

淬火应力场对铝合金厚板固有频率的影响

胡永会, 吴运新

(中南大学机电工程学院, 湖南长沙 410083)



胡永会

摘要: 建立 7075 铝合金厚板淬火残余应力场数学模型, 理论与实验探讨振动时效中淬火残余应力场对板固有频率的影响。结果表明, 板尺寸、密度、均匀性等物理材料特性确定时, 其固有频率主要受到残余应力场的分布状态影响, 且高阶固有频率受残余应力的影响比低阶固有频率大。淬火残余应力场总是增大板的固有频率, 振动时效消减或均匀化残余应力的同时, 也将降低各阶次固有频率。

关键词: 7075 铝合金; 淬火; 残余应力场; 振动时效; 固有频率

中图分类号: TG146.21; O326 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2011)11-0050-05

Influence of Quenching Stress Field on Natural Frequency of Aluminum Alloy Thick Plate

HU Yonghui, WU Yunxin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Mathematical model of quenching residual stress field of 7075 aluminum alloy thick plate was established to theoretically and experimentally analyze the influences of quenching residual stress on plate natural frequency during VSR. The results show that plate natural frequency, based on constant physical material characteristics like dimension, density and homogeneity, etc., is mainly influenced by the residual stress distribution characteristics while quenching residual stress always increases plate natural frequency. And the higher the rank number is, the larger the influence of residual stress on frequency is. Moreover, natural frequency in each order would decrease following residual stress relaxation or homogenization caused by stress re-distribution during VSR.

Key words: 7075 aluminum alloy; quenching; residual stress field; VSR; natural frequency

1 前言

构件内残余应力的存在, 对构件的固有频率、阻尼等参数将产生影响。高永毅等人^[1-2]发现, 焊接残余应力场的存在增加了构件各阶次固有频率, 构件的阻尼也发生变化; 李文威等人^[3]也发现, 残余应力的存在, 对铸件固有频率等振动参数产生较大的影响, 同一梁形铸件经过 10 年时间的自然时效后, 其应力降低了 80%, 一阶固有频率降低了 20 Hz。

《振动时效工艺参数选择及技术要求》^[4]中明确提出振动时效过程中构件固有频率将发生变化, 故理论与实验研究残余应力场对构件固有频率的影响, 对残余应

力的评估和判断以及振动时效的研究有很大帮助。同时, 也为建立固有频率的变化与其残余应力的变化二者之间的定量关系提供一个可行方案。

2 应力场数学模型

由于板厚与板长、宽相差较大, 淬火过程中沿厚度方向的残余应力很小, 在工程应用与理论分析中常忽略。通常认为同一厚度上残余应力均匀分布, 而计算时将此应力看作常量, 即在板长与板宽构成的二维平面中, 应力仅为厚度的函数, 但实际上应力分布并不均匀, 尤其在板边缘附近应力已高度释放。如图 1 所示为 30 mm 与 40 mm 厚的两种铝板淬火表面边缘部分的残余应力分布, 而图 2 则为参考相关文献及课题组实验数据^[5-9]得到的淬火应力沿板厚方向分布规律。

由图 2 可知淬火铝合金厚板沿板厚残余应力分布特征为: 以板厚中性面对称, 整体上呈抛物线形, 压应力

收稿日期: 2011-03-30

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(2005CB623708; 2010CB731703)

通信作者: 胡永会, 男, 1985 年生, 硕士

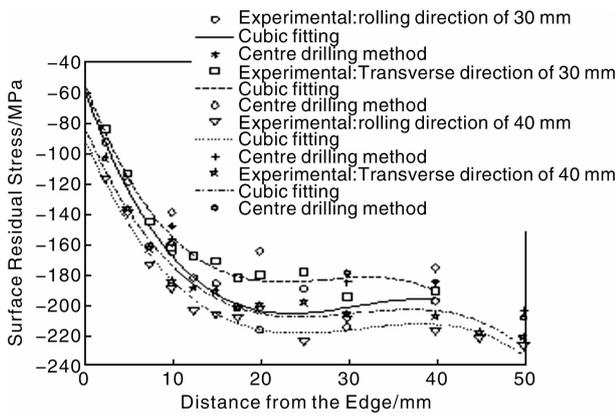


图 1 铝合金厚板淬火表面边缘残余应力分布
Fig. 1 Surface edge residual stress distribution of the quenched aluminum alloy

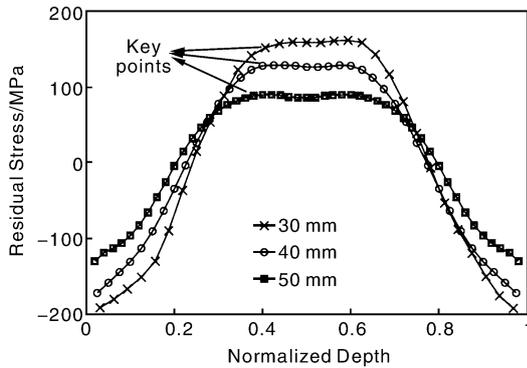


图 2 铝合金厚板厚度方向的淬火应力分布规律
Fig. 2 Residual stress distribution of the quenched aluminum alloy thick plate along its thickness

峰值出现在表层附近，心部厚度层 30% 至 70% 表现为拉应力峰值，且拉应力峰值约为压应力峰值的 3/4。故对此残余应力场数学模型的建立主要参照以下 3 个参量：表面残余应力水平测量值、关键点应力水平回归值及应力场分布线型函数。

对实验获得的多条应力分布曲线进行归一化处理，用数学统计的方法得到相应板厚度上的归一化应力，基于 Legendre 级数对数据点拟合，Legendre 级数首先在数学上保证沿厚板的应力平衡问题，则应力分布可以表示为厚度坐标 z 的函数。

另将板边缘残余应力简化为抛物线分布，分布距离为距板边缘一个厚度范围，其余应力简化为均布，同一厚度平面内纵横方向残余应力水平相当。则淬火热铝应力分布不仅与厚度有关，且受板长或板宽影响。

3 理论推导

对长 \times 宽 \times 高为 $a \times b \times h$ 的等厚矩形薄板建立图 3

中所示的坐标系：

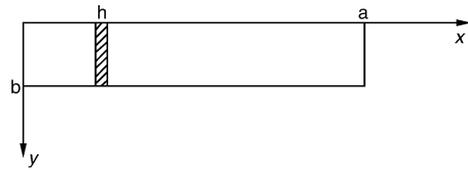


图 3 矩形薄板坐标系
Fig. 3 Coordinate system of the rectangular thin plate

则矩形板的自由振动方程为：

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + \frac{\rho h \partial^2 w}{D \partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中， w 为挠度， ρ 为单位体积质量， h 为板的厚度 (h 与其他尺寸相比很小)， $D = Eh^3/12(1 - \mu^2)$ 为板的弯曲刚度， μ 为泊松比。

对于固有振动，由方程(1)可得其振型方程：

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - \alpha^4 w = 0 \quad (2)$$

式中， $\alpha^4 = w^2 \frac{\rho h}{D}$ 为振型系数。

图 3 所示的矩形薄板四边简支时，其边界条件为：

$$\begin{aligned} (w)_{x=0} &= 0 & (\partial^2 w / \partial x^2)_{x=0} &= 0 \\ (w)_{x=a} &= 0 & (\partial^2 w / \partial x^2)_{x=a} &= 0 \\ (w)_{y=0} &= 0 & (\partial^2 w / \partial y^2)_{y=0} &= 0 \\ (w)_{y=b} &= 0 & (\partial^2 w / \partial y^2)_{y=b} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

此时薄板的振动微分方程为：

$$D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + \rho h \ddot{w} = q \quad (4)$$

式中， q 为单位面积上的载荷。

如图 4 所示，板弯曲时(微变形)板内沿 x 轴和 y 轴的残余应力在 z 方向有式(5)中的分量。

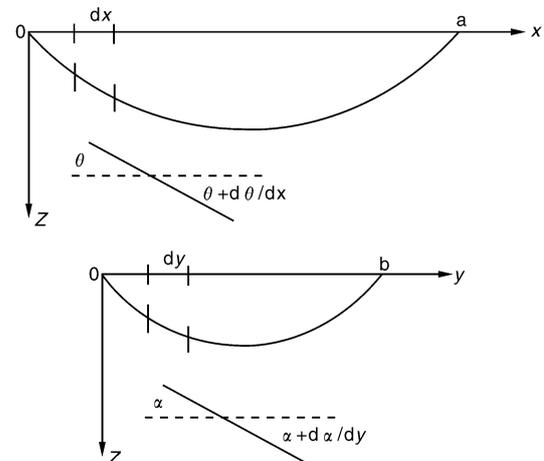


图 4 四边简支矩形薄板形变图
Fig. 4 Deformation of the rectangular thin plate simply supported on four sides

$$\begin{aligned} \sigma_x \sin \theta &\approx \sigma_x \theta \quad \theta = \partial w / \partial x \\ \sigma_y \sin \alpha &\approx \sigma_y \alpha \quad \alpha = \partial w / \partial y \end{aligned} \quad (5)$$

作用在 $dx dy$ 面上的单位厚度中总 f_z 分量为:

$$f_z = f_{xz} + f_{yz}$$

$$f_{xz} = -\sigma_x dy \left(\theta + \frac{\partial \theta}{\partial x} dx \right) + \sigma_x dy \theta = -\sigma_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} dx dy \quad (6)$$

$$f_{yz} = -\sigma_y dx \left(\alpha + \frac{\partial \alpha}{\partial y} dy \right) + \sigma_y dx \alpha = -\sigma_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} dx dy$$

注意到残余应力沿厚度中性面对称的特点,则残余应力所引起 z 方向的单位面积的力 q 为:

$$\begin{aligned} q &= \int_{-\frac{t}{2}}^{+\frac{t}{2}} f_z dz / dx dy = \int_{-\frac{t}{2}}^{+\frac{t}{2}} \left(-\sigma_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \sigma_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) dz \\ &= -2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \int_0^{\frac{t}{2}} \sigma_{\rho}(z) dz \end{aligned} \quad (7)$$

令 $\Phi = -2 \int_0^{\frac{t}{2}} \sigma_{\rho}(z) dz$, 定义为影响系数。将式(7)代入式(4)得到振动方程:

$$D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + \rho h \ddot{w} = \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \Phi \quad (8)$$

令 $w = \bar{w}(x, y) \sin(\omega_{mn} t + \beta)$, 代入式(2)得到其主振型方程为:

$$D \nabla^4 \bar{w}(x, y) - \rho h \omega_{mn}^2 \bar{w}(x, y) = \Phi \nabla^2 \bar{w}(x, y) \quad (9)$$

式中, ∇ 为散度算子, 又令 $\bar{w}(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cdot \sin \frac{n\pi y}{b}$, 代入(9)整理后得到:

$$\omega_{ij}^2 = \frac{\pi^4 D}{\rho h} \left(\frac{i^2}{a^2} + \frac{j^2}{b^2} \right)^2 - \frac{\pi^2 \Phi}{\rho h} \left(\frac{i^2}{a^2} + \frac{j^2}{b^2} \right) \quad (10)$$

式(10)即为在在淬火残余应力时四边简支矩形薄板的固有频率计算公式。弹性力学中已给出无残余应力时图3中四边简支矩形薄板的固有频率公式为:

$$\omega_{mn}^2 = \frac{\pi^4 D}{\rho h} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 \quad (11)$$

对比式(10)与式(11)可知,式(10)中的第2项为淬火残余应力对固有频率的影响。虽然得到了淬火残余应力场下铝合金厚板固有频率的表达式,但尚未推导出这种应力场对固有频率的影响是增加抑或是减小,下面将针对典型的淬火应力场进行讨论。

若认为淬火残余应力场仅为厚度的函数,则由于应力分布的对称性与均衡性,影响系数 Φ 恒为零;而若淬火残余应力场为厚度、板长或板宽的函数,此时淬火应力影响板固有频率的公式推导从式(7)后将有所不同,此时 Φ 不为零,由淬火板的应力分布状态与水平确定。而计算结果表明, Φ 为表面残余应力 $\sigma_{\rho-s}$ 的非线性函数,且只要 $\sigma_{\rho-s} < 0$, 则 $\Phi < 0$, 则

$$-\frac{\pi^2 \Phi}{\rho h} \left(\frac{i^2}{a^2} + \frac{j^2}{b^2} \right) > 0 \quad (12)$$

故铝合金板淬火后其固有频率总是增大的:且①其他因素不变时, Φ 数值越大(与残余应力场分布状态有关),固有频率变化越大;②其他因素不变时,材料密度越大,固有频率变化越小;③其他因素不变时,阶数 i 与 j 越高,固有频率变化越大;④其他因素不变时,尺寸 h, a 与 b 越大,固有频率变化越小。

4 实验与讨论

试验用材为 2A12 高强铝合金轧制板,其主要成分为 $w_{Cu} = 4\%$, $w_{Mg} = 1.6\%$ 、 $w_{Mn} = 0.5\%$ 、 $w_{Zn} = 0.3\%$, 单个杂质的 $w < 0.05\%$, 合计杂质的 $w < 0.10\%$, 其余为 Al。试样为尺寸 1 000 mm × 500 mm × 20 mm 的 4 块轧制板, 分别标记为 P1, P2, P3, P4。其中, P1 与 P2 板保持为原始轧制状态, 应力水平较低; 而 P3 与 P4 板从室温开始每 h 升高 100 °C, 保温 10 min, 固溶温度达到 480 °C 后保温 2 h, 采用水浴淬火。

残余应力测量设备为加拿大 Proto 公司生产的 iXRD 型衍射仪, 测量参数为: 辐射线 CoK_{α} , 管电压与电流分别为 20 kV 与 4 mA, 衍射晶面为 (331), 高斯拟合定峰, 准直管尺寸 2 mm × 5 mm。淬火板测量结果表明其表面压应力水平最大达 180 MPa。

搭建振动时效系统平台如图 5 所示, 选用神华振动时效技术研究所生产的神华 SHX2108 型全自动屏展振动时效仪。由于激振器的质量达 20 kg, 与试样铝板相比质量较大, 且铝板尺寸较小, 固有频率比较高, 所以在安排支承座时, 主要需要考虑的不再是受激振工件的振型, 而是考虑整体振动时效系统在振动时的平衡。由于激振器及其夹具体积紧凑, 材料刚性、密度很大, 且安装位置远离系统共振点, 故认为除铝板外各配件振动过程中不发生频率改变。

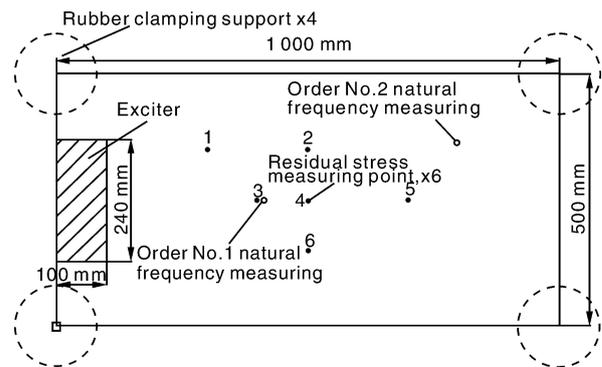


图5 振动时效系统平台示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the VSR system platform

选择一阶与二阶固有频率对各铝板激振，采用振动时效仪的半自动方式对铝板振前与振后进行扫频，并根据加速度传感器拾取的加速度达到峰值时对应的激振器转速，即可得到系统共振时的固有频率。通过对比激振前后铝板残余应力与固有频率的变化，可研究淬火残余应力场对铝板的一、二阶固有频率的影响规律。

将激振器的偏心角调整至 30°，分别设置振动时效

控制系统在一阶、二阶固有频率附近进行振动时效，时效时间各设为 25 min，振动时效仪的自动跟踪扫频功能可保证系统一直在固有频率附近激振，得到表 1 不同应力状态下的铝板固有频率激振前后结果对比。测量 P1 与 P3 铝板各应力测试点振前、一阶激振后与二阶激振后的残余应力值，得到表 2 激振前后铝板残余应力结果对比。

表 1 铝板固有频率激振前后结果对比

Table 1 Comparison results of aluminum plate natural frequency before and after VSR

Frequency/Order number		No queched		Queched		Average change
		P1	P2	P3	P4	
f_{b-vsr}/Hz	Order No. 1	75.51	76.85	78.37	80.43	3.22
	Order No. 2	123.3	122.8	127.2	130.7	5.9
f_{a-vsr}/Hz	Order No. 1	76.17	76.69	77.52	79.61	2.14
	Order No. 2	123.2	122.0	124.4	127.8	3.8
$\Delta f/\text{Hz}$	Order No. 1	-0.66	0.16	0.85	0.82	2.17
$\Delta f = f_{b-vsr} - f_{a-vsr}$	Order No. 2	0.1	0.8	2.8	2.9	2.4

f_{b-vsr} , f_{a-vsr} and Δf showing nature frequency before and after vibration and their change, respectively

表 2 铝板残余应力激振前后结果对比

Table 2 Comparison results of aluminum plate residual stress before and after VSR

P1	$\sigma_{b-vsr}/\text{MPa}$	$\sigma_{a1-vsr}/\text{MPa}$	$\Delta\sigma_1/\text{MPa}$	$\sigma_{a2-vsr}/\text{MPa}$	$\Delta\sigma_2/\text{MPa}$
1	33.1	34.2	-1.1	31.7	2.5
2	49.3	47.5	1.8	49.1	-1.6
3	53.2	53.6	-0.4	52.1	1.1
4	27.8	30.1	-2.3	29.8	0.3
5	58.4	58.8	-0.4	56.2	2.6
6	38.7	38.5	0.2	37.6	1.1
P3	$\sigma_{b-vsr}/\text{MPa}$	$\sigma_{a1-vsr}/\text{MPa}$	$\Delta\sigma_1/\text{MPa}$	$\sigma_{a2-vsr}/\text{MPa}$	$\Delta\sigma_2/\text{MPa}$
1	-123.6	-129.2	5.6	-121.1	-8.1
2	-136.2	-127.7	-8.5	-129.3	1.6
3	-173.1	-158.4	-14.7	-155.2	-3.2
4	-150.6	-144.3	-6.3	-136.6	-7.7
5	-117.8	-131.7	13.9	-127.8	-3.9
6	-128.3	-126.4	-1.9	-120.9	-5.5

σ_{b-vsr} , σ_{a1-vsr} and σ_{a2-vsr} showing residual stress before vibration and after vibration with order 1 and order 2 nature frequency, respectively, $\Delta\sigma_1$ and $\Delta\sigma_2$ showing change of residual stress after vibration with order 1 and order 2 nature frequency, respectively

由表 1 与表 2 可知，当矩形板的尺寸 a , b 与 h 及密度 ρ 不变时，可认为只有残余应力场的分布状态对板的固有频率有影响，而且表现出以下特性：①有淬火残余应力场的铝板其一阶、二阶固有频率增大，且二阶大于一阶固有频率的变化量；②激振后，淬火铝板一阶、

二阶固有频率下降，且二阶大于一阶固有频率的变化量；③振动时效后，铝板淬火残余应力场得到一定程度的消减与均化，相应的固有频率有所下降。

残余应力并不是影响板固有频率的直接因素，而只是这种影响的一种表现形式。理想状态下，认为板材为各向同性的匀质结构，此时影响板固有频率的弹性模量也是均匀分布的一定值。然而受加工使用等条件限制，板材在某些场合表现出强烈的非均匀性，即弹性模量的非均匀与材料晶格分布的非均匀（宏观表现为弹塑性变形，即残余应力）。残余应力与弹性模量相互影响，公式推导与实验结果也说明弹性模量对板固有频率的影响在一定程度上可由残余应力的影响体现出来。

5 结 论

残余应力对构件固有频率的影响客观存在且可以测试出来。构件的固有频率主要受到残余应力场的分布状态影响，残余应力消减或均匀化将降低构件的各阶固有频率，而且高阶固有频率受残余应力的影响比低阶固有频率大。实验中由于构件尺寸与淬火应力水平的限制，残余应力对试样低阶固有频率的影响很小，而工程应用中大多构件工作频率皆处于一阶或二阶固有频率范围内，残余应力对构件固有频率的影响很难引起操作者和研究者的注意。另外，依据构件的一阶或二阶固有频率明显降低这一准则来判断振动时效的效果，在某些场合并不理想，而应该合理选用其他判据。

参考文献 References

- [1] Gao Yongyi(高永毅), Su Zhixiao(苏志霄), Jiao Qunying(焦群英), et al. 残余应力对构件固有频率影响的讨论[J]. *Journal of Mechanical Strength* (机械强度), 2002, 24(2): 289-292.
- [2] Gao Yongyi(高永毅), Liu Deshun(刘德顺). 利用试验模态分析进行残余应力评估的研究[J]. *Journal of Vibration and Shock* (振动与冲击), 2005, 24(5): 111-114.
- [3] Li Wenwei(李文威), Dong Xuewu(董学武), Wang Dongqiang(王东强), et al. 铸铁构件固有频率与其残余应力关系的研究[J]. *Journal of Zhongyuan University of Technology*(中原工学院学报), 2007, 18(2): 7-10.
- [4] GB/T5926, *Process Parameters Selection and Technical Requirement of Vibration Aging*(振动时效工艺参数选择及技术要求)[S]. PRC Engineering Industrial Ministry, 1991.
- [5] Michael B Prime, Michael R-Hill. *Residual Stress, Stress Relief, and Inhomogeneity in Aluminum Plate* [J]. *Scripta Materialia*, 2002(46): 77-82.
- [6] Liao Kai(廖凯), Wu Yunxin(吴运新), Gong Hai(龚海). 基于积分法的铝合金厚板内部残余应力测试应用分析[J]. *Journal of Central South University of Technology: Natural Science Edition* (中南大学学报: 自然科学版), 2010, 41(1): 179-183.
- [7] Liao Kai(廖凯), Wu Yunxin(吴运新), Gong Hai(龚海). 淬火厚板残余应力测试的仿真-实验综合方法[J]. *Journal of Sichuan University: Natural Science Edition* (四川大学学报: 自然科学版), 2010, 42(3): 211-215.
- [8] Gong Hai(龚海), Wu Yunxin(吴运新), Liao Kai(廖凯). 预拉伸对 7075 铝合金厚板残余应力分布的影响[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报), 2009, 30(6): 201-205.
- [9] Gong Hai(龚海), Wu Yunxin(吴运新), Liao Kai(廖凯). 铝合金厚板残余应力测试方法有效性分析[J]. *Journal of Materials Engineering*(材料工程), 2010(1): 42-46.

中科院兰州化学物理研究所镁合金表面处理技术取得新进展

2011年11月13日获悉,中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室低维材料摩擦学组研发出一种乙二醇型冷却系统用镁合金稀土转化膜的制备方法,该项技术获得国家发明专利授权。(乙二醇型冷却系统用镁合金稀土转化膜的制备方法,专利号:200810183390.5)

该方法包括预处理及活化、化学转化膜步骤。制备的稀土转化膜厚度均匀、表面致密性好、与基体结合良好,在乙二醇-水冷却液中具有优异的耐腐蚀性能,可以解决发动机冷却系统用镁合金在冷却液中严重腐蚀的问题。且制备转化膜处理液成分简单,不含传统化学转化工艺中所用的六价铬化合物,为无铬环保的稀土转化膜。

汽车轻量化是降低油耗和减少排放的最有效措施之一,镁合金被公认为是当今最有前途的汽车轻量化材料。在汽车冷却系统中采用镁合金具有很好的减重潜力和应用前景,但镁合金的标准电极电位低、化学和电化学活性高,在冷却液中耐腐蚀性能非常差,这严重制约了其在冷却系统中应用。

冷却液是发动机冷却系统中不可或缺的传热介质,目前商业冷却液基本上都是乙二醇-水体系。对冷却液中镁合金缓蚀剂的研究表明,对镁合金在冷却液中具有明显效果的特殊缓蚀剂很大程度上会对系统中的其他金属产生严重的腐蚀。因此,对其进行表明处理是防止镁合金在冷却系统中腐蚀最有效的途径。

由于发动机缸体冷却系统主要为循环冷却管道,其特殊的形状和环境限制了微弧氧化、气相沉积、激光处理、喷涂处理等表面处理技术的应用,而化学转化膜处理法可以克服以上技术不足。然而,现有的镁合金转化膜工艺均存在一定缺陷,如对环境污染严重、复合膜膜层不致密、配方溶液成分复杂等。目前还很少公开有适用于发动机冷却系统用镁合金的表面稀土转化膜处理工艺。

(来源: http://www.cas.cn/ky/kyjz/201111/t20111114_3395658.shtml)