

浸液淬火冷却技术中几个热点问题的研究与进展

上海交通大学先进热处理与表面改性工程技术研究中心 (200030) 陈乃录

浸液淬火冷却是目前热处理领域应用最为广泛的方法，同时它也是存在问题最多、研究难度最大的领域之一，已成为目前热处理界研究的热点问题之一。但是，由于浸液淬火冷却过程的复杂性和具有瞬间完成的特点，加之测量仪器和研究手段的局限，使其研究和控制水平滞后于热处理的加热过程。近十年，随着测量技术、计算水平、重视程度以及解决工程问题迫切性的提高，在新型淬火介质、淬火介质评价、淬火冷却过程机理研究、过程模拟和控制冷却等领域取得了显著的进展。

本文将重点就淬火介质、冷却曲线测量和评价、淬火冷却过程模拟、控制冷却技术和特殊冷却方法等几个研究热点问题介绍一些国内外最新研究成果。

一、淬火介质

目前在淬火介质的研究主要关注点在以下两个方面：一是以解决环保问题为目标，研究矿物油的替代物（选择可降解的植物油、水溶性介质、水或其他介质）；另一方面是开发冷却能力适用性更好介质，以满足产品对介质的性能方面的要求。

在以解决环保问题为目标而研究矿物油的替代物方面，目前的研究工作有采用可降解的水溶性聚合物类淬火介质、可降解的植物油、水或以水为主的介质。

水溶性聚合物类淬火介质由于具有介于水和油之间的冷却能力、冷却能力的可调节性、在淬火件表面形成一层可提高传热均匀性的可逆的聚合物膜和符合环保要求等优点正在被普遍认识和接受，并在合金钢的调质、表面喷淬等方面得到了应用。此外，人们尝试了在密封箱式多用渗碳炉和真空淬火炉中采用水溶性聚合物作为淬火介质。

目前，水溶性聚合物类淬火介质应用于合金结构钢的淬火冷却还有待于解决结构复杂件的淬火开裂和精密件的畸变控制等问题。此外，介质的浓度控制及性能稳定性、带出液的回收、抑制细菌生长避免产生臭味、废液的降解排放，以及性能/价格比的优化选择等问题，一直是人们关心的焦点。但是，随着人们对水溶性聚合物淬火介质认识的加深、冷却过程工艺控制水平的提高以及控时浸淬技术的推广应用，水溶性聚合物淬火介质将有广阔的应用前景。

Farah A.F 对可降解的植物油抗氧化性能和冷却特性进行了对比研究，结果表明植物油的粘度特性有很大的波动性，预计通过加入添加剂可以解决植物油的抗氧化性能差的问题。

张克俭研究了以水和细小粘土粉末等固体颗粒混合而成的浆状介质的稳定性、冷却特性及其影响因素。比较发现，浆状介质具有高于风冷而又低于普通机油的冷却速度，既可用于一些高合金钢的淬

火冷却、铝合金固溶处理，也可用于结构钢工件做等温正火的冷却。

上海交通大学在计算机模拟的基础上成功地采用水淬自回火的方法，解决了预硬化模具钢的淬火冷却问题，这是直接用水作为淬火介质的例子。

二、淬火介质性能测试技术及其评价方法

1. 淬火介质冷却曲线的测定标准

在冷却曲线测定标准方面，虽然仍存在选用镍合金探头（数据重复性高）还是选用银探头（数据灵敏度高）的分歧，但是，ISO9950 的 Inconel 600 镍合金探头已被包括我国在内的世界许多国家所普遍接受和采用。

2. 动态淬火介质冷却性能的测量

通过对冷却曲线的分析，可以较好地了解介质的特性。但是对于多数淬火介质，尤其是水溶性聚合物类淬火介质，在静态下却无法发挥其性能，而且在实际淬火过程中几乎所有淬火介质都是在搅拌状态下工作，因此测量搅拌状态下介质的冷却能力是实际工程的需要。

在 1998 年美国材料实验协会（ASTM）组织提出了搅拌条件下测定聚合物水溶性淬火介质冷却曲线标准试验法（Tensi 法）的征求意见稿。随后，在 1999 年 ASTM 组织又提出了搅拌条件下测定淬火介质冷却曲线标准试验法（Drayton 搅拌法）的征求意见稿。

3. 冷却曲线的评价方法

采用冷却曲线估测淬火介质冷却能力已被普遍认同和接受。其优点是测试简便、数据重复性好，不但可以直观地反映冷却机理，而且还敏感于影响介质从工件表面吸取热量的诸多因素，如介质类型、介质的物理性能、介质的温度和介质的搅拌状态。但是，由于冷却曲线给出的是反映探头心部或某一固定位置热电偶的温度－时间曲线，仅凭这一点的冷却曲线很难对不同介质和不同搅拌状态下介质的冷却能力差异做出定量的评价。应该说，目前冷却曲线仍处于相互之间定性比较的阶段，尚没有一个被普遍接受的方法去定量评价冷却曲线。为此，人们进行了大量的研究工作，其目的是建立冷却曲线的定量评价方法，将冷却曲线与工件淬火后的冶金性能联系起来，实现淬火后的组织、硬度和力学性能的预测。

4. 冷却曲线的局限性

淬火件浸入介质中的实际情况是二个或三个冷却阶段同时并存，仅分析将热电偶置于探头中某一点的冷却曲线数据往往显得很不够。通过对试件的湿润过程研究表明，冷却曲线分析具有一定的局限性。图 1a 是水和水溶性介质（PAG）的心部冷却曲线，从这两条曲线看，这两种介质的冷却特性相近。但是，从图 1b 探头表面的上、中、下三个位置冷却曲线看，则水和水溶性介质的冷却特性存在较大差异。

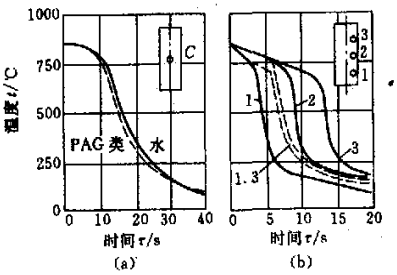


图 1　圆柱不同位置测定的冷却曲线比较

5. 换热系数在评价介质冷却能力方面得到重视

冷却曲线反映探头心部温度随时间的变化，而换热系数反映表面热量传递的速率。与冷却曲线相比，换热系数能更直观地反映介质冷却能力的变化，同时换热系数也是进行模拟计算的一个重要的边界条件。因此，换热系数的测量、计算和应用已日益引起人们的重视。

6. 实际淬火槽冷却能力的监测

为了实现对实际淬火槽冷却能力的连续监测，Tensi 建议用测量能量传导的方法来比较流体场中各部位流速分布的均匀程度。其原理见图 2。Ipsen

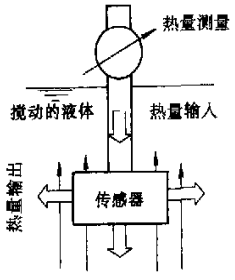


图 2　淬火介质搅拌能力测定探头的示意图

公司最近开发了被称为“Fluid-quench”的探头，它是由两支相互隔热的铠装热电偶组成，其中一支热电偶被恒定功率的热源加热，另一支热电偶测量介质的温度，利用示差热电偶原理测量和记录两支热电偶在淬火槽中的温度差，通过分析这个温差变化曲线就可以得出介质冷却能力和淬火槽搅拌强度的综合变化情况。

三、冷却过程模拟技术

1. 淬火介质流速场的模拟

热处理设备制造厂为了提高产品的竞争力，总是会努力提高淬火槽的冷却均匀性。在过去采取的方法是根据制造出的设备或使用中的效果来对产品的设计进行改进。目前，人们已开始采用计算流场动力学（CFD）方法去指导淬火槽的设计，目前已可以模拟无淬火件、结构简单的淬火槽的流场，并且推出了建立在有限元基础之上的 ACS（Applied Computational Simulation）计算机软件。

2. 冷却过程的模拟

ASTM 组织已经把数值模拟作为现代热处理技术的一个重要组成部分，并把它作为保持竞争力的重要手段。Kobasko 通过模拟给出了淬火件获得最大表面压应力的时间，解决了汽车半轴采用 40 钢替代 40CrNi2Mo 强烈淬火获得最大表面压应力的淬火工艺问题。Clements 在工件硬度和应力模拟方面得到了与试验相吻合的结果。上海交通大学在冷却过程的模拟方面进行了大量的工作，解决了许多工程问题，如通过对淬火冷却过程模拟，解决了卡抓、锚环的淬火开裂问题和冷轧辊获得合理应力场问题。清华大学在淬火冷却过程数值模拟方面也进行了大量的研究工作。

四、控制冷却技术及特殊冷却方法

1. 控时浸淬技术（ITQS）

控时浸淬系统（ITQS）是采用计算机控制冷却过程的浸淬时间和搅拌强度，在避免开裂的前提下，达到获得高的力学性能和尽可能小的畸变的目的。具体方法是在浸淬初始阶段通过强烈搅拌提供足够高的冷却强度，当心部温度接近 Ms 点时，降低或停止搅拌。控时浸淬系统的技术关键是确定达到 Ms 点的时间，对于采用水溶性聚合物淬火介质的控时浸淬系统还应确定出淬火件的总浸淬时间，以避免因过冷而产生开裂。由于控时浸淬系统的采用，扩大了水溶性聚合物淬火介质的应用范围，也使得中碳合金钢采用水溶性聚合物淬火介质淬火易于产生开裂的问题得以解决。目前，控时浸淬系统在国外已得到了较广泛的应用，取得了明显的效果，该技术在国内也开始采用，可以说控时浸淬系统是今后浸液淬火设备发展的主导方向。

2. 强烈淬火技术（Intensive Quenching）

强烈淬火技术是在 1964 年由前苏联的 Kobasko 博士发现和提出的，并在独联体国家得到应用。近年该技术在美国得到了重视和应用，我国武汉汽车紧固件厂（Wuhan Automotive Fasteners Factory）也采用了该技术。

强烈淬火技术是采用高速搅拌或高压喷淬使试件在马氏体转变区域进行快速而均匀的冷却，在试件整个表面形成一个均匀的具有较高压应力的硬壳，避免了常规淬火在马氏体转变区域进行快速冷却产生畸变过大和开裂问题的发生。强烈淬火技术的优点如下：①与油淬的零件相比使用寿命提高 3～4 倍。②用低成本的碳钢或低合金钢替代合金钢或高合金钢。③用水或水溶性介质替代油。④工艺非常稳定，易于实现自动化生产。目前，强烈淬火技术在汽车半轴、链轮、轴承圈、紧固件、销轴和模具上得到应用。

五、结语

为了更好的推进液体淬火技术的发展，国际热处理与表面工程联合会在 2003 年成立了液体淬火工作委员会（Liquid quenching-science and technology Activity Group of IFHTSE），委员会的工作目标是建立搅拌条件下的水溶性淬火介质冷却曲线测量标准（采用 ISO Inconel 探头、银探头等，计划 2004 年完成）、研究和建立冷却曲线数据转换的标准方法（计划 2005 年完成）、建立采用标准探头测量表面换热系数的标准方法（计划 2006 年完成）、建立各种淬火介质冷却曲线和换热系数的数据库（计划 2007 年完成）。

淬火冷却已成为制约热处理整体技术发展的瓶颈，推进我国冷却技术的进步一方面要积极参与国际合作，提高研究水平；另一方面要积极吸收和消化国外的先进技术，同时也需要全行业的共同努力，尤其是产学研的密切合作。 (20040226)