金属加工 创刊六十周年

“记录金属加工60年”主题征文选登

编者按：《金属加工》创刊60周年，这将是我们大家——读者、编者和作者共同的节日。为铭记一代代金属加工人为中国金属加工行业所作出的巨大贡献，回顾历史，总结经验，激励新一代金属加工人为实现制造强国梦继续拼搏奉献，金属加工杂志社特举办“记录金属加工60年”主题征文活动。

新中国60年来热处理设备的发展与展望（下）

全国热处理学会荣誉理事长　樊东黎

2010年是《金属加工》（原名机械工人）创刊60周年，几乎与新中国同龄的《金属加工（热加工）》记录和见证了我国的热处理作为一门技术的发展全过程，积极推动了热处理技术进步。进入21世纪以来，又积极配合热处理行业规划的实施，围绕热处理生产技术改造和设备更新开展了一系列采访、座谈、交流、宣传、报道活动，开阔了热处理企业的眼界，沟通了设备制造企业和热处理生产用户的联系，为用户正确选用设备提供了依据，为设备制造业创造了商机，形成了热处理设备市场多年火红的局面。

3. 产品质量分散度最小

机械产品的可靠性在很大程度上取决于零部件质量和质量的均匀度。也就是说机器零件质量的分散度小就不容易发生因个别零件的提前失效使整台机器出现故障，造成重大事故。从热处理角度，保持炉膛温度的均匀性，实现均匀的加热和冷却，保持炉气的理想循环是保证同一炉次或不同炉次零件显微组织和力学性能一致性的基本条件。为此，各种加热炉的控温精度最好保持在±1℃以内，有效加热区内的多点测温偏差在±5℃范围，渗碳时的炉气碳势控制在±0.05%，渗层波动±0.1mm。服役期间的加热炉会因炉衬性能和结构的变化，造成能保持±5℃均匀度的有效加热区的逐渐缩小而影响装炉量。因此在连续生产条件下，每年应至少两次按GB/T9452进行炉温均匀性和有效加热区测量。

4. 高生产效率

选用能体现先进工艺的高效率设备，可在不增加或少增加消耗的基础上生产更多的产品，从而降低成本，节约能源。在可保持批量连续生产的前提下，选用连续式设备的效率高，比相同功率周期式设备的单耗电能少10%～15%。能施行1000℃以上的渗碳设备比常规930℃渗碳能缩短30%～50%的工艺周期。因此，用石墨棒或石墨纤维带加热的能实现1050～1100℃低压渗碳的真空炉具有优越性。采用$MoSi_2$棒电热体的气氛炉也可施行1000～1050℃渗碳，减少一半的时间。为细化晶粒，即使渗碳后采取二次加热淬火也是划算的。1000℃以上的高温密封多用炉还可用于冷作模具的热处理，受到了热处理加工厂用户的青睐。

5. 可控制工件畸变

金属制件热处理后不可避免地会发生形状和尺寸变化，被称作“畸变”。畸变的原因是在加热和冷却过程中的组织转变，所形成的新相比体积差异，以及热处理过程中的热应力和组织应力所致。畸变会增大热处理后工件的磨削余量，延长工时，降低效率，增加成本。大批量生产的汽车传动齿轮通常采用渗碳淬火，回火后不经加工即装车运行。由于畸变啮合不良，恶化了接触条件，使车辆噪声增加，也会使齿轮提前失效。

采用等温分级淬火工艺的设备可在相当程度上减少畸变。用高压气体喷射冷却淬火由于比液态介质淬火冷却均匀，减少畸变的效果明显。在压床上加压喷液淬

火对于扁平零件和形状复杂但对称的零件（如汽车后桥伞齿轮）可显著减少其畸变程度。薄片状零件可压紧夹持后在回火炉中回火，校正已发生的畸变。长杆状零件回火后立即在油压校直机上手动或自动校直。

6. 质量在线控制

近代物理冶金理论几乎可以洞悉金属及合金在热处理过程中的组织、性能、化学成分，甚至原子状态的瞬息万变，从而可以利用精确灵敏的传感控制系统对热处理工件质量进行精确的在线控制，从而做到100%的合格率。在规模化生产条件下，采用生产过程自动化、质量在线信息化、工艺参数与质量效果的模拟，以及自适应控制的热处理设备和生产线，可以最大限度地提高生产效率，实现无人作业，完全消除影响质量的人为因素，保证产品质量的一致性和重现性。

7. 可靠性

热处理设备的可靠性主要指在生产运行中的故障率，也包括其质量和性能的稳定程度。设备频繁发生故障会造成生产的经常停顿维修，严重影响生产效率。增加废品率，降低质量，提高成本，降低企业信誉。设备可靠性低的主要原因在于机电零配件、测试仪表、传感器、筑炉材料、控制元器件的质量。结构设计的合理性、加工制造的精心程度，以及停电、停水时的自行保护功能也很重要。近代热处理设备都具备故障自诊断系统，许多厂家也都设有设备的远程服务系统，一旦设备出现问题或发生技术疑难都可以直接及时地对用户解答和服务。设备可靠性高低是本土制造业赶超国际先进水平的重要目标。

8. 降价和延寿

美国热处理技术发展路线图的2020年目标中有一项是设备降价一半，使用寿命延长10倍。用户希望新购置的新设备技术先进，自动化程度高，程序严格，参数精确。但这种要求会使设备价格不断提高。昂贵的设备又会显著增加一次投资，如果服役寿命不长，更会使生产成本变本加厉，使用户在更新设备时，对先进设备望而却步。降价和延寿会激发用户选用优秀设备的积极性。

三、设备发展展望

热处理设备发展前景首先表现在使用新能源上，诸如微波、离子束、新型激光器等方面。气体燃料的热化学重整技术正在被火热研发，预计很快会投入实际应用。金属零件在强磁场作用下的近成形可免去零件随后的热处理，从而根本上把热处理的能耗减少到零。

1. 微波加热设备

最近有不少关于微波加热处理的报道。过去微波主要用于家庭烹调，间或用于木材、橡胶、陶瓷的加热。由于金属大量反射微波，造成弧光放电，会损坏作为微波能源的磁控管，故长期未见有在金属加工业的应用。现在发现在金属制件周围形成等离子体，就可使其充分吸收微波辐射反射。吸收了微波的等离子体迅速把热能传给金属体。微波加热设备是外有保温层的能把气态等离子体约束的陶瓷容器。此陶瓷体可被微波穿透，并可经受高温。另一重要条件是均匀的等离子体在大气压下形成，如此就可避免使用昂贵的真空系统。微波大气等离子加工（MAPP）系统的加热速度可达到1300℃/s，并可根据不同金属和工件形状尺寸在一定范围调节，还可在瞬间开始和停止加热，不会在系统中产生热应力。美国Dana Corp公司把微波用于钢件的渗碳、钎焊和粉末烧结，可以大大缩短加热时间，具有显著节能和提高生产率的效果（见表6）。该技术和设备恐难一时推广和实现批量生产，但却是一种很有前景的未来生产技术。

表6 微波和传统加热的比较

用途	传统加热周期/min	微波加热周期/min
渗碳	360	80
钎焊	15～60	1.5
粉末烧结	40～120	20

2. 离子束表面改性设备

用高速脉动离子束在金属表面数微米内施行快速熔化和凝固，以提高其耐磨性和抗腐蚀能力，改善外观和表面状态，其束斑尺寸可达50cm^2，可用以提高大表面零件或大批量小零件的表面性能，此为法国Sandia National Laboratories Albuquerque N.M.的专利技术，被称为Q.M.Technologies）。

设备脉动周期＜1μs，采用任何气体的平均功率都在1～10kW，离子能达0.1～1MeV。在10^{-3}Pa真空室内即可实现有效的离子束传输。每个脉冲的离子数为10^{12}～10^{14}/cm^2。进入工件的热能迅速在工件内逸散，工件升温可忽略不计，故畸变很小。在＜1μs可使3μm表层熔化，20μs工件温升不超过100℃。

经Q.M.处理后，AISI 01（相当于CrNMn）工具钢表面用2%硝酸酒精侵蚀，未出现任何显微组织特征，表面硬度达900HR，销钉圆盘试验的耐磨性提

高200%，AISI H13钢切边模寿命提高10倍，AISI M2（W6Mo5Cr4V2高速钢）切刀寿命明显增加，硬质合金轧辊和钻探钻头寿命提高500%。

3. 二级管激光器

大功率直接二极管激光器（High Power Direct Diode Laser，简称HPDDL）是Nuvongx Inc.（Bridgeton Mo）公司的研发成果，是用于钢件相变硬化的理想光源。该激光器具有大长宽比光束，可在大件上施行大面积快速加热，调节输入功率或光斑移动速度就可以改变淬硬层深度。1SL－4000L激光器最大输出功率为4kW，可用于热处理、焊接、钎焊、涂覆和脱漆。其最大优点是电光转换率高达60%，从插头到输出光能的转换率为20%，即包括水冷系统用电，输出4kW光能激光器所需电能只有20kW。激光束横切零件移动时光斑边缘陡峭，不像钕-钇铝石榴石激光器需配备圆柱聚焦镜头，也不像CO_2激光器需要水冷聚光器，在805nm波长段工作时，HPDDL的光能具有高吸收率，比CO_2激光器的另一优越性在于无需对钢件冷覆提高光吸收率的预冷黑层。

1SL－4000L激光器配有6轴机器人、激光头仅重6.5kg，装在机器人手臂端部，其功率可在1kW、2kW、3kW和4kW多档调节。用长度比15：1的光束对14.5mm宽的4140（相当于40CrMo）钢块施行相变硬化，在0.5mm深度可淬到50HRC。用此激光还可以实现钢件的“超级硬化”（Superhardening），加热时的马氏体－奥氏体转变极快，形成非常细的奥氏体晶粒，使最后的淬硬表面硬度高达59～65HRC。

4. 燃烧炉燃料的热化学蓄热重整

近几年，一种有效节约燃料措施——热化学蓄热（Thermo Chemical Recuperation，简称TCR）重整（reforming）技术受到国际广泛重视。采用TCR技术可使燃料炉热效率提高15%～30%，和一般蓄热再生式只预热空气的方法比较，可节约15%～100%的碳氢化合物燃料，还能减少NO_x、CO、THC、CO_2等排放30%～80%。TCR用于内燃机，燃气轮机等热循环系统可提高热效率8%～15%。该技术在1978年由苏联乌克兰科学院发表初步研究报告，后来在1985和1989年陆续发表了实际效果，直到21世纪初才被日本和美国发现和重视，但到目前为止尚未成为有实际工业应用的成熟技术。即便如此，由于其具有的巨大节能潜力和广泛的应用范围，美国能源部已将其列入“能源策略行动”（Energy Policy Act）下“工业技术计划”（DOE's Industrial Technology Progrom，简称ITP）的8个重点研发项目之一。

燃料蓄热重整是一种把燃烧废气中的显热回收，并将其用于碳氢化合物燃料重整为高热焓（higher calorific heat content）燃料的技术。其过程是利用废热、水蒸汽和CO_2使燃料重整为碳氢化合物+$CO+H_2$的可燃混合气体。如果原始燃料是天然气，利用TCR就可使其热值增加28%。重整后的燃料在炉中燃烧时，可显著提高燃料利用率，提高整个燃烧系统的效率，还可减少温室气体排放，兼具节能、减排效果。燃料在重整中还会吸收废气的显热，从而被预热。

美国燃气技术研究所（Gas Technology Institute，简称GTI）对钢材加热炉、熔玻璃和熔铝炉的TCR技术进行了试验性研究，证实了预期的节约燃料效果，GTI正在开发TCR技术在往复式发动机上的应用。在50kW引擎上用小型TCR试验装置进行节能效果试验，还打算在331kW发动机上进行500h的试验。

5. 不需加热的热处理

美国橡树岭国家实验室（Oak Ridge National Lab）开展的一项被列入能源部“工业技术计划”（ITP）的有关热处理的研发项目是高磁场加工——一种不需加热的热处理方法（heat-free heat treatment method）。

据报道，高磁场加工（High Magnetic Field Processing，简称HMFP）是一种相变材料的加工工艺，附带对材料的尺寸加工，使用超导磁体(Super Conducting Magnets)的高磁场可以加速相变过程，移动相界面，能使材料达到一般热处理后的性能，但无需进行热处理过程。磁场强度高达9T（特斯拉）以上，磁芯直径152mm，能对大尺寸零件进行加工。

伊顿（Eaton corp.）公司负责的另一课题是利用热磁性(thermo-magnets)和感应淬火净成形加工技术。其目的是延长模具寿命，节能，降低成本的精密锻造成形。

以上内容仅为课题组的简短报道，详情尚不清楚，但被能源部列为工业技术计划中的重点项目肯定是值得重视的前瞻性课题，而且题目又是如此吸引人的眼球。

6. 复合热处理技术和设备

复合处理是把几种热处理工艺或热处理与其他加工方法复合或叠加的处理方法，是能把各种方法的优点集中，从而进一步提高材料和零件性能的有效工艺。已有的典型复合技术有形变热处理，锻后余热淬火，渗氮、氮碳共渗后感应淬火，Ni-P化学镀和低温时效硬化

等。近几年又出现一些新的复合处理工艺，诸如VC热扩散沉积淬火、渗碳+CVD和气冷淬火等。

A2、D2、H13、M2、M4、T15钢切削工具、冲压和成形模具在1000℃含钒盐浴中沉积6～10h，可使表面沉积约15μm的VC，然后直接在热盐浴或油中淬火，表面和心部同时获得3200～3800HV的高硬度，可显著改善工模具的滑动磨损和磨粒磨损的耐磨性，明显提高其使用寿命。该技术是美国Metlab公司前几年的研发成果。

德国不来梅材料研究所（IWT）最近研发出集渗碳、化学气相沉积TiN和奥氏体化淬火的复合工艺。用DIN 17CrNiMo6钢进行0.6%～0.87%～1.14%～1.62%C表面碳浓度的渗碳，随后用气相法沉积TiN，最后重新加热奥氏体化淬火。用Bernex 200型设备沉积TiN，渗碳和奥氏体化高压气体冷却淬火都在ALD公司的VKNQ真空炉中施行。渗碳温度1000℃，炉压3×10^4Pa（300mbar），冷却气体为6×10^5Pa（6bar）的N_2。沉积TiN的炉压为8×10^4Pa（800mbar），温度1000℃，气体介质为$TiCl_3+H_2+N_2$。试验结果表明，钢经高浓度渗碳复合处理后，表层1mm内的硬度都在850HV以上，耐磨性和接触承载能力都有明显提高。

7. 物理气相沉积新成果

近代物理气相沉积技术进步神速，主要特点是越来越趋向低温，越来越精密，可按预先设定成分获得纳米型多层结构。

美国Worthington Beam Alloy服务中心最近开发的离子束增沉积（Ion Enhanced Deposition，简称IBED）技术已用于精密汽车零件和工具的强化。其最大特点是在93℃（200℉）低温下进行，用IBED技术可在金属和非金属表面沉积多种金属和耐火材料以及类金刚石（DLC）层，涂层厚度在1～10μm。IBED利用高能离子分别控制多个粒子束同时轰击母材表面，依靠真空蒸镀和离子溅射使沉积膜层逐步增长。由于离子束控制和蒸发气体无关，离子束可在很大范围调节，并可在很窄的窗口选取，使沉积层在纳米结构范围高度受控，从而优化界面结合力、密度、晶粒度、晶粒状态及内应力状态等性能。由于沉积原子先渗入母材表层，然后再逐步增长为厚的沉积层，由嵌入机制取代热结合而形成冶金结合，比范德华（Van der Woals）结合更为牢固，而且IBED是一种动力学驱动，在结合面上会超越合金固溶限度，故沉积层性能都比一般PVD层好，宏观形貌平整，无孔洞和针孔，批量生产的质量重现性也好。

20世纪80年代兴起的仿金TiN物理气相沉积（PVD）技术曾在手表、装饰品和切削刀具上广泛应用，被称为第一代的PVD技术。20世纪末陆续出现的TiCN、CrN和TiAl高硬度涂层称为第二代PVD技术。21世纪研发的具有纳米多层结构，被称做“超层状结构”（Superlattice）的涂层是第三代PVD技术。

这种超层结构的涂层是由3～4nm成对的第二代TiN/CrN涂层构成。由数千个单层厚1～2nm，总厚3μm的化合物层硬度可达3500～5000HK。此技术已实现工业生产，被注册为Hauzer Techno涂层专利。

ABS真空涂敷机有4个丝状阴极可以按照特定磁路的几何位置依控制阴极弧模式或非平衡磁控管模式交替工作。简言之，即一个阴极配备一个TiAlYN含金靶和两个TiAl含金靶、一个Cr靶。机器中心有一个三倍衬底的旋转台，以克服PVD技术固有的瞄准线问题。

在沉积涂层之前，母材表面需经Cr或Ar离子轰击净化预处理，以除去表面氧化物。刚开始沉积涂层靠非平衡磁控管中的两个TiAl靶和一个Cr靶按$Ar+N_2$溅射模式工作。此时应力诱发基层由TiAl-CrN多元层构成，也可用CrN层代替，此层约厚2nm，然后4个靶同时投入工作。用优选出的旋转速度和4个阴极的溅射就可以沉积出纳米级的多层TiAlCrN和TiAlN涂层。用装在阴极上的各种靶就可以形成由不同性质膜构成的新型多层涂层。表7所列为纳米尺度多层TiAlN/VN和Cr/NbN涂层和一二代TiN、CrN涂层，以及电镀硬铬层性能的比较。高速钢涂层的高硬度可显著提高其减磨性。

表7 纳米尺度多层涂层和单层涂层以及镀硬铬层性质的比较

涂层	厚度/μm	超结构周期/nm	偶层数	努氏硬度HK	塑性硬度（HP）/GPa	销盘滑动摩擦系数/$m^2\cdot N^{-1}$
TiAlN/VN	3～4	3.5	1000	3800	56	1.3×10^{-17}
CrN/NbN	3～4	3.5	1000	3500	48	2.5×10^{-15}
TiN	3～4	—	—	2500	28	7.1×10^{-15}
CrN	3～4	—	—	2200	25	9.0×10^{-15}
电镀硬铬	20	—	—	1000	12	5.8×10^{-14}

MW（全文完） （20091215）