

锆及锆合金表面变形强化技术进展

高世杰, 史欣婷

西安石油大学材料科学与工程院, 陕西 西安 710065

DOI:10.61369/ME.2025100028

摘 要 : 锆及其合金在某些特殊工况或极端环境下会出现耐蚀性差、硬度低、耐磨性差等表面性能问题, 限制了锆及其合金的应用。表面处理技术能够使高及其合金的耐磨耐蚀性等优势更加突出, 如何在不同工况下使用对应的表面处理手段是当下的一个关键性问题。综述了锆及锆合金在表面变形强化的特点, 对比其各自优缺点并精细化分类, 根据不同需求提出合适的表面处理手段的建议, 最后展望了锆及锆合金表面处理技术的发展方向。

关 键 词 : 锆; 锆合金; 表面处理; 表面耐腐蚀; 耐磨性

Progress in Surface Deformation Strengthening Technology for Zirconium and Zirconium Alloys

Gao Shijie, Shi Xinting

Institute of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065

Abstract : Zirconium and its alloys may exhibit surface performance issues such as poor corrosion resistance, low hardness, and insufficient wear resistance under certain special working conditions or extreme environments, which limits their applications. Surface treatment technologies can further enhance the advantages of zirconium and its alloys, such as wear resistance and corrosion resistance. How to select corresponding surface treatment methods for different working conditions is a key issue at present. This paper summarizes the characteristics of surface deformation strengthening of zirconium and its alloys, compares their respective advantages and disadvantages, and conducts refined classification. Appropriate suggestions for surface treatment methods are proposed based on different requirements, and finally, the development direction of surface treatment technologies for zirconium and its alloys is prospected.

Keywords : zirconium; zirconium alloy; surface treatment; surface corrosion resistance; wear resistance

引言

锆及其合金有着耐腐蚀性能良好、热中子吸收截面低以及优异的生物相容性等特点, 近些年被广泛应用于核工业、石油化工、压力容器等领域的关键设备中^[1-6]。然而, 在实际应用过程中, 由于锆合金氧化层过薄, 导致其表面出现点蚀等腐蚀失效以及硬度低、耐磨性差等问题^[7]。为减少此类危害, 需要对锆及其合金进行表面处理, 通过表面处理技术可以提高锆及其合金的耐磨性和耐蚀性, 从而提高其腐蚀寿命。这一技术手段对于提升产品的使用寿命、工作可靠性以及拓展其应用领域具有关键意义, 可显著突破材料在原始状态下的性能局限。

然而, 不同的表面处理手段强化方向、适用环境以及经济性效益都有所不同, 其中, 表面变形强化最为一种常用表面处理方法, 在不同工况下使用哪一种表面变形强化方法是提高锆及其合金的腐蚀寿命、磨损寿命等的重点。因此, 本文综述了表面变形强化技术的分类, 分析不同表面处理技术的适用工况以及适用的锆合金零部件类型, 对比不同表面变形强化处理方法并进行分类, 为不同工况提供合理的表面处理建议。锆及锆合金表面变形强化技术及其应用领域如表1所示^[8]。

表1 锆及锆合金表面处理技术及其应用领域^[8]

方向	技术	应用领域
表面变形强化技术	喷丸强化	航空航天 (发动机叶片、结构件)、核工业 (压力管道)、机械制造 (齿轮、轴类)
	滚压强化	汽车工业 (底盘部件)
	激光冲击强化	精密机械 (轴承、导轨)

表面变形强化技术是通过物理手段对材料表面施加机械载荷, 使其发生塑性变形并引入残余压应力, 从而提升表面硬度、耐磨性、

抗疲劳及抗应力腐蚀性能的一类工艺。

表面变形强化技术相比于表面合金化、表面涂层等技术，加工成本较低，并且无需引入新元素，适用于对工件尺寸精度要求高、工件形状复杂等情况，如核工业核心部件、精密薄壁零件等。

一、喷丸强化

喷丸是锆及锆合金关键的表面变形强化工艺，借助高速弹丸的冲击作用，使材料表层产生强烈塑性形变，进而催生高密度位错与晶界缺陷，并在表面构建显著的压应力场，喷丸强化适用于锆合金的非精密表面、复杂结构件、薄壁件等。这一工艺不仅可促使表层晶粒细化至纳米级（晶粒尺寸达100nm以下），更能通过微观组织的重构，显著提升锆合金的表面机械强度、耐磨特性、抗疲劳性能及耐腐蚀能力^[9]。

李宁^[10]等通过采用表面高能喷丸工艺（HESP）对工业纯锆（R60702）焊接接头进行处理，并对处理后的试样进行了电化学测试，电化学测试结果如图1所示，进行高能喷丸处理的R60702焊接接头自腐蚀电位正移，腐蚀电流密度降低，处理后的三处位置电位差明显减少，从而抑制电偶腐蚀。何晓梅^[11]等通过高能震动喷丸对纯钛进行处理，如表2所示，处理后的纯钛显微维氏硬度从180HV提高到372.6HV，硬度明显提高。

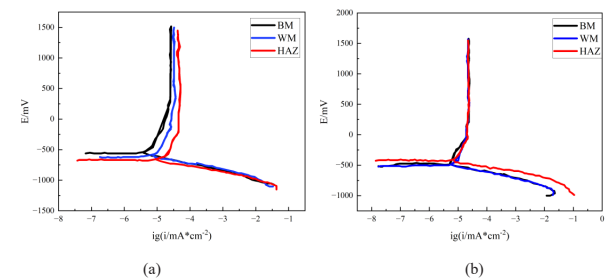


图1 未处理和经 HESP 处理后焊接接头 3 个区域极化曲线^[10]：（a）未处理，（b）经 HESP 处理

表2 纯钛在不同强度下喷丸处理后的显微硬度值 (HV)^[11]

喷丸强度	设定值	平均值
原始纯钛	182,180,178	180
0.20A	351,335,357	348
0.40A	381,354,383	372.6

二、滚压强化

滚压强化是一种通过硬质滚压工具（如滚轮、滚珠或滚柱）对金属工件表面施加可控的机械压力，使其表层材料产生塑性变形和冷作硬化的表面处理技术^[12]。相比于其他的表面变形强化方式，滚压强化适用于形状规则、高硬度以及表面粗糙度有高精度要求的设备，如阀门阀芯、法兰密封面、高精度轴类零件等^[13]。

冯泽奇^[14]等研究了超声滚压加工中静压力对Ti6Al4V合金试样表面完整性的影响，随着静压力增大，试样的塑性变形程度增大，但是过大的静压力会增大表面粗糙度，破坏表面完整性，

如图2（a）所示，当静压力为0.3MPa时，表面显微硬度提高到632HV，表面平均残余压应力约为305MPa，如图2所示（b）以及表3所示，相较于未滚压试样，经过超声滚压后，试样的腐蚀电流密度为3.007E-07A/cm²，降低了90.43%，年腐蚀速率为9.84E-4mm/a，降低了90.44%。

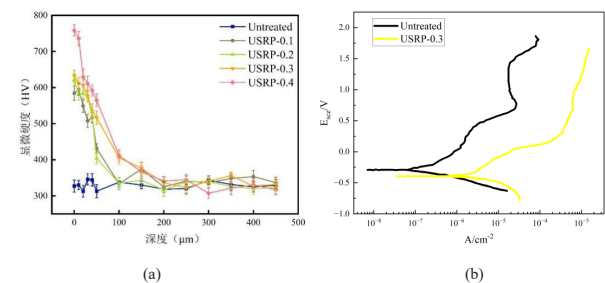


图2 Untreated与USRP0.1~USRP0.4的显微硬度（a），Untreated和USRP-0.3的极化曲线及拟合结果（b）^[14]

表3 极化曲线拟合结果^[14]

试样名称	E _{corr} /(VSCE)	I _{corr} /(A/cm ²)	CR/(mm/a)
Untreated	-0.4003	3.14E-06	1.03E-02
USRP-0.3	-0.2973	3.01E-07	9.84E-04

三、激光冲击强化

激光冲击强化（Laser Shock Peening,LSP）是一种利用高能激光诱导冲击波改善金属材料表面性能的先进表面强化技术。相比于其他表面变形强化方法，激光冲击强化更适合深层强化，激光冲击强化示意图如图3所示。

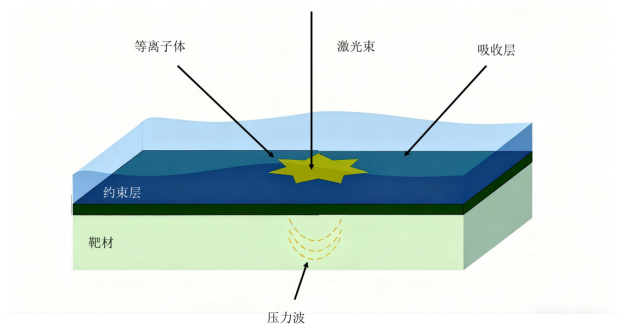


图3 激光冲击强化示意图^[25]

Liu^[15]等对Zr合金进行了LSP处理，并对处理后的表面晶粒尺寸和表面硬度粗糙度进行了表征，处理后表面晶粒细化的平均晶粒尺寸最大减小了52.7%（从22.88μm²降低到10.8μm²），同时处理后硬度增加了59%（204HV至326HV），处理后表面粗糙度有所提高，经过LSP处理后，表面上的TRS（横向残余应力）转化为CRS（周向残余应力），此外，在处理过的表面上会产生

压缩残余应力层,从而降低了应力腐蚀开裂的风险。

四、总结

本文介绍了三种能够表面变形强化技术,并对比了各自优缺点:

(1) 表面喷丸强化: 适用于铝合金的非精密表面、复杂结构件、薄壁件等。

(2) 表面滚压强化: 适用于形状规则、高硬度以及表面粗糙度有高精度要求的设备

(3) 表面激光冲击强化: 适合对于强化影响深度要求较高的零部件。

参考文献

[1]海敏娜,王快社,王文,等.纯铝 R60702 板材焊接接头的腐蚀性能研究 [J].稀有金属,2015,39(09):787-792.DOI:10.13373/j.cnki.cjrm.2015.09.004.

[2]张强,齐世锋,陈鸿飞,等.在高温硝酸与丙烷蒸气环境中 R60702工业纯铝的腐蚀行为 [J].机械工程材料,2020,44(07):33-37+50.

[3]张聪慧,杨军,宋国栋,等.超声喷丸对工业纯铝拉疲劳性能的影响 [J].稀有金属材料与工程,2019,48(06):1954-1960.

[4]杨西荣,王欣哈,张文艳,等.工业纯铝的低周疲劳特性及寿命预估 [J].稀有金属材料与工程,2019,48(08):2515-2522.

[5]李献军,王镐,文志刚,等.工业级铝在化学工业的应用现状及前景分析 [J].世界有色金属,2012,7:57-59.

[6]宋国栋.表面纳米化工业纯铝拉伸断裂性能研究 [D].西安建筑科技大学,2020.DOI:10.27393/d.cnki.gxazu.2020.001922.

[7]李宁,叶建林,郝大来.一种铝基材料表面原位陶瓷化复合处理方法 [P].陕西省:CN202011632715.0,2024-03-15.

[8]王东,张晓静,戴泓源,等.钛及钛合金表面处理技术研究进展 [J].中国材料进展,2024,43(10):924-934.

[9]陈旭东.表面纳米化316LN不锈钢抗辐照及耐腐蚀性能研究 [D].北京科技大学,2020.DOI:10.26945/d.cnki.gbjku.2020.000283.

[10]李宁,张敏,雒设计,等.高能喷丸对 R60702 焊接接头组织性能的影响 [J].稀有金属材料与工程,2021,50(06):2100-2105.

[11]何晓梅,赵西成,王敬忠,等.喷丸处理实现纯钛表面纳米化的研究 [J].热加工工艺,2007,(16):7-9+55.

[12]王燕礼,朱有利,杨嘉勤.滚压强化技术及在航空领域研究应用进展 [J].航空制造技术,2018,61(05):75-83.DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.05.075.

[13]王强,吕心如,孙志豪,等.表面机械滚压处理对2024铝合金表面粗糙度及性能的影响 [J].金属热处理,2025,50(04):282-289.DOI:10.13251/j.issn.0254-6051.2025.04.044.

[14]冯泽奇,韩新哲,李顺康,等.静压力对超声滚压 Ti6Al4V 合金表面完整性和腐蚀性的影响 [J/OL].机械科学与技术,1-12[2025-06-03].https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20240180.

[15] Liu Z ,Pan F ,Deng X , et al.Experiments and Multiscale Simulation on Enhancement Mechanism of Zirconium Alloy Microstructure and Properties by Laser Shock Peening[J].Chinese Journal of Mechanical Engineering,2025,38(1):74-74.