

ΟΔΗΓΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ · 8 ΛΕΠΤ. · 24 ΑΥΓΟΥΣΤΟΥ 2026

Φράγματα σε επίπεδο κυψέλης και δομοστοιχείου: σύγκριση χαρτιού ινών, μικροπορωδών πολυστρωματικών φύλλων και αερογέλης

Ποιο υλικό φράγματος αποτρέπει πιο αξιόπιστα τη διάδοση μεταξύ κυψελών και δομοστοιχείων; Τεχνική σύγκριση χαρτιού ινών, μικροπορωδών πολυστρωματικών φύλλων και σύνθετων υλικών αερογέλης για σταθερά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες.

Γιατί η πρώτη γραμμή άμυνας ξεκινά από την κυψέλη

Η θερμική διαφυγή (thermal runaway) ξεκινά πάντα από μία μεμονωμένη κυψέλη. Το αν θα εξελιχθεί σε τοπικά περιορισμένο συμβάν ή σε ολική πυρκαγιά ολόκληρου του κοντέινερ αποθήκευσης κρίνεται στα πρώτα δευτερόλεπτα και λεπτά – και συγκεκριμένα από το αν η γειτονική κυψέλη θα αναγκαστεί να απορροφήσει την εισερχόμενη θερμότητα ή όχι. Ακριβώς εδώ παρεμβαίνουν τα θερμικά φράγματα σε επίπεδο κυψέλης και δομοστοιχείου (module): λεπτές διαχωριστικές στρώσεις ανάμεσα στις κυψέλες, καθώς και διαχωριστικές πλάκες ανάμεσα στα δομοστοιχεία, που περιορίζουν τη θερμική ροή έως ότου η εκλυόμενη ενέργεια απαχθεί ή κατανεμηθεί.

Για τους μελετητές και τους εγκαταστάτες σταθερών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες (BESS) το θέμα έχει διπλή σημασία. Πρώτον, μέθοδοι δοκιμών όπως το UL 9540A αξιολογούν τη συμπεριφορά διάδοσης από την κυψέλη, μέσω του δομοστοιχείου, έως τη μονάδα (unit) – ένα αποτελεσματικό φράγμα σε επίπεδο κυψέλης βελτιώνει το αποτέλεσμα σε όλα τα υπερκείμενα επίπεδα. Δεύτερον, ο διαθέσιμος χώρος στα σύγχρονα ικριώματα (racks) είναι εξαιρετικά περιορισμένος: κάθε χιλιοστό υλικού φράγματος ανταγωνίζεται την ενεργειακή πυκνότητα. Η επιλογή υλικού αποτελεί επομένως πάντα συμβιβασμό μεταξύ θερμικής απόδοσης, πάχους, μηχανικής συμπεριφοράς και κόστους.

Σημείωση: Ο κατάλογος απαιτήσεων για ένα φράγμα κυψελών — Ένα φράγμα ανάμεσα στις κυψέλες πρέπει να κάνει περισσότερα από το να μονώνει: πρέπει να αντέχει για σύντομο χρονικό διάστημα στα θερμά σωματίδια και αέρια μιας αστοχίας κυψέλης, να μονώνει ηλεκτρικά, να ακολουθεί μηχανικά, σε όλη τη διάρκεια ζωής, την κυκλική «αναπνοή» των κυψελών (swelling) και ταυτόχρονα να διατηρεί τη μορφή του. Κανένα υλικό δεν ικανοποιεί από μόνο του τέλεια όλα τα σημεία – γι’ αυτό στην πράξη κυριαρχούν οι συμβιβασμοί και οι πολυστρωματικές διατάξεις.

Χαρτί ινών: το ανθεκτικό κλασικό υλικό

Χαρτιά και κουβέρτες από ίνες υψηλής θερμοκρασίας – κλασικές αργιλοπυριτικές ίνες (ASW) ή βιοδιαλυτές ίνες πυριτικών αλκαλικών γαιών (AES) – είναι εδώ και δεκαετίες καθιερωμένα στην κατασκευή βιομηχανικών κλιβάνων. Τα πλεονεκτήματά τους: πολύ υψηλές θερμοκρασίες ταξινόμησης (ανάλογα με τον τύπο ίνας, τυπικά στην περιοχή περίπου 1.100–1.400 °C), καλή διαθεσιμότητα, εύκολη διαμόρφωση με αποκοπή σε πρέσα ή κοπή και μέτρια τιμή. Ως διαχωριστική στρώση ανάμεσα στα δομοστοιχεία ή ως επένδυση των περιβλημάτων των δομοστοιχείων προσφέρουν αξιόπιστες υπηρεσίες.

Τα όριά τους βρίσκονται στη θερμική αγωγιμότητα και στη μηχανική συμπεριφορά. Τα χαρτιά ινών μονώνουν αισθητά χειρότερα από τα μικροπορώδη υλικά ή τις αερογέλες, επομένως χρειάζονται μεγαλύτερο πάχος για την ίδια προστασία. Επιπλέον, υπό μόνιμη συμπίεση χάνουν μέρος της ικανότητας επαναφοράς τους – για θέσεις όπου η διόγκωση των κυψελών πρέπει να παραλαμβάνεται ελαστικά είναι επομένως, από μόνα τους, μόνο υπό όρους κατάλληλα. Στις κλασικές αργιλοπυριτικές ίνες πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη η ταξινόμησή τους ως δυνητικά καρκινογόνων, η οποία συνεπάγεται ειδικά μέτρα προστασίας κατά την επεξεργασία και την αποξήλωση· οι βιοδιαλυτές ίνες δεν έχουν αυτό το ζήτημα.

- Τυπική χρήση: διαχωριστικές στρώσεις ανάμεσα στα δομοστοιχεία, επένδυση περιβλημάτων δομοστοιχείων και racks, οπίσθια στρώση σε κανάλια απαγωγής αερίων
- Πλεονεκτήματα: υψηλή αντοχή στη θερμοκρασία, εύκολη επεξεργασία, χαμηλό κόστος
- Μειονεκτήματα: υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα, περιορισμένη ικανότητα επαναφοράς, ζήτημα σκόνης ινών ανάλογα με τον τύπο ίνας

Μικροπορώδη πολυστρωματικά φύλλα: μέγιστη μονωτική ικανότητα ανά χιλιοστό θερμικής προστασίας

Τα μικροπορώδη μονωτικά υλικά αποτελούνται από πυρογενή πυριτία με αδιαφανοποιητές και επιτυγχάνουν μεγέθη πόρων μικρότερα από τη μέση ελεύθερη διαδρομή των μορίων του αέρα. Το αποτέλεσμα είναι θερμική αγωγιμότητα που σε υψηλές θερμοκρασίες είναι χαμηλότερη από εκείνη του ακίνητου αέρα – κανένα άλλο υλικό της πράξης δεν μονώνει καλύτερα ανά χιλιοστό σε επαφή με θερμά αέρια. Οι θερμοκρασίες ταξινόμησης κυμαίνονται, ανάλογα με το προϊόν, συνήθως γύρω στους 1.000 °C. Ακριβώς αυτός ο συνδυασμός καθιστά τις μικροπορώδεις πλάκες και τα πολυστρωματικά φύλλα πρώτη επιλογή, όταν πρέπει να διατηρηθεί απότομη θερμοκρασιακή βαθμίδα σε ελάχιστο χώρο.

Το τίμημα είναι η μηχανική ευαισθησία: το υλικό είναι ευαίσθητο στη θλίψη και αποβάλλει σκόνη, γι’ αυτό πρακτικά χρησιμοποιείται πάντα με επικάλυψη – σφραγισμένο σε μεμβράνες, περιβεβλημένο με υαλοϋφασμα ή ως πολυστρωματικό φύλλο με επιφανειακές στρώσεις από μαρμαρυγία ή μεταλλικό φύλλο. Τέτοια πολυστρωματικά φύλλα συνδυάζουν τη μονωτική ικανότητα του μικροπορώδους πυρήνα με τη διηλεκτρική αντοχή και την αντοχή στη μηχανική διάβρωση από σωματίδια της επιφανειακής στρώσης. Για θέσεις με κυκλική συμπίεση – απευθείας ανάμεσα σε κυψέλες που «αναπνέουν» – το υλικό είναι αντίθετα ακατάλληλο, καθώς υπό εναλλασσόμενο φορτίο μπορεί να συμπυκνωθεί και να χάσει τη δομή του.

Σημείωση: Ο μαρμαρυγίας ως συμπλήρωμα — Οι πλάκες μαρμαρυγία (mica) διαθέτουν ό,τι λείπει από τους μικροπορώδεις πυρήνες: υψηλή μηχανική ακαμψία, εξαιρετική ηλεκτρική μόνωση και αντοχή σε ροές θερμών σωματιδίων. Στα πολυστρωματικά φράγματα ο μαρμαρυγίας αναλαμβάνει συχνά τη θερμή όψη, που δέχεται τα σωματίδια, ενώ ο μικροπορώδης πυρήνας διατηρεί τη θερμοκρασιακή βαθμίδα.

Σύνθετα υλικά αερογέλης: λεπτά, εύκαμπτα, σταθερά στη συμπίεση

Οι αερογέλες πυριτίας συγκαταλέγονται στα στερεά με τη χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα γενικώς· τα ινοπλισμένα σύνθετα υλικά αερογέλης επιτυγχάνουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος θερμικές αγωγιμότητες της τάξης των 0,015–0,02 W/(m·K). Για το επίπεδο της κυψέλης, ωστόσο, ενδιαφέρον έχει κυρίως ο συνδυασμός μονωτικής ικανότητας, μικρού πάχους και μηχανικής ενδοτικότητας: παρεμβύσματα αερογέλης πάχους λίγων

χιλιοστών μπορούν να αντέξουν για σύντομο χρονικό διάστημα πολύ υψηλές θερμοκρασίες φλόγας και ταυτόχρονα να παραλαμβάνουν ελαστικά την «αναπνοή» και τη διόγκωση των κυψελών επί χιλιάδες κύκλους, χωρίς να αναπτύσσουν αξιόλογη παραμένουσα παραμόρφωση από θλίψη (compression set).

Έτσι, τα σύνθετα υλικά αερογέλης καταλαμβάνουν τη θέση που δεν καλύπτουν το χαρτί ινών και τα μικροπορώδη πολυστρωματικά φύλλα: το άμεσο φράγμα από κυψέλη σε κυψέλη στα πρισματικά δομοστοιχεία και ανάμεσα σε κυψέλες τύπου pouch, όπου φράγμα και παρέμβυσμα συμπίεσης συμπίπτουν σε ένα εξάρτημα. Μειονεκτήματα είναι η υψηλότερη τιμή, η – ανάλογα με το προϊόν – περιορισμένη θερμοκρασία συνεχούς χρήσης σε σύγκριση με την κεραμική ίνα, καθώς και η πιθανή απελευθέρωση σκόνης, η οποία επίσης αντιμετωπίζεται με επικαλύψεις. Για διαχωρισμούς δομοστοιχείων μεγάλης επιφάνειας ή για επενδύσεις περιβλημάτων συχνά δεν αποτελούν, από οικονομική άποψη, την πρώτη επιλογή.

- Χαρτί ινών: μεγάλο θερμοκρασιακό περιθώριο, απαιτεί πάχος – κατάλληλο για τον διαχωρισμό δομοστοιχείων και για περιβλήματα
- Μικροπορώδες πολυστρωματικό φύλλο: η καλύτερη μονωτική ικανότητα ανά χιλιοστό, ευαίσθητο στη θλίψη – κατάλληλο για στατικά φράγματα σε στενό χώρο
- Σύνθετο υλικό αερογέλης: μονώνει πολύ καλά και απορροφά ελαστικά τη διόγκωση – κατάλληλο για τη θέση από κυψέλη σε κυψέλη
- Μαρμαρυγίας: ισχυρός μηχανικά και ηλεκτρικά, σχεδόν δεν μονώνει – κατάλληλος ως επιφανειακή στρώση σε σύνθετη διάταξη

Επιλογή στο έργο: από την περίπτωση φόρτισης στο αποδεικτικό

Η επιλογή υλικού δεν ξεκινά από το φύλλο τεχνικών δεδομένων (TDS), αλλά από την περίπτωση φόρτισης: ποια ποσότητα ενέργειας εκλύει η κυψέλη, πόσο διαρκεί η εκτόνωση των αερίων (venting), ποιες θερμοκρασίες και ροές σωματιδίων εμφανίζονται στο φράγμα και ποια μέγιστη θερμοκρασία επιτρέπεται να φτάσει η ψυχρή όψη, ώστε η γειτονική κυψέλη να μην εισέλθει στην κρίσιμη περιοχή; Από αυτές τις οριακές συνθήκες προκύπτουν το πάχος και η διαστρωμάτωση – συχνά ως πολυστρωματική σύνθετη διάταξη, που συνδυάζει μονωτικό πυρήνα, προστασία από σωματίδια και ηλεκτρική μόνωση.

Το αποδεικτικό της αποτελεσματικότητας παρέχεται τελικά από τη δοκιμή: οι δοκιμές διάδοσης (propagation test) σε επίπεδο κυψέλης και δομοστοιχείου, τυποποιημένες στη Βόρεια Αμερική μέσω του UL 9540A, δείχνουν αν το φράγμα σταματά πράγματι την εξάπλωση ή απλώς την καθυστερεί. Σημαντικό για τους φορείς εκμετάλλευσης: μια αλλαγή υλικού κατά τη διάρκεια ζωής του προϊόντος – για παράδειγμα για λόγους κόστους ή προμήθειας – μπορεί να θέσει υπό αμφισβήτηση την ισχύ των υφιστάμενων αποδεικτικών δοκιμών. Τα υλικά φράγματος ανήκουν επομένως στον έλεγχο αλλαγών της μελέτης ασφάλειας και όχι στην ελεύθερη προμήθεια.

Συχνές ερωτήσεις

Αρκεί ένα φράγμα σε επίπεδο κυψέλης, ώστε να παραλειφθούν τα μέτρα σε επίπεδο κοντέινερ;

Όχι. Τα φράγματα κυψελών μειώνουν την πιθανότητα διάδοσης, δεν αντικαθιστούν όμως ούτε τον θερμικό διαχωρισμό του κοντέινερ για σκοπούς πυροπροστασίας ούτε την ανίχνευση αερίων, την εκτόνωση πίεσης ή τα συστήματα κατάσβεσης. Αποτελεσματική προστασία προκύπτει μόνο από τη συνεργασία όλων των επιπέδων – κυψέλη, δομοστοιχείο, rack και χώρος.

Γιατί δεν χρησιμοποιείται παντού αερογέλη, αφού μονώνει καλύτερα;

Τα σύνθετα υλικά αερογέλης είναι αισθητά ακριβότερα από το χαρτί ινών και αναδεικνύουν τα πλεονεκτήματά τους κυρίως εκεί όπου απαιτούνται ταυτόχρονα μικρό πάχος και καλή συμπεριφορά σε συμπίεση – δηλαδή απευθείας ανάμεσα στις κυψέλες. Για στατικούς διαχωρισμούς μεγάλης επιφάνειας, τα προϊόντα ινών ή τα μικροπορώδη πολυστρωματικά φύλλα αποτελούν συχνά την οικονομικότερη και εξίσου αποτελεσματική λύση.

Τι σημαίνει η «αναπνοή» των κυψελών για την επιλογή του φράγματος;

Οι κυψέλες ιόντων λιθίου διαστέλλονται κατά τη φόρτιση και με τη γήρανση. Ένα φράγμα ανάμεσα στις κυψέλες πρέπει να παραλαμβάνει ελαστικά αυτή τη μεταβολή πάχους, χωρίς να συμπυκνώνεται μόνιμα – διαφορετικά

χάνει μονωτική ικανότητα και η δέσμη των κυψελών χάνει την καθορισμένη προένταση. Τα υλικά με μικρή παραμένουσα παραμόρφωση από θλίψη έχουν εδώ σαφές πλεονέκτημα.

Συζητήστε μαζί μας το έργο σας

Απάντηση εντός 24 ωρών, τις εργάσιμες ημέρες.

info@sbs-rs.de

+49 89 541 960 200 **Διαβάστε online: www.sbs-rs.de/batteriespeicher/ratgeber/barriere-zelle-modul**