حالت شیشه ای، کریستاله شدن شیشه و ذوب فاز کریستالین را نشان می دهند. دمای ذوب در نقطه شروع پیک سوم حدس زده می شود. محل تلاقی خطوط مماس بر خط زمینه و پیک نیز می تواند معرف دمای ذوب باشد. در مورد T_g و T_c نیز همین قانون حاکم است. البته این روش چندان هم دقیق نمی باشد. نقطه ای که در آن انحراف از خط زمینه شروع می شود، نشاندهنده شروع استحاله است اما روی این مسئله اجماع عمومی وجود ندارد. در شیب های حرارتی کم، اختلاف دمایی بین نقاط به دست آمده از روش ترسیمی و انحراف اولیه بسیار ناچیز است.



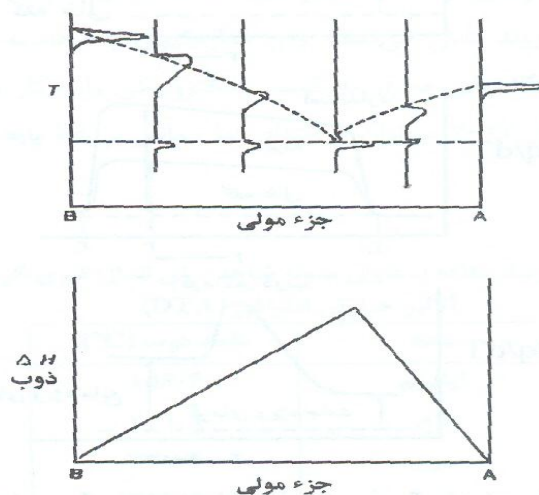
شکل 8: منحنی DTA شیشه- سرامیک $Li_{20}Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ [1]

شکل 9 منحنی DTA نوعی سیستم شیشه- سرامیکی را نشان می دهد. در این ترکیب با حرارت دادن شیشه، تبلور ابتدایی در دمای 396 درجه سانتی گراد و تحولی دیگر در دمای 743 درجه دیده می شود. با تغییر ترکیب، پیکهای دیگری قابل مشاهده است. در این منحنی ها نقطه T_g در دمای 330 درجه سانتی گراد قرار دارد. این شکل حساسیت بالای روش DTA را به مقدار افزودنی BaO نشان می دهد در حالی که در روش XRD چنین حساسیتی وجود ندارد [1و2و3].

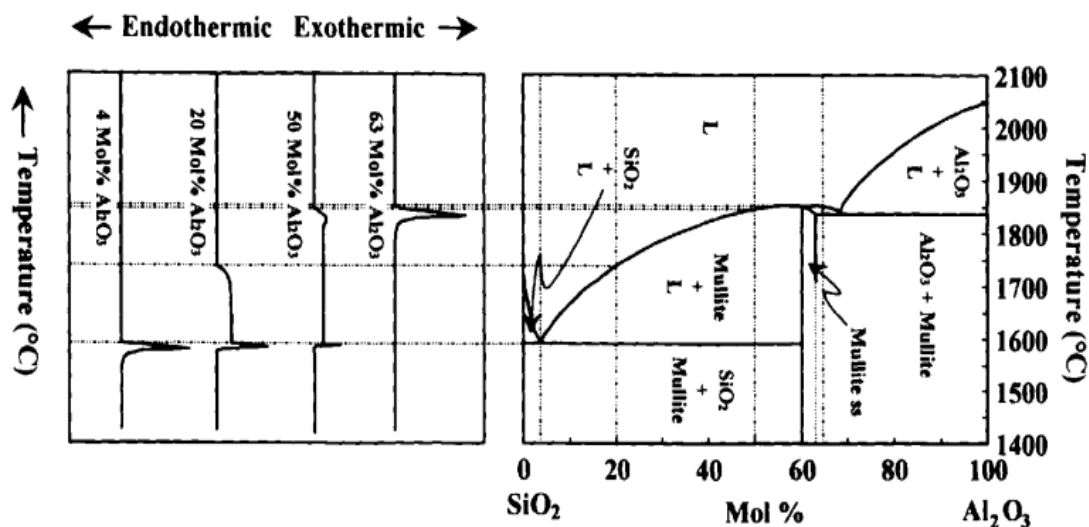
3- تعیین نمودارهای تعادلی فازی : برای رسم نمودارهای تعادلی فازی و یا به عبارت دیگر تعیین نقاط لیکویدوس و سالدوس، می توان از روش DTA استفاده کرد. در این حالت برای ترکیب های گوناگون، نقاطی از خطوط لیکویدوس و سالدوس به صورت پیک بر روی منحنی سرد کردن با شیب دمایی کم مشخص می گردد و با کنار هم قرار دادن این نقاط خود خطوط حاصل می شوند (شکل 10). در شکل 11 نیز نحوه رسم دیاگرام تعادلی $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ از روی منحنی های سرد شدن آورده شده است [2و1].



شکل 9: منحنی DTA سیستم شیشه-سرامیکی $\text{Pb}_{5-x}\text{Ba}_x\text{Ge}_3\text{O}_{11}$ با $x=0.3$ (پایین) و $x=0.5$ (بالا) [2]



شکل 10: استفاده از نمودارهای DTA برای رسم نمودارهای تعادلی فازی [2]



شکل 11: نحوه رسم دیاگرام تعادلی $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ از روی منحنی های سرد شدن [1]

4- تعیین گرمای واکنش: ثوابت ترمودینامیکی مانند گرمای نهان استحاله ها توسط DTA قابل شناسایی هستند. گرمای جذب یا آزاد شده در طی یک واکنش را می توان به راحتی از محاسبه ناحیه زیر پیک مربوط به آن واکنش به صورت روبرو محاسبه کرد:

$$Q = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{dQ}{dt} \right) dt$$

با توجه به ترمودینامیک داریم $dU = dQ - pdV$ اگر نمونه در یک ظرف

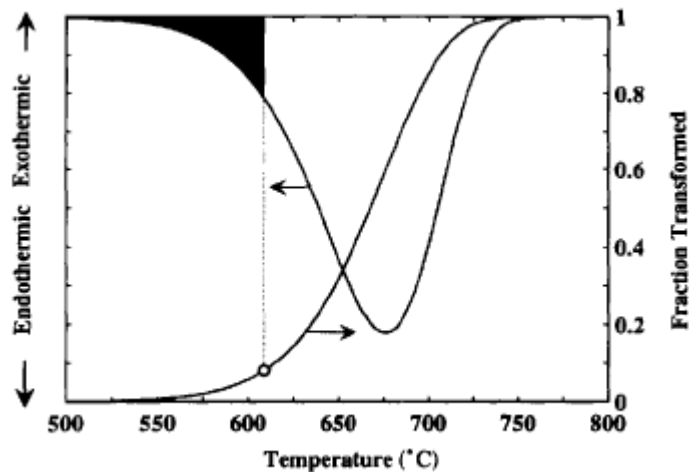
گرمایش تغییر فرم نداده و تبادل جرمی با بیرون نداشته باشد پس $dV=0$ بوده و $dU=dQ$ یا $Q=\Delta U$ خواهد بود. اما اگر نمونه در یک بوتله باز باشد، حجم سیستم ثابت نخواهد ماند. بعنوان مثال با خروج گازها از نمونه در حین استحاله، حجم سیستم افزایش می یابد. تابع انرژی دیگر آنتالپی است که به صورت $H=U+PV$ تعریف می گردد و $dH=dU+VdP$ و در فشار ثابت $\Delta H=Q$ خواهد بود. پس اگر شرایط تست DTA را در فشار ثابت در نظر بگیریم داریم:

$A = K \cdot m \cdot \Delta H$ که m وزن نمونه، K عامل کالیبره کردن و A سطح زیر منحنی است. مقدار K بستگی به نوع دستگاه و مشخصات جانمونه ای دارد و برای تعیین آن می توان از یک ماده شاهد با آنتالپی مشخص استفاده کرد [1 و 2].

5- تعیین کسر واکنش انجام گرفته: اطلاعات مربوط به سینتیک واکنش را می توان از خروجی DTA با تعیین کسر واکنش و پردازش آن با مدل های سینتیک واکنش که در ادامه به نمونه ای از آنها اشاره خواهد شد، بدست آورد. در این مجال تنها نحوه تعیین کسر واکنش از روی منحنی های DTA بررسی می شود. فرض می شود که گرمای آزاد شده در واحد زمان با سرعت واکنش متناسب باشد. پس کسر انتقال F برابر است با جزئی از مساحت پیک به مساحت کل پیک (شکل 12):

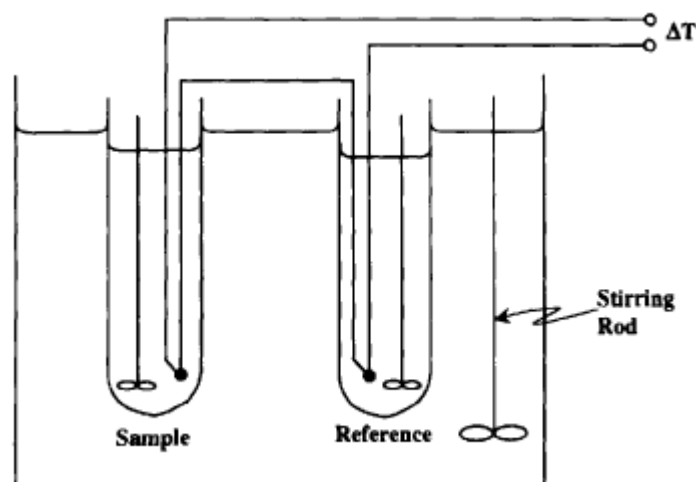
$$F = \frac{\text{Partial Area}}{\text{Total Area}}$$

نمودار حاصله S شکل می باشد [1].



شکل 12: نحوه تعیین کسر واکنش انجام گرفته در یک واکنش گرماگیر [1]

پس در فشار و حجم ثابت سطح زیر پیک DTA به ترتیب نشان دهنده تغییرات در آنتالپی و انرژی درونی است. در نگاه اول به نظر نمی رسد که انتگرالگیری از ΔT بر حسب دما یا زمان واحد انرژی داشته باشد. برای حل این تناقض، آزمایشاتی توسط Daniels و Borchardt صورت گرفت که در آنها نمونه و مرجع به ترتیب به صورت سیالهای واکنشی و غیر واکنشی بودند (شکل 23). هر دو نمونه برای یکنواختی دمایی، هم زده می شوند.



شکل 13: سیستم DTA مورد استفاده در آزمایش Daniels و Borchardt [1]

پس برای نمونه و مرجع داریم:

$$\frac{dH_s}{dt} = C_{p_s} \frac{dT_s}{dt} + \frac{dQ_s}{dt}$$

و

$$\frac{dH_r}{dt} = C_{p_r} \frac{dT_r}{dt} + \frac{dQ_r}{dt}$$

در حالت انتقال حرارت یک بعدی داریم:

$$\frac{dQ_s}{dt} = \frac{kA(T_f - T_s)}{L}$$

$$\frac{dQ_r}{dt} = \frac{kA(T_f - T_r)}{L}$$

و

که L ضخامت تیوپ تست، A ناحیه ای که تیوپ غوطه ور شده و k ضریب هدایت حرارتی تیوپ ها است و f نشاندهنده کوره است. بنابراین داریم:

$$\frac{dH_{trans}}{dt} = \frac{dH_s}{dt} - \frac{dH_r}{dt} = C_p \left(\frac{dT_s}{dt} - \frac{dT_r}{dt} \right) + \frac{kA}{L} (T_r - T_s) = C_p \frac{dT}{dt} - \frac{kA}{L} \Delta T, \quad \Delta T = T_s - T_r$$

اگر هدایت حرارتی تیوپ تست بالا باشد، جمله دوم در معادله بالا غالب بوده و داریم:

$$\Delta H_{trans} \propto \int_{-\infty}^{\infty} \Delta T dt \quad \text{یا} \quad \frac{dH_{trans}}{dt} \cong -\frac{kA}{L} \Delta T$$

پس سطح زیر منحنی در فشار ثابت نشاندهنده تغییرات آنتالپی واکنش است. در این فرمولها فرضیاتی چون برابری ظرفیت حرارتی نمونه و مرجع و بالا بودن هدایت حرارتی بین سیستم و واسط در نظر گرفته شده است [1].

6- تعیین انرژی فعالسازی واکنشها: برای تعیین انرژی فعالسازی واکنشهای شیمیایی می توان از رابطه معروف کیسینجر استفاده کرد:

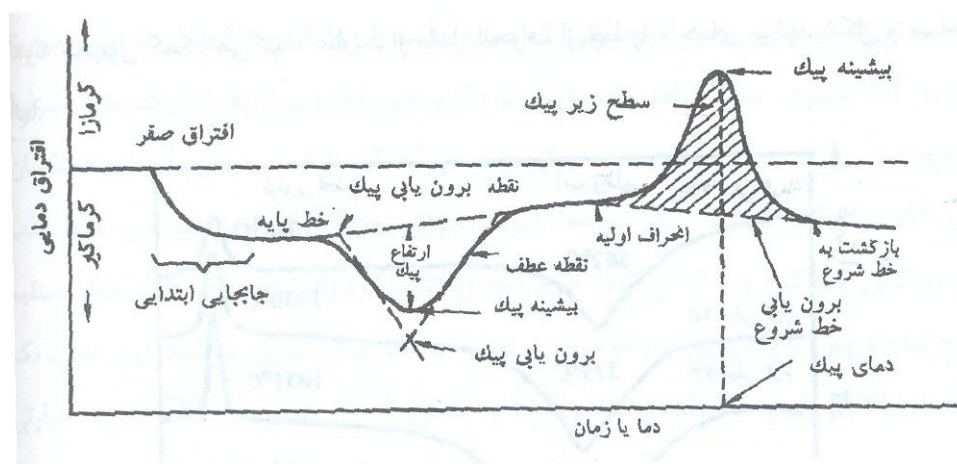
$$\frac{d[\ln(b/T_{max}^*)]}{d(1/T_{max})} = -\frac{E^*}{R}$$

در این رابطه b سرعت گرمایش، T_{max} دمای مربوط به پیک، E^* انرژی فعالسازی و R ثابت گازهاست. با انجام آزمایش DTA در سرعتهای گوناگون گرمایش و تعیین مقادیرهای گوناگون T_{max} ، می توان با استفاده از این رابطه، انرژی فعالسازی را محاسبه کرد [2].

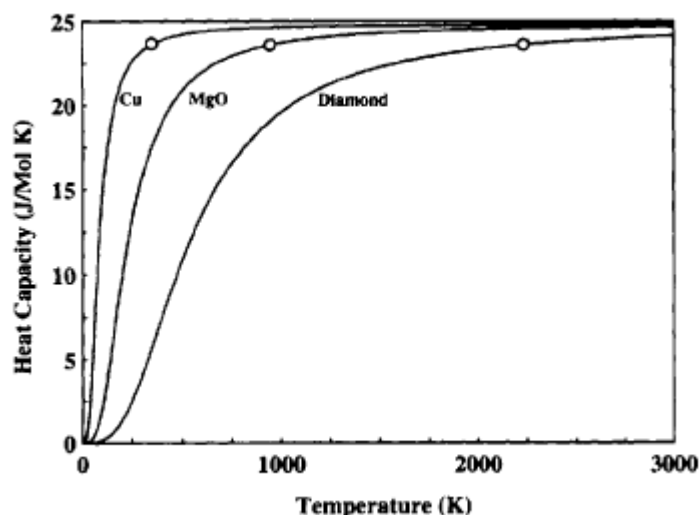
5- عوامل مؤثر بر شکل و نتایج آنالیز حرارتی :

در شکل 14 ویژگی های کلی یک نمودار DTA را مشاهده می کنید. عوامل مختلفی بر روی شکل نهایی این منحنی تأثیرگذار هستند. این عوامل عبارتند از سرعت گرمایش، جنس، شکل و هندسه جانمونه ای، ویژگی های نمونه و مرجع مانند ظرفیت گرمایی، اندازه ذرات پودر و فشردگی آن و همچنین محیط کوره و ...

الف- تأثیر ظرفیت گرمایی : در شکل 15 تغییرات ظرفیت حرارتی با دما برای جامد کریستالین رسم شده است. مطابق این شکل افزایش ظرفیت گرمایی از صفر مطلق شروع شده تا به حالت اشباع $3R$ (ثابت گازهاست) برسد. دمایی که در آن ظرفیت گرمایی ثابت می شود به دمای دبی¹ مشهور است. برای سرامیکهای اکسیدی این دما تقریباً 1000 درجه سانتی گراد است در حالیکه برای فلزات این مقدار می تواند به زیر دمای اتاق نیز برسد.



شکل 14: نمایش ویژگی های یک منحنی DTA [2]

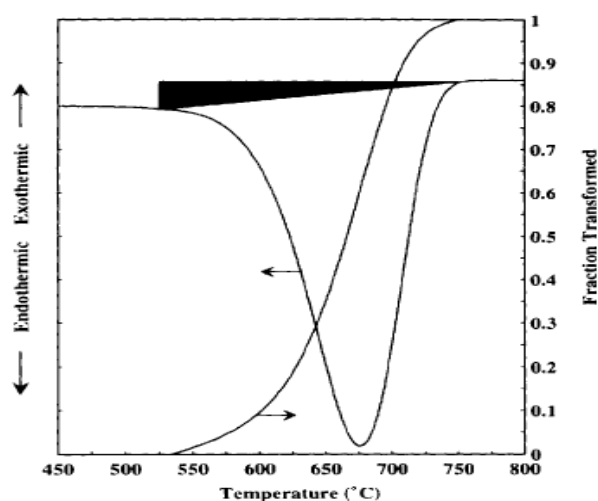


شکل 15: تغییرات ظرفیت گرمایی با دما برای سه ماده مختلف [1]

¹:Debye

مشکل دیگری که از ظرفیت حرارتی نمونه و مرجع ناشی می شود، جابجایی خط زمینه بعد از انجام استحاله است. اگر ظرفیت گرمایی کل نمونه و مرجع با افزایش دما به صورت واگرا افزایش نیابد، خط زمینه ثابت باقی می ماند ولی به هنگام انجام استحاله، ظرفیت گرمایی نمونه تغییر می کند و معادلات به هم می خورد.

به عنوان مثال در شکل 16 پیک گرمگیر، تنها گرفتن گرما را نشان نمی دهد بلکه به انتقالی تدریجی در ظرفیت گرمایی نمونه از واکنش دهنده ها به محصولات نیز اشاره دارد. مطابق شکل 16 با رسم یک سطح مثلثی و انتگرال گیری از آن در محدوده شروع واکنش تا پایان آن می توان به میزان تغییرات ظرفیت گرمایی پی برد [1].

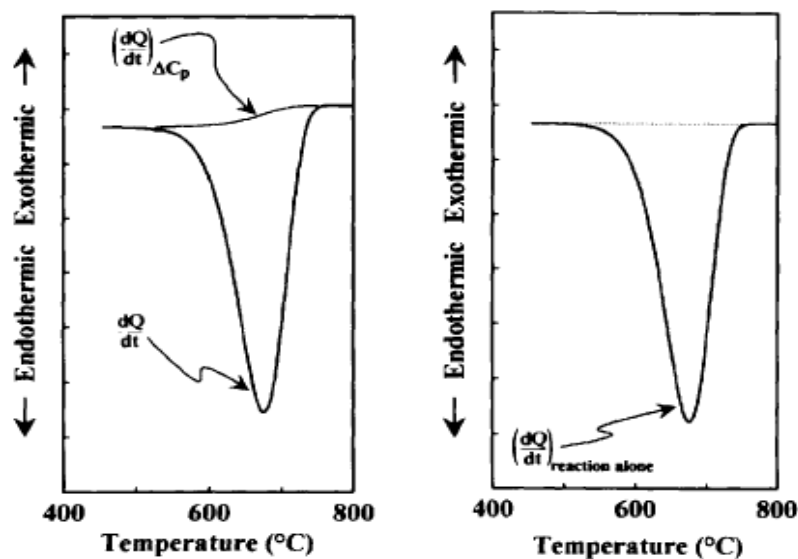


شکل 16: تغییرات خط زمینه بعد از واکنش گرمگیر [1]

برای حل مشکل به وجود آمده می توان مطابق شکل 17 عمل نمود. معادلات حاصله به صورت زیر است.

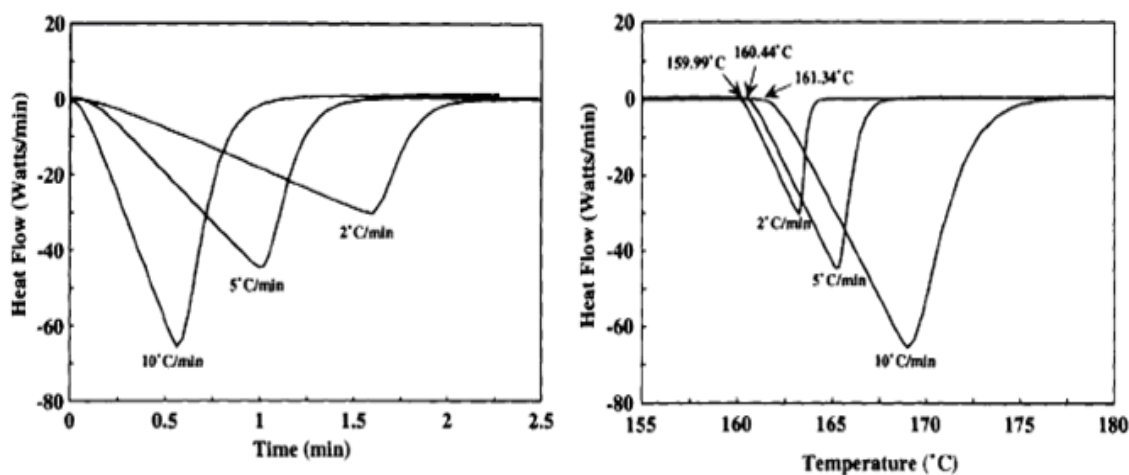
با رسم منحنی $\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{\text{reaction alone}}$ این اختلاف بر طرف می شود.

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{\Delta C_p} + \left(\frac{dQ}{dt}\right)_{\text{reaction alone}} = \frac{dQ}{dt}$$



شکل 17: حل مشکل جابجایی خط زمینه با حذف اختلاف ظرفیت حرارتی به وجود آمده در طی واکنش [1]

ب- تأثیر سرعت گرمایش : تأثیر سرعت گرمایش روی منحنی های DTA محسوس بوده و بستگی به بر چسب محور افقی دارد. شکل 18 تأثیر این عامل را در دو حالت نشان می دهد.

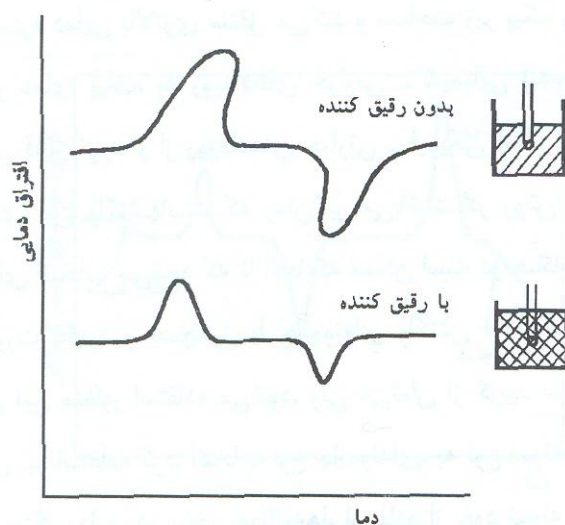


شکل 18: تأثیر سرعت گرمایش روی منحنی های DTA [1]

مطابق این اشکال شروع واکنش ذوب در سرعت گرمایش پایین، دیرتر است چراکه در این حالت مدت زمان زیادی طول می کشد تا کوره به دمای ذوب برسد. در سرعت های گرمایش بالا بدلیل فاصله زمانی که لازم است تا حرارت از مرکز نمونه به ترموکوپل برسد، دمای شروع واکنش بیشتر نشان داده می شود. هر چه سرعت گرمایش افزایش می یابد، بر شدت پیک ها نیز افزوده می شود و پهنای یا محدوده دمای واکنش گسترده تر می شود. ولی پهنای زمانی واکنش کاهش می یابد زیرا با افزایش سرعت گرمایش بر سرعت واکنش نیز افزوده می شود.

تأثیر عوامل دیگر را می توان به صورت زیر دسته بندی کرد :

- افزایش مقدار نمونه ،دمای پیک را به گستره بالاتری منتقل می کند و مساحت زیر پیک را افزایش می دهد.
- در برخی اوقات استفاده از جانمونه ای همجنس با نمونه مجهول ،منحنی هایی با قدرت تفکیک بالا پدید می آورد.
- رقیق کردن نمونه مجهول سبب صاف شدن خط پایه و بهبود شکل پیک ها خواهد شد و از انحراف خط زمینه جلوگیری می کند. ماده رقیق کننده نباید با نمونه وارد واکنش شود و مقدار آن نیز نباید بیشتر از حد معمول باشد تا باعث از بین رفتن پیکهای کوچک نمونه نشود. برای این منظور گاهی از نمونه شاهد برای رقیق کردن بهره برده می شود. شکل 19 تأثیر رقیق کننده را روی منحنی DTA نشان می دهد[1و2].



شکل 19: تأثیر رقیق کننده روی منحنی DTA [2]

[1] ROBERT F. SPEYER, THERMAL ANALYSIS OF MATERIALS, School of Materials Science and Engineering Georgia Institute of Technology Atlanta, Georgia, 1994, pp.35-100

[2] روشهای شناسایی و آنالیز مواد، دکتر فرهاد گلستانی فرد، دکتر اسماعیل صلاحی، مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت، 1383

[3] Chandra S. Ray , Signo T. Reis , Richard K. Brow , Wolfram Holand , Volker Rheinberger, A new DTA method for measuring critical cooling rate for glass formation, Journal of Non-Crystalline Solids 351, 2005, pp. 1350–1358

[4] Robert L. Danley, Comparison of simulated and actual DSC measurements for first-order transitions, Thermochimica Acta 409 , 2004, pp. 111–119

[5] L. Wang, L.J. Rong, D.S. Yan, Z.M. Jiang, Y.Y. Li, DSC study of the reverse martensitic transformation behavior in a shape memory alloy pipe-joint, Intermetallics 13 , 2005, pp. 403–407

[6] Z.G. Wang, X.T. Zu, Y.Q. Fu, Study of incomplete transformations of near equiatomic TiNi shape memory alloys by DSC methods, Materials Science and Engineering A 390, 2005, pp. 400–403