

网站地图 (<http://www.imech.cas.cn/serv/wzdt/>) |

联系我们 (http://www.imech.cas.cn/serv/lxfs/201212/t20121205_3698646.html) |

所内网 (<http://www.imech.cas.cn/serv/szxx/>) | 所内网 (<https://ioa.imech.ac.cn>) |



<https://mail.imech.cas.cn/> | [English \(<http://english.imech.cas.cn/>\)](http://english.imech.cas.cn/) |

中国科学院 (<http://www.cas.cn/>)

(<http://www.imech.cas.cn/>)



当前位置：首页 (../..../..../) >> 科学传播 (../..../..../) >> 力学园地 (../..../) >> 情系科学 (../..../)

【情系科学】科研体会点滴

2023-09-12 11:05

[【放大 缩小】](#)

编者按：力学研究所成立六十多年来，力学人遵循钱学森的工程科学办所思想，为推进中国的近代力学事业、为推动中国的经济国防建设，做出了重要的贡献。老一辈力学人以国家需求为己任、艰苦创业和奋发拼搏的精神，是力学所60年奋斗史的精髓。本刊在“情系科学”栏目里陆续推出离退休老同志回忆文章，以展示普通科技人员的风貌。

科研体会点滴

陈光南

要机遇，更要有充分的准备

抓住机遇的前提是充分的准备，准备得越充分，抓住机遇并走向成功的可能性才越大。这是我从事科研工作多年的一个切身体会。激光毛化技术在秦皇岛龙腾精密带钢公司的成功应用，就是我经历的准备与机遇碰撞的典型案例之一。

秦皇岛龙腾精密带钢公司是我国第一家精密带钢生产企业，其主要产品是电冰箱散热器所需的0.35mm覆铜薄带钢，刚刚投产半年，就因难以生产出合格产品而进退维谷。在1992年7月底召开的公司董事会上，其技术顾问、武钢钢研所退休所长方泽民建议找我咨询。那时，我正在力学所做博士后，在激光室杨明江主任的课题组参与激光毛化设备研制和轧辊毛化工艺研究。

经过现场考察，我知道该公司的困局源于先天不足。首先是认识上的先天不足。他们的产品厚度只有汽车板的1/3左右。一般而言，钢板越薄，其表面状态对于产品性能质量的影响就越大，生产的难度也越大。但缺乏薄板生产经验的他们，对此并无切身体会。其次是设备上的先天不足。受投资所限，该公司只有一台从法国引进的二手森吉米尔二十辊轧机，产品的大变形（冷轧）和微变形（平整）都在同一台轧机上进行，而且一律采用砂轮修磨的光面轧辊。令他们最为头痛的是冷轧板卷的退火粘结问题，这直接影响其产品的表观质量和成品率，也是其生产进行不下去的最直接原因。很显然，他们需要采用毛面轧辊，而且需要轧辊的粗糙度能精准控制并且有足够长的使用寿命。在当时的条件下，要做到这一点，非采用力学所刚刚研制成功的YAG激光毛化试验设备不可。董事会采纳了我的意见，决定采用激光毛化技术。

为了找到适合于该轧机及其产品的轧辊激光毛化工艺，我在该公司的生产现场断断续续地待了近半年时间，与其技术人员密切配合，不仅彻底解决了其退火粘结问题，优化了工艺制度，完善了产品质量评价方法，提升了原有产品的质量水平，还开发出电池壳带钢等新产品，使该公司的生产逐渐起死回生，扭亏为盈，成了所在行业的标杆企业。

帮助秦皇岛龙腾精密带钢公司解决生产难题，不论对力学所推广应用YAG激光毛化技术，还是对于发挥我在这方面的所学和经验，都是难得的机遇。在来力学所工作之前，我曾因承担冷轧板性能质量控制与评价方法研究任务，在武汉钢铁公司的钢研所和冷轧厂摸爬滚打了多年。其间，提出了08A1汽车板平整工艺的优化方案，在武钢建立了表征汽车板成形性能的 n 值和 r 值试验方法，并负责起草了这两项试验方法的国家标准（GB5027-85和GB5028-85）。之后，又以“拉伸变形损伤与薄板成形极限”为题开展博士论文研究，先后师从北京航空航天大学板料成形教研室主任胡世光教授和法国格勒诺布尔理工大学材料物理与力学实验室主任B. Baudalet教授，拓展了视野，提升了薄板成形的力学分析和数值计算能力，特别是对于内部损伤（夹杂物和空洞等）和表面损伤（缺陷和粗糙度等）对薄板性能质量的影响有了更深入的理解。我于1991年8月获得博士学位。

其实，我到力学所工作也是机缘巧合的结果。1990年10月我刚刚回国不久，正在北航准备博士论文。力学所激光室的杨明江主任，通过在北京汽技术中心工作的北航分校毕业生王旭找到我，向我介绍力学所在YAG激光毛化技术方面的研究进展，希望通过我与武钢建立合作关系。这事虽因华中理工大学捷足先登没有成功，却让我产生了尽快参加激光毛化技术研究的愿望。因为，我清楚该技术对于提升我国冷轧钢板质量水平的意义，更清楚激光工艺与冷轧板生产需求有机结合的必要性和重要性。当然，这里也有我对钱学森的崇敬和对他创建的力学所的仰慕。在博士论文答辩之后，我便克服重重阻力、义无反顾地来到力学所，以博士后身份，以白以龙院士和杨明江主任为合作导师，投身轧辊激光毛化设备研制和激光毛化工艺探索工作。这才有了上述帮助秦皇岛龙腾精密带钢公司解决生产难题的故事。

在力学所YAG激光毛化技术成功应用并获得各种表彰和奖励之后，不时有人问我这样一个问题：中国科学院内有好几个光机所，在全国范围内还有华中理工大学这样同时拥有激光技术国家重点实验室和激光加工国家工程中心的强大竞争对手，为什么YAG激光毛化技术会生根在力学所并且率先实现工程应用？“准备与机遇的碰撞”和“天时地利人和”，应该就是这个问题的最为贴切的答案。

说起人和，我觉得，除了力学所内相关人员的齐心合力以及领导和职能部门的强力支持之外，我们还应该感谢所外那些为该项工作做出过无私贡献的人。譬如首钢钢研所的刘天化同志，是他从该所情报室的翻译资料上获悉国外发展激光毛化技术的报道，找到有激光加工设备研制能力的大恒公司和力学所，这才促成了这个项目。譬

如为推动该技术研发和应用而上下穿针引线的北汽的王旭和李重同志。还有已经去世的邓树森同志，他是大恒公司的副总裁，是中国激光学会激光加工专业委员会的主任，也是这个项目的倡导者和组织者，还是支持组建“激光加工联合实验室”并让其挂靠力学所的推动者之一。

知其然，更要知其所以然

科研的真谛是什么？我以为，就是发现问题，解决问题，并且知其所以然。在参与一型镀铬身管寿命问题的攻关研究中，我对此别有一番体会。

身管是枪炮类动能武器的发射部件，需要在反复的高温、高压、强烧蚀、强冲刷和强挤压磨损等极端环境下工作，其内膛表面的瞬时温度可以达到甚至超过钢材的熔点（1450℃）。电镀铬是最常用的延长身管使用寿命的措施。这是因为铬的熔点超过1860℃，且其具有良好的耐腐蚀能力和高温强度。但铬的脆性大，容易开裂，与钢基底的热物性存在明显差异，在反复的热冲刷和强磨损作用下，镀层会逐渐与基底剥离，从而失去其保护内膛的功能。我们任务的研究对象之所以一直不能定型，是因为其设计要求较原型号有了重大改变：在技术指标保持不变的情况下，将自重大幅缩减，将所用弹种由铜壳弹改成覆铜钢壳弹。这使其镀铬身管的服役工况，比一般镀铬身管更加恶劣、更趋极端，故而其综合寿命迟迟不能达标。

由于已经经过多轮攻关，并且采用过包括激光相变强化在内的多种可能的手段，其镀铬身管的综合寿命仍无重大突破，该型号的攻关人员打算放弃电镀铬方案。他们认为，该型号的服役条件已经超出了铬的承受能力。他们来力学所求援，是听说我们的激光毛化方法在延长轧辊寿命方面效果显著，希望用激光毛化取代电镀铬。但是我告诉他们：激光毛化延长轧辊寿命的基本原理是改形和改性。所谓改形，就是改变摩擦与接触条件，以降低磨损；所谓改性，则是发生相变和细化组织，以此提升材料的耐磨损能力。但无论如何，激光处理获得的钢的强度，不可能超过同样晶粒度的铬的强度，这是由材料本身的性能所决定的。对于身管而言，激光毛化的效果虽然优于常规激光相变强化，但不可能超过电镀铬。因此，建议他们保留电镀铬工艺。我的理由如下：

根据对寿终镀铬身管内膛破坏状态的观察，不难发现：即使是在内膛表面烧蚀和冲刷破坏最为严重的弹膛的出口部位也有铬层残留。根据从内膛表面温度曲线，也可以发现：上述部位的瞬间温度虽然最高，可以超过钢的熔点，但仍然没有超出铬的高温强度允许的范围。此前，镀铬身管寿命一直不能达标的关键，在于铬层的过早剥落，而不是其性能不足。因此我们的主攻方向，应该是设法增强镀铬层与钢基底的界面结合强度，以延缓铬层的剥落时间。

根据上述分析以及我们此前在激光离散加工强韧化机理方面的研究成果，我提出了新的技术方案：在电镀铬之前，先对身管内膛钢基底进行激光离散处理。希望通过提升内膛钢基底表层的强韧性，减小镀层与基底之间的硬度梯度，缓解二者之间热物性差异导致的影响。

经过近一年的努力，该方案的效果终于通过靶场考核得到证实和确认。这之后，我们研制了可以对细长狭小的身管内膛基底进行激光离散强化加工的专用试验设备，并用其加工了第二批和第三批考核用身管。但靶场结果的不稳定击碎了我们的乐观。一时间，在该型号的攻关小组内部，对电镀铬的质疑声再起，甚至怀疑第一批镀铬身管达标的可靠性，认为那或许只是偶然。虽然我坚信我们的方案，但我不能质疑靶场的考核结果。我们带着疑问与相关厂家沟通，深入生产现场与相关人员交流，这才找到了后两批身管性能不稳定的原因所在。原来，在行业生产部门，所有产品的每一道工序都有严格的检验制度和处理程序。激光处理的第一批身管，因为是初次试

验，没有走正规产品的检验程序，内膛处理干净后就进入电镀工序了。而后两批身管在走正规产品检验程序的时候，检验人员将内膛表面具有不同光反差的激光强化组织误认为是“锈蚀”，并按规定采用机械擦膛的办法将其清理干净。他们哪里知道被他们一丝不苟地擦掉的那些“锈蚀”，正是我们辛辛苦苦好不容易才获得的硬化层！事情总算是水落石出了，我们可以继续前行了，但两年多的时间过去了！当然，这两年的时间并没有白白浪费，我们也有两个重要发现：一个是，虽然这两批镀铬身管靶场考核不合格，但其寿命明显高于没有激光处理的镀铬身管。这说明即使“锈蚀”被清理掉了，身管内膛仍然保留了相当部分的激光强化效果，我们的激光加工效果是显著的。另一个是，一项新技术要想成为具备可操作性的工程实用技术，必须加强与应用对象的现有工艺、环境、条件的充分衔接和融合，并且通过这一过程进一步完善和提升自身的有效性和可靠性。由于有了相互了解和相互信任的基础，在2002年3月该型号刚刚设计定型、我们研制的激光加工专用设备和工艺技术还来不及向相关生产企业转移、用户方的紧急订货任务又接踵而至的时候，我们能够在力学所内帮助企业就地进行激光加工部分的生产，边生产边为他们培训技术和操作人员，在完成了阶段性加工任务后，平稳地将相关设备与技术转移到企业，并且做到落地就位便能继续生产。

2003年，经中国科学院推荐，该项目成果参加了当年的国家技术发明奖评选。在评审会上，一位院士评委对我的报告提出了质询。他问我：身管延寿是一个世界性难题，你们的工作不错，成果令人振奋。包括我在内，在座的好几位评委也做过类似的工作，但都没有取得你们这样显著的效果，你能告诉我支撑这种效果的机制吗？我回答：镀铬身管延寿的关键在于延缓镀层的剥落。与国外的镀铬身管激光处理方法不同，我们的激光作用对象是钢基体，通过提升基体对于镀层的支撑延长身管寿命。此外，我们采用的是离散强化处理，由此形成的强韧相间结构，可以进一步减小镀层的开裂和剥离倾向。他进一步问我：激光相变强化钢基体这没有问题，但身管是在反复的热冲击条件下使用的，相变强化效果在高温冲击下，会退火软化，如果其寿命只提高了几个或几十个周次，这还能理解，可是你们现在的效果是提高了上千甚至几千周次，基体的相变强化能够坚持这么久吗？…。我一时语塞。因为他说的的问题我也意识到了，只是因为时间关系，我们的主要力量都放在完成任务和保障需求上，尚未来得及仔细分析和揭示除离散相变外的其它强化机制。虽然这一问话后来由专家组组长师昌绪先生给我打了圆场：他们的结果是靶场考核打出来的，是过硬的。关于其机理的认识，有时间还可以继续挖掘，但这不影响这个项目的价值与意义，……。我还是为我的工作的不深入，也就是没有真正知其所以然而羞愧不已。

我要感谢这位评委的提醒。那次答辩会后，我迅速组织团队加强相关基础研究，经过几年奋斗，逐渐揭示出了我们的镀铬身管激光延寿技术中的多种作用机制。我们发现，除已经认识到的离散相变强韧化机制外，基体表层因激光作用产生的组织和结构变化，会在电镀过程中，影响在其上着床的铬原子的沉积和结晶方式，使其按照基底的结构模式外延生长。这种“遗传”效应，不仅可以强化镀层与钢基体之间的界面，还可以显著细化镀层的组织，提高其硬度和耐蚀能力。在此基础上形成的“涂层/金属基底界面结合性能表征的试验与理论研究”项目得到了国家重点基金的资助（批准号：0650011021，2006—2009）。这些成果不仅帮助我们在提高镀铬身管寿命方面更上了一层楼，还发表了一系列有影响的论文，培养了多名博士研究生，其中一篇博士论文还获得2011年度中国科学院院长特别奖，我也因此获得院人教局颁发的当年度“优秀研究生指导教师”奖。

服务社会，乐在其中

有人说搞科研很苦很累，我倒觉得这要看一个人的兴趣所在。对科研工作有兴趣就会乐在其中，不会觉得苦和累，反而很享受那种“山重水复疑无路，柳暗花明又一村”的过程。

在我的工作中常常会碰到一些临时任务。这些任务责任重、时间紧、难度大，甚至要担风险。但一个科研工作者的社会责任感，不容我有半点犹豫，不仅要立即投入工作，还必须快速理清头绪并做出准确判断。当一个个困扰人们的谜团因为我们的工作而解开，当人们的久聚不散的眉头因为我们的努力而舒展时，什么苦啊累啊统统被抛到了九霄云外，那份释然难以言表。

下面是我经历的这类任务中的两个典型案例。

第一个是揭开“三个炸孔之谜”。2005年9月，发生了正常射击训练时身管炸膛并伤人的事故。炸膛事故在身管武器的生产和使用过程中并不罕见，罕见的是这次炸膛事故呈现的破坏状态：在靠近事故身管出口端附近，沿长度方向依次留下了中间是由气爆形成、两边是被弹片击穿形成的三个炸孔。参与事故调查的专家从未见过，也无从分析解释。鉴于我们在镀铬身管激光延寿方面的表现，相关部门再次向力学所求援。这是我和我的团队第一次参与这类装备事故分析工作，也让我们第一次体会到行业要求之规范和严格：通过领导小组、专家小组和执行小组三级联动，协调所需条件、控制时间节点和工作质量；对于事故分析报告，不仅要逐一排除与事故有关的所有因素，做到理论分析和试验数据翔实可靠，还必须能够复现事故，以验证结论的正确性和可靠性。

在各相关单位的共同努力下，当然也包括我们夜以继日的工作，这一事故分析任务圆满完成。我们在其中的贡献是：通过痕迹检测和弹道分析，确认有留膛弹堵塞弹道。证明事故身管发生的气爆是由超常高温高压引起的，而这源于超声速运行的继发弹头前方残余气体中的激波效应。具体分析参见《力学与实践》（第34卷，2012年第4期，第106-108页）。

为了感谢我们的工作，相关的装备部门分别向力学所发来了感谢信函，路甬祥院长还在相关的院情通报上作了批示，对这一工作给予了肯定和鼓励。我还因此被国防科工委授予2006年度“国防科技工业协作配套先进个人”荣誉称号。

第二个例子是寻找“7.5事故”的原因。2011年7月5日9时36分，位于北京市西城区的地铁4号线动物园站A口的上行自动扶梯（以下简称扶梯）发生乘客一死多伤的安全事故。在责令市质监局立即组织专家尽快查明事故原因的同时，北京市政府下令，停运了所有还在地铁和其他公共场所服役的同型号扶梯，以避免发生类似事故。相关部门，特别是责任单位市质监局及其组织的事故调查专家组的精神压力之大可想而知。

我是当年国庆长假期间，被乔均录书记从外地紧急召回，参与该项目攻关的。10月5日，在事故发生满三个月的时候，在市质监局主持的情况通报会上，我才大致了解这次事故的基本情况。先期介入的国家电梯质量检验检测中心和国家钢铁材料质量检验检测中心的专家，已分别提交了事故分析报告。对于事故发生的主要原因，两家报告的意见基本一致：一是因驱动电机四个基脚的面有2度倾角，螺栓紧固后会在其内部产生弯矩，事故螺栓的断口特征与此弯矩的作用有因果关系。二是事故螺栓太短，只有三个螺扣在吃力，致使吃力的螺扣因承受的应力过大而断裂。这一结论显然无法解释事故螺栓断口的疲劳破坏特征，因为疲劳破坏必须有交变动载荷作用，而上述弯矩，还包括螺栓因紧固电机与基础（支撑钢梁）而承受的轴向应力，即使足够大也不可能成为交变动载荷。因为没有找到导致事故螺栓疲劳破坏的动载荷，也就无法认定事故的成因与责任，市质监局不得不向力学所求援。

既然事故是由紧固螺栓断裂引起的，我的分析工作就从观察分析事故螺栓的断口特征开始。这断口的确是疲劳断口。但从其疲劳裂纹肉眼可辨的特征看，这断口应是低周次大应变疲劳破坏所致，这也表明该螺栓在断裂之前经历过异常动载荷。我询问有关人员，在当时现场亲历者的口述或现场的视频中，是否有事故发生前出现过异

常响动的记录？他们告诉我：的确有，但持续的时间不长，注意到的人不是很多。于是我判断：导致事故螺栓疲劳断裂的异常动载荷很可能源于其附近发生的共振。剩下的问题是，寻找产生共振的原因。

事故调查组的领导只给我一周时间，不仅要找到动载荷的来源，还必须给出证据或依据。事情很快就有了进展：第二天我与同事吴臣武去事故现场考查，发现事故驱动电机的四个基脚不是直接与地基固定，而是通过两块过渡钢板（长485mm、宽100mm、厚20mm）间接联系的。即电机产生的动载荷需要通过过渡钢板传递给地基。通过市质监局，我们将这一严重问题反映给事故扶梯供应商。得到的反馈信息是：因为事故电机的尺寸小于原设计，无法与地基直接固定，只好采用过渡钢板。我们又问：这种变更设计的做法，是否经过专门的论证和计算？答复是：有。但始终不能给我们提供相关文件。

这一做法显然有悖力学常识。因为这两块过渡钢板的嵌入，会严重改变整个结构系统的固有频率。过渡钢板的质量远小于地基，而其柔性却远大于后者，驱动电机的旋转运动很容易激励电机与过渡钢板连接系统产生共振，并导致连接螺栓发生大应变疲劳断裂。为说明这一问题的严重性，我们进行了理论分析和数值计算（详见《力学与实践》第35卷，2013年第3期，第102-105页），并与对方的技术专家多次交流理论分析和计算结果。最终，事故扶梯供应商不得不认可我们的分析，承认他们没有对这一设计变更进行过动载荷校核，他们的设计变更存在缺陷。

事故的原因找到了，事故的责任方清楚了，我们的使命也就结束了。在我们的正式报告提交之后两天，北京市政府就公布了“7.5”事故的正式调查处理结果。认定该事故是由扶梯的不当设计变更导致的，应由供应商承担事故赔偿责任。

而我感到欣慰的是，这之后不久，经过改造，被停运了数月之久的同型号电梯终于恢复运行，市民的出行又方便了。

关于作者——陈光南



2018年5月8日，在贵州盘县五中作科普报告后与同学们一起讨论问题

简介：陈光南，男，博士，中国科学院力学研究所研究员、博士生导师，享受国务院政府特殊津贴；主要从事金属物理、材料力学、应用激光、以及先进制造工艺力学等方面的研究与应用工作；发表学术论文130余篇；授权发明专利20余项；曾获中国科学院科技成果一等奖、国家技术发明二等奖、国家专利局和世界知识产权组织“中国发明创造金奖”等多项奖励，以及国防科工委“国防科技企业协作配套先进个人”和中国科学院“优秀博士生导师”等荣誉称号。



中国科学院
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

(<http://www.cas.cn>)

中国科学院力学研究所 版权所有 京ICP备05002803号 京公网安备110402500049

地址：北京市北四环西路15号 邮编：100190

(<http://bszs.conac.cn/sitename?method=show&id=081D2D6355AD574EE053022819ACCB7>)

