|  |
| --- |
| **Охлаждение материала при сверхтонком измельчении**  **полимеров, пищевых продуктов и взрывоопасных веществ**  **Автор:** Игнатов Владимир Иванович  **Содержание:**  1.Выделение тепла при измельчении и его влияние на помол  2.Охлаждение камеры измельчения и других элементов мельницы  3.Проток воздуха через камеру измельчения, как способ охлаждения  4.Особенности измельчения пищевых продуктов  5.Охлаждение материала перед измельчением  6.Охлаждение мельницы протоком воздуха  7.Обоснование охлаждения проточного воздуха  8.Способы и оборудование для охлаждения воздуха  9.Особенности охлаждения воздуха |

|  |
| --- |
|  |
| **1.Выделение тепла при измельчении и его влияние на помол**  Известен факт, что в процессе измельчения материалов энергия, затрачиваемая на снижение крупности материала, увеличивается пропорционально росту суммарной площади образуемой поверхности частиц, то есть в квадратичной зависимости (обратно пропорционально снижению квадрата радиуса частицы).  Особенно эта зависимость проявляется при производстве порошков: при переходе размеров частиц ниже 100мкм. Ведь площадь поверхности частиц крупностью несколько мкм, содержащихся в 1см3, составляет десятки м2, то есть увеличивается в миллионы раз.  Если учесть, что большая часть затрачиваемой на измельчение энергии переходит в тепло, то не удивительно, что при производстве порошков мы имеем значительный нагрев материала в мельнице. Наибольший процент энергии (до половины) переходит в тепло при истирательном методе измельчения (из-за его низкого КПД), наименьший – при ударном и резательном. Очевидно, что для различных материалов оптимальными являются различные способы измельчения, но можно с уверенностью сказать, что в большинстве конструкций мельниц присутствует сочетание различных способов измельчения.  Высокая температура отрицательно влияет не только на свойства некоторых измельчаемых материалов (например, термопластические полимеры расплавляются), но и на саму мельницу, приводя к температурным поводкам металлов, из которых она изготовлена (изменяются конструктивные параметры мельницы, зазоры и т.п.).  Высокая температура также ухудшает свойства смазки подшипниковых узлов приводов, снижая срок их службы. Усложняется диагностика состояния мельницы. Например, трудно становится выделить на фоне нагрева мельницы от измельчаемого материала нагрев привода мельницы вследствие выхода из строя подшипника. Поэтому все мельницы тонкого и сверхтонкого измельчения в том или ином виде используют охлаждение своих узлов.  **2.Охлаждение камеры измельчения и других элементов мельницы**  Распространено мнение, что наиболее эффективным является охлаждение непосредственной зоны создания высокой температуры, то есть камеры измельчения мельницы.  Речь идет об объеме, в котором на измельчаемый материал воздействуют рабочие органы мельницы:  -шары (шаровая, планетарная, роликовая мельницы, атритор и т.п.),  -ротор (молотковая, роторная, дисковая, роторно-вихревая мельницы),  -воздух (струйная мельница),  -валки (валковые, шредерные, шнековые измельчители).  Процесс охлаждения реализуется через создание жидкостной «рубашки» внутри всех поверхностей камеры, а иногда и внутри рабочих органов (например, ротора, валков и т.п.). В качестве охлаждающей жидкости наибольшее распространение получила вода или тосол (если для повышения интенсивности теплосъема оправданно охлаждение поверхностей до отрицательных температур), закольцованные через специальные холодильники или градирни. В случае роторно-вихревых мельниц с вертикальным валом, охлаждение подается в обечайку камеры, верхнюю и нижнюю крышки (которая одновременно является классифицирующей диафрагмой).  Для снижения воздействия температуры на конструкции мельницы иногда идут на непосредственное охлаждение отдельных узлов (например, корпуса подшипникового узла, редуктора и т.п.). При наличии в конструкции линии циркуляции масла с маслостанцией, производится охлаждение картера редуктора или масляного бака.  Однако требуется отметить, что метод охлаждения камеры измельчения имеет свои пределы. Он наиболее эффективен именно для охлаждения конструкций мельницы, а не материала. Для объяснения этого утверждения можно привести следующие аргументы. В большинстве высоконагруженных и поэтому высокоэффективных мельниц для повышения интенсивности (удельного воздействия мельницы на материал), камеры имеют наименьший объем из возможных вариантов, диктуемых конструкцией. Вследствие этого площадь внутренней поверхности камеры измельчения, как правило, не превосходит 1м2 даже в мельницах относительно большой (до 1 тонны в час) производительности. При этом скорость охлаждения пылевоздушной среды в камере пропорциональна площади охлаждаемой поверхности камеры и разности температур пылевоздушной среды и охлаждаемой поверхности. Таким образом, у современных мельниц сверхтонкого помола нет пути интенсификации охлаждения материала через увеличение площади внутренней поверхности камеры измельчения.  Путь интенсификации теплопередачи через снижение температуры охлаждающей жидкости, протекающей в «рубашке» в стенках камеры, также имеет ограничение.  Во-первых, это дорого стоит (снизить температуру охлаждающей жидкости).  Во-вторых, ограничение накладывает поступление в мельницы наружного (то есть теплого, а значит с высокой относительной влажностью) воздуха. Внутри камеры влага оседает на охлаждаемых поверхностях в зонах с наименее интенсивным движением материала. Это явление начинает проявляться, если разница температуры пылевоздушной среды и внутренней охлаждаемой поверхности камеры превышает несколько десятков градусов. Часто (со временем) такие налипания материала приводят к «зарастанию» мельницы или, как минимум, к изменению конфигурации камеры, к изменению настроек мельницы, что, в конечном счете, сказывается на качестве помола.  Зарастание может привести к снижению теплоотвода, так как между охлаждаемой поверхностью и пылевоздушной смесью (измельчаемым материалом) образуется прослойка из налипшего материала. Зарастание также может перевести процесс измельчения ударом в процесс измельчения истиранием, когда зазоры между рабочими органами и камерой достигнут предельно малых значений.  Истирание, имеющее более низкий кпд по сравнению с ударом, еще больше увеличивает интенсивность выделения тепла при помоле.  **3.Проток воздуха через камеру измельчения, как способ охлаждения**  Одним из решений снижения температуры в камере измельчения является вывод образующегося в процессе помола тепла путем организации протока воздуха через мельницу. Можно организовать поступление воздуха в камеру вместе с загружаемым исходным материалом (через питатель), а также через специально организованное отверстие в камере измельчения. Обычно такое отверстие специально предусматривается для ввода в мельницу инертного газа, который требуется иногда при измельчении легковоспламеняющихся и взрывоопасных материалов.  Кроме отвода тепла, дополнительным эффектом, которым обладает проток воздуха через камеру измельчения, является эффект подсушки измельчаемого материала в мельнице, чему способствует повышение температуры материала при помоле.  Надо заметить, что ввод воздуха в процесс измельчения имеет несколько отрицательных эффектов.  Во-первых, он приводит к увеличению энергозатрат на измельчение вследствие расхода части энергии не на измельчение материала, а на разгон воздуха. Надо помнить, что 1м3 воздуха имеет массу 1 кг и рабочему органу мельницы все - равно, что разгонять до необходимой для измельчения скорости: 1 кг измельчаемого материала или 1 кг воздуха.  Во-вторых, готовый продукт получается в виде пылевоздушной смеси, от которой его надо отделить, вводя в линию помола пылеулавливающее устройство (фильтр). Стоимость фильтра существенно зависит от объема проходящего через него воздуха и от крупности частиц, которые надо выделить. Именно поэтому линии для сверхтонкого измельчения на основе струйных мельниц часто оказываются менее конкурентными по стоимости (по кап.затратам) по сравнению с альтернативными вариантами оборудования: они имеют относительно низкий КПД (из-за «паразитарного» разгона воздуха для разгона материала), высокую стоимость (для отделения сверхтонких частиц требуется фильтр с очень большой фильтровальной поверхностью – дорогая ткань и большая площадь).  В-третьих, большой проток воздуха через мельницу трудно настроить так, чтобы не происходило выброса из камеры измельчения частиц крупностью выше требуемой (движение пылевоздушной смеси обладает высокой турбулентностью, которая по-разному влияет на частицы, которые из-за формы имеют разную парусность). Поэтому проток воздуха через мельницу, как правило, требует установки после мельницы воздушного классификатора для выделения недомола и возврата его обратно в мельницу.  В роторно-вихревых и аналогичных им мельницах (молотковых, роторных и т.п.), работающих без протока (входа и выхода) воздуха, энергия тратится на поддержание определенной скорости воздуха в камере, а не на разгон его с нуля.  Использование протока воздуха через эти и другие (не струйные) мельницы имеет меньше отрицательных эффектов по причине того, что преследует цель не разгона материала для измельчения (разгон с нулевой скорости до необходимой требует большого расхода воздуха), а диктуются только соображениями:  -теплоотвода  -или улучшением вывода продукта готовой крупности из процесса измельчения.  То есть количество воздуха, подаваемого в камеру, строго дозируется и не превышает необходимого для снижения температуры.  В результате, как правило, КПД линий на основе роторных мельниц более высокое и для выделения готового продукта из пылевоздушной среды требуется на порядок менее дорогие фильтры (меньшей площади).  **4.Особенности измельчения пищевых продуктов**  В отличие от минеральных продуктов и полимеров пищевые продукты, как правило, имеют более низкую допустимую температуру нагревания, то есть требуют более щадящих условий помола.  При этом для получения сверхтонких порошков пищевых материалов, как правило, требуется большие энергозатраты (в первую очередь связанные с волокнистой структурой растительного сырья), значительная часть которых при измельчении переходит в тепло.  Дополнительно к этой особенности, пищевые материалы при любом уровне сушки имеют остаточную (внутреннюю) влажность, которая сосредоточенна в клетках. Внутриклеточная влага выходит наружу, когда клетка разрушается или нагревается. Обычно это происходит на крупности ниже 20мкм и при температурах выше 60-100 градусов (зависит от материала).  В результате нагрева пищевых материалов и разрушения клеток процесс выделения внутренней влаги и «зарастание» мельницы происходит намного интенсивнее и чаще, что требует особого подхода, особых технологий.  **5.Охлаждение материала перед измельчением**  Может показаться, что решением проблемы помола полимеров и пищевых продуктов (то есть материалов нестойких к высоким температурам) может быть охлаждение материалов перед вводом в мельницу. Например, с помощью флюидизационных холодильников, широко используемых в процессе замораживание мелконарезанных фруктов и ягод.  С точки зрения физики это вполне объяснимо. Пластичные материалы, коими являются полимеры и пищевые продукты, при снижении температуры переходят в хрупкое состояние, которое способствует их эффективному разрушению любыми способами измельчения. Однако при таком замораживании внутренняя влага никуда не девается, а просто переходит в замороженное состояние и будет в процессе помола выделяться из измельчаемого материала с теми же последствиями (залипание внутри камеры).  Во-вторых, вызывает сомнение эффективность такого теплоотвода с точки зрения снижения температуры в камере измельчения. Дело в том, что полимеры и пищевые продукты имеют низкую теплоемкость, то есть эффективно отнять у них тепло не удается. Нагрев до плюсовой температуры исходных частиц материала произойдет при первом же ударе в камере измельчения.  Обычно замораживание применяется при помоле трудноизмельчаемых материалов (например, полимеров, таких как сивилен или резины), если требуется получить крупность порядка 0.5-1мм. Если необходима меньшая крупность, замораживание материала на входе менее эффективно. Впрочем, любая меньшая крупность получается из большей, поэтому повышение эффективности на первой стадии (до 1мм) измельчения будет полезна в любом случае.  **6.Охлаждение мельницы протоком воздуха**  Как уже было сказано выше, охлаждение внутренних поверхностей камеры измельчения и рабочих органов мельниц недостаточно для эффективного измельчения полимерных материалов и пищевых продуктов по двум причинам.  1) Первая причина - малая площадь охлаждаемой поверхности и, как следствие, недостаточная скорость отвода тепла от пылевоздушной смеси при ее движении вдоль стенок камеры.  2) Вторая причина состоит в следующем. Попытка снизить температуру охлаждаемых поверхностей за счет использования тосола и снижения температуры охлаждающей жидкости до минус 5-10 градусов вызывает резкое снижение температуры воздуха вблизи холодной поверхности, соответственно резко снижается относительная влажность воздуха. Влага, растворенная в воздухе и вскрытая при разрушении материала (внутренняя остаточная влажность материала) выделяется из пылевоздушной смеси и оседает на холодной поверхности камеры, вызывая при этом залипание и зарастание мельницы. Организация протока воздуха через мельницу значительно улучшает условия помола. Решается вопрос отвода тепла и пара. Пар образуется в процессе выхода влаги из материала и нагрева ее теплом, выделяемым при измельчении.  Однако надо отметить, что при вводе воздуха в процесс измельчения существенно (в 2 раза и больше) возрастают размеры и стоимость линии из-за организации системы выделения готового продукта из пылевоздушной смеси.  **7.Обоснование охлаждения проточного воздуха**  Снизить расход воздуха через мельницу можно путем его предварительного охлаждения. При этом получается тройной эффект.   1. Для охлаждения пылевоздушной среды до приемлемой для пищевых и полимерных порошков температуры требуется отнять у этой смеси энергию, которая образуется в процессе помола. Как известно (и указывалось выше) скорость теплоотвода зависит от разности температур и от площади поверхности. Холодный воздух отводит тепло от порошка на несколько порядков эффективнее, чем охлаждаемые внутренние поверхности потому, что площадь поверхности частиц, находящихся в камере, чрезвычайно высока: от первых до десятков квадратных метров в 1 см3 при снижении крупности частиц до 10мкм и ниже. При этом пылевоздушная смесь (например, в роторно-вихревых мельницах) интенсивно перемешивается, что также способствует интенсивному теплопереносу. 2. При снижении температуры существенно уменьшается относительная и абсолютная влажность воздуха, то есть уменьшается содержание в нем влаги. 3. Такой воздух может существенно подсушивать материал, так как при помоле пылевоздушная смесь нагревается и влага переходит в растворенное в воздухе состояние (пар), который потом выводится вместе с измельченным материалом из мельницы и оседает на частицах или отделяется от пылевоздушной смеси и выводится в атмосферу через фильтр.   По многочисленным публикациям охлаждение материала перед измельчением, а особенно ввод охлажденного воздуха в пылевоздушную смесь, существенно (в несколько раз) увеличивает производительность мельницы при помоле полимерных материалов и пищевых порошков. Air-cooler (охладитель воздуха) присутствует в любой линии, предлагаемой западными компаниями для помола пищевых продуктов и полимерных материалов.  Зависимость производительности мельницы от температуры исходного материала и температуры в камере измельчения не афишируется производителями линий для помола пищевых продуктов и полимеров и является их НОУ-ХАУ. Для разных продуктов требуется разная температура охлаждения. Для некоторых достаточно протока воздуха комнатной температуры. Другие невозможно эффективно измельчить без охлаждения жидким азотом. Например, для эффективного измельчения резины, сивилена и т.п. необходимо охлаждение воздуха до минус 50-70 градусов.  При этом энергия, затрачиваемая на охлаждение, будет сравнима с энергией, идущей на измельчение. Однако экономические показатели мельницы (например, энергозатраты на помол 1 кг продукта) за счет роста производительности будут примерно в 2 раза выше, чем без охлаждения.  **8.Способы и оборудование для охлаждения воздуха**  Как показало изучение проблемы охлаждения воздуха, существует несколько решений, каждое из которых оптимально для конкретной температуры.  1) Охлаждение наружного (с комнатной температуры +20) воздуха до минус 20-30 градусов оптимально решать охладителями на хладонах (фреонах).  2) Охлаждение того же воздуха (+20) до минус 50-100 градусов оптимально решать с помощью турбодетандеров (турбин, быстро расширяющих предварительно сжатый и осушенный воздух).  3) Охлаждение ниже минус 100 градусов оптимально вести с помощью сжиженных газов (азота, например).  Капитальные затраты (стоимость охладителей) при одной и той же производительности по воздуху удваиваются при переходе от п.1) к п.2) и далее к п.3). Энергозатраты на охлаждение будут возрастать в той же пропорции.  Например, охладитель на фреонах с производительностью 300-500м3 в час и температурой выходящего воздуха минус 20-30 градусов стоит порядка 2 млн.рублей и имеет энергопортебление порядка 40квт.  Охладитель той же производительности с турбодетандером и охлаждением воздуха до минус 50-100 градусов стоит порядка 3-4 млн.рублей и требует уже мощности 100квт.  Охладитель, имеющий на выходе сжиженный воздух (азот), стоит уже порядка 6-8 млн.  **9.Особенности охлаждения воздуха**  Как уже указывалось выше, единственной особенностью охлаждения воздуха является выделение (выпадение) из него растворенной в нем воды. Таковы свойства относительной влажности воздуха: чем ниже температура, тем меньше воды в воздухе растворено. Таким образом, охладители в процессе снижения температуры воздуха, позволяют получить дополнительный эффект: осушение воздуха, то есть снижение количества растворенной в нем воды.  Однако, если при охлаждении воздуха до +3 градусов выделяемая из воздуха вода превращается в жидкость и удаляется из охладителя самотеком. То при более низкой температуре она будет намерзать на охлаждающих поверхностях, снижая теплоотдачу.  Аналогичный эффект (выпадение снега) получается при смешивании газа с более низкой температурой (например, жидкого азота) с газом с более высокой температурой с целью получения средней температуры.  Однако последний процесс нельзя рассматривать в качестве реализуемого потому, что затраты на снижение температуры (особенно на сжижение газов) растут нелинейно и дешевле получать воздух более высокой температуры сразу, не переохлаждая его, а не путем смешивания с газом более низкой температуры.  Эффект намерзания воды из воздуха в охладителях убирается вводом в линии охлаждения специальных устройств – осушителей, в первую очередь абсорбционных.  Подсушка воздуха при охлаждении важна для процесса сверхтонкого измельчения еще и тем, что по мере роста температуры пылевоздушной смеси в мельнице, выделяемая из измельчаемого материала влага будет переходить в сухом воздухе в растворенное состояние (при повышении температуры в мельнице).  То есть сухой воздух будет забирать в себя выделяемую из материала влагу и снижать эффект налипания материала в мельнице. Кроме этого при подаче сухого воздуха становится возможным существенное охлаждение рубашки камеры измельчения без опасения, что на ней будет выделяться влага, растворенная в воздухе (см. п.2 и п.6. настоящей статьи). |