

自然科学奖公示：

项目名称	金属玻璃的形变与断裂机制
提名者	中国科学院沈阳分院
提名意见	<p>我单位认真审阅了该项目提名书及附件材料，确认全部材料真实有效，相关栏目符合填写要求。按照要求，我单位和完成人所在单位都已对该项目进行了公示，目前无异议。</p> <p>该项目通过引入“断裂方式因子”这一新参数，提出了统一拉伸断裂准则，揭示了金属玻璃的形变与断裂机制；在此基础上，发展了韧、脆两类金属玻璃的增韧机制，为金属玻璃的强韧化和作为结构材料的应用提供了科学依据。取得的主要创新性成果包括：</p> <p>1) 统一拉伸断裂准则：提出了统一拉伸断裂准则，将四个经典屈服/断裂准则有机地统一起来，并提出金属玻璃韧/脆性的定量评价参量-“断裂方式因子”，由此建立了各种不同材料强度与硬度之间的本征关系。</p> <p>2) 韧性金属玻璃增韧：剪切应变局域化是韧性金属玻璃（断裂方式因子较低）形变与断裂的核心机制。该项目从改变形变机制和促进多重剪切带萌生两个方面发展了金属玻璃的增韧方法。</p> <p>3) 脆性金属玻璃增韧：提出了脆性金属玻璃“波状解理断裂”的微观机制，揭示了动态破碎断裂的微观机制。并在镁基金属玻璃中通过引入第二相颗粒，改变其宏观断裂机制，有效地提高了脆性金属玻璃的强度与塑性。</p> <p>相关成果发表在 <i>Phys Rev Lett</i>、<i>Acta Mater</i> 等 SCI 收录期刊，在国内外产生了重要的影响，推动了高强度材料的断裂机制与强度理论研究。8 篇代表性论文被 <i>Science</i>、<i>Nature Mater</i>、<i>Nature Commun</i>、<i>Phys Rev Lett</i>、<i>Prog Mater Sci</i> 等国际期刊 SCI 论文他引 980 次。</p> <p>该项目技术创新，对照辽宁省自然科学奖授奖条件，提名该项目为 2019 年度辽宁省自然科学奖一等奖。</p>
项目简介	<p>不同于传统的晶态金属材料，合金熔体经过冷液态冻结形成的金属玻璃为非晶态性质，其原子堆垛与排列呈长程无序、短程有序的结构特征，无位错、晶界等晶体缺陷，从而拥有独特的物理、化学与力学性质，如超高强度、大弹性应变极限、耐腐蚀性和各向同性的磁学性能等，具有广阔的应用前景。该项研究通过引入“断裂方式因子”这一新参数，提出了统一拉伸断裂准则，揭示了金属玻璃的形变与断裂机制；在此基础上，发展了韧、脆两类金属玻璃的增韧机制，为金属玻璃的强韧化和作为结构材料的应用提供了科学依据。相关研究成果发表在《<i>Physical Review Letters</i>》和《<i>Acta Materialia</i>》等期刊上，得</p>

	<p>到国内外材料科学与固体力学领域专家陈国良院士、胡壮麒院士、白以龙院士、汪卫华院士、杨卫院士、高华健院士、C.T. Liu（刘锦川）院士、A. Inoue（井上名久）院士、U. Ramamurty院士、T.G. Langdon、F. Spaepen、M.A. Meyers、A.L. Greer、C.A. Schuh 和 E.J. Lavernia 等教授的高度评价与多次正面引用，8 篇代表性论文被 SCI 期刊论文他引 980，Web of Science 收录论文他引 1325 次。主要科学贡献如下：</p> <p>1、提出了统一拉伸断裂准则—“椭圆准则”，从理论上定量地解释了各种不同金属玻璃拉伸/压缩强度与断裂角度的差异，通过提出新的参数—“断裂方式因子”，将材料力学教科书中的四个经典屈服/断裂准则（最大正应力准则、Tresca 准则、Mohr-Coulomb 准则、von Mises 准则）有机地统一起来；其中，断裂方式因子作为衡量金属材料形变断裂机制的重要参数之一，为金属玻璃韧/脆性的定量评价提供了有效参量。同时，依据断裂方式因子的大小将材料的压痕变形形貌划分为塌陷、剪切与开裂三种类型，并建立了各种不同材料强度与硬度之间的本征关系。</p> <p>2、剪切应变局域化是韧性金属玻璃（断裂方式因子较低）形变与断裂的核心机制。该工作从改变形变机制和促进多重剪切带萌生两个方面发展了金属玻璃的增韧方法：（1）提出金属玻璃塑性变形稳定剪切台阶的概念，揭示出金属玻璃拉伸变形过程中，剪切与颈缩两种机制相竞争发生转变的尺寸效应；（2）首次发现圆柱试样高径比对压缩强度与塑性的影响规律，揭示了约束形变导致剪切带数量增加是改善金属玻璃塑性的本源；（3）开发出高断裂韧性的新型锆基金属玻璃，揭示出高断裂韧性金属玻璃裂纹扩展阻力的本质源于裂纹尖端多重剪切带萌生和裂纹偏转机制。</p> <p>3、根据脆性金属玻璃（断裂方式因子较高）的断裂表面特征，提出“波状解理断裂”的微观机制，并通过能量耗散理论定量地解释了波状解理断裂伴生的纳米条纹特征及动态破碎断裂的微观机制。同时，在镁基金属玻璃中通过引入第二相颗粒，形成复合结构，增强金属玻璃基体破碎断裂阻力，使其从宏观脆性断裂转变为韧性剪切断裂，有效地提高了脆性金属玻璃的强度与塑性。</p>
<p>客观评价</p>	<p>1. 对科学发现内容 1（代表性论文 1、2）的评价：</p> <p>(1) 北京科技大学陈国良院士和惠希东教授共同编著的国内第一本非晶合金专著《块体非晶合金》中，其中第 8.4.1 节关于非晶合金的断裂理论用 3 整页篇幅引用代表性论文 1 的力学分析与理论模型。</p> <p>(2) 美国加州大学圣迭戈分校 M.A. Meyers 教授在著名力学家、中国科学院院士白以龙院士和英国帝国理工学院 B. Dodd 教授所著的《Adiabatic Shear Localization: Frontiers and Advances》一书中，用一整页的篇幅介绍代表性论文 1 的研究工作，并指出“(非晶合金) 剪切断裂角度偏离 45° 的行为已经被</p>

张等[158]使用一个新的失效准则所解释。”(文献[158]为代表性论文 1)。

(3) 在物理领域顶级综述期刊 *Adv. Phys.* (55, 247-278, 2006) 上, 芬兰的 J. A. Åström 博士用半页篇幅对科学发现 1 作了重点介绍, 他指出: “选择一个合适的断裂准则是极其重要的, 关于该主题张与 Eckert [20]最近写了一篇引入瞩目的论文, 其中经典断裂准则 Tresca、von Mises、莫尔-库仑及最大正应力准则都可以用简单的椭圆应力准则进行统一。”此后 Åström 博士也在其多篇论文中将该准则作为模拟工作的理论基础。(文献[20]为代表性论文 1)。

(4) 中国科学院汪卫华院士在 *Prog. Mater. Sci.* (74, 211-307, 2015) 上用 3 整页篇幅对科学发现 1 做了重点评述, 其论文图 17 引自代表性论文 1。

(5) 美国佛罗里达大学 C. Suryanarayana 教授在 *Materials Today* 上对科学发现 2 介绍指出: “通过在 $Zr_{52.5}Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}Ti_5$ 中引入不同角度倾斜缺口以控制拉伸断裂面上的正应力, 屈等研究表明椭圆准则 [137] (可以统一四大经典准则, 即 Tresca 准则、von-Mises 准则、莫尔-库仑及最大正应力准则) 更加精确地预测了拉伸断裂行为”。(文献 137 为代表性论文 1)

(6) 代表性论文 1 在物理类顶级期刊 *Phys. Rev. Lett.* 上发表时, 审稿人给出了很高的评价: “这是一篇研究主题非常有意义的论文, 分析是令人惊讶地简单, 但我必须说虽然我在这个领域已近十年, 我却并未完全清楚明白, 我从这篇文章中学到了很多。这篇论文的内容很有意义, 毫无疑问对广大读者更有意义。”

(7) 香港工程科学院院士朱剑豪教授在其 *Corros. Sci.* (94, 142-155, 2015) 论文中评价并引用了科学发现 1 中关于强度-硬度一般关系的主要观点, 指出“一般来说, 材料的硬度与材料的强度成比例[40]”。(文献 40 为代表性论文 2)。

(8) 奥地利著名学者 H. Clemens 教授在 *Acta Mater.* (94, 205 - 213, 2015) 论文中指出: “文献[51]对于材料的强度与硬度关系进行了十分深入地探讨”。(文献[51]为代表性论文 2)。

(9) 欧洲科学院院士、英国皇家工程院院士 T. G. Langdon 教授在其论文 (*MSE-A*, 631, 201-208, 2015) 中指出: “金属材料硬度与其局部流变应力的正比关系已被很好地建立起来 [35-36]”。(其中文献[36]为代表性论文 2)。

2. 对科学发现内容 2 (代表性论文 3、4、5) 的评价:

(10) 美国工程院院士、中国工程院外籍院士 C.T. Liu 教授在其综述论文 (*J. Mater. Sci.*, 47, 55-67, 2011) 中指出: “基于实验观察, 临界剪切台阶的概念被提出[24]用来合理地理解非晶变形的尺寸效应。”(文献[24]为代表性论文 3)。

(11) 荷兰格罗宁根大学 J.T.M. de Hosson 教授和美国加州大学著名材料学家 J. R. Greer 在 *Prog. Mater. Sci.* (56, 654-724, 2011) 论文中引用介绍了科学发现 2 的内容, 指出: “关于拉伸延展性, 伍等人[219]呈现了一个关于尺寸依赖的剪切断裂和宏观拉伸塑

性的引人注目的研究。”(文献[219]为代表性论文 3)

(12) 英国剑桥大学 A.L. Greer 教授与美国马恩教授在 *Mater. Sci. Eng. - Reports* (74, 71-132, 2013) 上的论文对代表性论文 3、4 均进行了引用介绍, 并且其论文中的图 47 引自代表性论文 4。

(13) 中国科学院汪卫华院士和英国剑桥大学 A.L. Greer 教授在 *Nature Mater.* (5, 857-860, 2006) 上的论文指出: “文献[25]深入地研究了试样高径比对 Zr-基金属玻璃的压缩实验的影响。”(文献[25]为代表性论文 4)。

(14) 美国工程院院士、哈佛大学 F. Spaepen 教授与德国哥廷根大学 C.A. Volkert 教授在其 *J. Appl. Phys.* (103, 083539, 2008) 论文中指出: “这种偏差可能是由于压缩样品端部的限制作用的结果 [25]。”(文献[25]为代表性论文 4)

(15) 中国科学院汪卫华院士在其 *Science* (315, 1385, 2007) 论文中指出: “为了提高非晶合金的塑性人们进行了许多努力, 但主要集中在非晶合金复合材料制备上[6-9]。”(文献[7]为代表性论文 4)。

(16) 新加坡南洋理工大学教授、*Acta Mater.* 主编 U. Ramamurty 教授在其 *Acta Mater.* (144, 325-336, 2018) 论文中指出: “前人的研究表明剪切模量 G 在决定块体金属玻璃的韧性方面起到了重要的作用[26, 34, 35]。”(文献[35]为代表性论文 5)。

(17) 中国科学院汪卫华院士在其 *Nature Communication* (4, 2204, 2013) 论文中多次引用代表性论文 5, 指出: 金属玻璃的力学性能(尤其是塑性与韧性)对化学作用十分敏感, 并且引用了关于 H_{chem} 的计算方法。

(18) 中国科学院汪卫华院士在其综述论文 *Prog. Mater. Sci.* (74, 211-307, 2015) 中多次引用代表性论文 5, 指出: 贺等人系统研究了 Zr-Ti-Cu-Al 体系中化学因素对断裂韧性的影响, 研发出了纯金属玻璃中具有最高断裂韧性 KIC 的 Zr₆₁Ti₂Cu₂₅Al₁₂ 金属玻璃, 具有潜在的工程应用价值。

3. 对科学发现内容 3 (代表性论文 6、7、8) 的评价:

(19) 中国科学院白以龙院士在 *Int. J. Impact Eng.* (35, 704-716, 2008) 上指出 “随着载荷增加, 单一的局部剪切带迅速扩展并导致材料在没有明显塑性变形时沿主剪切带发生突发性断裂 [21]。”其文献[21]为代表性论文 6。

(20) 新加坡南洋理工大学教授、*Acta Mater.* 主编 U. Ramamurty 教授在其 *Acta Mater.* (80, 407-420, 2014) 论文中指出: “所有金属玻璃均展示出独有的断口表面特征[13-16]”(文献[16]为代表性论文 6)。

(21) 中国科学院汪卫华院士在其综述论文 *Prog. Mater. Sci.* (52, 540-596, 2007) 中指出: “原位形成的含有尺寸为 1-10 mm 均匀分布富 Fe 颗粒的 Mg 基金属玻璃在单向压缩时表现出高达 990 MPa 的断裂强度和 1.0% 的塑性延伸率[145]”(文献[145]为代表性论文 7)。

(22) 两位 *Acta Mater.* 主编 (美国麻省理工大学的 C.A. Schuh 教

授和新加坡南洋理工大学教授 U. Ramamurty 教授) 共同撰写的综述文章 *Acta Mater.* (55, 4067-4109, 2007) 中对代表性成果 7 中的结果进行了引用。

(23) 美国加州大学的 R.O. Ritchie 教授在 PNAS (106,4986-4991, 2009) 论文中指出:“近来开发出的原位金属玻璃基复合材料通过引入第二相阻止剪切带扩展的方式解决了金属玻璃塑性和韧性差的问题 [23-26]。”(文献[25]为代表性论文 7)。

(24) 中国科学院杨卫院士在其论文 *Int. J. Plasticity* (52, 540-596, 2007) 中指出:“近年来金属玻璃基复合材料被开发出来克服纯金属玻璃塑性差的问题[...Xu et al., 2005...]”(Xu et al., 2005 为代表性论文 8)。

(25) 美国田纳西大学 P.K. Liaw 教授在其论文 *Adv. Mater.* (18, 752-754, 2006) 中引用了代表性论文 7 关于强度的结果, 总结于图 2。

(26) 加州大学欧文分校常务副校长、中国政府“友谊奖”获得者 E.J. Lavernia 教授在其论文 *Acta Mater.* (61, 4414-4428, 2013) 中指出:“对比如 Zr 基及 La 基等大多数金属玻璃, Mg 基金属玻璃具有价格低、比强度高的优点[7, 8]。”(文献[8]为代表性论文 8)。

代表性论文专著目录 (不超过 8 篇)

序号	论文专著名称/刊名/作者	年卷页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表时间 (年月日)	通讯作者 (含共同)	第一作者 (含共同)	国内作者	SCI 他引次数	他引总次数	论文署名单位是否包含国外单位
1	Unified tensile fracture criterion/ <i>Physical Review Letters</i> /张哲峰、J. Eckert	2005 年 94 卷 094301	2005 年 3 月 11 日	张哲峰	张哲峰	张哲峰	89	93	是
2	General relationship between strength and hardness/ <i>Materials Science and Engineering A</i> / 张鹏、李守新、张哲峰	2011 年 529 卷 62-73 页	2011 年 9 月 8 日	张哲峰	张鹏	张鹏 李守新 张哲峰	236	253	否
3	Size-dependent shear fracture and global tensile	2009 年 57 卷	2009 年 1	张哲峰	伍复发	伍复发 张哲峰	99	102	是

	plasticity of metallic glasses/ <i>Acta Materialia</i> / 伍复发、张哲峰、S. X. Mao	257-266 页	月 1 日						
4	Effect of aspect ratio on the compressive deformation and fracture behaviour of Zr-based bulk metallic glass/ <i>Philosophical Magazine Letters</i> / 张哲峰、张辉、潘晓飞、J. Das、J. Eckert	2005 年 85 卷 513-521 页	2005 年 10 月 1 日	张哲峰	张哲峰	张哲峰 张辉 潘晓飞	96	97	是
5	Locating bulk metallic glasses with high fracture toughness: Chemical effects and composition optimization/ <i>Acta Materialia</i> / 贺强、Y.Q. Cheng、E. Ma、徐坚	2011 年 59 卷 202-215 页	2011 年 1 月 1 日	徐坚	贺强	贺强 徐坚	80	82	是
6	Wavy cleavage fracture of bulk metallic glass/ <i>Applied physics Letters</i> / 张哲峰、伍复发、高薇、谭军、王中光、M. Stoica、J. Das、J. Eckert、沈宝龙、A. Inoue	2006 年 89 卷 251917	2006 年 12 月 18 日	张哲峰	张哲峰	张哲峰 伍复发 高薇 谭军 王中光 沈宝龙	77	86	是
7	Mg-based bulk metallic glass composites with plasticity and high strength/ <i>Applied physics Letters</i> / 麻晗、徐坚、E. Ma	2003 年 83 卷 2793	2003 年 10 月 6 日	徐坚	麻晗	麻晗 徐坚	152	157	是
8	Mg-based bulk metallic glass composites with plasticity and gigapascal strength/ <i>Acta Materialia</i> / 徐映坤、麻晗、徐坚、E. Ma	2005 年 53 卷 1857-1866 页	2005 年 4 月 1 日	徐坚	徐映坤	徐映坤 麻晗 徐坚	151	155	是
主要完成人情况			摘自辽宁省自然科学奖提名书中“主要完成人情况表”中姓名、排名、行政职务、技术职称、工作单位、完成单位、对本项目贡献。						

	<ol style="list-style-type: none">1. 姓名：张哲峰<ul style="list-style-type: none">• 排名：第一• 行政职务：材料疲劳与断裂实验室主任• 技术职称：研究员• 工作单位：中国科学院金属研究所• 完成单位：中国科学院金属研究所• 对本项目贡献：项目负责人，提出了项目学术思想，组织了项目实施，全面参与了项目实验与理论分析工作，对《重要科学发现》中各项科学发现均做出了创造性贡献，是第 1、4、6 篇代表性论文的第一作者与通讯作者，第 2、3 篇论文的通讯作者。2. 姓名：徐坚<ul style="list-style-type: none">• 排名：第二• 行政职务：无• 技术职称：研究员• 工作单位：中国科学院金属研究所• 完成单位：中国科学院金属研究所• 对本项目贡献：项目中部分工作的负责人，提出了项目中部分工作的学术思想，负责项目中部分内容的组织实施，参与了项目中部分内容的实验设计、数据分析、论文撰写与发表工作，对《重要科学发现》中的第 2 项科学发现的部分工作做出创造性贡献，对第 3 项科学发现做出主要创造性贡献，是第 5、7、8 篇代表性论文通讯作者。3. 姓名：张鹏<ul style="list-style-type: none">• 排名：第三• 行政职务：无• 技术职称：副研究员• 工作单位：中国科学院金属研究所• 完成单位：中国科学院金属研究所• 对本项目贡献：应用断裂准则阐述了各种不同材料强度与硬度之间的本征关系及其物理机制，进一步发展了材料的断裂与强度理论。对《重要科学发现》中第 1 项科学发现做出了创造性贡献，是第 2 篇代表性论文的第一作者。4. 姓名：麻晗<ul style="list-style-type: none">• 排名：第四• 行政职务：常务副院长• 技术职称：研究员级高工• 工作单位：江苏沙钢集团有限公司
--	--

	<ul style="list-style-type: none"> • 完成单位：中国科学院金属研究所 • 对本项目贡献：完成了含 Fe 颗粒 Mg65Cu7.5Ni7.5Zn5Ag5Y10 内生金属玻璃复合材料的制备以及力学性能的测试和结果分析。对《重要科学发现》中第 3 项科学发现做出了创造性贡献，是第 7 篇代表性论文的第一作者和第 8 篇代表性论文的第二作者。 <p>5. 姓名：伍复发</p> <ul style="list-style-type: none"> • 排名：第五 • 行政职务：副院长 • 技术职称：教授 • 工作单位：辽宁工业大学 • 完成单位：中国科学院金属研究所 • 对本项目贡献：揭示了外加应力状态对非晶合金形变与断裂的影响规律，提出了临界剪切台阶是表征非晶合金拉伸剪切变形能力的重要参数，定量地解释了试样尺寸对非晶合金拉伸塑性与脆性转变的影响。对《重要科学发现》中第 2、3 项科学发现做出了创造性贡献，是第 3 篇代表性论文的第一作者和第 6 篇代表性论文的第二作者。
<p style="text-align: center;">完成人合作关系说明</p>	<p>该项目第一完成人张哲峰研究员与第二完成人徐坚研究员在完成国家自然科学基金专项基金项目（多组元玻璃形成合金体系的复合结构与强韧化 50322009）时，开始合作研究该项目相关工作。</p> <p>该项目第一完成人张哲峰研究员 2004-2011 年期间指导了博士研究生张鹏，共同完成了代表性论文 2:</p> <p style="padding-left: 2em;">Zhang, P., Li, S. X., and Zhang, Z. F., Genral relationship between strength and hardness. Materials Science and Engineering, A529 (2011) 62-73。</p> <p>该项目第一完成人张哲峰研究员 2004-2009 年期间指导了博士研究生伍复发，共同完成了代表性论文 3:</p> <p style="padding-left: 2em;">Wu, F. F., Zhang, Z. F., and Mao, S. X., Size-dependent shear fracture and global tensile plasticity of metallic glasses, Acta Mater., 57 (2009) 257-266。</p> <p>该项目第二完成人徐坚研究员 2000-2006 年期间指导了博士研究生麻晗，共同完成了代表性论文 7、8:</p> <p style="padding-left: 2em;">Ma, H., Xu, J., and Ma, E. Mg-based bulk metallic</p>

	<p>glass composites with plasticity and high strength. Appl. Phys. Lett. 83 (2003) 2793-2795;</p> <p>Xu, Y.K., Ma, H., Xu, J., and Ma, E. Mg-based bulk metallic glass composites with plasticity and gigapascal strength. Acta Mater., 53 (2005) 1857-1866.</p>
--	--