

加工表面质量对耐腐蚀性能影响的研究进展

陈光军^{1,2}, 侯帅², 韩松鑫²

(1.天津职业技术师范大学 机械工程学院, 天津 300222;
2.佳木斯大学 机械工程学院, 黑龙江 佳木斯 154007)

摘 要: 加工表面质量对材料表面耐腐蚀性能的影响具有复杂性和综合性, 研究加工表面质量对材料表面耐腐蚀性能的影响, 对如何延长机械产品的服役寿命、预测加工表面质量、精简制造工序和优化加工参数等具有重要的指导和实践作用。对已加工表面腐蚀形成机理进行了分析, 并指出了影响耐腐蚀性能的因素, 从加工表面机械物理特征和加工表面几何形状特征两方面入手, 综述了已加工表面质量对耐腐蚀性能影响的研究进展。重点报道了加工表面机械物理特征中表面残余应力、加工表面金相组织变化以及加工表面冷作硬化对耐腐蚀性能影响的研究进展, 分别总结了加工表面几何形状特征中已加工表面的表面纹理、表面粗糙度和表面伤痕对耐腐蚀性能影响的研究进展。提出应开展多表面质量参数之间相互影响综合分析, 以及各表面质量参数联合作用下对表面耐腐蚀性能影响的研究, 为开展表面质量与金属材料加工表面耐腐蚀性能关联性研究打下基础, 并指出了加工表面质量对耐腐蚀性能影响研究的未来发展趋势。

关键词: 耐腐蚀性能; 表面质量; 残余应力; 金相组织; 粗糙度

中图分类号: TG506; TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)10-0025-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.10.003

Research Progress on Effect of Machined Surface Quality on Corrosion Resistance

CHEN Guang-jun^{1,2}, HOU Shuai², HAN Song-xin²

(1.School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China;
2.School of Mechanical Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China)

ABSTRACT: The influence of machined surface quality on the corrosion resistance of material surface is complex and comprehensive. The research on the effect of machined surface quality on the corrosion resistance of material surface has important guiding and practical functions on how to prolong the service life of mechanical products, predict the machined surface quality, simplify the manufacturing process and optimize the processing parameters. The mechanism of corrosion formation on machined surface was analyzed, and the factors affecting corrosion resistance were pointed out. The research progress on the effect of machined surface quality on corrosion resistance was reviewed from the aspects of mechanical and physical characteristics of machined surface and geometrical characteristics of machined surface. The research progress on residual stress, microstructure changes of machined surface and the influence of cold hardening on corrosion resistance of machined surface was mainly reported, the effects of surface texture, surface roughness and surface scars on corrosion resistance

收稿日期: 2019-05-07; 修订日期: 2019-07-11

Received: 2019-05-07; Revised: 2019-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51675231); 黑龙江省自然科学基金 (LH2019E090)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51675231) and the Natural Science Foundation of Heilongjiang (LH2019E090)

作者简介: 陈光军 (1975—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为精密切削加工技术。邮箱: chenguangjun@126.com

Biography: CHEN Guang-jun (1975—), Male, Doctor, Professor, Doctoral supervisor, Research focus: precision machining technology. E-mail: chenguangjun@126.com

of machined surface were summarized. It is suggested that a comprehensive analysis of the interaction between multi-surface quality parameters should be carried out, and the combined effects of various surface quality parameters on the surface corrosion resistance should be studied. In order to lay a foundation for the research on the relationship between surface quality and corrosion resistance of machined surface of metal materials, the future development trend of the research on the influence of machined surface quality on corrosion resistance has been pointed out.

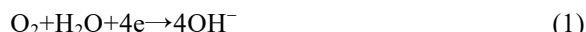
KEY WORDS: corrosion resistance; surface quality; residual stress; metallurgical structure; roughness

由于受工作环境的影响,加工表面在使役过程中不可避免地会出现腐蚀,其耐腐蚀性能直接影响到产品的寿命。在进行加工之前就将加工表面质量对耐腐蚀性能的影响因素考虑其中,以期获得符合需求的最优产品。近年来,国内外相关领域的许多专家学者在已加工表面质量对其耐腐蚀性能的影响方面做了许多研究。本文对加工表面腐蚀的形成机理以及影响因素进行了探讨,并从加工表面机械物理特征和加工表面几何形状特征两方面入手,综述了已加工表面质量对耐腐蚀性能影响的研究进展。

1 已加工表面腐蚀形成机理及其影响因素

金属材料受到周围介质作用发生损坏,称为金属

腐蚀。根据金属腐蚀机理不同,分为化学腐蚀及电化学腐蚀,以电化学腐蚀出现居多^[1-3]。随着电子及离子转移,在腐蚀发生区形成多种原电池,以吸氧腐蚀、析氢腐蚀为主,如公式(1)、(2)所示。



影响腐蚀形成的因素可概括为内、外因素:外因包含所处介质、pH 值等^[4-7];内因包含材料的表面质量、晶体形态、应力等^[8-10]。腐蚀按其形态可划分为全面腐蚀与局部腐蚀,在表层以局部腐蚀居多,如点蚀、晶间腐蚀、选择性腐蚀、剥层腐蚀等^[11-12],如图 1 所示。

郭新刚等^[13]就不锈钢的几种常见表面腐蚀成因及其腐蚀防护进行了研究,着重介绍了点蚀、晶间腐蚀以及应力腐蚀的形成因素和防护措施,并阐述了钝化膜理论及稳定元素理论对表面耐腐蚀性能的影响。

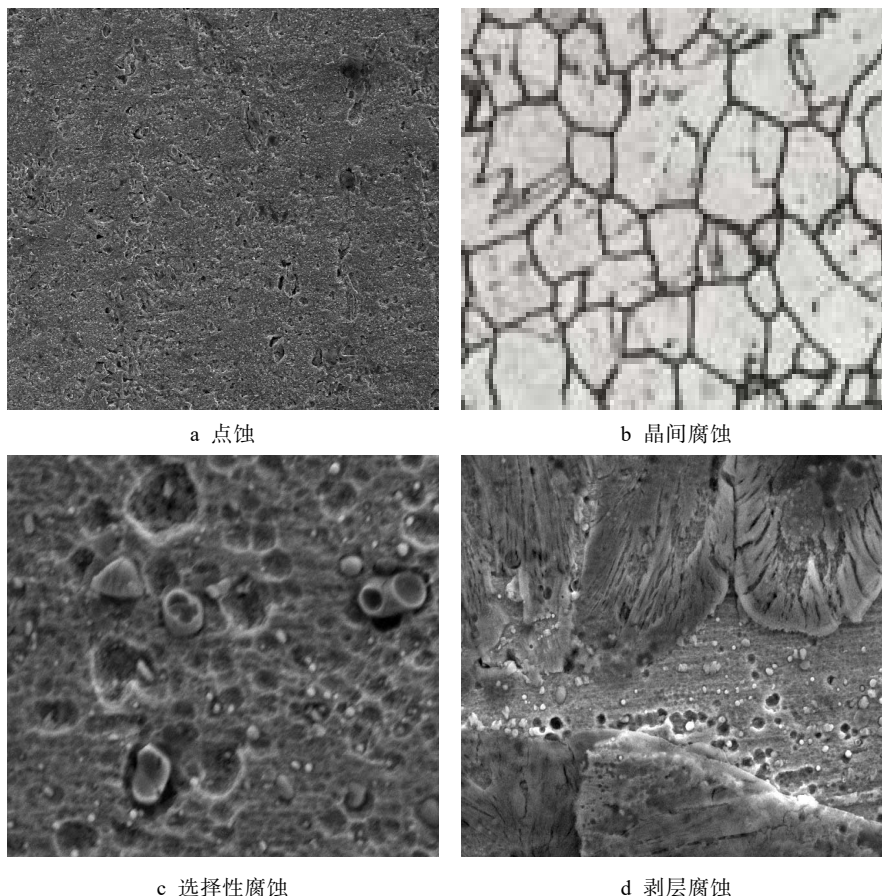


图 1 表面腐蚀主要形态

Fig.1 Main forms of surface corrosion: (a) pitting, (b) intergranular corrosion, (c) selective corrosion, (d) exfoliation corrosion

已加工表面的耐腐蚀性能一般与表面质量有直接关系,加工过程中的切屑瘤、划痕、金相组织变化、表面波度、微裂纹等都会影响已加工表面的耐腐蚀性能。如图 2 所示,腐蚀过程一般是从表面或者是裂纹处向内部进行,凸起处经腐蚀后脱落重新形成新的凹凸表面,腐蚀继续进行。

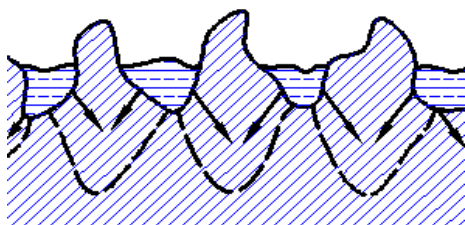


图 2 表面腐蚀过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of surface corrosion process

2 加工表面机械物理特征对耐腐蚀性能影响的研究进展

2.1 表面残余应力对耐腐蚀性能的影响

残余应力的产生主要是由于加工过程中切削力及切削热的综合作用,在表层发生塑性变形或金相组织变化,一般表征为残余拉应力及压应力。残余拉应力会破坏材料表层的耐腐蚀性能,压应力与之相反。图 3 为基体在有无应力作用下的腐蚀形态变化。无应力时,腐蚀呈现出向四周均匀扩散的趋势;有应力时,根据应力性质不同,存在拉应力的区域形成严重腐蚀,甚至产生腐蚀裂纹,加速腐蚀进程,存在压应力

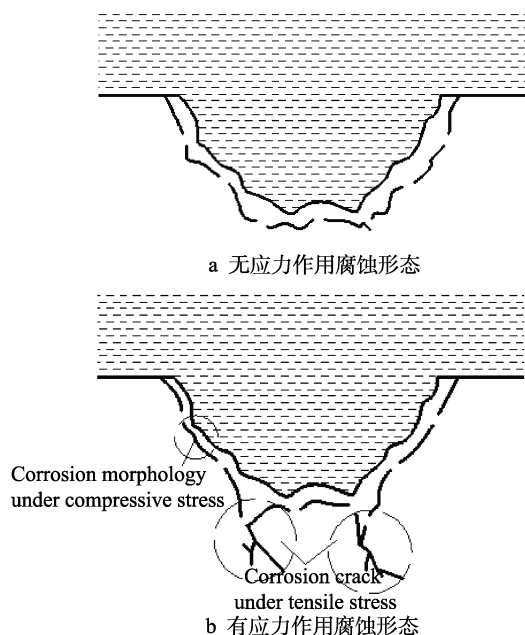


图 3 有无应力下腐蚀形态变化

Fig.3 Change of corrosion morphology under the condition with or without stress: (a) non-stress corrosion morphology, (b) stressed corrosion morphology

的区域表现出延缓腐蚀进行的趋势。

目前国内外学者关于残余应力对耐腐蚀性能影响方面做了相当多的研究,比如残余应力下腐蚀速率、腐蚀电位变化、腐蚀裂纹生成发展趋势等。根据 BADWE N^[14]对不同材料层腐蚀情况的研究,发现腐蚀层与未腐蚀层之间保持足够的粘合,腐蚀层出现的应力腐蚀裂纹可能穿透到未腐蚀层,加速材料腐蚀破坏。残余应力对腐蚀速率的影响巨大,ANITA T^[15]、李晨^[16]等通过较直观的角度研究了应力与腐蚀的联系,发现表面残余压应力与残余拉应力对表面耐腐蚀性能的影响相反,残余拉应力与耐腐蚀性能呈现负相关趋势,随残余拉应力的增大,耐腐蚀性能减弱。崔晓玉^[17]通过对不锈钢转鼓外轮廓面的冷加工实验,发现外轮廓面存在残余拉应力是其发生应力腐蚀的主要因素,经过热处理将拉应力转变成压应力之后,冷加工外表面的耐腐蚀性能明显提高。来维亚等^[18]研究表明:304 不锈钢在残余拉应力作用下,随着残余拉应力的增大,钝化电位与孔蚀电位差值增大,耐腐蚀性能变差,而且随着残余拉应力的增大,腐蚀速率增大。

汤精明等^[19]研究了电火花表面强化及喷丸强化对 40Cr 钢耐腐蚀性能的影响,发现经过强化后的表面层组织均发生了改善,并产生了较大的残余应力,增强了材料的溶解活性,使其耐腐蚀性能降低,如图 4 所示。为处理后试样的耐腐蚀性能评级,表面磨削加工和喷丸强化处理的试样在前期腐蚀评级呈现快速下降趋势,磨削加工试样在腐蚀 48 h 后达到 3 级,之后缓慢降低,在 240 h 时达到 0 级,经过磨削加工的试样的耐腐蚀性能较差;喷丸强化处理的试样,在腐蚀 72 h 后达到 0 级,耐腐蚀性能最差;电火花强化处理的试样的腐蚀评级降低相对较缓,最后稳定在 4 级,耐腐蚀性能最好。RHOUMA 等^[20]通过对表面进行不同处理,研究了不锈钢的耐腐蚀性能,发现通过打磨处理后,加工表面残余压应力的存在对表面耐腐蚀性能起到了良好的促进作用。葛茂忠等^[21]通过激光冲击强化对 AZ31B 镁合金在模拟液体中应力腐蚀开裂的影响研究,发现经过双侧激光冲击强化产生了对称的残余压应力,明显提高试件表面的耐腐蚀性能。

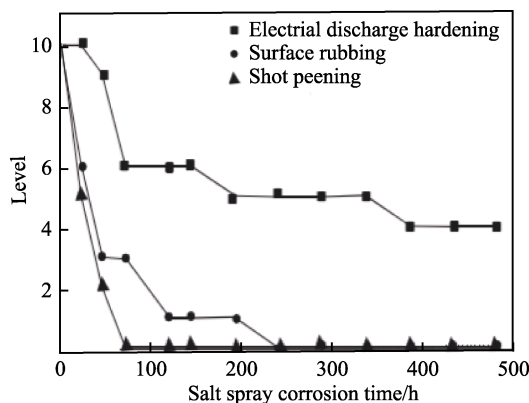


图 4 试样耐腐蚀评级^[19]

Fig.4 Corrosion resistance rating of samples^[19]

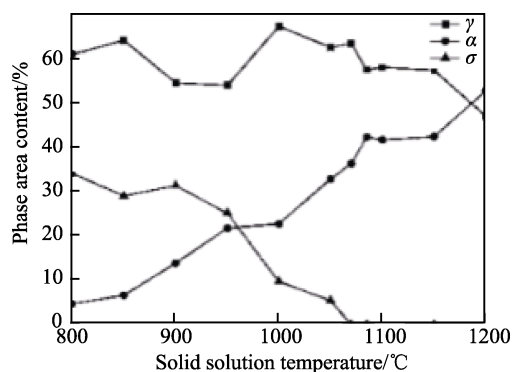
根据汤精明、RHOUMA 等人结论, 这些加工工艺会通过改变表面形貌和近表面残余应力, 来影响钝化膜和近表面层的电化学及机械稳定性, 从而影响表面层的耐腐蚀性能。

刘彤辉^[22]通过对镍基粉末高温合金铣削加工实验, 研究了加工表面在模拟海洋环境下残余拉应力对耐腐蚀性能的影响。发现加工表面的腐蚀速率与残余拉应力呈正相关趋势, 表面残余拉应力越大, 工件加工表面的腐蚀速率越快, 工件因腐蚀导致使用寿命减小的速度越快, 这与李晨等人关于残余应力影响下腐蚀发展趋势的结论基本一致。

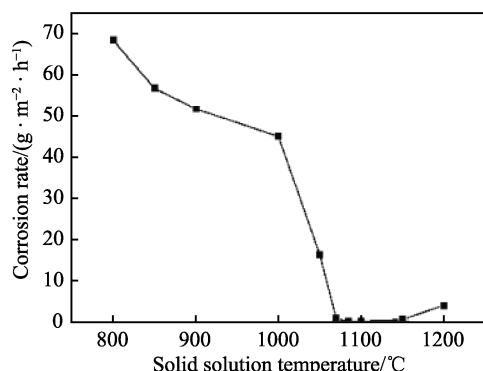
2.2 加工表面金相组织变化对耐腐蚀性能的影响

在机械加工过程中, 由于热、力冲击等作用, 已加工表面会与基体组织表现出不同的金相组织, 金相组织变化在金属腐蚀过程中会起到重要的作用。国内外关于金相组织变化对耐腐蚀性能影响的研究, 主要集中在晶粒细化、晶界面积变化、偏析相变化以及不同金相组织的反应极性等方面。

黄盛等^[23]研究了 σ 相金属化合物变化对不锈钢的耐腐蚀性能影响, 图 5 为相面积含量及其点蚀率变化。温度在 800~1050 °C 之间, 有大量的 σ 相金属化合物析出, 其耐腐蚀性能降低; 温度在 1070~1200 °C 之间, σ 相金属化合物溶解, 其耐腐蚀性能先升后降,



a 固溶处理温度对相面积含量的影响



b 固溶处理温度对点蚀率的影响

图 5 相面积含量及其点蚀率随固溶温度的变化曲线^[23]
Fig.5 Curve of phase area content (a) and pitting corrosion rate (b) with solid solution temperature^[23]

1100 °C 时达到最佳耐腐蚀性能。

朱绍严^[24]通过对 PH15-7Mo 不锈钢进行固溶处理, 发现在固溶温度升高后, 马氏体组织增大, 自腐蚀电位降低, 耐腐蚀性能提高。郑丽鸽等^[25]用固溶处理方法对 Mg-1Zn-0.3Zr-2Gd-0.3Sr 合金金相组织及耐腐蚀性能进行了研究, 发现经过处理后的合金偏析相明显减少, 组织较初始铸态合金均匀, 合金的耐腐蚀性能有较大改善, 平均腐蚀速率比铸态合金降低了 42.8%。吴慧^[26]通过对高氮不锈钢固溶处理, 研究了不锈钢固溶处理后抗晶间腐蚀的性能, 发现固溶处理保温时间对其耐腐蚀性能有重要影响。当时间较短时, 随着温度的升高, 晶粒生长, 晶界面积减小, 耐晶间腐蚀性能增强; 当时间较长时, 由于析出物增多, 晶间腐蚀开始沿着晶界发展, 耐腐蚀性能减弱, 析出物含量是耐腐蚀性能的一个重要指标, 这与郑丽鸽等结论基本一致。

侯丹丹^[27]通过对 6082 铝合金晶间腐蚀进行分析研究, 发现合金发生局部网状腐蚀, 说明合金晶界腐蚀由于晶界性质不同, 晶界腐蚀发生具有选择性; 由于无晶界析出, 而合金发生晶间腐蚀, 是由于 α -Al 基体与单质 Si 之间存在腐蚀电位差, 导致点蚀发生并逐渐扩展至周围基体组织, 引起晶间腐蚀, 如图 6 所示是合金晶间腐蚀形貌。根据 PU 等^[28]以及 TANG 等^[29]研究发现, 经滚压加工后加工表面晶粒细化, 表面层的耐腐蚀性能有所提高。孔德军等^[30]通过对 X80 焊接接头激光冲击处理, 发现处理后表面耐腐蚀性能提高, 主要是由于处理后表面层晶粒细化引起的, 这与 PU 和 TANG 等人结论一致, 晶粒细化是表面层耐腐蚀性能提高的原因之一。同时根据 BOAG A^[31]、仲照琳^[32]等研究发现: 在金属组织中, 一般以 η 相、S 相和 β 相作为反应阳极, 最先开始受到腐蚀。

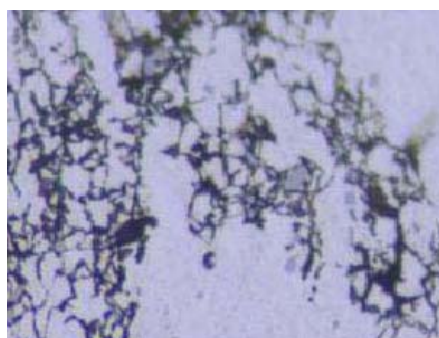


图 6 晶间腐蚀形貌^[27]

Fig.6 Inter granular corrosion morphology^[27]

2.3 加工表面冷作硬化对耐腐蚀性能的影响

在切削等机械加工过程中, 由于热力耦合作用, 加工表面层晶体可能会发生严重的扭曲破坏以及剪切滑移, 并伴随着晶粒的拉长、纤维化和破碎, 导致材料加工表面层强度、硬度明显提高, 即表面层的冷作硬化, 从而影响加工表面的耐腐蚀性能。

文献[33]通过对低碳马氏体不锈钢的机械加工表面腐蚀实验分析,发现加工表面的显微硬度对点蚀电位存在较大的影响,随着加工表面显微硬度的增大,表面点蚀电位降低,硬表面比软表面对点蚀更敏感。点蚀电位随表面显微硬度的变化趋势如图 7 所示,随着加工表面硬度的增加,点蚀电位呈下降趋势。

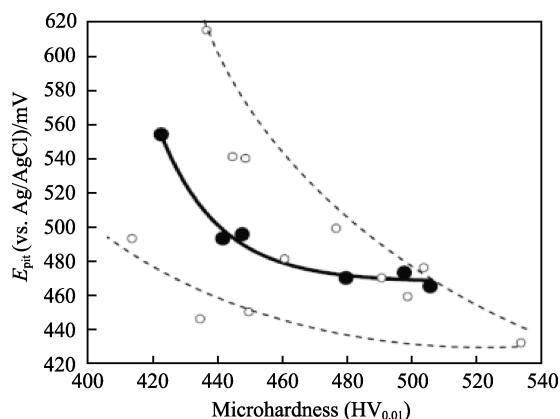


图 7 点蚀电位随显微硬度的变化趋势^[33]

Fig.7 Change trend of pitting potential and microhardness^[33]

文献[34]分析了加工硬化对铀氢腐蚀反应早期的影响,发现与其他样品相比,显示出特别的氢化行为,加工硬化后的样品更易受到腐蚀。文献[35]研究了应变硬化内表面层对 316 型不锈钢模拟压水堆一次水应力腐蚀裂纹的影响,发现如果在加工硬化的内表层中存在裂纹,则裂纹尖端应力较原始材料变得非常大,更容易产生应力腐蚀开裂,造成材料失效。

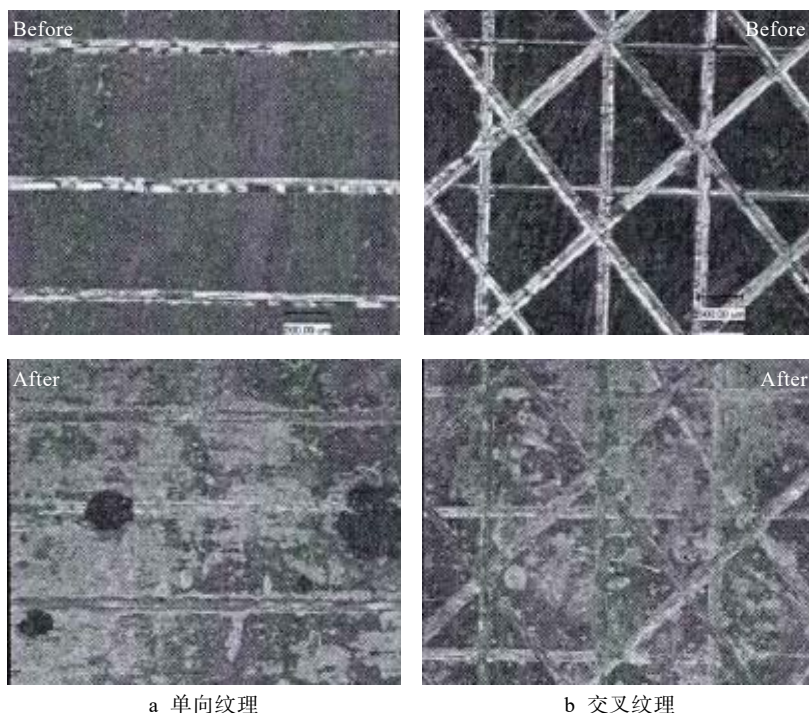
综上所述,加工表面的残余应力、金相组织变化和冷作硬化都会对其耐腐蚀性能产生影响。残余应力表现为压应力时,加工表面耐腐蚀性能提高;残余应力表现为拉应力时,加工表面耐腐蚀性能降低。应力腐蚀会严重影响表面质量,造成较大的腐蚀裂纹,加速腐蚀速率。加工表面金相组织的晶粒细化、晶界面积减小和偏析相减少等,都会促进其耐腐蚀性能提高;反之,当晶界面积增大、析出物增多等,都会使加工表面耐腐蚀性能降低;加工硬化层对点蚀更加敏感,在硬化层裂纹处应力作用更加明显,对腐蚀的促进作用更大。

3 加工表面几何形状特征对耐腐蚀性能影响的研究进展

3.1 表面加工纹理对耐腐蚀性能的影响

加工过程中,由于受到摩擦、震动、热冲击等作用,不可避免地会在加工表面形成不同形态的纹理,进而影响到其耐腐蚀性能。关于加工表明纹理对耐腐蚀性能方面的影响,相关研究还相对较少,主要是因为加工过程中纹理生成的不可控性及其复杂性,严重影响了实验的进行。

张入仁^[36]通过自腐蚀电位和腐蚀速率研究了表面纹理对耐腐蚀性能的影响,研究表明:相同条件下,不同纹理的耐腐蚀性能存在差异,抛光纹理的耐腐蚀性能最好;单向纹理比交叉纹理的耐腐蚀性强,由于实验所用纹理为人为刻画,与实际存在一定差别。单向、交叉纹理腐蚀前后形态对比如图 8 所示。



a 单向纹理

b 交叉纹理

图 8 单向及交叉纹理腐蚀前后形态对比^[36]

Fig.8 Comparison of unidirectional (a) and cross-texture (b) morphology before and after corrosion^[36]

安增辉^[37]通过对航空铝合金 7050-T7451 在模拟海洋环境下的盐雾腐蚀实验研究,发现腐蚀发生区域在刀痕周围较为集中,并且腐蚀发展表现出沿着刀痕走向向四周扩展的趋势,如图 9 所示。

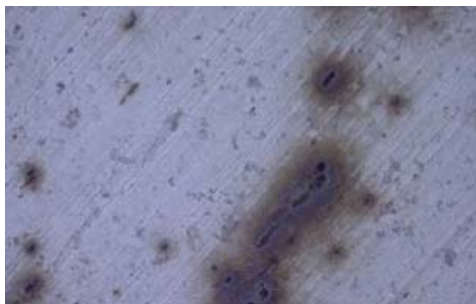


图 9 刀痕周围腐蚀情况^[37]
Fig.9 Corrosion around knife marks^[37]

3.2 表面粗糙度对耐腐蚀性能的影响

表面粗糙度对已加工表面耐腐蚀性能有极其重要的作用,关于材料表面粗糙度对耐腐蚀性能的影响研究,已经有了相对成熟的理论成果。应用不同的处理方法改变表面粗糙度,比如激光冲击、喷丸处理等,通过观察处理后材料的腐蚀电位、腐蚀形态、腐蚀速率等,发现材料表面粗糙度增大,其耐腐蚀性能降低。

通过分析粗糙度变化对腐蚀电位的影响,是研究表面质量与耐腐蚀性能关系的一个重要手段。张培荣^[38]基于功函数理论以及电化学阻抗谱测试技术,就表面质量对耐腐蚀性能的影响进行了分析,发现粗糙度参数与腐蚀电位呈现正相关,表面粗糙度降低对耐腐蚀性能的提高有良好的促进作用。LATIFI 等^[39]通过对 316L 不锈钢表面特性研究,发现不锈钢表面的腐蚀电流密度与其粗糙度呈正相关发展趋势,表面越光滑,腐蚀电流密度越小,不锈钢表面的耐腐蚀性能越强。陈红星等^[40]研究表明:钢板冷轧加工表面耐腐蚀性能表现出差异性,主要是因为不同粗糙度,加工表面氧化膜的均匀性和致密性存在较大差异,且自腐蚀电位随之波动。如图 10 所示,图 10a 是试样 No1 至 No5 所对应的表面极化曲线。由图 10b 可知,随着冷轧钢板表面粗糙度 R_a 的增大,表面自腐蚀电位先增大后减小,在 $1.25 \mu\text{m}$ 时达到峰值,且阳极曲线在 $-0.25 \sim -0.1 \text{ V}$ 之间存在钝化区。

BALUSAMY 等^[41]通过对 304 不锈钢 (SMAT) 处理,发现表面粗糙度增大对加工表面的耐腐蚀性能产生了不利影响。张入仁等^[42]关于表面粗糙度对已加工表面耐腐蚀性能在模拟海洋环境下的研究表明:已加工表面粗糙度越大,其耐腐蚀性能越差。侯江涛等^[43]、KARTHIK 等^[44]研究发现:减小材料表面粗糙度可以明显地增强已加工表面耐腐蚀性能。RIBEIRO 等^[45]通过对 Ti-6Al-4V 合金车削实验,发现耐腐蚀性能与表面粗糙度有关,将表面粗糙度 R_z 与 R_a 分别降低

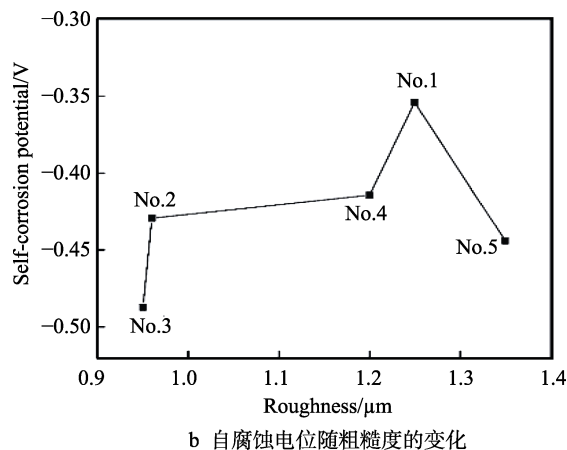
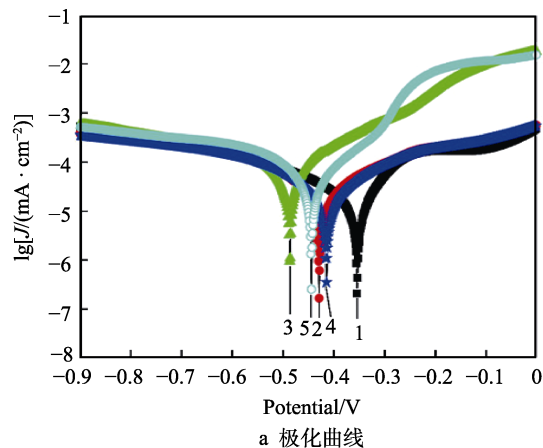


图 10 极化曲线及自腐蚀电位^[40]

Fig.10 Polarization curve (a) and self-corrosion potential (b)^[40]

11.9%和 5.5%,耐腐蚀性能提高了 18.8%。ZHANG 等^[46]通过激光冲击处理 ANSI 304 不锈钢实验,发现 LPS 处理后表面粗糙度降低,其耐腐蚀性能提高,这和张入仁等结论基本一致,但对应力、金相组织、粗糙度等多因素下综合表面质量对耐腐蚀性能的影响并未给出过多结论。

唐聿明等^[47]研究了表面粗糙度对不锈钢孔蚀状态转变的影响,研究发现,亚稳态孔的形核率及平均寿命随粗糙度的增大呈现正相关变化趋势,且其持续成长能力增强,最终导致大量稳态孔蚀的形成,使表面耐腐蚀性能降低。刘思航^[48]、BURSTEIN 等^[49]通过不同方式打磨不锈钢,观察加工表面腐蚀形成情况,发现孔蚀的形成受到表面粗糙度的影响,表面粗糙度越大,亚稳态孔蚀电位 E_m 及稳态孔蚀电位 E_b 越小,加工表面越容易受到腐蚀,且形成的亚稳态孔蚀更易转化为稳态孔蚀。

3.3 表面伤痕对耐腐蚀性能的影响

加工过程中伴随着振动、热能、残余应力、组织变形等,这些都会造成加工表面出现微裂纹、划痕等缺陷,微裂纹容易堆积腐蚀性介质,并腐蚀裂纹周围的基体组织,加大裂纹缝隙扩展,降低其耐腐蚀性能。许祖滨等^[50]通过对 AZ80 镁合金磷酸盐转化膜微裂纹

形成及耐蚀性进行研究,发现当微裂纹宽度、面积减小时,其耐腐蚀性能提高。杨迅雷^[51]通过研究高速铣削加工 7055-T6I4 铝合金表面质量对耐腐蚀性能的影响,发现微裂纹存在会破坏表面层氧化膜,加速腐蚀行为,降低已加工表面的耐腐蚀性能。

综上所述,加工表面几何形状特征对其耐腐蚀性能有重要影响:加工表面耐腐蚀性能随表面粗糙度、裂纹的增大而降低,表面层粗糙度、裂纹越大,表面层氧化膜等钝化层越易受到破坏,腐蚀性介质越易残留,亚稳态孔蚀越易向稳态孔蚀转变,腐蚀发生区一般会沿着刀痕、纹理走向发展。

4 结论与展望

1) 当表面粗糙度及裂纹增大、晶界面积减小、残余应力表现为拉应力时,加工表面耐腐蚀性能降低,腐蚀速率增加,且腐蚀发生区以刀痕、纹理走向区域居多。

2) 残余应力、表面粗糙度、冷作硬化、表面伤痕等对加工表面耐腐蚀性能有重要影响,目前关于表面质量对耐腐蚀性能的研究已取得一定成果,但关于不同表面质量参数之间相互作用下对耐腐蚀性能的研究相对较少,加工参数对表面耐腐蚀性能的影响机理尚不明晰。对残余应力、表面粗糙度、冷作硬化、表面伤痕等相互作用下的耐腐蚀性能的研究,以及加工参数对表面耐腐蚀性能的影响机理研究,将对加工表面使役性能提升和耐腐蚀性能的控制起到重要的指导作用。

3) 加工表面机械物理特征及几何性状特征对其耐腐蚀性能具有重要影响,可以通过合理选择加工技术以及精确控制加工参数对表面质量进行优化,实现加工表面耐腐蚀性能的进一步提高。为了实现加工表面腐蚀防护的人为控制,应加快表面质量对耐腐蚀性能影响相关数据库的建立,以期实现对加工表面质量预测、精简制造工序等。

参考文献:

- [1] 龚敏. 金属腐蚀理论与腐蚀控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
GONG Min. Metal corrosion theory and corrosion control[M]. Beijing: Chemical industry press, 2009.
- [2] MA H Y, CUI C Y, CHEN T. Brief introduction to metal corrosion and protection[J]. Electrochemistry, 2011, 17(3): 288-291.
- [3] 慕立俊, 赵文珍. 腐蚀的电化学研究现状[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2008, 25(6): 5-9.
MU Li-jun, ZHAO Wen-zhen. The development of corrosion research by electrochemical technologies[J]. Corrosion & protection in petrochemical industry, 2008, 25(6): 5-9.
- [4] 刘凯吉. 大气腐蚀环境的分类及腐蚀性评定[J]. 全面腐蚀控制, 2015, 29(10): 26-27.
LIU Kai-ji. Classification and evaluation of environment of atmospheric corrosion[J]. Total corrosion control, 2015, 29(10): 26-27.
- [5] 夏兰廷, 王录才, 黄桂桥. 我国金属材料的海水腐蚀研究现状[J]. 中国铸造装备与技术, 2002(6): 1-4.
XIA Lan-ting, WANG Lu-cai, HUANG Gui-qiao. Present status of research on sea-water corrosion of metal in China[J]. China foundry machinery & Technology, 2002(6): 1-4.
- [6] CHEMIN A E A, SACONI F, BOSE Filho W W, et al. Effect of saline corrosion environment on fatigue crack growth of 7475-T7351 aluminum alloy under TWIST flight loading[J]. Engineering fracture mechanics, 2015, 141: 274-290.
- [7] XIE Yun, XU Li-ning, GAO Chun-liang, et al. Corrosion behavior of novel 3% Cr pipeline steel in CO₂ top-of-line corrosion environment[J]. Materials and design, 2012, 36: 54-57.
- [8] 杨志勇, 李明哲, 郝义磊, 等. 黄铜晶间腐蚀机理的实验及模拟研究[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 244-250.
YANG Zhi-yong, LI Ming-zhe, HAO Yi-lei, et al. Experimental and simulation study on intergranular corrosion mechanism of brass[J]. Surface technology, 2018, 47(8): 244-250.
- [9] 李虎. 7A04 铝合金二级应力时效的力学及耐腐蚀性能研究[D]. 重庆: 西南交通大学, 2018.
LI Hu. Research on mechanical properties and corrosion resistance of 7A04 aluminum alloy with two-stage stress-aging[D]. Chongqing: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [10] 吕明刚, 张文清, 张晓梅. 供水钢管残余应力及腐蚀机理分析[J]. 市政技术, 2017, 35(5): 129-130.
LV Ming-gang, ZHANG Wen-qing, ZHANG Xiao-mei. Analysis of residual stress and corrosion mechanism of water supply pipe[J]. Municipal engineering technology, 2017, 35(5): 129-130.
- [11] 王祝堂. 铝的腐蚀形态[N]. 中国有色金属报, 2016-03-05(7).
WANG Zhu-tang. Corrosion morphology of aluminium[N]. China nonferrous metals news, 2016-03-05(7).
- [12] 赵麦群, 雷阿丽. 金属的腐蚀与防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
ZHAO Mai-qun, LEI A-li. Corrosion and protection of metals[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
- [13] 郭新刚, 宋鹏涛, 王永宁. 奥氏体不锈钢的腐蚀机理研究[J]. 科技创新与应用, 2013(17): 8-9.
GUO Xin-gang, SONG Peng-tao, WANG Yong-ning. Study on corrosion mechanism of austenitic stainless steel[J]. Technology innovation and application, 2013(17): 8-9.
- [14] BADWE N, CHEN X, SCHREIBER D K, et al. Decou-

- pling the role of stress and corrosion in the intergranular cracking of noble-metal alloys [J]. *Nature materials*, 2018, 17: 887-893.
- [15] ANITA T, PUJAR M G, SHAIKH H, et al. Assessment of stress corrosion crack initiation and propagation in AISI type 316 stainless steel by electrochemical noise technique[J]. *Corrosion science*, 2005, 48(9): 2689-2710.
- [16] 李晨. 航空铝合金铣削表面物理特征及其耐腐蚀性研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- LI Chen. Surface physical characteristics of aeronautical aluminum alloy after milling and its corrosion resistance[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [17] 崔晓玉. 离心机转鼓用奥氏体不锈钢应力腐蚀断裂研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2017.
- CUI Xiao-yu. A study of the stress corrosion fracture in the replacement of centrifuge with drum austenitic stainless steel[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2017.
- [18] 来维亚, 徐欣, 白真权, 等. 残余拉应力对 304 不锈钢电化学腐蚀行为的影响[J]. *机械工程材料*, 2016, 40(2): 84-88.
- LAI Wei-ya, XU Xin, BAI Zhen-quan, et al. Effect of residual tensile stress on electrochemical corrosion behavior of 304 stainless steel[J]. *Materials for mechanical engineering*, 2016, 40(2): 84-88.
- [19] 汤精明, 姜忠宇. 表面完整性对 40Cr 钢耐腐蚀性的影响[J]. *热加工工艺*, 2010, 39(2): 100-103.
- TANG Jing-ming, JIANG Zhong-yu. Influence of surface integrity on corrosion resistance of 40Cr Steel[J]. *Material & heat treatment*, 2010, 39(2): 100-103.
- [20] RHOUMA A B, SIDHOM H, BRAHAM C, et al. Effects of surface preparation on pitting resistance, residual stress, and stress corrosion cracking in austenitic stainless steels[J]. *Journal of materials engineering and performance*, 2001, 10(5): 507-514.
- [21] GE M Z, XIANG J Y, YANG L, et al. Effect of laser shock peening on the stress corrosion cracking of AZ31B magnesium alloy in a simulated body fluid[J]. *Surface and coatings technology*, 2017, 310: 157-165.
- [22] 刘彤辉. 镍基粉末高温合金铣削表层特征与耐腐蚀性研究[D]. 济南: 济南大学, 2015.
- LIU Tong-hui. Research on surface layer characteristics and corrosion resistant of milling nickel base superalloy[D]. Jinan: University of Jinan, 2015.
- [23] 黄盛, 宋志刚, 郑文杰, 等. 固溶处理温度对 00Cr27Ni7Mo5N 不锈钢组织及腐蚀性能的影响[J]. *金属热处理*, 2011, 36(12): 44-49.
- HUANG Sheng, SONG Zhi-gang, ZHENG Wen-jie, et al. Influence of solution temperature on microstructure and corrosion behavior of 00Cr27Ni7Mo5N stainless steel[J]. *Heat treatment of metals*, 2011, 36(12): 44-49.
- [24] 朱绍严. 固溶处理对 PH15-7Mo 不锈钢耐腐蚀性能影响的研究[J]. *华东科技: 学术版*, 2015(10): 32-33.
- ZHU Shao-yan. Study on the effect of solution treatment on corrosion resistance of PH15-7Mo stainless steel[J]. *East China science & Technology: Academic edition*, 2015(10): 32-33.
- [25] 郑丽鸽, 贺俊光, 文九巴, 等. 固溶处理对 Mg-1Zn-0.3Zr-2Gd-0.3Sr 合金组织和腐蚀性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2019, 40(2): 40-46.
- ZHENG Li-ge, HE Jun-guang, WEN Jiu-ba, et al. Effect of solid solution treatment on microstructure and corrosion properties of Mg-1Zn-0.3Zr-2Gd-0.3Sr alloy[J]. *Transactions of materials and heat treatment*, 2019, 40(2): 40-46.
- [26] 吴慧. 高氮不锈钢固溶处理及抗晶间腐蚀性能研究[D]. 大庆市: 东北石油大学, 2017.
- WU Zhuang. The research on solution treatment and intergranular corrosion resistance of high-nitrogen stainless steel[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.
- [27] 侯丹丹. 6082 铝合金的微观组织演变规律和晶间腐蚀行为研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2017.
- HOU Dan-dan. Research on microstructure evolution and intergranular corrosion behavior of 6082 aluminum alloy[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2017.
- [28] PU Z, SONG G L, YANG S, et al. Grain refined and basal textured surface produced by burnishing for improved corrosion performance of AZ31B Mg alloy[J]. *Corrosion science*, 2012, 57(none): 201.
- [29] TANG J, LUO H Y, ZHANG Y B. Enhancing the surface integrity and corrosion resistance of Ti-6Al-4V titanium alloy through cryogenic burnishing[J]. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2017, 88(9-12): 2785-2793.
- [30] 孔德军, 叶存冬, 王文昌, 等. 激光冲击处理后 X80 焊接接头表面质量对腐蚀性能的影响[J]. *焊接学报*, 2014(5): 63-66.
- KONG De-jun, YE Cun-dong, WANG Wen-chang, et al. Effects of surface qualities on corrosion performances of X80 pipeline steel welded joint by laser shock processing[J]. *Transactions of the China welding institution*, 2014(5): 63-66.
- [31] BOAG A, HUGHES A E, GLENN A M, et al. Corrosion of AA2024-T3 part I: Localised corrosion of isolated IM particles[J]. *Corrosion science*, 2011, 53(1): 26.
- [32] 仲照琳. 高速铣削铝合金 7050-T7451 表面质量及耐腐蚀性研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- ZHONG Zhao-lin. Surface integrity and corrosion resistance in high speed milling aluminum alloy 7050-T7451[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [33] VIGNAL V, BISSEY-BRETON S, COUDERT J B. Mechanical properties and corrosion behaviour of low carbon martensitic stainless steel after machining[J]. *International journal of machining & machinability of materials*, 2014, 15(1-2): 36-53.
- [34] BANOS A, JONES C P, SCOTT T B. The effect of work-hardening and thermal annealing on the early stages of the uranium-hydrogen corrosion reaction[J]. *Corrosion science*

- nce, 2018, 131: 147-155.
- [35] YONEZAWA T, WATANABE M, HASHIMOTO A, et al. Effect of strain hardened inner surface layers on stress corrosion cracking of type 316 stainless steel in simulated pwr primary water[J]. Metallurgical and materials transactions, 2019, 50: 1-24.
- [36] 张入仁. 航空铝合金铣削三维表面形貌及其耐腐蚀性研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- ZHANG Ru-ren. 3D surface topography and its corrosion-resistant research of milling aeronautic aluminum alloy[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [37] 安增辉. 航空铝合金切削表层微观组织特征与性能研究[D]. 济南: 济南大学, 2016.
- AN Zeng-hui. Research on microstructure and performance of aviation aluminum alloy cutting surface[D]. Jinan: University of Jinan, 2016.
- [38] 张培荣. Cr/Ni 合金激光熔覆层车—滚复合加工表面完整性及耐腐蚀性研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- ZHANG Pei-rong. On surface integrity and corrosion resistance of laser clad Cr/Ni alloy finished by hybrid turning and burnishing[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [39] LATIFI A, IMANII M, KHORASANI M T, et al. Electrochemical and chemical methods for improving surface characteristics of 316L stainless steel for biomedical applications[J]. Surface & coatings technology, 2013, 221(5): 1-12.
- [40] 陈红星, 李建中, 刘常升. 冷轧钢板表面粗糙度对耐蚀性的影响[J]. 上海金属, 2018, 40(2): 24-28.
- CHEN Hong-xing, LI Jian-zhong, LIU Chang-sheng. Effect of surface roughness on corrosion resistance of cold-rolled plate[J]. Shanghai metals, 2018, 40(2): 24-28.
- [41] BALUSAMY T, SANKARA N T S N, RAVICHANDRAN K, et al. Influence of surface mechanical attrition treatment (SMAT) on the corrosion behaviour of AISI 304 stainless steel[J]. Corrosion science, 2013, 74: 332-344.
- [42] 张入仁, 万熠, 李晨, 等. 模拟海洋环境下航空铝合金铣削表面的耐腐蚀性研究[J]. 工具技术, 2011, 45(12): 12-15.
- ZHANG Ru-ren, WAN Yi, LI Chen, et al. Surface corrosion resistance of milling aeronautic aluminum alloy in simulated marine environment[J]. Tool engineering, 2011, 45(12): 12-15.
- [43] 侯江涛, 孙华为, 刘洁, 等. 表面粗糙度对高纯银带抗腐蚀及电阻率的影响[J]. 贵金属, 2017, 38(S1): 60-62.
- HOU Jiang-tao, SUN Hua-wei, LIU Jie, et al. Effect of surface roughness on corrosion resistance and resistivity of high purity silver[J]. Precious metals, 2017, 38(S1): 60-62.
- [44] KARTHIK D, SWAROOP S. Laser shock peening enhanced corrosion properties in a nickel based Inconel 600 superalloy[J]. Journal of alloys and compounds, 2017, 694:1309-1319.
- [45] RIBEIRO F S L M, LAURO C H, BUENO A H S, et al. Influence cutting parameters on the surface quality and corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy in synthetic body environment (SBF) using response surface method[J]. Measurement, 2016, 88: 223-237.
- [46] ZHANG L, ZHANG Y K, LU J Z, et al. Effects of laser shock processing on electrochemical corrosion resistance of ANSI 304 stainless steel weldments after cavitation erosion[J]. Corrosion science, 2013, 66: 5-13.
- [47] 唐聿明, 林冰, 赵旭辉, 等. 粗糙度在 316L 不锈钢小孔初期生长过程中的作用[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2014, 26(6): 505-510.
- TANG Yu-ming, LIN Bing, ZHAO Xu-hui, et al. Effect of surface roughness on early stage of pitting corrosion of 316LSS[J]. Corrosion science and protection technology, 2014, 26(6): 505-510.
- [48] 刘思航. 机械打磨不锈钢表面完整性及耐蚀性研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2016.
- LIU Si-hang. Surface integrity of stainless steel by mechanical rinding and corrosion resistance[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2016.
- [49] BURSTEIN G T, PISTORIUS P C. Surface roughness and the metastable pitting of stainless steel in chloride solutions[J]. Corrosion, 1995, 51(5): 380-385.
- [50] 许祖滨, 宋影伟, 单大勇, 等. 成膜温度对 AZ80 镁合金磷酸盐转化膜微裂纹形成及耐蚀性的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(12): 23-27.
- XU Zu-bin, SONG Ying-wei, SHAN Da-yong, et al. Influence of film-forming temperature on the formation of microcracks and corrosion resistance of phosphate conversion films on AZ80 magnesium alloy[J]. Surface technology, 2016, 45(12): 23-27.
- [51] 杨迅雷. 高速铣削工艺对 7055-T6I4 铝合金表面质量和耐腐蚀性能的影响[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2017.
- YANG Xun-lei. The effect of high speed milling process on surface integrity and the corrosion resistance of 7055-T6I4 aluminum alloy[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2017.