Eine Einführung in Pulver

freeman*technology*
a micromeritics® company

Vorwort von Tim Freeman

Aus Pulvern werden viele der Produkte hergestellt, die wir im täglichen Leben sehr schätzen. Hier bei Freeman Technology konzentrieren wir uns ausschließlich auf Pulver, insbesondere darauf, wie man sie charakterisiert und versteht, um die Produktentwicklung und Herstellungsprozesse zu verbessern. Diese Broschüre, die erste in einer Reihe, ist eine Zusammenfassung dessen, was wir aus mehr als einem Jahrzehnt Arbeit mit diesen herausfordernden, aber faszinierenden Materialien über das Pulververhalten gelernt haben.

Managing Director
Freeman Technology Ltd.

Eine Einführung in Pulver

Ob als Rohstoffe, Zwischenprodukte oder Endprodukte, Pulver sind ein wesentlicher Bestandteil einer Vielzahl industrieller Prozesse und tragen zu rund 80% aller hergestellten Waren bei.

Trotz ihrer Allgegenwart stellen sich jedoch weiterhin Herausforderungen bei der Produktentwicklung, Herstellung und Qualitätssicherung.

Pulver werden oft als “schlecht” bezeichnet, obwohl es genauer gesagt der Fall ist, dass wir einfach nicht verstehen, wie sie sich verhalten. Ein gutes Verständnis des Pulververhaltens ist eine wesentliche Grundlage für die Optimierung der Produktionsprozesse, für die Entwicklung eines hochwertigen Produkts und für der Auswahl geeigneter Pulvercharakterisierungsmethoden.

Diese Broschüre bietet eine klare und praktische Einführung in die Charakterisierung von Pulvern. Sie wurde für diejenigen geschrieben, die neu auf dem Gebiet sind oder Erfahrung im Umgang mit Pulvern haben und nach neuen Erkenntnissen suchen. Es werden die folgenden Fragen behandelt:

- Pulver oder Partikel? Was sind die Unterschiede und warum sind diese Unterschiede wichtig?
- Welche Aspekte des Pulverver haltens sind aus industrieller Sicht interessant?
- Warum fließen Pulver oder warum hören sie auf zu fließen?
- Welche Faktoren beeinflussen das Verhalten von Pulvern - in einem Prozess oder als Endprodukt?

Inhaltsseite

ABSCHNITT 1 — 6 - 9

Was ist ein Pulver?

Verstehen Sie die Unterschiede zwischen Partikeln und Pulvern und warum es schwierig sein kann, beide zu messen, zu verstehen und zu kontrollieren.

ABSCHNITT 2 — 10 - 21

Interessante Aspekte des Pulververhaltens

Erfahren Sie mehr über die interessanten und industriell nützlichen Eigenschaften von Pulvern und warum sie für die Industrie relevant sind: Kohäsion - Adhäsion - Kompressibilität - Permeabilität - Fluidisierung - Konsolidierung - Schergeschwindigkeitsempfindlichkeit - Zusammenbacken - Entmischung - elektrostatische Aufladung.

ABSCHNITT 3 — 22 - 28

Pulverfließfähigkeit im Blickpunkt

Lassen Sie uns die Mechanismen der Pulverfließfähigkeit erforschen, eine wichtige Eigenschaft für viele Anwendungen. Finden Sie heraus, warum Pulver fließen oder nicht, und entwickeln Sie das Hintergrundverständnis, um die beobachtete Leistung zu rationalisieren.

ABSCHNITT 4 — 29 - 33

Die Prozessumgebung

Pulver sind an sich nicht gut oder schlecht, aber sie eignen sich auf unterschiedliche Weise für unterschiedliche Verarbeitungsumgebungen. Erfahren Sie, warum Verarbeitungsbedingungen wichtig sind und wie sie sich auf das Verhalten eines Pulvers auswirken.

ABSCHNITT 5 — 34

Zusammenfassung

Eine Zusammenfassung dessen, was Sie wissen müssen, um das Pulververhalten zu verstehen, und wie dies mit der Produktentwicklung und der Pulververarbeitung zusammenhängt.

ABSCHNITT 1

Was ist ein Pulver?

Pulver sind Massen-Zusammensetzungen, die Partikel enthalten, aber aus mehr als nur Partikeln bestehen. Es kommt häufig vor, dass die Begriffe „Partikel“ und „Pulver“ synonym verwendet werden, dies kann jedoch irreführend sein. Pulver bestehen auch aus Gas, normalerweise in Form von Luft, und Flüssigkeit, normalerweise Wasser, oft auf der Oberfläche des Partikels oder innerhalb seiner Struktur.

Es sind die Eigenschaften jeder Phase eines Pulvers und die Wechselwirkungen zwischen ihnen, die das Verhalten des Pulvers in loser Schüttung definieren. Dies bedeutet, dass das Verhalten durch eine große Anzahl von Variablen und eine Reihe von möglichen Wechselwirkungen beeinflusst wird.

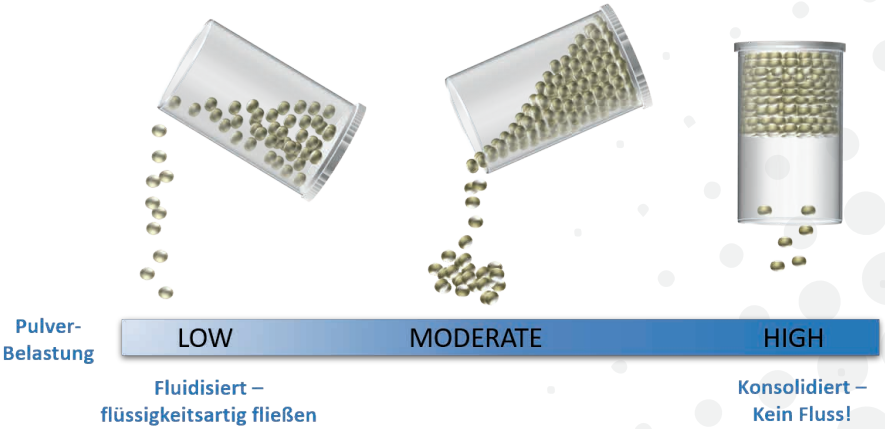
Viele dieser Variablen beziehen sich auf die physikalischen Eigenschaften der Partikel, einschließlich folgender Partikelparameter:

- Größe
- Form
- Oberflächenstruktur
- Oberfläche
- Dichte
- Kohäsion
- Adhäsion
- Elastizität
- Plastizität
- Porosität
- Potenzial für elektrostatische Aufladung
- Hygroskopizität
- Härte / Brüchigkeit
- Amorpher Gehalt

(Beachten Sie, dass es sich bei vielen Eigenschaften auch um Verteilungen handelt und nicht um einen einzelnen Wert.)

„Pulver sind Schüttgüter, die aus Feststoffen, Flüssigkeiten und Gasen bestehen. Wechselwirkungen zwischen allen drei Phasen bestimmen das Pulververhalten.“

Andere Variablen beziehen sich auf den Prozess selbst oder 'externe' Einflüsse, wie die vorhandene Luftmenge, die Durchflussmenge und den Konsolidierungsgrad.



Das Pulververhalten hängt sowohl von den Partikeln selbst als auch von den externen Variablen ab. Aus diesem Grund ist es kompliziert und die Pulverleistung kann nicht ausschließlich aus Messungen der physikalischen Eigenschaften allein vorhergesagt werden. Aus praktischer Sicht wirken sich zu viele Variablen auf das Pulververhalten aus, um eine genaue mathematische Modellierung zu ermöglichen. Darüber hinaus kann man sagen, dass noch nicht alle möglichen Wechselwirkungen vollständig verstanden sind und viele der Einflussgrößen nicht direkt gemessen werden können.

"Partikeleigenschaften sind wichtig, wenn es um das Pulververhalten geht, aber auch externe Variablen wie das Ausmaß der Belüftung oder der Verfestigung."

Das gegenwärtige Verständnis beschränkt sich darauf zu erkennen, dass:

Pulververhalten = fn (Partikelgröße) + fn (Partikelform) + fn (Partikelsteifigkeit) + fn (Partikeloberflächentextur) + fn (Partikeldichte) + fn (Kohäsion) + etc

und auch externe Variablen wie:

- Verfestigung
- Belüftung
- Luftfeuchtigkeit
- Ausmaß der Scherung / Dehnung
- Eigenschaften der Geräteoberfläche

"Viele Variablen beeinflussen das Pulververhalten - eine Vorhersage über die Partikeleigenschaften und externen Variablen ist noch nicht möglich."

"Ein Pulver fließt durch einen Prozess als "Massen-Zusammensetzung" und sollte daher in Bezug auf seine Massen-Eigenschaften quantifiziert werden, wenn die Verarbeitungsleistung vorhergesagt und verstanden werden soll."

Ein häufiges Problem: Wechsel des Rohstofflieferanten

Ein Pulverhersteller erwägt einen Wechsel des Rohstofflieferanten, um die Kosten zu senken. Eine Sorte wird immer mit der gleichen Spezifikation in Bezug auf die Zusammensetzung, Reinheit, Partikelgröße, Schüttdichte und der Feuchtigkeitsgehalt ausgewiesen. Das neue Material kommt mit einer Spezifikation, die dem entspricht, was vereinbart wurde, aber wenn es in die Anlage eingeführt wird, läuft der Prozess nicht optimal. Verstopfungen treten häufiger auf, die Durchflussraten sind beeinträchtigt und das Endprodukt entspricht nicht den Qualitätsstandards.
Warum treten solche Probleme auf, wenn die Spezifikation übereinstimmt?

Es ist klar, dass die Spezifikation nicht ausreicht, um zwischen einer Charge mit guter und einer mit schlechter Leistung zu unterscheiden.
Es müssen andere Eigenschaften des Materials vorliegen, die das Verarbeitungsverhalten und nicht in der Spezifikation enthalten sind. Daher ist es bei der Auswahl eines Pulvers auf der Grundlage seiner Verarbeitungsfähigkeit wichtig, messbare Parameter zu definieren, die sich auf die prozessinterne Leistungsfähigkeit beziehen und zur effektiven Beseitigung von Leistungsschwächen verwendet werden können. Physikalische und chemische Daten allein können dies oft nicht erreichen.

ABSCHNITT 2

2

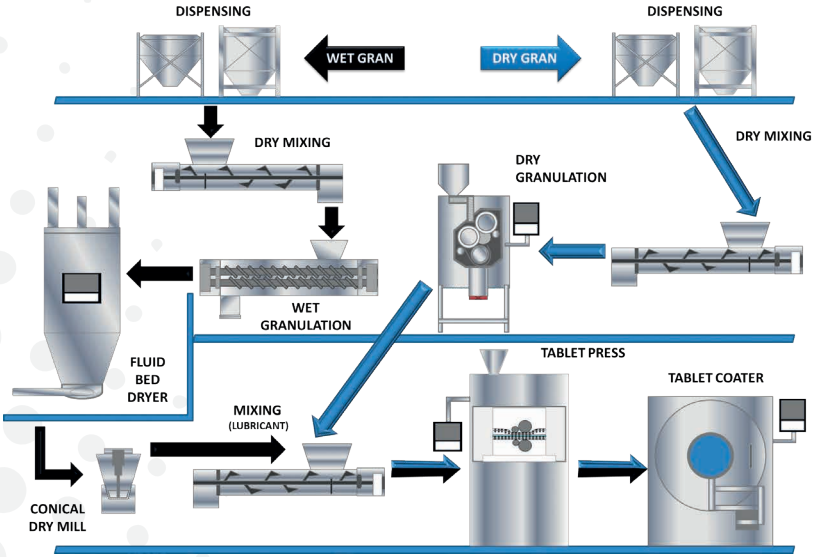
„Pulververhalten bedeutet nicht nur, aus einem Trichter zu fließen! Pulverhersteller interessieren sich auch für das Zuführen, Mischen / Vermischen, Granulieren, Trocknen, Abfüllen, Tablettieren, Aerosolieren, die pneumatische Fördern, Dosieren, Lagern, Transportieren usw.“

Interessante Aspekte des Pulververhaltens

Pulver sind Massenanordnungen von Partikeln, Gas und Flüssigkeiten, und diese Tatsache erklärt zweifellos, warum sie so komplex sind, untermauert aber auch ihren industriellen Wert. Pulver verhalten sich auf viele verschiedene Arten, je nachdem, wie sie formuliert und hergestellt werden und welcher Umgebung sie ausgesetzt sind. Das ist der Grund, weshalb wir sie so nützlich finden. Vor allem wenn ein Pulver durch eine Presse fließt und als harte stabile Tablette austritt, oder wenn eine Pulverbeschichtung an einer Metallplatte haftet, die in ein Fließbett getaucht ist.

Für viele Anwender geht es bei der Diskussion um Pulver und insbesondere um das Testen von Pulvern ausschließlich um das Fließen von einem Trichter zu einem anderen Trichter. Das Pulververhalten und das industrielle Interesse daran gehen jedoch weit über diese enge Definition hinaus.

Schauen wir uns die besonders interessanten Aspekte des Pulververhaltens genauer an:



Schema eines kontinuierlichen Herstellungsprozesses für die Tablettenherstellung

Fließfähigkeit

Wenn man sich zwei Pulverproben in Gläsern vorstellt, wovon eine aus Kristallzucker besteht und die andere aus Mehl, erzeugt das Schwenken des Zuckerglases eine flüssigkeitsähnliche Bewegung im Pulver, und wenn das Glas auf die Seite gerollt wird, fällt der Zucker ebenmäßig und behält ein gleichmäßiges Fließmuster bei.

Das Drehen der Mehlprobe in beiden Ebenen induziert eine sehr unterschiedliche vorübergehende Bewegung, hauptsächlich die von Agglomeraten. Es ist möglich, das Glas ein kleines Stück zu bewegen und festzustellen, dass nichts passiert, und dann tritt eine Art Lawinenereignis auf, wenn das Pulver an der neuen Position ins Rutschen kommt. Dieses Pulver fließt auch, aber auf eine ganz andere Weise, die es für diejenigen, deren Hauptanliegen ein stetiger Prozessfluss ist, intuitiv weniger attraktiv macht.

In diesem lockeren Packungszustand liegen diese beiden Pulver an gegenüberliegenden Enden des Fließfähigkeitsspektrums. In einfachen Worten würde Zucker als “rieselfähig” und Mehl als “kohäsiv” bezeichnet werden. Es ist jedoch wichtig zu erkennen, dass sich viele Pulver an genau definierten Punkten zwischen diesen beiden Extremen befinden.

Wenn ein Pulver verfestigt oder belüftet wird, hat dies außerdem Einfluss auf seine Fließeigenschaften und die relativen Unterschiede in seinem Verhalten können sich ändern. Wenn die Zuckerteilchen einer Vibration ausgesetzt werden, können sie sich sehr effizient arretieren, was zu einem Material führt, das sehr schlecht fließt, möglicherweise sogar schlechter als Mehl, nachdem auch dieses durch Vibration verfestigt wurde.

Externe Variablen, wie Belüftung und Verfestigung können dramatische Auswirkungen haben und ein einmal mäßig fließendes Pulver in ein flüssigkeitsähnliches Material verwandeln, wenn es belüftet wird (z.B. Talkum), oder ein einmal frei fließendes Material nach der Verfestigung in ein festes Gebilde überführen (z.B. Toner). Um den Bereich der Fließeigenschaften, die Pulver aufweisen können, vollständig zu verstehen, ist es daher wichtig ihr Verhalten in allen Spannungszuständen von belüftet bis verfestigt zu beobachten. Darüber hinaus zeigen Pulver

häufig eine Fließgeschwindigkeitsempfindlichkeit, was bedeutet, dass die Leichtigkeit, mit der sie fließen, von der auf sie ausgeübten Schergeschwindigkeit abhängt. Ein praktisches Beispiel, das diesen Punkt veranschaulicht, ist ein Mischprozess.

Einige Pulver mit hoher Fließgeschwindigkeitsempfindlichkeit erfordern einen Mischprozess mit hoher Scherkraft, um eine gleichmäßige Mischung zu erreichen. Pulver, die weniger durchflussempfindlich sind, können bei niedrigen Schergeschwindigkeiten vollständig gemischt werden, was die Möglichkeit bietet, energieärmere Mischprozesse zu verwenden, wo hingegen Vorgänge mit hoher Scherung Partikel auch beschädigen und elektrostatische Aufladung verursachen können.

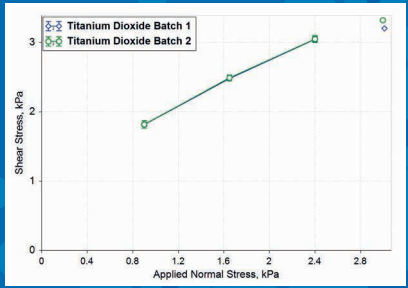
Das Verständnis des Pulverflusses ist für den effizienten Betrieb vieler Prozesse von entscheidender Bedeutung. Die Fließeigenschaften beeinflussen, wie leicht sich Pulver vermischen, wie sie sich in der Zuführung verhalten oder wie sie in eine Kapsel oder Düse fließen und diese füllen. Das Verständnis der Faktoren, die den Durchfluss beeinflussen, ist auch wichtig, um optimale Lagerbedingungen zu schaffen. Selbst wenn zwei Pulver relativ ähnliche Fließeigenschaften aufweisen, können sie aufgrund von Unterschieden in ihren Schütt- oder Schereigenschaften dennoch ein ganz anderes Prozessverhalten zeigen.
Die genaue Quantifizierung geringfügiger Unterschiede in jeder für das Verhalten relevanten Eigenschaft ist entscheidend, wenn eine gründliche und solide Charakterisierung erlangt werden soll.

„Bei der Pulververarbeitung werden viele Einheitsoperationen durchgeführt, und jede unterwirft das Pulver einem bestimmten Satz von Bedingungen. Es gibt kein allgemein „gutes“ Pulver - es geht vielmehr um die Frage, ob die Eigenschaften dieses Pulvers mit den Prozessbedingungen kompatibel sind, die bei diesem Anlagenbetrieb vorhanden sind.“

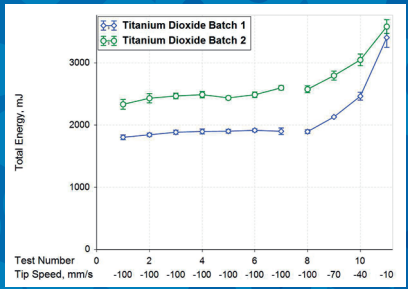
2

Ein häufiges Problem: Messung der falschen Eigenschaft!

Ein Pulverhersteller sammelt Daten für zwei Titandioxidproben, die zum einen mit einem Schertester und zum anderen mit einem dynamischen Fließprüfverfahren erstellt werden, das ein direktes Maß für die Fließfähigkeit liefert - Basic Flowability Energy (BFE). Die Scherdaten legen nahe, dass die beiden Proben identische Eigenschaften aufweisen. Die Ergebnisse der dynamischen Fließfähigkeit zeigen jedoch, dass dies nicht der Fall ist. Welche Daten sind richtig? Beide Datensätze sind korrekt. Schließlich messen diese Techniken unterschiedliche Eigenschaften des Pulververhaltens. Was wir aus diesen Ergebnissen sagen können, ist, dass sich die beiden Proben in einer konsolidierten Umgebung wahrscheinlich gleich verhalten, z.B. während der Einleitung des Flusses, wie in einem Trichter (Schertestdaten). Jedoch weisen sie signifikant unterschiedliche Fließeigenschaften auf bei dynamischer Bewegung in einem Prozess, wie durch die Messung ihrer dynamischen Fließfähigkeit gezeigt wird. Wenn der Grund für diese Analyse darin besteht, zu beurteilen, ob diese Pulver identisch verarbeitet werden können, ist die Antwort, dass dies davon abhängt, welcher Teil des Prozesses in Betracht gezogen wird. Es ist wahrscheinlich, dass sich beide Pulver in einem Trichter ähnlich verhalten, aber wenn die Leistung in dynamischeren, gemäßigten oder stressarmen Umgebungen wie Misch- und Abfüllprozessen bewertet wird, weisen diese Pulver wahrscheinlich eine unterschiedliche Leistung auf.



Scherdaten



Daten der dynamischen Fließfähigkeit

Kohäsion

Der Begriff Kohäsion wird üblicherweise mit der Fließfähigkeit eines Pulvers in Verbindung gebracht und ist in der Tat häufig die einflussreichste Eigenschaft im Hinblick auf das Pulververhalten in großen Mengen. Kohäsion ist ein Mechanismus, der zwischen Partikeln wirkt und dazu neigt, ein Partikel an seinen Nachbarn zu binden. Diese Zugkräfte sind eine Kombination aus elektrostatischen Ladungen oder Oberflächenenergien und Van-der-Waals-Kräften.

Die Stärke der Kohäsionskraft zwischen zwei benachbarten Partikeln ist typischerweise gering und oft unbedeutend, wenn sich die Pulver in einem konsolidierten Zustand befinden, in dem die Reibungskräfte und die mechanischen Verriegelungskräfte stärker vorhanden sind. Befindet sich ein Pulver jedoch in einem lockeren Packungszustand, können die Kohäsionskräfte im Verhältnis zu den anderen auf das Partikel einwirkenden Kräften groß sein und das Verhalten des Pulvers als Massengut dominieren. Da Pulver häufig in einem spannungsarmen Packungszustand verarbeitet werden, kann die Stärke der Kohäsionskräfte den Unterschied zwischen einer guten Prozessleistung und einem Pulver, das sich schlecht verhält, ausmachen.

Auf dieses Thema wird später noch näher eingegangen, aber es ist hier hervorzuheben, dass insbesondere bei Prozessen oder Anwendungen, bei denen das Pulver locker gepackt ist, die Kohäsionseigenschaften wichtig sind.

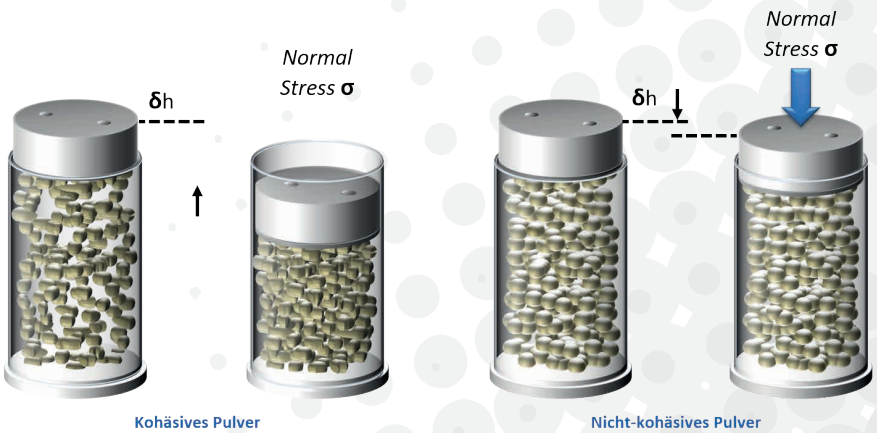
Adhesion

Während die Kohäsion die Stärke der Partikelwechselwirkungen quantifiziert, ist die Adhäsion ein Maß für die Neigung der Partikel, an einer anderen Oberfläche oder einem anderen Material zu haften - häufig an der Geräteoberfläche. Dies ist ein wichtiges Problem bei der Verarbeitung, da Pulverreste zu Mischungsheterogenität führen können, eine gründlichere Reinigung erfordern, das Risiko einer Kreuzkontamination zwischen Chargen erhöhen und ein Hauptinitiator für Verstopfungen sein können.

Kompressibilität

Die Kompressibilität ist ein Maß für die Volumenänderung in einer Pulverprobe als Folge einer ausgeübten Verfestigungsspannung. Diese Beanspruchung drückt Partikel näher zusammen, packt die gleiche Anzahl Partikel in ein kleineres Volumen und erhöht dadurch die Schüttdichte. Die Komprimierbarkeit sollte nicht mit einer durch Vibration hervorgerufenen Verfestigung verwechselt werden, einem völlig anderen Mechanismus, der von der Partikelreorganisation abhängt, wenn das Pulverschüttgut angestoßen wird.

Es gibt Zeiten, in denen eine Komprimierung beabsichtigt ist, beispielsweise beim Tablettieren, und andere, in denen dies nur relativ unkontrolliert geschieht, beispielsweise wenn ein Pulver unter dem Druck seines eigenen Gewichts gelagert wird.



"Im Allgemeinen sind kohäsive Pulver, die in der Regel ineffizient verpackt sind und daher mehr Luft enthalten, komprimierbarer als weniger kohäsive Pulver."

Einige Pulver sind inkompressibel, während das Volumen anderer Pulver leicht verringert wird. Zurück zu dem vorherigen Beispiel: Kristallzucker ist relativ inkompressibel. Im Gegensatz dazu führt das Ausüben einer konsolidierenden Spannung auf eine Mehlprobe zu einer signifikanten Änderung der Pulverbetthöhe und gleichzeitig zu einem Pfropfen mit erhöhter struktureller Festigkeit. Mehl ist relativ komprimierbar.

Es gibt Zusammenhänge zwischen Kompressibilität und Fließverhalten, obwohl diese nicht so eindeutig sind, wie es einige traditionelle Testmethoden vermuten lassen. Pulver, die eine hohe Kompressibilität aufweisen, neigen dazu, in einem Zustand geringer Spannung durch eine ineffiziente Packungsstruktur gekennzeichnet zu sein, und dies ist meistens symptomatisch für relativ zusammenhängende Pulver. Im Gegensatz dazu neigen nicht-kohäsive Pulver dazu, viel weniger komprimierbar zu sein.

Es ist dieses Prinzip, das die traditionellen Schüttdichtemethoden und ihre Verwendung zur Messung der Fließfähigkeit untermauert. Es sollte jedoch beachtet werden, dass diese Methoden auf einer uniaxialen Verzögerung (oder einem Gewindeschneiden) beruhen, um eine Volumenänderung zu induzieren. Obwohl sie traditionell als „Kompressibilitätstests“ bezeichnet werden, sollte dieser Begriff nicht mit der Kompressibilität verwechselt werden, die durch die Anwendung einer externen Kraft hervorgerufen wird. Der auf diese Weise aus Dichtemessungen abgeleitete Durchfluss kann irreführend sein und ist weit weniger empfindlich als die direkte Durchflussmessung.

Permeabilität

Die Leichtigkeit, mit der Luft durch ein Pulverbett geleitet werden kann, hängt von der Schüttgutdurchlässigkeit des Pulvers ab (nicht zu verwechseln mit der zuvor erwähnten Belüftung). Im Allgemeinen neigen Pulver mit einer großen Partikelgröße aufgrund der großen Kanäle, die zwischen Partikeln bestehen, durch die Luft leicht hindurchtreten kann, zu einer hohen Permeabilität. Pulver, die kleine Partikel enthalten, können einen höheren relativen Luftgehalt oder einen geringeren Feststoffanteil oder eine geringere Schüttdichte aufweisen. Aufgrund der kleineren Zwischenräume und der schlecht verbundenen Lufttaschen ist der Widerstand des Schüttguts gegenüber dem Luftstrom jedoch höher.

Die Permeabilität wird auch von anderen Pulvereigenschaften beeinflusst, wie der Menge der vorhandenen feinen Partikel, der Form der Partikel und ihren Oberflächeneigenschaften. Darüber hinaus hängt die Permeabilität des Pulvers von dem Ausmaß der Kompression ab, dem das Pulver ausgesetzt ist. Pulver, die stark komprimierbar sind, neigen dazu, infolge von Verfestigung größere Änderungen in ihrer Permeabilität aufzuweisen. Im Gegensatz dazu zeigen Pulver, deren Packungsstruktur sich bei einer Konsolidierungsbelastung in geringerem Maße ändert, eine konstantere Permeabilität. Es ist daher ratsam, die Permeabilität über einen Bereich von Konsolidierungsspannungen zu bestimmen.

Permeabilitätsmessungen helfen zu quantifizieren, wie leicht ein Pulver belüftet oder entlüftet wird, und identifizieren Materialien, die das Potenzial haben, sehr schnell von flüssigem zu festem Verhalten überzugehen (oder umgekehrt), was für einen Prozess durchaus problematisch sein kann.
Wenn ein relativ rieselfähiges Pulver belüftet wird, kann es seinen Zustand beibehalten, so dass es den Prozess auf völlig unkontrollierte Weise „überflutet“. Andererseits kann sich ein Pulver, das leicht Luft verliert, schnell in ein unbewegliches Material verwandeln, das schlecht fließt.
Füll- und Kompressionsprozesse sind besonders sensibel, wenn es um Permeabilität geht, da die Luft im Werkzeug oder in der Form schnell ausgestoßen und durch Partikel ersetzt werden muss. Eine geringe Permeabilität des Pulvers schränkt den Luftrückfluss zwischen den

Partikeln ein, da die Partikel die Düse füllen und die Füllrate somit stark beeinflusst ist.

Während der Tablettenkompression hängt die Fähigkeit der Luft, während des Kompressionsschritts aus dem in der Düse enthaltenen losen Pulver auszutreten, stark von den mechanischen Eigenschaften der Tablette und unerwünschten Eigenschaften wie Laminierung und Verkappung ab.

Die Relevanz der Permeabilität ist relativ leicht zu erkennen, wenn es um Fluidisierungsprozesse und andere Anlagenvorgänge wie die pneumatische Förderung geht, bei denen Luft (oder ein anderes Gas) eine hervorgehobene Rolle spielt. Die Luftmenge in einem Pulver ist jedoch typischerweise unkontrolliert und kann sich während der Routineverarbeitung erheblich ändern. Pulver können sich leicht ansammeln und Luft verlieren, beispielsweise beim Entladen aus einem Gefäß oder wenn sie sich unter ihrem eigenen Gewicht absetzen müssen. Bei einigen Pulvern führt dies zu einer drastischen Verhaltensänderung.

Mit freundlicher Genehmigung von Solids Handling Technology

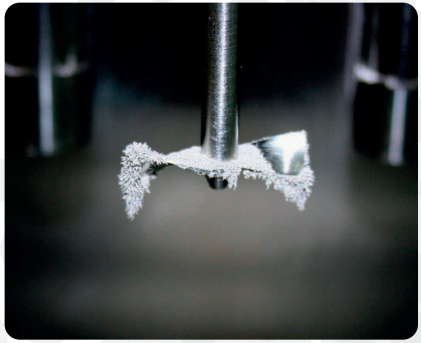
„Pulver können absichtlich belüftet werden oder während der routinemäßigen Verarbeitung einfach Luft aufnehmen oder abgeben. Bei dem Verlust der Prozesskontrolle können Überschwemmungen zu kostspieligen Problemen führen.“

Elektrostatische Aufladung

Die an einem Computerbildschirm haftenden Partikel sind ein hervorragendes Beispiel für den Einfluss elektrostatischer Aufladung. Einige Partikel können leicht aufgeladen werden, wodurch sich das Kräfteverhältnis innerhalb des Pulvers und des Aufprallverhaltens ändern. Pulver sind jedoch in der Regel elektrisch isoliert. Das einfache Erden eines geladenen Pulvers ändert also wenig an seinem Verhalten. Es ist aus Sicherheitsgründen üblich, Verarbeitungsgeräte zu erden. Diese Maßnahme sollte jedoch nicht zur Beseitigung der Ladungsentwicklung im Schüttgutpulver getroffen werden. Eine weitaus effektivere Methode ist die Optimierung des Wassergehalts im Pulver. Wasser wird normalerweise als schädlich angesehen, wenn es um den Pulverfluss geht. In einem elektrostatisch aufgeladenen Pulver wirkt Wasser jedoch als leitfähigeres Medium.

Auf diese Weise kann Wasser einen effektiven Weg zum Erden bieten, wodurch das System entladen wird und die Partikel möglicherweise ungehinderter fließen können.

In Anwendungen wie Pulverbeschichtung (Automobil) oder Toner (Laserdruck) sind die elektrostatischen Eigenschaften von Pulvern von grundlegender Bedeutung für den Erfolg der Anwendung. Hier ermöglicht die Oberflächenmodifizierung von Tonerteilchen, dass die elektrischen Eigenschaften des Massentoners so konstruiert werden, dass sie eine optimale Leistung für den beabsichtigten Prozess und die beabsichtigte Anwendung aufweisen.



"Elektrostatische Aufladung in Pulvern kann ihr Verhalten verändern."

Physikalische Änderungen

Bei der Verarbeitung von Pulvern ist es möglich, dass einige Eigenschaften der Partikel absichtlich oder unabsichtlich verändert werden. Beispielsweise variieren Partikel in Bezug auf ihre Affinität zu Wasser erheblich. Die Auswirkungen der Verarbeitung in feuchter Atmosphäre hängen daher von der Tendenz des Pulvers ab, Wasser aufzunehmen, und von der Leistung bei bestimmten Vorgängen, wie z.B. der Nassgranulierung. Darüber hinaus können Partikel, die mechanisch nicht robust sind, bei Beanspruchung einem Abrieb unterliegen. Abrieb kann zu einer Verringerung der Partikelgröße, zur Änderung der Partikelform, zu einer Vergrößerung der Oberfläche und zu einer Änderung der Oberflächeneigenschaften führen, die sich alle auf das Pulververhalten auswirken. In vielen Fällen kann ein Prozessschritt, der darauf ausgelegt ist, ein Ergebnis zu erzielen, gleichzeitig die Partikel- und Pulvereigenschaften unbeabsichtigt und irreversibel verändern. Ein häufiges Beispiel für solche Änderungen sind die Agglomerations- und Verdichtungsphänomene, die bei der Zufuhr eines kohäsiven Pulvers auftreten. Schneckenförderer werden verwendet, um die Fließgeschwindigkeit eines Fördermaterials in den nächsten Schritt eines Prozesses zu steuern, aber sie setzen ein Pulver einem hohen Maß an Scherung und Verdichtung aus. Infolgedessen besitzen bestimmte Pulver nach dem Durchlaufen der Zuführung sehr unterschiedliche Eigenschaften, obwohl dies vielleicht gar nicht beabsichtigt ist.

"Partikel können bei Belastung Abrieb ausgesetzt sein, was zu einer Verringerung der Partikelgröße und einer Änderung der Form und Oberfläche führt."

„Die Vielfalt des Pulververhaltens lässt sich nicht mit nur einer Messmethode und schon gar nicht mit einer einzigen Zahl erfassen. Die Verwendung eines facettenreichen Ansatzes bei der Pulverprüfung gilt heute als die produktivste Strategie.“

Der Mythos einer einzigen Zahl

Pulver werden getestet, um eine Vielzahl von Fragen zu beantworten. Dies können sein:

- Ergibt diese Mischung hochwertige Tabletten, wenn sie im Direktkompressionsverfahren hergestellt werden?
- Kann ich sicher sein, dass diese Pulverbeschichtung in der Anlage meines Kunden gut flüssig wird?
- Wird dieses neue Rohmaterial in meinem vorhandenen Mixer eine gute Mischungsgleichmäßigkeit erzielen?
- Wie genau muss ich die Lagerbedingungen für diesen Rohstoff kontrollieren?
- Was ist der optimale Wassergehalt, der während der Granulierung erforderlich ist, um optimale Eigenschaften des Endprodukts sicherzustellen?

Dies sind nur einige der vielen Hunderten von Fragen, die von der Community der Pulverhersteller gestellt werden.

Das Pulververhalten ist komplex und facettenreich, und es ist erforderlich, dieses Verhalten im Kontext vieler verschiedener Verarbeitungsumgebungen zu verstehen. Es ist daher unmöglich, Pulver mit nur einer einzigen Zahl oder einer einzigen Technik ganzheitlich zu beschreiben. Es ist wie der Versuch, eine Person mit einem einzigen Adjektiv zu beschreiben. Eine einfache Messung wie das Hausner-Verhältnis gibt nur einen kleinen Einblick in das Verhalten, es ist jedoch unrealistisch das für eine effiziente Verarbeitung erforderliche, Wissen aus einer einzigen Analyse zu ziehen.

ABSCHNITT 3

Pulverfließfähigkeit im Fokus

Die Art und Weise, in der die Pulver fließen, ist wohl ihre bestimmende Eigenschaft. Die Fließfähigkeit spielt in vielen Prozessen eine Rolle und ist häufig das Problem, das bei Fragen der Verarbeitungseffizienz im Mittelpunkt steht. In diesem Abschnitt werden wir uns eingehender mit den Mechanismen der Wechselwirkung zwischen Partikeln befassen und wie sich diese auf die Fließeigenschaften des Pulvers auswirken.

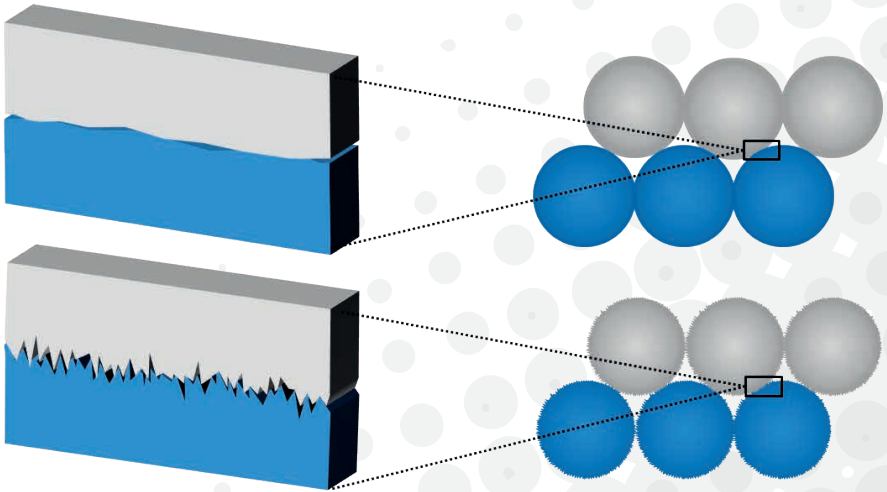
Wenn Pulver fließen, bewegen sich die Partikel in ihnen relativ zueinander. Die Mechanismen, die die Leichtigkeit dieser Bewegung definieren, sind:

- Reibung - zwischen Partikeln und zwischen Partikeln und Geräteoberflächen
- Mechanische Verriegelung - in Bezug auf die Form der Partikel
- Flüssigkeitsüberbrückung - führt zu Kapillareffekten
- Kohäsion - Wechselwirkungen zwischen Partikeln aufgrund von Elektrostatik und Van-der-Waals-Anziehung
- Gravitationseffekte - stehen in direktem Zusammenhang mit der Dichte und Größe der Partikel

Reibung

Glatte Partikel neigen aufgrund der geringeren Reibung an den Kontaktpunkten dazu, relativ leicht zueinander zu gleiten. Ebenso wird der Reibungsgrad zwischen Partikeln und der Wand der Prozessausrüstung durch die Oberflächeneigenschaften sowohl der Partikel als auch des Konstruktionsmaterials beeinflusst.

Die Oberflächenrauheit und auch die chemischen Eigenschaften des Materials können die Reibungswechselwirkungen beeinflussen.

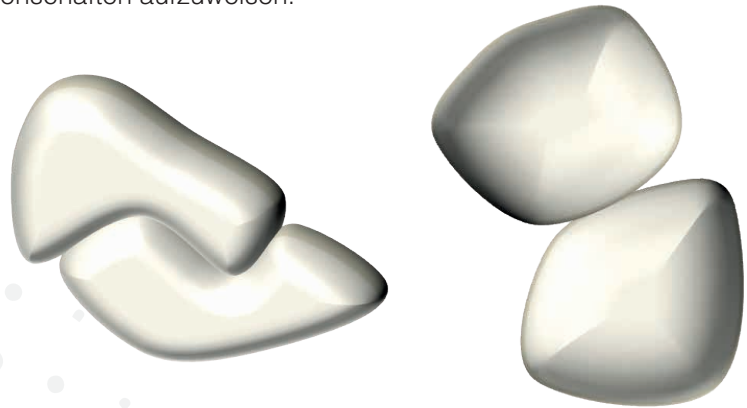


„Partikel mit einer glatteren Oberfläche weisen im Allgemeinen eine geringere Reibungswechselwirkung auf und fließen leichter als solche, die rauer sind, vorausgesetzt, alle anderen Merkmale sind identisch."

Mechanische Verriegelung

Partikel mit einer komplementären Form können zu einer erheblichen mechanischen Verzahnung führen. In diesem Fall werden die Partikel einer weiteren Bewegung stark widerstehen, selbst wenn ihre Oberflächenreibung gering ist. Wenn die Partikelmorphologie jedoch sphärischer ist, ist die mechanische Verzahnung aufgrund der abgerundeten Natur der Partikel weniger einflussreich.

In diesem Fall ist es wahrscheinlicher, dass die Partikel aneinander vorbeischauen, obwohl ihre Wechselwirkungen durch andere Mechanismen wie Reibung beeinflusst werden. Es ist im Allgemeinen der Fall, dass Pulver, die Partikel mit unregelmäßiger Form umfassen, dazu neigen, schlechtere Fließeigenschaften aufzuweisen.



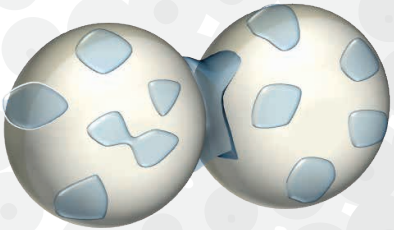
"Partikel einer bestimmten Form können mechanisch ineinandergreifen und dem Fluss widerstehen."

Flüssigkeitsüberbrückung

Wenn es um die Fließfähigkeit des Pulvers geht, wird die adsorbierte Feuchtigkeit allgemein als negativ empfunden. Dies ist nicht immer der Fall, aber eine Flüssigkeitsüberbrückung kann den Durchfluss beeinträchtigen. In ein Pulver eingebrachte Flüssigkeiten neigen dazu, die Oberfläche der Teilchen zu benetzen und Flüssigkeitsbrücken zu bilden, die die freie Bewegung eines Teilchens zu einem anderen hemmen.

Dieser Effekt wird bei der Nassgranulierung ausgenutzt, bei der mit Wasser einzelne Pulverteilchen zu einem leichter zu handhabenden Granulat mit besseren Kompressionseigenschaften gebunden werden. Andernorts kann das unkontrollierte Eindringen von Wasser die Materialqualität erheblich beeinträchtigen, die Verarbeitbarkeit beeinträchtigen und das Zusammenbacken fördern und somit die Produktivität verringern. Eine Flüssigkeitsbrücke kann auch zwischen Pulverteilchen und den Wänden der verarbeitenden Geräte auftreten, was zu weiteren Herausforderungen führt.

Wie bereits erwähnt, kann Wasser jedoch auch dazu beitragen, elektrostatische Ladungen abzuleiten und die Fließeigenschaften zu verbessern. Die Herausforderung besteht darin, sicherzustellen, dass das Pulverschüttgut genügend Wasser enthält, um die Wirkung der Elektrostatik zu minimieren, jedoch nicht so viel, dass sich zwischen den Partikeln Kapillarbindungen bilden, die die Fließfähigkeit verringern.

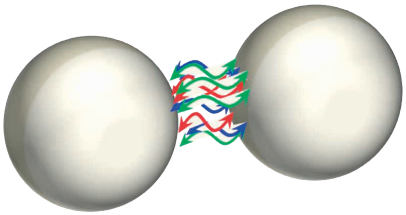


"Flüssigkeit hat die Fähigkeit Partikel zu überbrücken und die Partikelunabhängigkeit zu verringern."

Interpartikuläre Kohäsionskräfte

Die Eigenkraft der interpartikulären Anziehungskräfte (oft als Kohäsionskräfte bezeichnet) ergibt sich aus einer Kombination der Van-der-Waals-Kräfte und der elektrostatischen Aufladung der Partikeloberfläche. Dies sind in der Regel Zugkräfte, die die Partikel in der Nähe ihrer Nachbarn halten und die unabhängige Partikelmobilität hemmen. Sie führen zur Bildung von Agglomeraten und können die Ursache für viele Verarbeitungs- und Qualitätsprobleme sein.

Die absoluten Werte der Partikelkräfte können in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung der Partikel, ihrer Form und Oberflächentextur, dem Wassergehalt und der Verarbeitungsgeschichte stark variieren. Sie können sich auch im Laufe der Zeit ändern, wenn Pulver sich zu entspannen scheinen, wenn die elektrostatische Aufladung nachlässt (z. B. nach einem Mischprozess mit hoher Scherkraft). Kohäsionskräfte sind möglicherweise die schwierigste aller Teilchen-Teilchen-Wechselwirkungen und lassen sich nur schwer messen und modellieren. Ihr Einfluss dominiert jedoch das Pulververhalten in vielen Prozessen und Anwendungen, insbesondere dort, wo das Pulver nicht komprimiert ist und fließen muss. Prozessabläufe wie Befüllen, Mischen, Fördern und Anwendungen wie Trockenpulverinhalatoren werden alle von der Kohäsionsfestigkeit des Pulvers bestimmt. Es ist daher unerlässlich, dass diese Kräfte gut verstanden und genau quantifiziert werden.



"Interpartikuläre Kräfte wirken zwischen sich berührenden Partikeln und Partikeln in unmittelbarer Nähe."

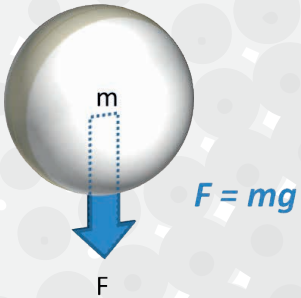
Gravitation

Bisher haben wir in diesem Abschnitt Kräfte betrachtet, die die Unabhängigkeit von Teilchen zu Teilchen einschränken. Im Allgemeinen ist das Fließverhalten des Pulvers umso schlechter, je stärker der Einfluss dieser Kräfte ist. In Pulvern mit hoher Kohäsion, unregelmäßiger Morphologie und hoher Oberflächenreibung kann jedoch ein Fließen beobachtet werden, so dass eindeutig eine signifikante motivierende Kraft vorhanden ist, die eine Bewegung der Partikel bewirkt. Diese Kraft wird durch die Erdbeschleunigung aufgebracht.

Die Hauptkraft, die auf ein lose gepacktes stationäres Teilchen wirkt, ist der Schwerkraft geschuldet → das Gewicht. Daher hängt die Fähigkeit eines Partikels, zu fließen, insbesondere in Pulvern, die nicht konsolidiert sind, stark von der Stärke der Gravitationskraft ab, welche auf es einwirkt. Aus diesem Grund neigen Pulver, die große Partikel enthalten oder aus einem Material mit hoher Dichte bestehen, dazu, besser zu fließen, wenn sie lose gepackt sind, da die individuelle Masse des Partikels und damit die auf ihn einwirkende Gravitation hoch sind.

Das Kräfteverhältnis zwischen allen einschränkenden Kräften und der antreibenden Schwerkraft bestimmt, ob sich Partikel unabhängig bewegen können oder ob sie als Teil eines stärkeren Agglomerats existieren. Im letzteren Fall wird der Volumenstrom durch die Masse des Agglomerats und seine Beziehung zu den umgebenden Agglomeraten beeinflusst.

Es gibt ein weit verbreitetes Missverständnis, dass Pulver mit kleiner Partikelgröße stärkere Kohäsionskräfte aufweisen, dies ist aber nicht unbedingt der Fall. In diesem Szenario sind die auf das Partikel wirkenden Gravitationskräfte gering, da die Partikelmasse gering ist und daher die relative Größe der Kohäsionskraft zur Gravitationskraft hoch ist, obwohl der absolute Wert der Kohäsionskraft gering sein könnte.



„F = mg, wobei g die Erdbeschleunigung ist. Gravitationskraft ist oft die einzige auf das Partikel wirkende Antriebskraft.“

Ein Pulver, das aus größeren Partikeln besteht, könnte stärkere Kohäsionskräfte aufweisen, die zwischen Partikeln wirken. Da die Partikelmasse jedoch hoch ist, dominiert die Gravitationskraft und die Partikel können unabhängig voneinander fließen.

Im Allgemeinen gilt für lose gepackte Pulver Folgendes:

- Die Gravitationskraft ist größer als alle einschränkenden Kräfte, die Partikel sind beweglich und das Pulver fließt gut

  Ein extremes Beispiel wäre ein Pulver, das große, kugelförmige Partikel mit einer Oberfläche mit geringer Reibung und guter elektrischer Leitfähigkeit enthält.

- Die Gravitationskraft ist schwächer als alle einschränkenden Kräfte, Partikel sind unbeweglich und Pulver agglomeriert und fließt schlecht

  Ein extremes Beispiel wäre ein Pulver, das kleine, unregelmäßig geformte Teilchen mit hoher Oberflächenenergie, hoher Oberflächenreibung und einer Form von Bindemittel wie überschüssigem Wasser oder Fett enthält.

Natürlich gibt es eine unendliche Anzahl von Möglichkeiten zwischen diesen beiden Extremen, und dies wird durch die Tatsache weiter erschwert, dass im Partikelmaßstab jede Kraft in Abhängigkeit von der Umgebung, der das Pulver ausgesetzt ist, variabel und veränderbar ist.

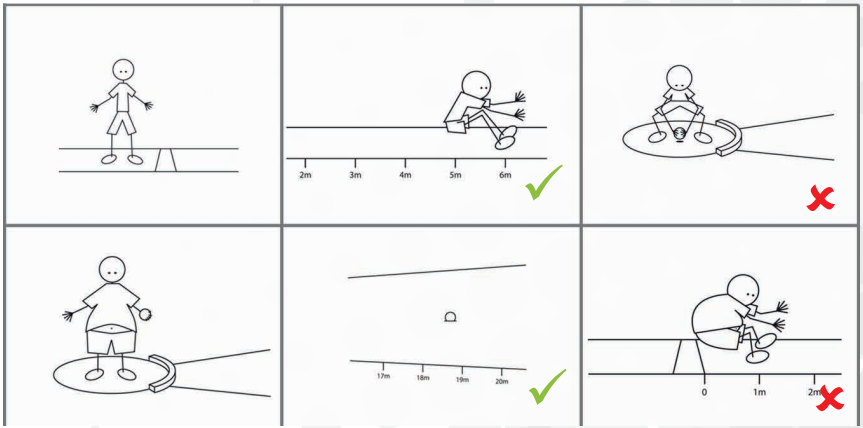
ABSCHNITT 4

Die Prozessumgebung

Für die meisten Pulverhersteller ist das Pulververhalten nicht von akademischem Interesse, sondern häufig eine tägliche Herausforderung. Wenn Pulver verarbeitet werden, werden sie in einer Vielzahl von Arbeitsschritten unterschiedlichen Belastungen und Umgebungsbedingungen ausgesetzt, einschließlich:

- Trichtern
- Granulieren
- Mahlen
- Komprimieren
- Beschicken
- Trocknen
- Extrudieren
- Mischen
- Fördern
- Füllen

Pulver sind an sich weder gut noch schlecht, können jedoch für verschiedene Situationen unterschiedlich geeignet sein.



„Pulver haben wie Sportler unterschiedliche Eigenschaften, die sie für unterschiedliche Prozesse und Anwendungen unterschiedlich geeignet machen. Die Auswahl und Konfiguration einer Prozessoperation, die gut zu den von Natur aus gegebenen Eigenschaften eines Pulvers passt, sichert den Erfolg.“

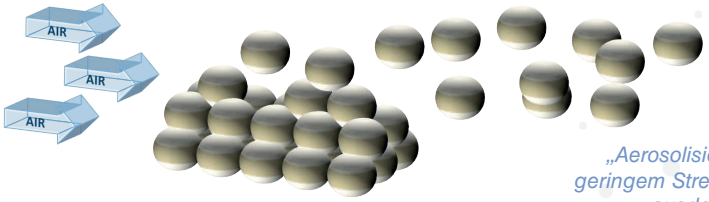
“Um zu verstehen, wie sich ein Pulver in einem Prozess verhält, wird es am besten unter Bedingungen getestet, die die Verarbeitungsumgebung simulieren.”

4

Die Entwicklung eines optimierten Pulverprozesses setzt voraus, dass die spezifischen Eigenschaften des Pulvers und die Anforderungen des Prozesses bekannt sind und sichergestellt ist, dass beide kompatibel sind. Wenn nicht, muss eines oder müssen beide modifiziert werden, um langfristig eine effiziente Verarbeitung und ein qualitativ hochwertiges Produkt zu erzielen. In diesem letzten Abschnitt werden wir uns eingehender mit der Verarbeitungsumgebung und deren Einfluss auf die Produkteigenschaften und -qualität befassen.

Beachten Sie die Umgebung und die Beanspruchung eines Pulvers, das aus einem gut gefüllten Trichter austritt. Der Pulverfluss wird durch die Schwerkraft induziert und die Flussraten sind im Allgemeinen im Vergleich zu anderen Prozessen relativ niedrig. Das Pulver wird durch das Gewicht des darüber befindlichen Materials verfestigt, abhängig von seiner Verweilzeit möglicherweise über einen längeren Zeitraum. Dieses Gewicht legt dem Pulver direkt über dem Auslass eine mittelschwere bis hohe Beanspruchungsumgebung auf. Es ist wichtig, auch die Reibung zwischen Pulver und Trichterwand nicht zu vernachlässigen. Zum Zeitpunkt der Entladung wird ein Ventil am Boden des Trichters geöffnet, und die gleiche Verfestigungsspannung, die das Pulver während der Lagerung verdichtet hat, zwingt das Pulver nun dazu, durch das Ventil zu fließen.

Durchfluss aus einem Trichter: Geringe Durchflussrate, starke Belastung des Pulvers



„Aerosolisierung: Pulver unterliegt geringem Stress und kann sich somit ausdehnen und verflüssigen“

In dieser Umgebung sind Pulver, die komprimierbar sind, anfälliger für Änderungen ihres Verhaltens als Folge des auferlegten Gewichts des Pulverbetts. Eine Kombination aus Pulver und Konstruktionsmaterial, die zu einer geringen Reibung an der Trichterwand führt, ist vorteilhaft für die Verbesserung des Durchflusses, ebenso wie relativ geringe Kräfte zwischen den Partikeln. Unter Belastung werden Partikel näher zusammengedrückt, so dass Reibungskräfte und mechanisches Ineinandergreifen die Mechanismen sind, die das Strömungsverhalten bestimmen. Kohäsionskräfte können existieren, sind aber im Gegensatz zu den anderen mechanischen Wechselwirkungen vernachlässigbar.

Daher sind die folgenden Informationen besonders relevant, wenn es darum geht, das Pulververhalten in dieser Umgebung zu bewerten oder vorherzusagen:

- Schereigenschaften des Pulvers bei mäßiger bis hoher Beanspruchung
- Wandreibung zwischen dem Pulver und dem Material, aus dem der Trichter besteht
- Daten zur Kompressibilität und Dichte
- Luftdurchlässigkeit, insbesondere wenn der Auslass des Behälters an eine Übergaberutsche oder anderes Equipment angeschlossen ist, welches den Rückfluss von Luft verringert

Vergleichen Sie die Trichteranwendung mit dem, was beispielsweise während der Aerosolisierung eines Pulvers, der pneumatischen Förderung, der Pulverbeschichtung oder der Arzneimittelabgabe über einen Trockenpulverinhalator geschieht. In diesen Situationen ist die äußere Druckspannung, die auf das Pulver einwirkt, gering oder gar nicht vorhanden. Wird durch die Probe Luft gesogen, besteht die Möglichkeit eine partikelübergreifende Schmierung, eine Belüftung oder sogar eine Ausdehnung des Pulvers in einen Strom einzelner Partikel zu erzielen.

Die relevanteren Fragen, die gestellt und beantwortet werden müssen, sind:

- Wie hoch ist die Kohäsionskraft des Pulvers (da dies die Reaktion auf die Belüftung stark beeinflusst)?
- Wie verändert sich das Fließverhalten des Pulvers beim Belüften?
- Fluidisiert das Pulver?
- Wenn ja, wie hoch ist die minimale Fluidisierungsgeschwindigkeit für dieses Pulver?
- Sind die Partikel robust oder verschleißen sie?

Daher müssen bei dieser Anwendung die verschiedenen Pulver nach ganz anderen Kriterien beurteilt werden als in einer Trichterumgebung. In diesem spannungsarmen Bereich bestimmen Kohäsionskräfte eher das Fließverhalten als Mechanismen, die auf einer engeren Partikelnähe beruhen. Es ist unwahrscheinlich, dass ein stark kohäsives Pulver leicht fließt oder eine gleichmäßige Fluidisierung und somit fortschreitende Dispersion zeigt. Kohäsive Pulver weisen jedoch häufig eine geringe Permeabilität auf und neigen daher dazu, während eines Belüftungsprozesses katastrophal zu versagen, was zu einer energiereichen Dispersion führt, die für die Anwendung von Vorteil sein kann. Dennoch muss der optimale Dispersionsmechanismus in Bezug auf die spezifische Anwendung berücksichtigt werden.

In der Tat bringt jeder Prozess oder jede Operationseinheit eine andere Kombination von Pulvereigenschaften in den Fokus. Nehmen Sie als weiteres Beispiel den Transport. Hierbei kann eine Verfestigung aufgrund von Vibrationen sowie eine Belastung durch normale Beanspruchung zu Problemen führen, während Anbackungen auftreten können, wenn das Pulver unter ungeeigneten Bedingungen gelagert wird. Während des Befüllens wird der Prozess durch die Fähigkeit des Pulvers definiert, unter Schwerkraft schnell und gleichmäßig zu fließen, häufig bei geringer Belastung, sowie durch die Fähigkeit, Luft schnell freizusetzen.

Das Erkennen der Auswirkungen, welche von der Verarbeitungsumgebung her rühren, ist von grundlegender

“Die Abstimmung von Pulver und Prozess ist für die langfristige Maximierung der Produktionseffizienz von entscheidender Bedeutung.”

Bedeutung, um das Verständnis des Pulververhaltens in eine bessere Produktionsleistung umzusetzen. Wie die vorangegangene Diskussion verdeutlicht, gibt es eine einzigartige Reihe von Pulvereigenschaften, die die Leistung in einem bestimmten Prozess oder in einer bestimmten Umgebung bestimmen. In der Regel ist es mehr als eine Eigenschaft, und deren Kombinationen variieren von Anwendung zu Anwendung.

Hier schlägt der Eine-einzige-Zahl-Ansatz zur Pulverprüfung fehl. Die Komplexität des Verhaltens und das Erfordernis sensibler, differenzierender und prozessrelevanter Informationen zeigen, dass Eine-einzige-Zahl-Testtechniken kaum bzw. gar nicht hilfreich sind.

Im Gegensatz dazu liefert die facettenreiche Charakterisierung Erkenntnisse, die für eine gute Prozess-Pulver-Übereinstimmung erforderlich sind, unabhängig von Branche, Anwendung oder Pulver.

Darum geht es letztendlich beim Charakterisieren und Verstehen von Pulvern. Der Versuch, ein Pulver zu verarbeiten, das für die Verarbeitungsanlagen ungeeignet und / oder für ein qualitativ hochwertiges Endprodukt ungünstig ist, ist eine ständige Herausforderung, während eine gut abgestimmte Pulver-Prozess-Kombination zu langfristiger, rentabler Produktivität, hoher Leistung und Effizienz beiträgt.

Copyright GEA Avapac 2014

ABSCHNITT 5

Zusammenfassung

- Pulver sind mehrkomponentige Schüttgüter aus Feststoffen, Flüssigkeiten und Gasen.
- Infolgedessen weisen sie ein komplexes Verhalten auf, das nicht allein durch die Eigenschaften der Partikel vorhergesagt werden kann.
- Diese Komplexität macht es schwierig, Pulver zu verarbeiten und zu messen, führt aber gleichzeitig zu einer Reihe von industriell nützlichen Verhaltenseigenschaften.
- Das Verhalten eines Pulvers ist eine Funktion seiner natürlichen Eigenschaften und der Umgebung, der es ausgesetzt ist. Deshalb ist die Verarbeitungsumgebung eine zusätzliche Variable, die bei der Bestimmung des Pulververhaltens berücksichtigt werden muss.
- Durch die Messung einer Reihe von Pulvereigenschaften werden diejenigen identifiziert, die für eine bestimmte Anwendung von entscheidender Bedeutung sind. Dies trägt dazu bei, eine gute Prozess-Pulver-Kombination sicherzustellen.
- Die Verträglichkeit von Pulver und Verfahren ist für eine langfristige, effiziente Herstellung und ein qualitativ hochwertiges Produkt von entscheidender Bedeutung.

freemantechnology
a micromeritics® company

Globales Hauptquartier
Freeman Technology Ltd
1 Miller Court
Severn Drive
Tewkesbury
Gloucestershire
GL20 8DN
Großbritannien

+44 (0)1684 851 551
germany@freemantech.co.uk

www.powderflow.com

Freeman Technology® ist ein registriertes Warenzeichen von of Freeman Technology Ltd
Freeman Technology Ltd. ist eine Firma der Micromeritics Instrument Coorperation
Urheberrechte © 2016 Freeman Technology