

## 一、技术背景

紧固件淬火冷却是热处理过程中最关键的一环，退火、正火、淬火三种工艺的最典型区别就是冷却过程不一样。在紧固件热处理中，淬火冷却非常关键，其变化因素多、影响范围广，熟练掌握淬火过程中的冷却部分十分关键。在古代，铁匠打铁时，对淬火冷却赋予了很多神秘的内容，这也说明淬火冷却过程的重要性和难度控制。淬火冷却介质是保证快速冷却以获得预期的组织、残余应力场与性能的物质。所谓“淬火”，是将钢加热到临界温度 $A_{c1}$ 、 $A_{c3}$ 或 $A_{cm}$ 以上奥氏体化后，以大於临界冷却速度快冷到 $M_s$ 点以下进行马氏体相变的热处理工艺。其它高强度紧固件合金，如铝合金、钛合金或高温合金材料，凡是带有快速冷却过程的热处理均称淬火。

淬火冷却是高强度紧固件极限性能和极限服役性能的重要保证，淬火冷却介质是一个紧固件企业乃至一个国家热处理水平的重要标志。因此，淬火冷却介质成为骨干紧固件企业的研究热点。

# 淬火冷却介质的 发展及技术期待

文 / 冯琴

热处理的理论基础是相变，保证实现相变的方法是加热与冷却。其中，加热控制高温相变，高温相变是低温相变的前提和基础；冷却控制中低温相变，中低温相变产物保留於高强度紧固件中，是极限性能和极限服役性能的前提和保障。

例如，钢的CCT曲线、TTT曲线提出了淬火冷却速度的要求，低於临界冷却速度淬火后，得不到约90%的马氏体组织、残余应力场与性能；淬火冷却速度高时还会发生开裂，因而需要冷至不同温度有相适应的冷却速度。大规格高强度紧固件一直受制於淬火冷却速度，困扰於淬火冷却介质。由於不同的材料和关键高强度紧固件需要不同的淬火冷却速度，甚至淬火冷却过程中不同温度下还需要不同的冷却速度。为此，淬火冷却介质主要应具备三大基本素质。

- ①冷却能力：冷却能力指的是高强度紧固件获得规定的组织、残余应力场与性能的硬化层深度，冷却能力无疑是淬火冷却介质的核心和创新的主题。遵循这一原则，淬火冷却介质已从传统的水、油、气介质进步到了各种各样的聚合物有机介质，并向复合介质发展。
- ②少变形：造成高强度紧固件热处理变形的因素很多，但主要源自各部位的淬火冷却不同步和整体不均匀。这一问题要靠冷却介质解决，并成为其发展方向。
- ③无毒与环保：紧固件列出“淬火冷却介质”作为关键技术，意在対淬火冷却介质做负责任地判定，建立无毒与环保的淬火冷却介质体系，以免给就业者、国人和子孙后代留下祸根。警示淬火冷却介质对人体伤害和环境污染。

## 二、技术展望

热处理所采用的冷却介质类型和参数很多，紧固件淬火中常用的是快速淬火油和PAG淬火液。随著各种清洁生产技术的推广和开发，在2016~2025年期间各种废水、废气、废渣的排放必须达到国家有关标准规定，力争做到热处理生产环境污染趋近於零。以PAG为代表的水溶性聚合物淬火介质的应用在中国已有20余年的历史，它以其固有的安全、环保、节能的特点一直受到业界关注。为此，紧固件企业生产将更需要采用以水溶性聚合物淬火液逐步取代淬火油，以适应节能减排的需要，这是发展的趋势。

- ①无毒与环保淬火冷却介质是紧迫需求。淬火介质对人体伤害和环境污染的主要关联包括淬火过程产生的气体排放、存放过程与环境的接触及废弃物的作用。

据分析，淬火油会在反复加热冷却过程形成多环芳烃，其典型代表苯丙芘是一种强致癌物，其残渣污染土壤水源，也极具危害性能，属于长期健康和生态污染物。在国际上被列为危险污染物，在中国2008年“国家危险废物名录”明确将淬火油残渣列入其中。淬火油是历史久远的传统淬火冷却介质，如此有害，值得重视。高分子聚合物淬火介质，在淬火过程中不燃烧、无烟雾，目前被认为是有发展前景的淬火油替代品。但在高温作用下可能会裂解出甲基、乙基、异氰基、氰基等自由基，并能通过氧化作用攻击生命大分子，从而引起人体细胞结构和功能的破坏，导致组织损害和器官退化性变化。高分子聚合物淬火冷却介质作为淬火油替代品必须谨慎使用。

目前，安全、绿色的淬火冷却介质是水、气、流态床及其之间形成的复合介质，需要集中力量快速发展。国外研究的高压水淬火冷却介质，冷却机理技术新、可行、效果佳。

- ②淬火冷却介质困扰大规格高强度紧固件。风电、核电高强度紧固件热处理的难点之一，是淬火冷却介质的冷却能力。可以设想，改变结构设计、感应热处理和淬火冷却介质是排除困扰，解决组织、残余应力场和力学性能不可控问题，这是提高服役性能的三项技术方向。
- ③理论研究。各类淬火冷却介质有各自的基础理论，其应用目标在於控制相变。所以，其理论基础离不开相变和「无应力集中」抗疲劳概念。淬火冷却介质技术的基本理念是，自主创新无污染淬火冷却介质并建立技术体系，快速形成无污染中国特色高强度紧固件淬火冷却介质产业，达到国际先进水平。

「十三五」期间及其未来20年，中国紧固件热处理的发展规划技术指标：①关键高强度紧固件表面各部位的冷却不同时间与温度差均降低2/3；②变形量减少2/3；③各项技术达到国外先进水平，关键高强度紧固件、大规格高强度紧固件疲劳寿命不低於国外现役同类产品。

