

Dispersantes y Agentes de Acoplamiento

LOS DISPERSANTES FUNCIONAN RECUBRIENDO LAS PARTÍCULAS DE LAS CARGAS CREANDO UNA BARRERA FÍSICA. LOS AGENTES DE ACOPLAMIENTO PROPORCIONAN LA CAPACIDAD PARA MEJORAR LA ADHESIÓN ENTRE LA CARGA Y EL POLÍMERO.

Los dispersantes funcionan recubriendo las partículas de las cargas y creando una barrera física que les impide acercarse lo suficiente para adherirse entre ellas.

En contraste, los agentes de acoplamiento, mientras que pueden ayudar con la dispersión, proporcionan la capacidad para mejorar la adhesión entre la carga y el polímero (Figura 1).

A menudo se supone que una buena adhesión entre la carga y el polímero es deseable, y que un agente de acoplamiento será preferible al comparar con un dispersante. Se puede observar que la elección del dispersante o del agente de acoplamiento depende del conjunto de propiedades que se está tratando de alcanzar (Tabla 1).

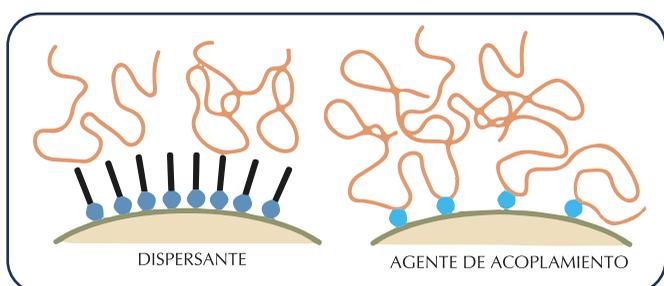


Figura 1. Representación esquemática de los dispersantes y agentes de acoplamiento.

Dispersantes

Principios básicos:

Los dispersantes utilizados en polímeros trabajan a través del mecanismo conocido como estabilización estérica, el cual depende de los siguientes tres criterios:

1. Fuerte anclaje de la “cabeza” del dispersante a la partícula / inclusión.
2. Solubilidad / compatibilidad de la “cola” del dispersante con la matriz polimérica restante.
3. Suficiente largo de “cola” para prevenir que las partículas se aproximen lo suficiente como para que las fuerzas de Van der Waals predominen y que fueren la aglomeración de partícula.

Adhesión a la Carga / Inclusión

El dispersante debe estar bien adherido a la superficie de la carga para que no se desplace, por ejemplo, bajo las extremas condiciones de cizallamiento y temperaturas durante la extrusión.

Por lo tanto, las fuerzas de Van der Waals no son suficientes y la unión debe tener lugar a través de enlaces iónicos o covalentes.

Considerando que las fuerzas de van der Waals están presentes entre cualquiera de los dos materiales, tanto los enlaces iónicos como covalentes requieren que una química específica tome lugar entre la “cabeza” del dispersante y una superficie de inclusión.

Así, el dispersante debe tener grupos químicos apropiados para que pueda interactuar con los grupos químicos ubicados sobre la superficie de la carga.

Fuerzas de los enlaces:

Van der Waals: <5 kJmol⁻¹
Iónico: Aprox. 600-4000 kJmol⁻¹
Covalente: Aprox. 300 kJmol⁻¹

Los grupos de anhídrido succínico y maléico son muy efectivos en la unión a cargas tales como carbonato de calcio, dolomita, hidróxido de aluminio e hidróxido de magnesio (Figura 2), pero son menos eficaces en sílices, por ejemplo.

En contraste, los organosilanos tienen la química correcta para unirse a la sílice, pero no son eficaces en carbonato de calcio.

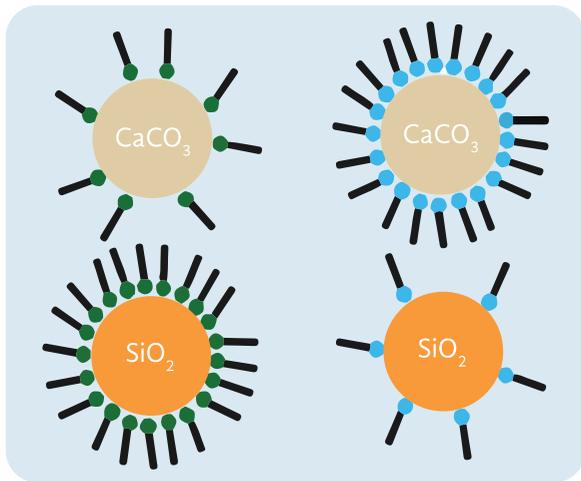


Figura 2. Carbonato de calcio y sílice con dispersantes a base de anhídrido (CaCO_3) y silanos (SiO_2).

En los últimos años la química del anhídrido maléico ha llegado a ser más y más popular, ya que permite un buen anclaje a la superficie de una amplia gama de cargas y proporciona la base para varios tipos de agentes dispersantes y agentes de acoplamiento (Tabla 2).

Tipo de carga	Mejor dispersante	Segundo Mejor	Tercer Mejor
Fusión, Tiempo (s)	Anhídrido	Ácido carboxílico	Amina primaria
Fusión, Torque (mg)	Ácido sulfónico	Ácido carboxílico	Anhídrido
Fusión, Tiempo (s)	Anhídrido	Triclorosilano	Ácido carboxílico
Fusión, Torque (mg)	Amina primaria	Triclorosilano	Ácido sulfónico
Fusión, Tiempo (s)	Triclorosilano	-	-
Fusión, Torque (mg)	Triclorosilano	Ácido sulfónico	Anhídrido
Fusión, Tiempo (s)	Amina primaria	Anhídrido	Ácido carboxílico
Fusión, Temperatura (C)	Anhídrido	Ácido carboxílico	Triclorosilano

Tabla 2. Dispersantes más efectivos con respecto a cada grupo de cargas.

La compatibilidad con el polímero

La cola del dispersante debe ser compatible y perfectamente soluble en la fase del polímero circundante. Esto ayuda a mantener la cola extendida y proporcionar una buena barrera para encerrar a las partículas próximas.

Longitud de la “cola” del dispersante

La longitud necesaria de la cola del dispersante depende de las propiedades buscadas en el material compuesto. En algunos casos para una buena dispersión y minimización de la viscosidad, una cola de sólo 3 ó 4 carbonos de longitud es suficiente. Sin embargo, para prevenir la absorción de humedad por la carga, se prefieren colas más largas.

Cómo utilizar dispersantes

Pre-recubrimiento

La carga puede ser comprada con pre-tratamiento, de modo que el dispersante ya se encuentre incorporado. Esto tiene la ventaja de que las cargas están hidrofobizadas y por lo tanto no son propensas a absorber humedad durante el transporte y almacenamiento. Una desventaja es que las superficies de las cargas adicionales no recibirán este tratamiento.

El tratamiento *in situ*

El recubrimiento *in-situ* es menos costoso ya que el dispersante se añade durante la extrusión.

El dispersante se funde y se disuelve en la masa fundida de polímero que actúa como un disolvente para facilitar el tratamiento de la superficie. Este método permite que la superficie recién expuesta sea tratada y transformada en el extrusor.

UN DISPERSANTE BIEN DISEÑADO Y SELECCIONADO SE ADHIERE FUERTEMENTE A LAS PARTÍCULAS DE LAS CARGAS Y FORMA UNA BARRERA QUE EVITA QUE LAS PARTÍCULAS ADYACENTES SE ACERQUEN UNA CON OTRA Y SE PEGUEN ENTRE SÍ.

Cantidades a utilizar y cobertura de la superficie

Normalmente hay una cantidad óptima de dispersante. La adición de poco dispersante significa una cobertura incompleta así que la viscosidad no estará en su nivel mínimo posible y es posible que se encuentren presentes algunos aglomerados.

Por otro lado, exceso de dispersante conduce a problemas también. Los inconvenientes observados comúnmente incluyen amarillamiento del polímero, pobre estabilidad a la oxidación (como la observada en un envejecimiento en horno) y aumento de la absorción de agua, ya que un dispersante en exceso puede atraer agua al polímero.

Una buena regla a seguir es comenzar con 1 a 2 % en peso de dispersante. Si esto es eficiente, los siguientes resultados deben considerarse:

- ▶ Disminución de la viscosidad.
- ▶ Disminución de los aglomerados (visto por microscopía o melt filter Pack).
- ▶ Aumento de brillo.
- ▶ Mayor resistencia al impacto.
- ▶ Mayor elongación a la ruptura.

Una vez que el agente dispersante ha demostrado ser eficiente, los ensayos adicionales revelarán la cantidad óptima de usar.

Tipos de dispersantes

Muchos tipos de dispersantes están disponibles, ya que se necesitan para satisfacer una amplia gama de cargas y tipos de polímeros.

Ácidos insaturados

Los ácidos insaturados, como los basados en polibutadieno, pueden utilizarse como dispersantes eficaces incluso en situaciones en las que los dobles enlaces no son capaces de reaccionar químicamente con la matriz de polímero.

Pueden ser utilizados en una amplia gama de cargas del tipo carbonato y tipo hidróxido. Como se encuentran disponibles en forma sólida, líquida, o en dispersiones acuosas, son particularmente fáciles de aplicar utilizando una gran variedad de métodos.

Los polibutadienos hidrogenados también están disponibles para casos en los que los dobles enlaces no sean deseables.

Polímeros funcionalizados por ácidos

Durante mucho tiempo se ha probado al polietileno y polipropileno maleado con buenos resultados. **Cray Valley™** ha extendido el uso de dispersantes anhídrido maleico para cubrir una gama mucho mayor de polímeros.

Los copolímeros de estireno anhídrido maleico ofrecen la capacidad de dispersar materiales de carga en polímeros de polaridad media, incluyendo:

- ▶ Poliésteres como PET y PBT
- ▶ SAN
- ▶ ABS
- ▶ PMMA
- ▶ PVC
- ▶ Celulósicos

Efectos en las propiedades

Las ventajas del uso de dispersantes se tratan con más detalle en las secciones siguientes.

2 MICRAS O MÁS ES EL TAMAÑO APROXIMADO DE LAS PARTÍCULAS PARA QUE TIENDAN A DISPERSARSE DE MANERA RELATIVAMENTE FÁCIL.

Flujo / Procesamiento

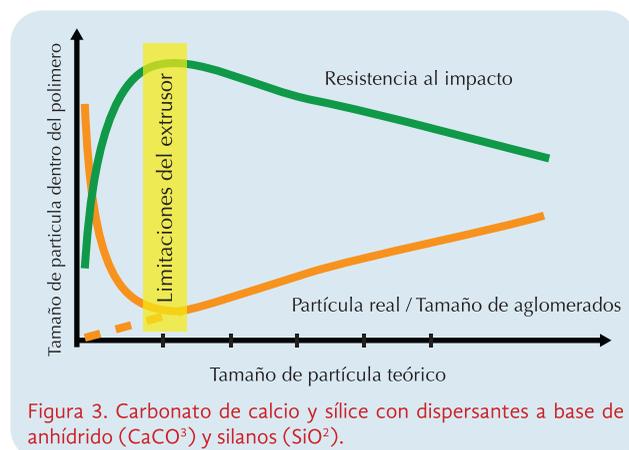
La adición de cargas o cualquier otro material sólido a un líquido dará lugar a un aumento de la viscosidad.

En concentraciones bajas de carga, el efecto puede ser ignorado, pero cuando la concentración de la carga se eleva, las partículas comienzan a interactuar con las adyacentes y se incrementa la viscosidad hasta que en algún punto todo el material se convierte en un sólido y ya no puede fluir (Figura 3).

El aumento de la viscosidad es generalmente indeseable porque significa que el polímero fundido fluye más lentamente y por lo tanto los procesos de transformación tales como extrusión e inyección son más lentos.

El resultado es un mayor costo de fabricación y un menor número de partes por hora en la producción. El aumento de la viscosidad también puede conducir a problemas de calidad, tales como llenado incompleto del molde.

En algunas formulaciones, donde la carga es más económica que el polímero, el objetivo es maximizar los niveles de carga. La adición de un dispersante permite que se añada más carga mientras se mantiene una procesabilidad y propiedades aceptables. Un ejemplo son las losetas de PVC, en donde se utiliza 80-90% en peso de carbonato de calcio para reducir el costo.



Resistencia al impacto

Los aglomerados actúan como defectos, es decir, puntos débiles donde las grietas inician bajo impacto (Figura 4).

Como los dispersantes rompen los aglomerados, el número y tamaño de los defectos disminuyen. Esto significa que la resistencia al impacto en probetas sin muesca puede mejorar sustancialmente cuando se emplean dispersantes.

La resistencia al impacto en probetas con muesca no mejora tanto porque en ese caso se introduce un gran defecto intencionalmente (*notched*) y reemplaza la presencia o ausencia de defectos más pequeños, tales como los aglomerados.

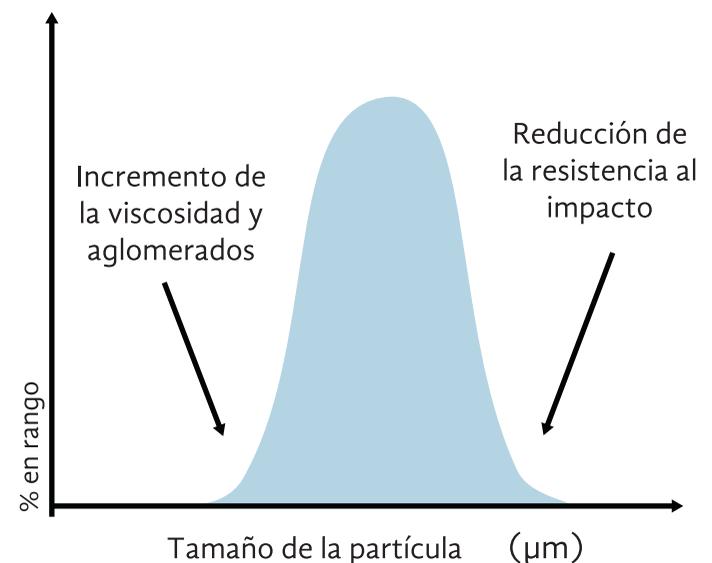


Figura 4. Efecto del tamaño de partícula y los aglomerados sobre las propiedades.

Los dispersantes también tienden a disminuir la unión entre la carga y el polímero de tal manera que, cuando se produce el impacto, la carga se desprende creando un vacío. Estos huecos en crecimiento con los impactos absorben energía.

Estos mecanismos también ayudan a aumentar la resistencia al impacto, tanto en probetas con muescas como en probetas sin muescas.



LOS DISPERSANTES TAMBIÉN TIENDEN A DISMINUIR LA UNIÓN ENTRE LA CARGA Y EL POLÍMERO DE TAL MANERA QUE, CUANDO SE PRODUCE EL IMPACTO, LA CARGA SE DESPRENDE CREANDO UN VACIO.

Las partículas de aproximadamente 2 micras o más tienden a dispersarse de manera relativamente fácil. Para partículas más pequeñas y en particular las nanopartículas, la dispersión puede ser difícil o imposible (Figuras 5, 6 y 7).

En estos casos la buena elección del dispersante y su buen mezclado en el polímero son de suma importancia.

Después de todo, las buenas propiedades que se pueden lograr a partir de nanopartículas sólo se obtienen si estas partículas se pueden separar y dispersar homogéneamente.

La cantidad de dispersión alcanzable depende de la configuración de la extrusora, así como de las materias primas.

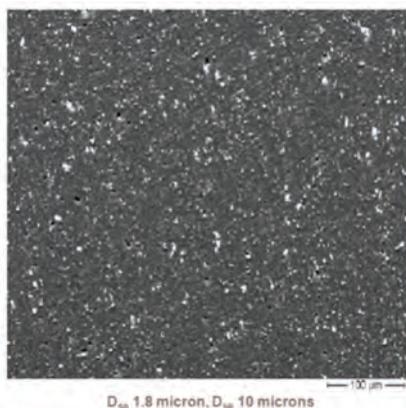


Figura 5. Carbonato de Calcio recubierto con ácido esteárico dispersado en un termoplástico vía extrusión de doble husillo; sin aglomeración.



Figura 6. Carbonato de calcio recubierto con ácido esteárico dispersado en un termoplástico vía extrusión de doble husillo; ligera aglomeración.

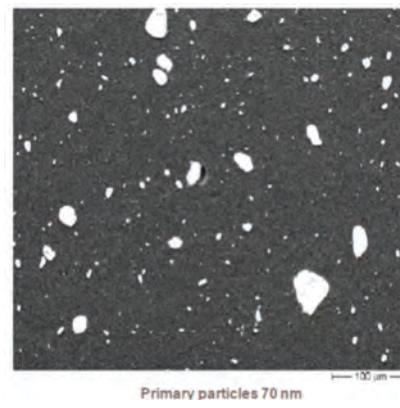


Figura 7. Carbonato de calcio recubierto con ácido esteárico dispersado en un termoplástico vía extrusión de doble husillo; aglomeración severa.

Agentes de acoplamiento

Introducción

Los agentes de acoplamiento son similares a los dispersantes en que deben adherirse fuertemente a la superficie de la carga y al mismo tiempo pueden mejorar la dispersión de la carga.

En contraste con los dispersantes, los agentes de acoplamiento también deben proporcionar una buena unión entre la carga y la matriz del polímero circundante (Tabla 3).

Esto conduce a mejorar la resistencia a la cedencia y aumentar la retención de la fuerza de cedencia bajo condiciones severas, por ejemplo temperatura elevada o alta humedad.

Brillo

El brillo puede ser mejorado mediante el uso de pequeñas cantidades de carga, pero bien dispersas.

El brillo medido a ángulos bajos por ejemplo, 20 grados, es más sensible que para ángulos mayores como 45 o 90 grados.

A veces, se necesita bajo brillo y de nuevo se utilizan las cargas, en este caso las partículas de carga más grandes hacen que la superficie sea rugosa y dispersan la luz para dar un efecto mate.

Terminología

En este documento, un agente de acoplamiento se refiere a un aditivo que mejora la adhesión entre la carga y el polímero, como se muestra a través de un incremento en el esfuerzo de cedencia. Algunos aditivos se comercializan como agentes de acoplamiento, pero no mejoran la resistencia de la adhesión y estos no están incluidos.

Principios básicos

Los agentes de acoplamiento son esencialmente moléculas bifuncionales; donde una funcionalidad es capaz de reaccionar con la superficie de inclusión y la otra con el polímero, acoplando así a los dos. Todos los agentes de acoplamiento pueden ser por lo tanto considerados bajo la siguiente estructura simple:

Ancla (A) ---- Amortiguador/Puente (B)
---- Acoplamiento (C)

El reto para el químico es encontrar las funcionalidades de A y C, así como encontrar la estructura que los une "B" que produzca una molécula que sea estable, no peligrosa y fácil de usar.

Esto puede parecer una tarea sencilla, pero se ha podido revisar que muchas de las estructuras potenciales han resultado en productos que son insolubles, con alto punto de fusión, compuestos que son a menudo imposibles de usar en cualquier forma comercialmente viable.

Diferencias entre la dispersión y el acoplamiento

Las cargas tratadas con dispersantes tienen algún grado de adherencia al polímero en virtud de fuerzas débiles de Van der Waals.

Sin embargo, esta adhesión es débil y puede ser destruida por alta temperatura, altas fuerzas aplicadas o por el ingreso de agua. La unión proporcionada por los agentes de acoplamiento es más fuerte y más resiliente.

La diferencia entre un dispersante y un agente de acoplamiento se ejemplifica observando un compuesto de EPDM cargado (Tabla 3, datos cortesía de Consultores Rothon).

Tanto el agente dispersante como el agente de acoplamiento disminuyen la viscosidad y por lo tanto actúan como dispersantes y promueven el flujo.

Considerando que el dispersante reduce la fuerza de despegado de la carga al elastómero, el agente de acoplamiento proporciona un aumento significativo en la resistencia a la tensión y resistencia al desgarre.

Ambos aditivos hidrofobizan la carga y reducen el hinchamiento en detergente, pero de los dos tipos, el agente de acoplamiento es más eficaz.

PROPIEDAD	Sin tratamiento	Dispersión	Acoplamiento
Viscosidad mínima a 160°C (Rheómetro Monsanto)	18.6	10.0	10.0
Resistencia a la tensión (MPa)	10.0	4.5	13.3
Módulo 300%, (MPa)	2.3	1.4	3.7
Resistencia al desgarre (N/mm)	16	10	24
Hinchamiento en detergente (%) (Detergente15, 72 horas a 95°C)	2.7	0.9	0.1

Tabla 3. Una comparación de los efectos de los dispersantes y agentes de acoplamiento en EPDM, curado con azufre y cargado con carbonato de calcio precipitado.



1% EN PESO Y 3% EN PESO DE AGENTE DE ACOPLAMIENTO SE DEBE PROBAR COMO PUNTO DE PARTIDA Y LUEGO OPTIMIZAR CON BASE A SUS RESULTADOS.

Anclaje a la carga

Tradicionalmente, los organosilanos han sido los agentes de acoplamiento de mayor uso para su enlace a cargas que contienen grupos silanol superficiales.

Entre ellos se incluyen las sílices (vidrio), mica y una variedad de otras cargas silíceas. Sin embargo, los organosilanos tienen algunas desventajas significativas:

- ▶ Son Ineficaces en algunos tipos de carga.
- ▶ Requieren pre-activación.
- ▶ Generan compuestos orgánicos volátiles (VOC's), inflamables, tales como metanol o etanol.

Desde hace tiempo se reconoce que los organosilanos son completamente ineficaces en algunos tipos de carga, por ejemplo: carbonato de calcio, sulfato de bario y negro de humo, por nombrar algunos. Esto ha conducido al desarrollo y estudio de otras sustancias químicas; el más exitoso de los cuales es el uso de agentes de acoplamiento a base de anhídrido.

Como se indica anteriormente (véase la Tabla 2), los anhídridos son capaces de adherirse a una amplia gama de cargas incluyendo aquellas a las cuales los organosilanos no se pueden acoplar

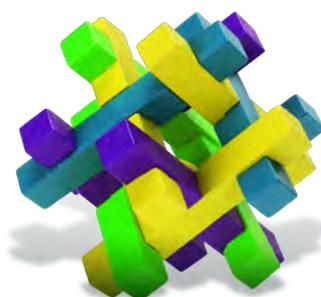
Los organosilanos se suministran en una forma de precursores, lo que significa que en su entrega no se encuentran en su forma activa. Los grupos activos silanol se bloquean para evitar su reacción durante el almacenamiento y el transporte. Sin esos grupos, se polimeriza espontáneamente.

Antes de su reacción con la carga, los grupos de bloqueo deben ser eliminados, por ejemplo mediante el ajuste del pH. A medida que se eliminan, el metanol o el etanol se desprenden. Estas son sustancias volátiles inflamables y actualmente hay una fuerte tendencia a reducir y eliminar esas sustancias volátiles por salud y seguridad.

El uso de la química del anhídrido, por otro lado, no requiere pre-activación. Los aditivos se pueden mezclar con el material de carga o simplemente introducirlos directamente en la extrusora.

Mejor aún, no hay formación de sustancias volátiles o tóxicas cuando el anhídrido reacciona con el material de carga.

Estas ventajas han favorecido el uso de anhídridos en los últimos años.



¿El tratamiento de las cargas las hace susceptibles a los anhídridos?

Acoplamiento al polímero:

Una forma de conseguir la adhesión a los termoplásticos es formar estructuras por las que los agentes de acoplamiento se ensamblen con el polímero para formar "nudos" que actúan para mantener el material unido (Tabla 4).

Esto requiere de un agente de acoplamiento que se encuentre ligado a la polaridad del polímero. Por ejemplo, el polipropileno maleado trabaja como un agente de acoplamiento en PP, ya que es soluble en el mismo y se enreda con la matriz de PP.

Sin embargo, el polipropileno maleado no es eficaz en PE, aunque los polímeros tienen una química prácticamente idéntica. El PP maleado no se disuelve en PE y no puede, por lo tanto, formar redes. Así, aunque un enfoque funciona bien en algunos casos, no es una forma versátil de lograr el acoplamiento.

Un método más robusto es asegurarse de que el agente de acoplamiento reacciona químicamente con el polímero para formar una unión fuerte. Esto da la oportunidad a un tipo agente de acoplamiento para ser eficaz en polímeros múltiples (Tabla 4).

Funcionalidad	Principales polímeros en los que se utiliza
Instauración, por ejemplo, vinil o metilacrilato	Poliésteres insaturados, acrílicos, elastómeros entrecruzados con peróxido
Epóxico	Epóxicos, poliésteres (PET, PBT), policarbonatos, nylons

Tabla 4. Funcionalidades reactivas en polímeros, utilizadas en agentes de acoplamiento (Cray Valley™ Chemistry).

En este último caso, el polímero fundido actúa como el “disolvente” para permitir que el agente de acoplamiento se difunda y reaccione sobre la superficie de la carga. Cada método tiene ventajas y desventajas.

Cómo utilizar agentes de acoplamiento

Los agentes de acoplamiento pueden ser usados como pre-recubrimiento sobre el material de carga o in situ donde el agente de acoplamiento se añade durante la formulación o el proceso de inyección. En este último caso, el polímero fundido actúa como el “disolvente” para permitir que el agente de acoplamiento se difunda y reaccione sobre la superficie de la carga. Cada método tiene ventajas y desventajas.

Pre-recubrimiento

El pre-recubrimiento de un polvo de carga seca añade un paso adicional al proceso de producción de la carga y por lo tanto aumenta el costo.

A menudo, sin embargo, la producción de cargas implica procesos húmedos y el agente de acoplamiento se puede añadir durante uno de estos, evitando de este modo algún paso adicional y permite el tratamiento eficaz con un costo mínimo.

Por ejemplo: en la producción de carbonato de calcio precipitado (u otras cargas precipitados), trituración en húmedo de las cargas y la producción de fibras de vidrio o fibras de carbono, se aplica un paso semejante.

Una desventaja del pre-tratamiento es que durante la formulación los aglomerados se pueden romper hasta la exposición de la superficie de la carga fresca sin tratar. Esta superficie permanecerá sin tratar.

Cray Valley™ suministra agentes de acoplamiento en formas sólidas, líquidas y dispersiones en agua para ayudar a los clientes a aplicar el tratamiento en sus procesos existentes como una disolución completa.

Tratamiento *in situ*

Este método de tratamiento es a menudo el más económico y la vía preferida por la mayoría de los mezcladores, ya que se añade el agente de acoplamiento durante la extrusión. El agente de acoplamiento se difunde a la superficie de la carga y se adhiere allí.

Sin embargo, este método no es tan fácil de controlar como la alternativa presentada anteriormente. Durante la mezcla otros ingredientes activos de superficie compiten con el agente de acoplamiento para unirse a la carga. Por ejemplo, los catalizadores, estearatos, deslizantes y anti-estáticos.

A pesar de lo anterior, el método es a menudo muy eficaz y está en uso a gran escala comercial. Los organosilanos se pueden aplicar in situ, sin embargo, liberan compuestos volátiles inflamables que deben ser tratados. En contraste, los agentes de acoplamiento de tipo anhídrido son ideales para aplicación in situ, ya que pueden ser fácilmente dosificados en forma de sólidos o líquidos y no emiten gases nocivos.



Cantidades de uso y cobertura de la superficie

Se debe utilizar la cantidad correcta del agente de acoplamiento. Si se agrega demasiado poco, el acoplamiento óptimo no se logrará. Si se añade en exceso son costos innecesarios y puede resultar en interacciones indeseables con otros aditivos en el sistema.

La reactividad y la zona de superficie de la carga determinan la cantidad correcta de agente de acoplamiento a usar, por lo que el nivel ideal varía de una formulación a otra. Como punto de partida, se debe probar entre 1% en peso y 3% en peso de agente de acoplamiento y luego optimizar en base a sus resultados.

Tipos de agentes de acoplamiento

Ácidos insaturados

Los polibutadienos maleados son muy versátiles porque los enlaces de los grupos anhídrido se adhieren a una amplia gama de cargas, además de que los dobles enlaces en los polibutadienos pueden reaccionar químicamente con una gran cantidad de polímeros (*Tabla 4*).

Cray Valley™ tiene un excelente control sobre la estructura y reactividad de sus productos de maleados de polibutadieno que permiten ajustar el rendimiento para cumplir con los requisitos del cliente.

Polímeros ácidos funcionalizados

Los polímeros de poliestireno maleado son excelentes agentes de acoplamiento, porque el grupo anhídrido se une fuertemente a diferentes tipos de carga y es soluble con el esqueleto del polímero, por lo tanto pueden unirse a través de redes a un espectro de termoplásticos desde ABS y SAN hasta poliésteres y más.

Conclusiones

Los dispersantes y agentes de acoplamiento se añaden en cantidades bajas pero aumentar el rendimiento de la formulación en términos de una mejor procesabilidad, mayor rendimiento, propiedades mecánicas equilibradas y mejoras estéticas.

Cray Valley™ puede ayudar a optimizar sus formulaciones utilizando su gama de aditivos que pueden ser adaptados para una amplia variedad de cargas y combinaciones de polímeros.

Referencias

1. Handbook of Fillers, G. Wypych, ChemTec Publishing, T 1. Toronto, Canadá, 2000
2. Handbook of Fillers for Plastics, H. S. Katz & J. V. Milewski (Eds.), Van Nostrand Reinhold, London, England, 1987

3. Handbook of Reinforcements for Plastics, H. S. Katz & J. V. Milewski (Eds.), Van Nostrand Reinhold, London, England, 1987
4. Plastics Materials 7th Edition, J. A. Brydson, Butterworth-Heinemann 1999
5. Polypropylene Handbook, E. P. Moore (Ed.), Hanser Gardner Publications Inc., Cincinnati, USA, 1996
6. Properties of Polymers 4th Edition, D. W. van Krevelen & K. te Nijenhuis, Elsevier, Oxford, UK 2009
7. Functional Fillers for Plastics 2nd Edition, Marino Xanthos (Ed.), Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Germany, 2010
8. Particulate-Filled Polymer Composites 2nd Edition, R. N. Rotheron (Ed.), RAPRA Technology Ltd., Shrewsbury, UK, 2003
9. Mechanical Properties of Reinforced Plastics, D. W. Clegg & A. A. Collyer (Eds.), Elsevier Applied Science Publishers Ltd., Barking, UK 1986.
10. Advances in Polymer Science 139, Mineral Fillers in Thermoplastics I, Raw Materials and Processing, J. Jancar (Ed.), Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1999
11. Polypropylene, Structure, blends and composites 3 – Composites, J. Karger-Kocsis (Ed.), Chapman & Hall, London, UK (1995).
12. Mechanical Properties of Polymers and Composites, L. E. Nielsen & R.F. Landel, Marcel Dekker Inc., New York, USA, 1994
13. Plastics Additives Handbook 5th Edition, H. Zweifel, Hanser Gardner Publications Inc., Cincinnati, USA, 2000
14. Rheology of Filled Polymer Systems, A. V. Shenoy, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1999
15. Polymer Tribology, S. K. Sinha & B. J. Briscoe (Eds.), Imperial College Press, London, UK, 2009
16. Polymer Interface and Adhesion, S. Wu, Marcel Dekker Inc., New York, USA, 1982
17. Chapter 4 POSS in Plastics in Applications of Polyhedral Oligosilsesquioxanes (POSS), C. Hartmann-Thompson, (Ed.), Advances in Silicon Chemistry Series, Volume 4, Springer, 2011, in preparation, ISBN: 978-90-481-3786-2.

Autores

Dr. Chris DeArmitt FRSC
Phantom Plastics
Profesor Roger Rotheron
Rotheron Consultants / Manchester Metropolitan University•