

L'AVVENTO DELLA NANOMECCANICA

Nicola M. Pugno^{1,2,3}

¹*Laboratory of Bio-Inspired & Graphene Nanomechanics, Department of Civil, Environmental and Mechanical Engineering, Università di Trento, via Mesiano, 77, I-38123 Trento, Italy.*

²*Center for Materials and Microsystems, Fondazione Bruno Kessler, Via Sommarive 18, I-38123 Povo (Trento), Italy.*

³*School of Engineering & Materials Science, Queen Mary University of London, Mile End Road, London E1 4NS, UK.*

nicola.pugno@unitn.it, <http://www.ing.unitn.it/~pugno/>

Accademia dei Lincei, Roma 10 Gennaio 2014.

Sommario

La Meccanica dei Solidi e delle Strutture ha una lunga storia ma è solo da pochi anni che, grazie a strumenti sempre più avanzati, possiamo osservare fenomeni meccanici alla scala nanoscopica. Sono così emersi nuovi fenomeni che hanno costretto anche a modificare la teoria classica e hanno quindi portato all'avvento di una nuova disciplina, quella della "Nanomeccanica", anche in Italia [1,2].

Un esempio rilevante di modifica nanoscopica di una teoria classica è nel campo della Meccanica della Frattura Lineare Elastica (LEFM), la teoria principe con la quale si studia la resistenza dei materiali. Con essa è possibile calcolare la resistenza di strutture reali e quindi contenenti delle fessure ("lunghe" e per definizione infinitamente acuminate). Tale teoria, pur rimuovendo il limite della teoria dell'Elasticità (assumendo rottura quando la tensione massima raggiunge un valore ultimo) di resistenza nulla per strutture fessurate, non è tuttavia ancora in grado di rimuovere il limite di resistenza infinita per strutture esenti da difetti e così non risulta affidabile anche nel caso di fessure "corte". Come riconciliare le due teorie e superarne i limiti citati? E' stato sufficiente rimuovere l'ipotesi di propagazione continua della fessura nel bilancio energetico di Griffith su cui la LEFM è basata, introducendo una lunghezza caratteristica (il quanto di frattura) e consentendoci così anche di calcolare la resistenza di nanostrutture come nanotubi o grafene contenenti qualche vacanza atomica [3]. E così si razionalizza anche come queste nanostrutture siano idealmente le più resistenti in assoluto (resistenza ultima nell'ordine dei 100GPa ovvero 100 volte quella dell'acciaio). Un cavo macroscopico di grafene o nanotubi (tollerante alla presenza del difetto) potrebbe permettere la realizzazione del sogno dell'elevatore spaziale [4].

Importante è il fatto che la fessura al di sotto di una certa dimensione caratteristica (il quanto di frattura; quando cioè la fessura è "corta") cessa di avere un effetto catastrofico, ovvero non propaghi. La nostra stessa vita è legata a questa capacità di tollerare le fessure da parte delle ossa. I materiali e le strutture biologiche possono così diventare estremamente tenaci (in grado di dissipare molta energia per unità di massa prima di rompersi); l'esempio più estremo è rappresentato dalla seta del ragno. Come ciò avvenga non è ancora chiarissimo, ma certo la gerarchia sempre presente in Natura e che l'uomo non è ancora in grado di controllare deve avere un ruolo fondamentale. In altri termini, a differenza dei compositi artificiali quelli naturali sono spesso composti da una matrice tenace e da inclusioni resistenti, ma queste sono a loro volta composte da sottoinclusioni ancora composite e così via; oggi sappiamo che in qualche caso questa strategia è benefica [5]. Anche la legge costitutiva dei materiali biologici è in contrasto con quella dei materiali artificiali. La prima è spesso "stiffening", ovvero il materiale biologico si irrigidisce sotto tensione, il contrario di quello che avviene nei materiali ingegneristici tradizionali, sempre "softening". Eppure sembra

che sia proprio la legge costitutiva “stiffening” della seta del ragno la chiave per la robustezza estrema della sua tela [6]; quindi strutture civili ispirate alla tela del ragno potrebbero risultare anticatastrofe.

La tolleranza alla presenza del difetto è anche la chiave per avere una grande resistenza adesiva da parte di ragni, insetti e specialmente dei gechi, gli animali basati sull’adesione con il rapporto superficie su volume più sfavorevole e che quindi hanno dovuto evolversi coi meccanismi adesivi più sorprendenti. Anche qui il segreto è nanoscopico, grazie ad una moltitudine di nanoscopiche spatoline, ognuna delle quali attiva una forza adesiva (di van der Waals) proporzionale al larghezza della stessa e non al suo spessore: dividendone quindi 1 in 100 più piccole porta ad un incremento della forza adesiva globale di un fattore 10 [7]. Ecco la necessità della miniaturizzazione dei contatti in questi animali. Al limite, con nastri di grafene, nanotubi o altre nanostrutture, potremmo realizzare tute da uomo ragno [8].

Con topologie nanostrutturate le foglie riescono viceversa a diventare antiadesive e autopulenti, un effetto oggi conosciuto come effetto loto. Anche col grafene si possono ottenere superfici conduttrici, estensibili e autopulenti [9]. Con la stessa strategia la Natura raggiunge anche il risultato antitetico della superidrofilia di una superficie. Superfici antiadesive potrebbero avere grande interesse applicativo, per esempio per evitare la formazione del ghiaccio sulle ali degli aerei [10].

Includendo le forze di van der Waals nelle analisi elastiche è stato possibile comprendere il perché i nanotubi all’interno di un fascio possano collassare senza pressione esterna e come ciò possa portare ad un incremento di resistenza [11] e il ruolo fondamentale delle stesse nei nano electro mechanical systems basati su nanotubi [12] o su nanoscroll di grafene [13].

La presentazione terminerà con un esempio pratico di come basti un semplice trucco strutturale per realizzare le fibre più tenaci del mondo. Superando i 100J/g del Kevlar e i 200J/g della seta del ragno, con dei nodi abbiano già ottenuto fibre in grado di dissipare oltre i 1000J/g [14].

Dettagli sul presente contributo possono leggersi nel riferimento divulgativo [15] o sui relativi Atti dell’Accademia.

Riferimenti

- [1] N. Pugno, *The Nanomechanics in Italy*. RESEARCH SIGNPOST (2007), ISBN: 978-81-308-0237-4.
- [2] N. Pugno, *Advanced and Bio-Inspired Nanomechanics*, International Centre for Mechanical Sciences, Luglio 18-12, 2011 (Lecturers: Nobel Laureate H. Kroto and Profs. R. Ruoff, H. Gao. S. Gorb, B. Persson, S. Keten and N. Pugno, Coordinator).
- [3] N. Pugno, R. Ruoff, *Quantized Fracture Mechanics*, PHILOSOPHICAL MAGAZINE (2004), **84/27**, 2829-2845.
- [4] N. Pugno. *The role of defects in the design of the space elevator cable: from nanotube to megatube*. ACTA MATERIALIA (2007), **55**, 5269-5279.
- [5] F. Bosia, T. Abdalrahman, N. M. Pugno, *Investigating the role of hierarchy on the strength of composite materials: evidence of a crucial synergy between hierarchy and material mixing*, NANOSCALE (2012), **4**, 1200-1207.
- [6] S.W. Cranford, A. Tarakanova, N. Pugno, M.J. Buehler, *Nonlinear material behaviour of spider silk yields robust webs*, NATURE (2012), **482**, 72-78.
- [7] M. Varenberg, N. Pugno, S. Gorb, *Spatulae structures in biological fibrillar adhesion*. SOFT MATTER (2010), **6**, 3269-3272.
- [8] N. Pugno, *Towards a Spiderman suit: large invisible cables and self-cleaning releasable super-adhesive materials*. J. OF PHYSICS – COND. MAT. (2007), **19**, 395001 (17pp).

- [9] J. Zang, Q. Wang, Q. Tu, S. Ryu, N. Pugno, M. Buehler, X. Zhao, *Multifunctionality and control of the crumpling and unfolding of large-area graphene*, NATURE MATERIALS (2013), **12**, 321-325.
- [10] E. Lepore, N. Pugno, *Superhydrophobic polystyrene by direct copy of a lotus leaf*. BIONANOSCIENCE (2011), **1**, 136-143.
- [11] N. Pugno, *The design of self-collapsed super-strong nanotube bundles*. J. OF THE MECHANICS AND PHYSICS OF SOLIDS (2010), **58**, 1397-1410.
- [12] C.H. Ke, N. Pugno, B. Peng, H.D. Espinosa, *Experiments and modeling of carbon nanotube NEMS device*. J. OF THE MECHANICS AND PHYSICS OF SOLIDS (2005), **53/6**, 1314-1333.
- [13] X. Shi, Y. Cheng, Nicola M. Pugno, H. Gao, *A translational nanoactuator based on carbon nanoscrolls on substrates*. APPLIED PHYSICS LETTERS (2010), **96**, 053115.
- [14] <http://www.technologyreview.com/view/514316/simple-trick-turns-commercial-polymer-into-worlds-toughest-fiber/>
- [15] N. Pugno, *Effetto Loto*, LE SCIENZE (2013), 537, 58-63.

Ringraziamenti

L'autore ringrazia il support da parte dell'European Research Council (ERC): ERC Starting (Consolidator) Grant Ideas 2011 BIHSNAM: "Bio-Inspired hierarchical super nanomaterials"; ERC Proof of Concept 2013-1 REPLICA²: "Large-area replication of biological anti-adhesive nanosurfaces"; ERC Proof of Concept 2013-2 KNOTOUGH: "Super-tough knotted fibers".