

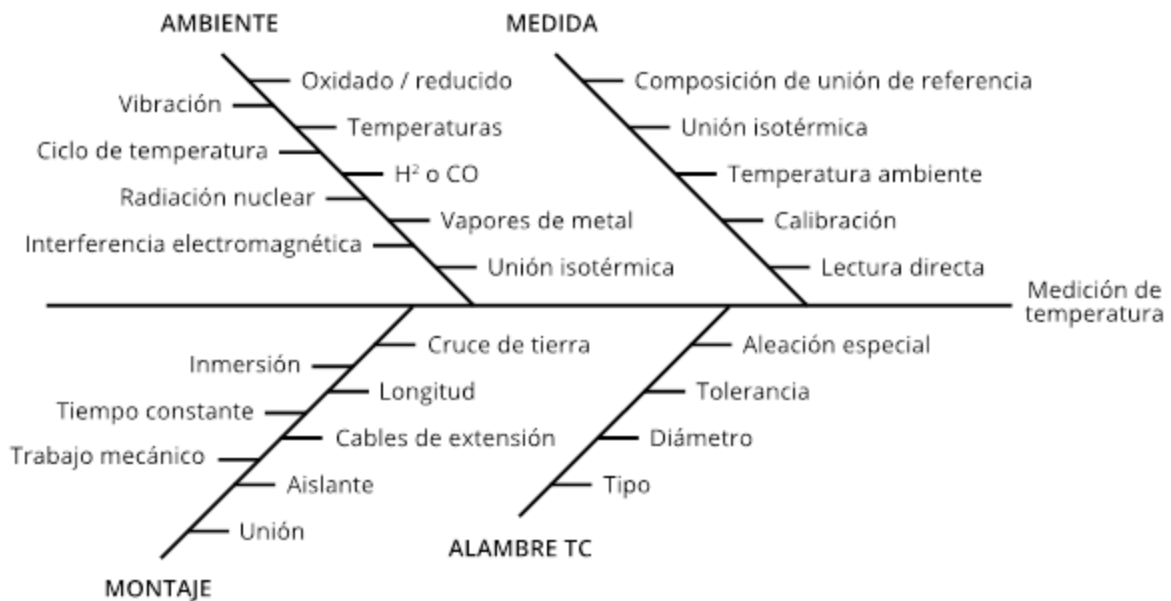
Errores de medida con termopares

viernes 9 de agosto, 2019



Imagen de janjf93 en Pixabay

Resume los diversos efectos de error que deben considerarse.



Efectos térmicos

Los cuatro efectos térmicos principales son los mismos factores que afectan a otros termómetros de contacto: inmersión, retraso térmico, capacidad calorífica y la influencia de radiación. Dada la amplia diversidad de construcciones de conjuntos de termopares, la

magnitud de los diversos efectos se determina mejor experimentalmente. Sin embargo, podemos hacer algunas observaciones útiles.

La mayoría de los termopares comprometen la inmersión para la confiabilidad mecánica. Por ejemplo, un pozo termodinámico en una tubería puede tener una longitud corta y un diámetro grueso para asegurar que no se fatiga ni se rompe con la vibración inducida por la turbulencia que acompañan las altas velocidades de flujo. Los termopozos típicos tienen una relación de longitud a diámetro de cinco o menos, lo que significa que están diseñados para realizar mediciones de una precisión no superior al 1%. En algunos casos puede ser posible mejorar la profundidad de inmersión efectiva rodeando el termopozo con aislamiento térmico.

Con los montajes multicapa que implican los termopozos y los montajes de las fundas de aislamiento mineral, es muy fácil introducir rápidamente varias constantes de tiempo en un termopar, pero después de la respuesta inicial continúan estableciéndose lentamente durante algún tiempo. En la mayoría de las situaciones de control, las constantes de tiempo múltiples limitan severamente la eficacia del controlador de temperatura.

Errores de inhomogeneidad

La discusión sobre el origen de los efectos termoeléctricos ya ha enfatizado el problema de inhomogeneidad, que es la principal fuente de error. El gran problema con los termopares es que las inhomogeneidades pueden ser introducidas de varias formas pero también pueden ser muy fáciles de detectar y reconocer. El factor más importante es la toma de conciencia de posibles problemas en el momento de la instalación.

Los siguientes ejemplos resaltan algunos de los posibles problemas. También se producen problemas adicionales con la exposición a campos magnéticos y radiaciones ionizantes, que no se discuten aquí.

Trabajo en frío: la mayoría de los termopares son susceptibles a daños mecánicos. Por desgracia, el daño tiende a ocurrir en el peor lugar del alambre: el punto de entrada en el horno donde el gradiente de temperatura es mayor. Las patas de aleación suelen ser las más propensas a sufrir daños. Para el Tipo K, se ha demostrado que las mediciones del efecto en el trabajo en frío (flexión, torsión...) provocan cambios en el coeficiente de Seebeck de hasta un 4% en temperaturas inferiores a 400°C. Las inhomogeneidades en el alambre nuevo a causa del trabajo en frío, que sucede durante el estiramiento del alambre

y en cables con aislamiento mineral, pueden empujar el alambre fuera de las especificaciones del fabricante. En principio, el fabricante debe recocer el alambre antes de venderlo, pero los efectos residuales a menudo persisten, y puede sacar el alambre fuera de las especificaciones del fabricante.

Químico: la mayoría de los termopares son quisquillosos con respecto a su entorno químico. En concreto, muy pocos termopares toleran atmósferas reductoras. A menudo el problema no radica en el propio termopar, sino en las estructuras aislantes alrededor del termopar. La magnesia, el sílice, el nitruro de boro o la alúmina tienden a romperse en un ambiente reductor y en el proceso liberan iones metálicos que migran y contaminan el termopar.

Tras una larga exposición a cualquier ambiente de alta temperatura, la composición de las aleaciones terminará cambiando. Por ejemplo, la evaporación del rodio que se produce en las aleaciones de platino-rodio y la oxidación preferencial de un componente de la aleación en la mayoría de los termopares de base de metal. En los termopares de Tipo K, la oxidación induce un aumento de tensión de aproximadamente un 1% por cada 1000 horas a 1000°C.

En algunos termopares de aleación, un bajo nivel de oxígeno es un problema. La oxidación preferencial de algunos componentes de la aleación cambia sustancialmente el coeficiente Seebeck. El ejemplo más notable es la "putrefacción verde" que se produce en los termopares de Tipo K, ya que el cromo se oxida preferentemente, causando una caída del 30% en el coeficiente de Seebeck. Esto sucede a menudo cuando el alambre está fijado a la pared de un horno, justo donde el gradiente de temperatura es mayor.

Tratamiento térmico: los termopares de aleación se encuentran entre los más afectados por el tratamiento térmico. Comúnmente, las aleaciones tienen varias estructuras o fases cristalinas diferentes. A medida que la temperatura cambia, la aleación cambia lentamente de estructura, a veces permanentemente a aquella que ofrece el estado de energía más bajo a esa temperatura. Típicamente, las diferentes fases tienen distintos coeficientes de Seebeck, por lo que los cambios de fase dan lugar a efectos de histéresis (donde la lectura depende de la exposición previa a la temperatura). De nuevo, los termopares de Tipo K son los más afectados con una transformación magnética en el rango de 50°C a 250°C,

dando lugar a un cambio de $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ en la salida y un fenómeno de ordenamiento de corto alcance causando cambios de hasta 8°C entre 250°C y 500°C . La transición a temperatura más alta es un problema difícil porque puede tardar varias semanas en estabilizarse y da lugar a una histéresis suficiente como para hacer que el termopar esté fuera de especificación, incluso después de haber sido utilizado una sola vez.

Errores isotérmicos

Algunas partes del termopar requieren buenas condiciones isotérmicas para asegurar que cualquier inhomogeneidad introducida no da lugar a un error significativo; por ejemplo, uniones, empalmes y terminales, y circuitos en instrumentación. La estimación experimental del error puede inferirse por la aplicación de un soplador de aire caliente en las partes sospechosas; se debe observar un cambio inferior a 0.2°C para el cable que presenta buenas condiciones.

Normalmente, los problemas se producen cuando se utilizan cables de extensión de compensación. Es importante que las uniones entre cada termoelemento y su prolongador estén a la misma temperatura. En los cables de compensación de Tipo R o Tipo S, una diferencia en las dos temperaturas introduce errores de aproximadamente 0.6°C por grado Celsius de diferencia en la temperatura, debido a la diferencia en el coeficiente de Seebeck entre las patas de platino y la aleación de cobre utilizada para simular el platino.

Errores de unión de referencia

El desconocimiento de la temperatura de la unión de referencia es, probablemente, el segundo error más significativo para los termopares, después de los causados por inhomogeneidad. El uso de un punto de hielo bien construido puede eliminar este error.

Las juntas de referencia de compensación tendrán, normalmente, su incertidumbre citada en las especificaciones; $\pm 1^{\circ}\text{C}$ en el rango de temperatura ambiente es típico. El valor es probable que sea el valor isotérmico; es decir, la unión necesita tiempo para establecerse si, digamos, la temperatura cambia de 20°C a 15°C . Algunos instrumentos pueden tardar hasta media hora en instalarse. Esto es un problema con instrumentos manuales usados de forma intermitente o llevados en los bolsillos.

Cuando se cambia entre termopares de un solo medidor, cada termopar debe tener su propia unión de referencia, de modo que la conmutación ocurra a lo largo de los cables de cobre.

Errores de interferencia

Aunque los termopares son dispositivos de baja impedancia, captan las interferencias electromagnéticas. Las longitudes largas del cable del termopar, por ejemplo alrededor de 50m, resultan ser unas buenas antenas de radio! También aumentan el riesgo de errores de perfiles de temperatura desconocidos y los daños accidentales. Por lo tanto, se recomienda evitar largas longitudes de alambre utilizando dispositivos de transmisión de señal inmunes a la interferencia, tales como bucles de corriente de 4mA a 20mA. Es esencial que la instrumentación utilizada pueda hacer frente a cualquier cambio en la temperatura ambiente.

Errores de resistencia del alambre

Como la señal a medir es la tensión Seebeck (es decir, un circuito abierto), la resistencia del cable no debería tener ningún efecto si se utiliza un potenciómetro o un voltímetro digital bueno. Los voltímetros analógicos no deben utilizarse ya que pueden generar una corriente demasiado alta y la lectura depende de la resistencia del circuito.

Un aumento en la resistencia del termopar de 3 o 4 veces, indica que un termopar se acerca al final de su vida, y una resistencia de circuito de más de 1KW debe considerarse un circuito abierto. Monitorizar la resistencia del circuito es muy útil para verificar posibles daños en el cable causado por fuentes químicas o mecánicas.

Los circuitos de termopar subterráneos deben ser probados antes de su uso para asegurar que no haya cortocircuitos a tierra, que pueden ser causados por conexiones sueltas en enchufes, tomas de corriente y bloques de conexión. Dado que el termopar tiene una resistencia eléctrica muy baja, los cortocircuitos normalmente no impiden el funcionamiento de un termopar. En su lugar, un cortocircuito permitirá que pase un porcentaje de la señal, y haga que el termopar se lea bajo. En combinación con los controladores de temperatura, esto provoca un sobrecalentamiento y un posible fallo de la instalación.

Errores de linealización

Todos los termopares tienen una respuesta no lineal con la temperatura, por lo que es necesaria alguna forma de linealización para convertir el voltaje asegurado a la temperatura. Las diferentes técnicas, dan lugar a diferentes errores. Las tablas definatorias para los tipos de termopar son usualmente dadas a una resolución de 0.01°C para permitir que se desarrollen esquemas de linealización práctica para que coincidan con las tablas a mejores que 0.1°C. El equipo digital moderno debe cumplir fácilmente este requisito. Se pueden encontrar formas más ásperas de linealización que son exactas a sólo 0.1°C.

Degradación de termopares

Puntos principales:

- Los cambios en la composición química o el estado metalúrgico de los cables del termopar pueden ocurrir y se producen cuando se utilizan termopares. Esto puede causar la descalibración del termopar con el uso, y esta descalibración puede ser significativa.
- Una sección no homogénea en un termopar causará un error de medición sólo si reside en un gradiente de temperatura.
- No se recomienda la recalibración o prueba de calibración de los termopares usados, excepto para los termopares de metal noble, donde puede ser económicamente ventajoso intentar restaurar la calibración a través de la recolección.
- En termopares enfundados, la selección adecuada de los componentes del sistema de termopar (alambres, aislantes, materiales de la funda metálica, gas contenido en los huecos dentro de las fundas de los termopares), puede tener un efecto importante en las tendencias de la decalibración.
- Los termopares degradados pueden indicar temperaturas demasiado altas o demasiado bajas.
- Las pruebas de diagnóstico pueden ayudar a identificar la existencia de problemas de termopar.

Para que el termopar funcione correctamente, el coeficiente de Seebeck para cada cable debe variar sólo de acuerdo con la dependencia de temperatura nominal para el tipo de termopar específico. Es decir, no debe haber cambios en el coeficiente de Seebeck desde la condición de construcción como resultado de cambios en la composición química o estado metalúrgico de los alambres. Desafortunadamente, tales cambios ocurren.

Cambios en la composición química

Los cables del termopar están hechos de mono-componentes metálicos o aleaciones. Pueden interactuar químicamente con otros materiales a su alrededor. Para los termopares de cables pelados, este entorno es el proceso en el que se instala el termopar. Para termopares enfundados, es el material de la funda, el aislante, el sellador, la humedad y cualquier contaminante de trazas incorporado en el sensor, además de el gas que está presente en el espacio vacío de la funda cuando el sensor se sella, y cualquier contaminante que se difunda a través de los sellos o las fundas.

El ataque químico implica la migración de átomos hacia y desde los alambres. Dado que se trata de un fenómeno superficial, la alteración se desarrolla normalmente como una banda en la superficie del alambre. Cuando esto ocurre, el cable consiste de conductores paralelos, cada uno con un coeficiente Seebeck diferente.

Dado que la contaminación del alambre generalmente comienza en la superficie y trabaja hacia adentro, la gravedad de su efecto sobre el rendimiento del termopar depende del diámetro del alambre. Si la contaminación penetra a una profundidad que es una pequeña fracción del diámetro del alambre, entonces su efecto sobre el rendimiento del termopar sería menor que en una situación en la que se afecte una gran fracción de la sección transversal del alambre. En consecuencia, los cables de diámetro pequeño no deben utilizarse en los casos en que se espere una contaminación.

Debe observarse que la pérdida o ganancia de átomos de una superficie depende de la condición de la superficie. Ciertos compuestos en la superficie inhiben la migración de átomos a través de la superficie en cualquier dirección. Las capas de óxido sobre el aluminio o los aceros inoxidables son ejemplos de este comportamiento. Esto se llama pasivación. Un problema que puede ocurrir (y ocurre) en los termopares es la destrucción de esta capa protectora por su interacción química con componentes del entorno

alrededor de los alambres. Esto expone el metal subyacente y lo hace susceptible al ataque químico. Por lo tanto, algunos se preocupan porque facilitan el ataque de materiales que de otro modo no serían capaces de atacar los cables.

Las reacciones químicas son generalmente una mayor preocupación a temperaturas más altas que a temperaturas más bajas. Las reacciones que son insignificantes o extremadamente lentas a baja temperatura pueden llegar a ser significativas y rápidas a alta temperatura. Por ejemplo, el componente platino-rodio se vaporiza cada vez más a alta temperatura y migra. Este efecto puede causar cambios en la composición de ambos cables y cambios en la calibración.

En un termopar enfundado, las fuentes de los átomos migratorios y los caminos de migración incluyen los siguientes:

- *Cable a cable:* los átomos pueden desacoplarse de un alambre y migrar al otro, alterando así, el coeficiente Seebeck de cada uno.
- *Vaina hacia/desde el cable:* los átomos pueden desacoplarse del metal de la funda y emigrar a uno o a ambos alambres, o viceversa. Esto generalmente resulta en una alteración preferencial del coeficiente de Seebeck para uno de los hilos.
- *Contaminantes del aislante en el alambre:* el material aislante puro para los aislantes comunes del termopar no reacciona significativamente con otros componentes del sensor, pero los rastros de contaminantes en el aislador pueden. Estos contaminantes pueden ser introducidos durante la fabricación del aislante o la fabricación del termopar. Además, las reacciones químicas entre el aislante y ciertos contaminantes pueden liberar iones que eran componentes del aislante, y estos iones pueden contaminar el cable del termopar.
- *Humedad:* algunos aislantes son muy higroscópicos. El agua absorbida en el aislante puede conducir a la contaminación del alambre y a reducciones importantes en la resistencia del aislamiento. Una posible consecuencia es la derivación eléctrica. La humedad puede también destruir la capa protectora del óxido en algunos metales y exponer los metales al ataque químico.
- *Gas de llenado:* los aisladores de termopar son granulares con pequeñas piezas de reemplazo entre los granos. Estos huecos se llenan con el gas presente durante la fabricación. Algunos constituyentes de gas pueden interactuar químicamente con metal de alambre.

- *Difusión a través de la funda:* el metal de la funda consiste en granos que se apilan juntos. Los límites entre los granos proporcionan vías para la difusión de contaminantes a través de la funda.

Cambios metalúrgicos

Los termopares pueden sufrir cambios metalúrgicos, así como cambios químicos. El coeficiente de Seebeck depende de la estructura cristalina del metal que comprende los cables del termopar. Ambos fenómenos pueden ocurrir en termopares durante la fabricación y/o uso rutinario.

Los posibles cambios metalúrgicos en los materiales del termopar incluyen los siguientes:

- Separación local de componentes o impurezas durante la fabricación.
- Alivio térmico.
- Trabajo mecánico en frío.
- Orden/desorden estructural.
- Recristalización.

El trabajo en frío es un cambio en la estructura cristalina causada por la deformación inducida por el trabajo a baja temperatura (ambiente). El trabajo en frío ocurre naturalmente durante la fabricación inicial del alambre del termopar. El material del termopar se produce inicialmente como lingotes. El metal se somete a operaciones repetidas de estirado y estampado, reduciendo cada uno el diámetro del alambre que existía en la página anterior. Este proceso frío trabaja el metal. Para asegurar que el producto final está libre de defectos debido a variaciones en la cantidad de trabajo en frío, los hilos pueden ser recocidos. El trabajo en frío también puede ocurrir durante el uso rutinario de termopares mediante sujeción, compresión o doblado de los alambres.

Los cristales en forma de metal cuando se funden, el metal se enfría y se solidifica. Los metales mantienen la estructura cristalina tal como se forma hasta que se ven afectados por el trabajo mecánico o el tratamiento térmico. Algunos termopares de metal

experimentan recristalización u orden/desorden estructural a temperaturas por debajo de la temperatura máxima de uso. Esto causa cambios en el coeficiente del Seebeck.

Los cables de termopar pueden experimentar cambios metalúrgicos que son reversibles a medida que el termopar experimenta cambios en su temperatura de funcionamiento. La pierna positiva del Tipo K y E es susceptible a este tipo de comportamiento. En este caso, el alambre positivo experimenta un cambio metalúrgico a unos 550°C. Existe incertidumbre sobre la causa física subyacente del efecto observado. Algunos expertos piensan que es un efecto orden/trastorno (el estado de equilibrio de la red cristalina se ordena por debajo de unos 550°C y desordena por encima de los 550°C), y otros piensan que es un fenómeno llamado mecanismo de spin-cluster. Cualquiera que sea la física subyacente, no hay duda de que el efecto se produce. Evitaremos el argumento sobre las causas subyacentes afirmando que el elemento termoeléctrico positivo tiene una condición de equilibrio por debajo de unos 550°C, estado A y otra condición de equilibrio por encima de unos 550°C, estado B. Además, el metal puede existir en el estado B a temperaturas inferiores a 550°C. El enfriamiento de una temperatura más alta "atrapa" al metal en el estado B. El metal atrapado en el estado B se transforma espontáneamente en el estado A a temperaturas inferiores a 550°C, pero el tiempo requerido para completar la transformación depende de la temperatura. A temperatura ambiente, el tiempo requerido es muy largo (esencialmente infinito); a 300°C se necesitan unas cuarenta semanas; a 350°C toma cuatro días; a 400°C se tarda setenta y cinco minutos; a 450°C toma un minuto; y a temperaturas más altas de 550°C (donde el estado B se convierte en condición estable), la transición del estado B al estado A es prácticamente instantánea.

Este comportamiento tiene graves consecuencias termoeléctricas. Esto se ilustra mediante tres escenarios hipotéticos. En cada caso, las temperaturas se seleccionan arbitrariamente para ilustrar un punto:

- *Hilo recocido por encima de 550°C y usado para medir temperaturas por debajo de los 250°C:* En este caso, el recocido hace que el termoelemento positivo esté en el estado inestable B, pero las temperaturas son demasiado bajas para que la transformación al estado A tenga lugar en poco tiempo. En este caso, la calibración permanece en la condición de construcción durante un periodo de tiempo prolongado.
- *Alambre recocido por encima de 550°C y utilizado para medir temperaturas por encima de 550°C:* Este caso es más complicado. Al inicio del primer calentamiento,

todo el alambre está en el estado B. Como resultado del calentamiento, la unión y parte del cable adyacente a la unión alcanzarán temperaturas por encima de 550°C y estarán en estado B. Dado que el extremo abierto normalmente estará a temperatura ambiente, habrá una porción del alambre adyacente al extremo abierto que está también en el estado B. Esto se debe al enfriamiento que ha "atrapado" la condición del estado B. Dado que un extremo del circuito del termopar está a la temperatura ambiente o cerca de ella, y el otro extremo está por encima de 550°C, debe haber una sección intermedia donde la temperatura sea de 300°C a 500°C. Parte del elemento termoeléctrico positivo en esta zona estará en el estado A. Por consiguiente, desde el extremo abierto hasta la unión, la condición será el estado B/estado A/ estado B. La selección del estado A es inhomogénea en comparación con las otras secciones. Esto puede causar errores de medición. Además, la longitud de la porción en el estado A crecerá con el tiempo, creando una inhomogeneidad no estacionaria.

- *El hilo recocido por encima de 550°C se utiliza para medir temperaturas en el rango de 250°C a 550°C:* En este caso, todo el alambre se encuentra inicialmente en el estado B. La sección operando a temperaturas de 250°C a 550°C convierte espontáneamente al estado A durante un periodo de tiempo más corto que las duraciones típicas de uso de termopares industriales (muy lentos en el extremo inferior del rango de temperatura y bastante rápidos en el extremo superior). Por consiguiente, desde el extremo abierto, hasta la unión, habrá una transición del estado B al estado A. Además, la transición se moverá gradualmente hacia el extremo donde el alambre está en el extremo inferior (250°C) del rango de temperatura. Esto crea una inhomogeneidad no estacionaria incluso cuando el perfil de temperatura a lo largo del cable no cambia. Esto puede causar errores de medición.

Consecuencias termoeléctricas de cambios químicos o metalúrgicos

Si los cambios químicos o metalúrgicos ocurren homogéneamente a lo largo de toda la longitud de un cable de termopar, el resultado neto es equivalente a reemplazar el cable por otro que tenga un coeficiente de Seebeck diferente. En el fondo, esto equivale a cambiar el termopar original por uno con una calibración diferente. El termopar continuaría proporcionando un *emf* que aumenta a medida que aumenta la temperatura, pero las indicaciones de temperatura serán erróneas. Sin embargo, los cables de los termopares suelen experimentar una variación en las condiciones ambientales que causan cambios químicos o metalúrgicos a lo largo de algunas partes del circuito.

En caso de que los cambios químicos o metalúrgicos ocurran a lo largo de una parte del alambre del termopar, el coeficiente de Seebeck sólo se modifica sobre la longitud del alambre donde suceden esos cambios químicos o metalúrgicos.

Dado que la recalibración no es una opción adecuada para determinar la precisión de un termopar de proceso usado, ¿cómo se puede verificar la precisión del termopar? En lugar de enviar un termopar usado a un laboratorio de calibración, el usuario debe retirar el termopar usado y reemplazarlo en el proceso por un termopar nuevo o por un termómetro de resistencia. Si la temperatura que indica el sensor de repuesto coincide satisfactoriamente con la temperatura indicada anteriormente por el sensor utilizado, el sensor utilizado se puede volver a instalar y continuar usando hasta la siguiente comprobación de precisión.

Algunos optan por reemplazar los termopares periódicamente en lugar de realizar verificaciones de precisión. Este enfoque es eficaz si el usuario ha comprobado que no se produce ninguna descalibración durante el periodo de uso del termopar en el proceso.