

X射线法测量淬火铝合金厚板表面残余应力

胡永会, 吴运新, 陈磊, 郭俊康

(中南大学机电工程学院, 湖南长沙 410083)



胡永会

摘要: 采用无损 X 射线衍射技术测试了 7075 铝合金厚板淬火后表面残余应力水平与分布, 得到了淬火铝合金厚板表面残余应力的分布区间和一般规律, 分析了准直管对测试结果的影响, 并与中心钻孔法得到的结果做了比较。结果表明, 两种方法都能有效并正确测量构件的表面残余应力, 但中心钻孔法不适合用于应力梯度大的场合, 而 X 射线法在无应力或原始应力水平很低的情况效果欠佳。淬火铝板表面残余应力的测试结果呈正态分布, 且淬火过程中边缘局部有应力释放, 释放值可达 40%, 且此区域大小约为铝板的一个厚度。

关键词: X 射线衍射法; 7075 铝合金; 残余应力; 中心钻孔法; 边缘效应

中图分类号: TG115.22; TG146.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962
(2011)02-0051-05

Experimental Measurement of Surface Residual Stresses of Quenched Aluminum Alloy Thick Plate by X-Ray Method

HU Yonghui, WU Yunxin, CHEN Lei, GUO Junkang

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

Abstract: Surface residual stress distributions and general rules of quenched 7075 aluminum alloy thick plates were acquired by non-destructive X-ray diffraction method, in which effects of collimators were analyzed and the stress results were compared with measurements from center drilling method. The results show that both of the two surface stress measurement methods are effective and correct. But center drilling method is not suitable to conditions with large stress gradient while X-ray method is not effective in conditions where there is no stress or very low initial stress level. In addition, surface residual stress measurements of the plates showing normal distributions which indicate credibility and correctness of the measured stress distributions. Edge effect causes residual stress relaxation near the edges of plates during quenching process, in which the maximum relaxation may amount to 40% of initial stress and the region size occurring stress relaxation would be equal to the thickness of the quenched plate.

Key words: X-ray diffraction method; 7075 aluminum alloy; residual stress; center drilling method; edge effect

1 前言

7075 高强铝合金厚板是航空航天与武器装备工业中使用广泛的关键性结构材料, 然而在其成形和热处理过程中引入的残余应力造成工件变形和尺寸不稳定, 是长期困扰工程界的技术难题^[1-2]。由于 X 射线法的无损与理论成熟等特性, 配合材料表面的逐层剥除, 目前正被广泛应用于高强铝合金的表层残余应力测试与研究工

作中^[3-6]。

本文采用 X 射线衍射法测量淬火 7075 铝合金厚板的表面残余应力, 研究其应力分布区间与一般规律, 并与中心钻孔法得到的结果比较分析, 讨论 X 射线测量结果的可信度与正确性。试验结果表明, X 射线法与中心钻孔法测试结果稍有差别, 但皆可有效并正确测试出淬火铝合金厚板的表面残余应力, 实际应用中可互补验证。但是二者的应用场合受限于初始残余应力状态, 初始局部应力梯度大将对中心钻孔法测量结果产生影响, 而无应力或初始应力水平很低的情况下, X 射线衍射法测试结果将引入较大误差。残余应力测试结果也表明, 淬火板表面残余应力呈正态分布特性, 且在淬火过程中厚板边缘发生大幅应力释放, 影响区域约为一个铝板厚度。

收稿日期: 2010-06-19

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973 计划)资助
(2005CB623708; 2010CB731703)

通信作者: 胡永会, 男, 1985 年生, 硕士研究生

2 X 射线残余应力测量原理

2.1 基本原理

X 射线应力测定的基本思路是一定的应力状态引起材料晶格应变和宏观应变是一致的。晶格应变可以通过 X 射线衍射技术测出，宏观应变可根据弹性力学求得，因此从测得的晶格应变可推知宏观应力^[7]。受力状态下晶面间距的变化使布拉格角 θ 产生角位移，当 X 射线的人射角满足布拉格方程产生衍射时，晶体材料中入射线、衍射线、晶面法线和材料表面法线间的角度关系如图 1 所示。图中 Ψ 为产生衍射的晶面法线和材料表面法线之间的夹角； 2θ 为衍射线与入射线之间的夹角， $2\theta = 180^\circ - 2\eta$ ；入射角 Ψ_0 为入射线与材料表面法线之间的夹角。

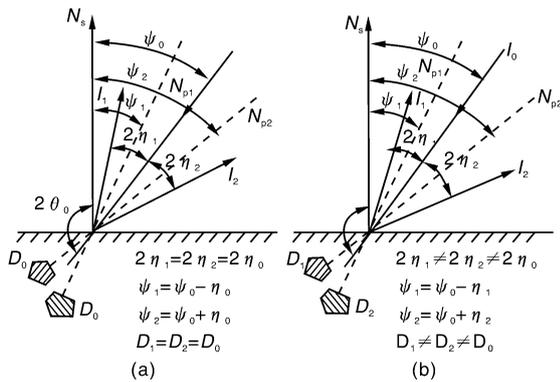


图 1 入射线、衍射线、表面法线和晶面法线间的角度关系：
(a) 无应力状态，(b) 有应力状态

Fig. 1 Relationships of angles among incident beam, diffraction beam, normal of sample surface and crystal plane: (a) without stress and (b) with stress

测量时认为材料为宏观均匀、各向同性，则主应力与主应变方向一致，如图 2 应力 - 应变状态坐标系所示， σ_φ 为作用在试样表面某一方向的待测应力。

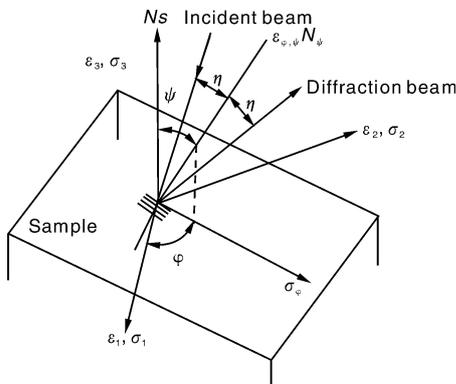


图 2 应力 - 应变状态坐标系

Fig. 2 Coordinate system of stress-strain state

2.2 计算方法

由于 X 射线的透入深度很小(对铝合金一般为 10 - 30 μm)，故测试中认为 X 射线照射表面薄层处于平面应力状态， σ_3 为零，且 $\sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi = \sigma_\varphi$ (此时 $\psi = 90^\circ$)，大多数情况下的实际测定对象符合此假定^[8-9]。另外，假设晶格应变与宏观应变一致，则得到采用 $\sin^2 \psi$ 计算方法 X 射线应力测定的基本方程：

$$\begin{cases} \sigma_\varphi = K \cdot M \\ K = \frac{-\frac{1}{2} \cot \theta_0 \frac{\pi}{180}}{\frac{1}{2} S_2} \\ M = \frac{\partial 2\theta_{\varphi, \psi}}{\partial \sin^2 \psi} \\ S_2 = \frac{2(1+\nu)}{E} \end{cases} \quad (1)$$

式中， K 为 X 射线应力常数， $\text{MPa}/(^\circ)$ ； M 为在不同 ψ 方向测定的衍射线角位置 $2\theta_{\varphi, \psi}$ 与 $\sin^2 \psi$ 直线关系的斜率； θ_0 为 X 射线掠射角； ψ 为产生衍射的晶面法线和材料表面法线之间的夹角； ν 为泊松比； E 为弹性模量。 E 可以从资料中查出或通过实验得到，计算 σ_φ 的步骤为选择若干个 ψ 方向测量衍射线角位置 $2\theta_{\varphi, \psi}$ ，并求出 $2\theta_{\varphi, \psi}$ 与 $\sin^2 \psi$ 之间斜率 M 。

3 试验材料与方法

3.1 试样制备

本实验用到的材料是 7075 铝合金，主要成分如下(按质量百分比计算)：1.6% Cu，2.5% Mg，0.23% Cr，5.6% Zr，余量 Al。试样尺寸为 1 200 mm \times 220 mm \times 30 mm 与 1 200 mm \times 220 mm \times 40 mm 2 种，长度方向为轧向。试样热处理机制为：从室温开始，以 100 $^\circ\text{C}/\text{h}$ 升高，保温 10 mm，固溶温度达到 480 $^\circ\text{C}$ 后保温 2 h，采用水浴淬火。考虑到板材的对称性与淬火的均匀性，表面残余应力测试点沿 Al 板纵向与横向中心线对称分布，且纵向与横向测试点间隔分别为 100 mm 与 40 mm。

3.2 实验设备与参数

残余应力测量设备为加拿大 Proto 公司生产的 iXRD 型衍射仪，其应力测试误差范围为 ± 10 MPa。本次对铝合金的实验测量参数为：辐射线 CoK_α ，X 射线管压 20 kV，管流 4 mA，衍射晶面为 (331)，采用高斯拟合定峰，准直管尺寸 2 mm \times 5 mm，曝光时间 2 s，每个 ψ_0 位置曝光次数 20 次，弹性常数 $1/2 S_2$ 为 18.5606×10^{-6} ， ψ_0 取 $\pm 28^\circ$ 、 $\pm 22.4^\circ$ 、 $\pm 16^\circ$ 、 $\pm 10.06^\circ$ 、 $\pm 2.10^\circ$ 与 0° ，另外，在每个 ψ_0 位置有 3° 的 Φ 角摆动。

X 射线投射到被测材料表面的范围决定了材料产生衍

射晶面的范围和数量，由准直管尺寸控制。对于轧制铝合金材料，由于受到晶粒尺寸和织构的影响，须增加衍射晶面的数量以减小误差，但准直管尺寸越小，才越能体现被测一点的残余应力值。准直管尺寸过小时，衍射强度弱且衍射峰形差，即拟合误差也越大；准直管尺寸过大时， $2\theta_{\varphi,\psi} - \sin^2\psi$ 曲线拟合呈现较大的非线性。综合考虑，本次实验选择 2 mm × 5 mm 准直管时的测量结果较好，图 3 为采用此准直管测量铝合金厚板表面某一点残余应力得到的衍射峰曲线(a)与 $2\theta_{\varphi,\psi} - \sin^2\psi$ 曲线(b)。

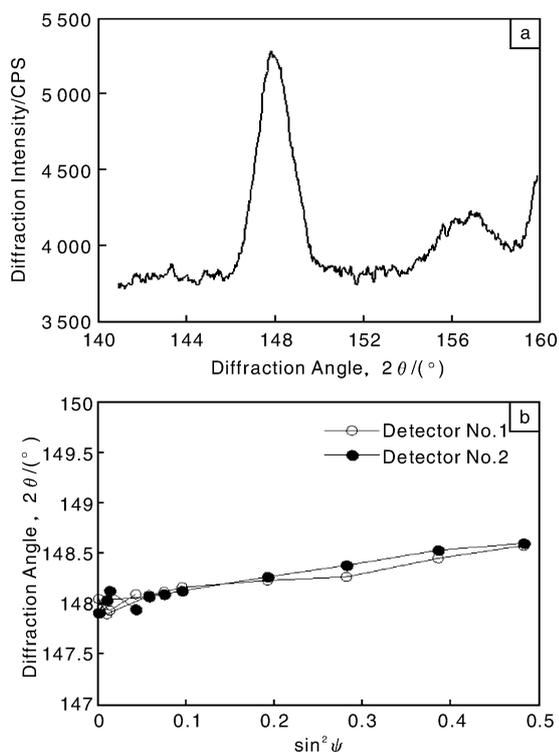


图 3 2 mm × 5 mm 准直管得到的衍射曲线：(a) 衍射峰强度曲线，(b) $2\theta - \sin^2\psi$ 曲线

Fig. 3 Diffraction curves by 2 × 5 mm collimator: (a) Diffraction intensity versus angle and (b) $2\theta_{\varphi,\psi} - \sin^2\psi$ curve

4 结果与讨论

根据以上实验条件，对两种不同厚度但经相同淬火工艺处理后的铝合金厚板表面进行残余应力测试，得到二者沿其轧向与横向的应力分布如图 4 所示，其中沿铝板轧向测量的是其轧向残余应力，而沿铝板横向测量的是其横向残余应力。

图 4 和图 5 的分布曲线表明，淬火后铝合金表面轧向残余应力较横向稍大，且两个方向的应力分布在一定的区间范围内，忽略边缘效应的影响，残余应力测量值最大相差达 60 MPa。这主要有两个方面的原因，淬火过程中铝合金厚板的应力应变状态急剧变化，厚板内外

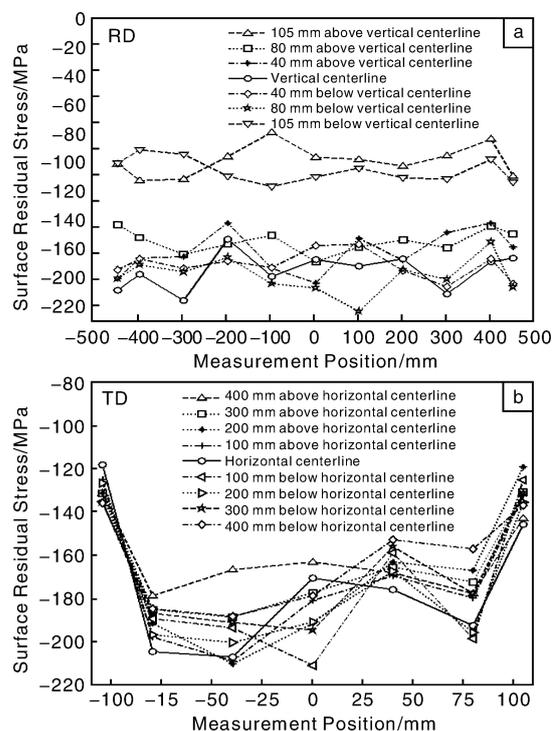


图 4 30 mm 铝合金厚板表面轧向 (a) 和横向 (b) 残余应力分布
Fig. 4 Surface residual stresses distribution of rolling (a) and transverse (b) direction of 30 mm aluminium alloy thick plate by X-ray method

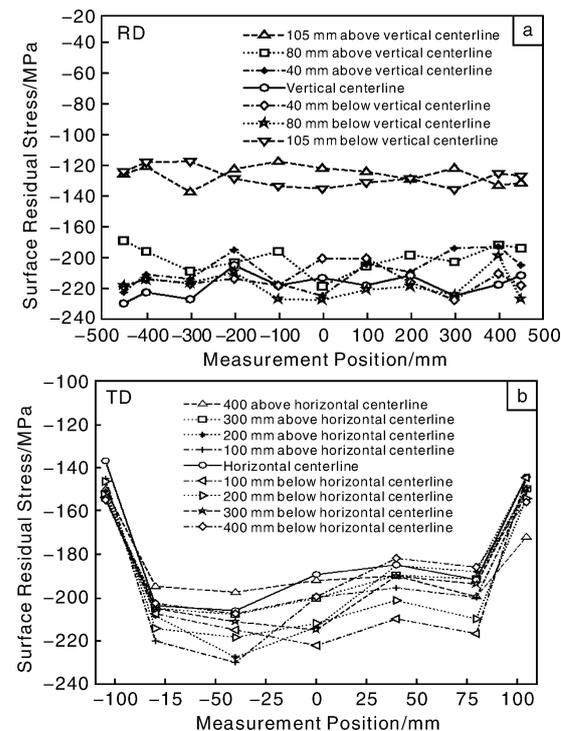


图 5 40 mm 铝合金厚板表面轧向 (a) 和横向 (b) 残余应力分布
Fig. 5 Surface residual stresses distributions of rolling (a) and transverse (b) direction of 40 mm aluminum alloy thick plate by X-ray method

各处热交换状态以及受到周围材料应力应变状态的影响皆不相同, 所以会产生一定的不均匀性; 另外 X 射线应力测量存在 ± 10 MPa 左右的测量误差, 也是引起应力测量结果不均匀的原因。进一步的分析表明, 检验显著水平标准 $\alpha = 0.01$ 时, 各组应力测量结果样本应用皮尔逊统计量检验后皆服从正态分布^[10], 表明 X 射线测试结果的正确性和可信度。

分析图 4 和图 5 可以看出, 两种厚板淬火后表面残余应力沿轧向与横向分布趋势基本相同, 较厚的板淬火过程中表面与心部换热速率慢, 温度梯度维持时间长, 故冷却后 40 mm 厚铝板较 30 mm 厚铝板表面残余应力数值上大 20 MPa 左右。值得注意的是, 由于边缘效应, 铝板在淬火过程中边缘部分的残余应力演变与稳态应力场较铝板表面中部明显不同。细化铝板边缘应力测量点, 得到图 6 所示两种厚度的铝板表面边缘部分沿铝板中心线的残余应力分布。采用中心钻孔法对 X 射线测试结果进行检验, 于各铝板表面选择 3 个钻孔位置。钻孔设备及参数为: 山东华云机电科技有限公司生产的 HK21B 残余应力测量仪, 郑州机械研究所生产的 TJ120-1.5- φ 1.5 型三向电阻应变计, 电阻值为 120 Ω , 打孔直径与深度分别为 1.5 mm 与 2 mm, A、B 系数分别为 -1.5 与 2.7。

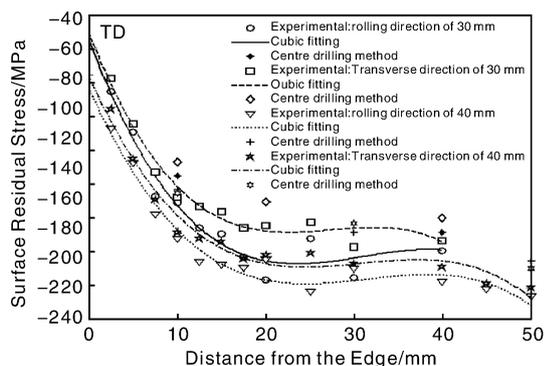


图 6 铝合金厚板表面边缘残余应力分布

Fig. 6 Surface residual stresses distributions of aluminum alloy thick plate edge by X-ray method

图 6 表明, 中心钻孔测量得到的表面残余应力大小较 X 射线法测试值偏小, 分析其原因, 主要是两种方法测试结果的局部对象不同。X 射线在铝合金中的穿透深度不超过 30 μm , 可认为测试结果为表面应力; 而中心钻孔测试得到的结果为沿厚度方向 2 mm 的平均值, 应力平均造成钻孔测试值偏小。两种应力测试方法结果相差 (20 ~ 30) MPa, 与被测应力水平相比, 为可接受偏差, 说明二者测试结果都是正确的, 条件允许的情况下, 二者可以相互补充或验证。

图 6 还表明, 铝板经淬火引入的表面残余应力在边缘部分发生部分应力释放, 而且距边缘发生应力释放的距离大约为铝板的厚度大小, 应力最大平均释放达到原始水平的 40%。在工程应用或实验室测定此类板材表面残余应力水平和分布时, 可认为距边缘大于一个厚度的位置残余应力测量值为其原始应力状态; 或试图精确测定构件的原始残余应力水平时, 应合理选择应力测量点以避免边缘效应的影响。

5 结 论

采用中心钻孔法和 X 射线法的检测结果比较表明, 二者都可真实反映淬火铝板的原始应力状态。在具有较大应力梯度的场合, 中心钻孔法测试结果将受到影响; 而 X 射线法不适合测试无应力或原始应力很小的构件。

通过应力测试发现, 忽略边缘效应后, 30 mm 厚铝板淬火后轧向表面残余应力分布在 -160 MPa 至 -220 MPa 之间, 横向应力略小于轧向应力, 40 mm 厚铝板表面残余应力水平较 30 mm 厚铝板整体高 20 MPa 左右, 分布趋势相同, 且两厚板表面残余应力皆服从正态分布。另外, 由于边缘效应造成淬火铝板边缘局部发生应力释放, 而此区域的大小约为试样的一个厚度, 应力最大平均释放 40%。

参考文献 References

- [1] Kang Xiaoming(康小明), Sun Jie(孙杰), Su Caimao(苏财茂), *et al.* 飞机整体结构构件加工变形的产生和对策[J]. *China Mechanical Engineering* (中国机械工程), 2004, 15(13): 1140-1143.
- [2] 米谷茂, Translated by Shao Huimeng, Zhu Jingpu(邹会孟, 朱荆璞译). *Cause of Residual Stress and Countermeasures*(残余应力的产生和对策)[M]. Beijing: China Machine Press, 1983: 261-307.
- [3] Chen Yu'an(陈玉安), Zhou Shangqi(周上祺). 残余应力 X 射线测定方法的研究现状[J]. *Non-Destructive Testing*(无损检测), 2001, 23(1): 19-22.
- [4] Sinha V K, Godaba V S. Residual Stress Measurement in Worked and Heat Treated Steel by X-Ray Diffractometry[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2008(488): 491-495.
- [5] Blinksmeier E. Nondestructive Testing for Evaluation Surface Integrity[J]. *CIRP*, 1984, 33(2): 489.
- [6] Sun Jianzhong(孙建中). X 射线法测定预拉伸铝合金板材表面残余应力[J]. *Light Metals*(轻金属), 1998(6): 51-53.
- [7] Zhang Dinquan(张定铨). 残余应力测定的基本知识[J]. *Part A: Physical and Chemical Testing*(理化检验-物理分册), 2007, 43(5): 263-265.
- [8] Liu Ming(柳铭), Song Ruihong(宋瑞宏), Kong Dejun(孔德军). 用 X 射线应力仪测量凸轮轴表面激光淬火相变层的

残余应力[J]. *Materials for Mechanical Engineering* (机械工程材料), 2007, 31(7): 28-31.

[9] Zhang Ming(张 铭), He Jiawen(何家文). 丝织构对薄膜X射线残余应力分析的影响[J]. *Materials for Mechanical Engi-*

neering (机械工程材料), 2001, 25(5): 21-23.

[10] Sheng Zhou(盛 骧), Xie Shiqian(谢式千), Pan Chengyi(潘承毅). *Probability and Statistics for Engineers* (概率论与数理统计)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005.

《中国材料进展》投稿须知

1 总体要求

(1) 来稿必须为原创作品, 尚未公开发表, 且篇幅不宜太长; 文章应具有能概括全文的中、英文摘要, 以及3~8个关键词。

(2) 投稿请登录《中国材料进展》杂志网站 www.mat-china.com, 或者杂志邮箱: rml@c-nin.com。

(3) 文章应论点明确、数据可靠、论证充分、结论完整、文字通畅。

2 内容及格式具体要求

(1) 文章题目 应简洁、凝练, 一般不宜超过20个字, 英文题目应与中文题名相吻合。

(2) 中英文摘要 要用第3人称, 应能涵盖文章的主要信息, 具有独立性; 研究论文摘要应包括研究目的、方法、结果和结论等4要素, 见摘要可窥全文, 故要求中文摘要篇幅在200~300字, 为便于收录和对外交流, 特别要求英文摘要不少于300字。

(3) 关键词 必须能精确反映文章内容, 以便检索。

(4) 文中的照片和曲线应清晰, 字符清楚, 宽度在80 mm以内或在170 mm以内; 表格为全英文的三线表。

(5) 计量单位一律采用法定计量单位, 物理量符号采用国家标准, 并注意区别外文字母的大小写和正斜体, 上下标位置要标示清楚。

(6) 参考文献著录格式

期 刊 [序号] 著者(中英文对照). 篇名[J]. 刊名(中英文对照, 英文斜体), 年, 卷(期): 起止页.

普通图书 [序号] 著者(中英文对照). 书名(中英文对照, 英文斜体) [M]. 出版地(英文): 出版者(英文), 年: 起止页(可不要).

中 译 本 [序号] 原著者. 书名(中英文对照, 英文斜体)[M]. 译者(中英文对照). 出版地(英文): 出版者(英文), 年: 起止页.

科技报告 [序号] 主要责任者(中英文对照). 报告名称(中英文对照, 英文斜体)[R]. 地点(英文): 单位

(英文), 年.

论 文 集 [序号] 著者或文集编者(中英文对照). 文集全名(中英文对照, 英文斜体)[C]. 出版地(英文): 出版者(英文), 年: 起止页.

学位论文 [序号] 主要责任者(中英文对照). 论文名称(中英文对照, 英文斜体)[D]. 学位授予地点(英文): 学位授予单位(英文), 年.

专利文献 [序号] 专利申请者或所有者(中英文对照). 专利名称(中英文对照, 英文斜体): 专利国别, 专利号[P]. 公告日期.

报 纸 [序号] 作者(中英文对照). 题目 [N]. 报纸名称(中英文对照, 英文斜体), 日期(版次).

电子文献 [序号] 责任者(中英文对照). 题名(中英文对照, 英文斜体)[EB/OL]. (更新日期)[引用时期]. 获取和访问路径.

国家标准 [序号] 著者或标准编者单位(中英文对照). 标准号, 标准名称(中英文对照, 英文斜体)[S]. 出版地(英文): 出版者(英文), 出版年

3 其它要求

(1) 严禁一稿多投、重复内容多次投稿、不同文种重复投稿。

(2) 来稿请写清楚联系人的姓名、性别、职务、职称、详细通讯地址、邮编、电话及E-mail; 稿件寄出3个月后未见答复, 作者有权自行处理。

(3) 获得基金资助的项目应注明基金项目名称和基金项目编号。

(4) 文稿需作者在本单位进行保密审查, 本刊概不负责保密事务。

(5) 稿件一经刊出, 即表明作者已经认可其版权转至本刊杂志社, 本刊在国内外文献数据库或检索系统进行交流及合作时, 不再征询作者意见。

在线投稿网址: <http://mat-china.com>

咨询电话: 029-86226599

E-mail: rml@c-nin.com