表面质量控制及检测

TC4 侧铣表面完整性对试件疲劳性能的影响

杨慎亮[1]，李勋[1]，王子铭[1]，官椿明[2]

（1.北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191；
2.北京星航机电装备有限公司，北京 100074）

摘　要：目的 提升钛合金的抗疲劳性能，丰富典型航空难加工材料疲劳失效的基础理论，为实际航空结构件的抗疲劳制造提供参考。**方法** 以 TC4 钛合金为研究对象，采用单因素实验法，通过侧铣及试件疲劳性能测试，对比分析了铣削参数（包括铣削线速度 v_c、每齿进给量 f_z 及径向切深 a_e）对表面完整性及表面完整性各指标（主要包括表面粗糙度、表面显微硬度及表面残余应力等）对试件疲劳性能的影响规律。**结果** 表面完整性的测量结果显示，表面粗糙度随 f_z 和 a_e 的增加而增大，随 v_c 的变化不显著；表面显微硬度随 f_z 的增加而增大，随 v_c 和 a_e 的增加而减小；同时，加工表面均呈现残余压应力状态，且表面残余应力的幅值随 v_c 的增加而减小，随 a_e 的增加呈先增大后减小的变化，随 f_z 的变化不明显。试件疲劳性能测试的结果表明，表面显微硬度是影响 TC4 钛合金试件疲劳性能的主要因素。**结论** 在实验条件下，随着表面显微硬度的增加，试件的疲劳性能逐渐提升，并且当 v_c=20 m/min、f_z=0.08 mm/z 和 a_e=0.1 mm 时，试件的疲劳性能最佳。

关键词：TC4 钛合金；疲劳性能；表面完整性；显微硬度；表面粗糙度

中图分类号：TG506　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-3660(2019)11-0372-09

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.11.043

Influence of Side Milling on Surface Integrity and Fatigue Behavior of TC4 Specimens

YANG Shen-liang[1], *LI Xun*[1], *WANG Zi-ming*[1], *GUAN Chun-ming*[2]

(1.School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;
2.Beijing Xinghang Mechanical and Electrical Equipment Co., Ltd, Beijing 100074, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the fatigue behavior of titanium alloy, enrich the basic theory of fatigue failure of typical aviation difficult-to-cut materials and provide references for anti-fatigue manufacturing of aerospace structural parts. TC4 titanium alloy was used as the research object to conduct single factor experiments. Side milling and fatigue tests were carried out to compare the influence of machining parameters (milling linear speed v_c, feed engagement f_z and radial cutting depth a_e) on TC4 titanium alloy specimens' surface integrity and the influence of surface integrity indexes (mainly including surface roughness, surface microhardness and surface residual compressive stress) on fatigue behavior. From the measurement

收稿日期：2019-03-11；**修订日期：**2019-09-22

Received：2019-03-11；**Revised：**2019-09-22

基金项目：国家科技重大专项（2018ZX04005001）

Fund：National Science and Technology Major Project of China (2018ZX04005001)

作者简介：杨慎亮（1995—），男，硕士研究生，主要研究方向为抗疲劳制造技术。

Biography：YANG Shen-liang (1995—), Male, Master, Research focus: anti-fatigue manufacturing technology.

通讯作者：李勋（1980—），男，博士，副教授，主要研究方向为抗疲劳制造技术。邮箱：lixun@buaa.edu.cn

Corresponding author：LI Xun (1980—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: anti-fatigue manufacturing technology. E-mail: lixun@buaa.edu.cn

result of surface integrity, the surface roughness increased as f_z and a_e increased, respectively, but did not change obviously with v_c. The surface microhardness increased with the increase of f_z, but decreased with the increase of v_c and a_e, respectively. Residual compressive stress could be detected on all machined surfaces, which presented a linear decrease with the increase of v_c, increased first and then decreased with the increase of a_e, and had no obviously change with the variation of f_z. From the fatigue performance results of specimens, microhardness had the most significant effect on the fatigue behavior of TC4 specimens. With the increase of microhardness, the fatigue behavior increases notably. Under the machining parameters of v_c=20 m/min, f_z=0.08 mm/z and a_e=0.1 mm, TC4 specimens have the best fatigue behavior.

KEY WORDS: TC4 titanium alloy; fatigue behavior; surface integrity; microhardness; surface roughness

TC4 钛合金是一种典型的 α+β 型钛合金，具有密度低、韧性好、比强度高、耐腐蚀性及抗蠕变性能卓越等诸多优点，被广泛用于制造长期工作在 400 ℃条件下的零件，如航空发动机风扇、压气机盘和叶片、火箭发动机外壳及其他结构锻件等[1-3]。

表面完整性是指在一定的加工工艺条件下产生的零件表面及亚表面结构的物理和化学特性，针对的是工件加工后，表面 0.2~0.5 mm 以下的微观几何特征和材料组织特性及其改变规律。表面粗糙度、表面显微硬度和表面残余应力等是表面完整性中非常重要的指标，加工参数及工艺条件对表面完整性具有直接的影响[4]。

史兴宽等人[5]通过对 TC4 钛合金进行铣削加工发现，采用高速铣削方法能使表面粗糙度大幅度降低。Che-Haron[6]测得 TC4 钛合金车削加工表面显微硬度远高于材料基体硬度，同时加工表面硬化层的深度约为 70 μm。Hughes[7]在进行 TC4 钛合金铣削加工表面完整性实验时发现，在切削表面及以下 60 μm 范围内，变质层材料的显微硬度远低于材料基体的硬度，并将这种现象归结为过高切削温度所导致的材料过度时效。刘战强[8]建立了切削残余应力混合模型，分析了加工参数对 TC4 钛合金侧铣表面残余应力的影响，结果发现，当 v_c 或 f_z 较小时，切削加工表面易形成残余压应力，而随着 v_c 或 f_z 的增加，表面残余应力将由压应力向拉应力转变。Ginting[9]对 TC4 钛合金的铣削实验结果表明，随着 f_z 的增大，切削变质层的深度将会增加。

国内外学者针对切削 TC4 钛合金进行了大量实验研究，获得了加工参数对 TC4 钛合金表面粗糙度、显微硬度及残余应力的影响规律。但随着制造技术的不断发展，零件的抗疲劳性能越来越受到关注。据统计，航空承力结构件 80%的失效形式是疲劳破坏[10-11]。除了材料性能和设计问题以外，零件加工表面完整性对其抗疲劳性能有较大的影响[12]。但目前针对侧铣加工表面完整性对 TC4 钛合金试件疲劳性能的影响相关研究成果较少。为提升 TC4 钛合金的抗疲劳性能，本文通过侧铣及试件疲劳性能测试实验，研究了铣削参数（包括铣削线速度 v_c、每齿进给量 f_z 及径向切深 a_e）对表面完整性及表面完整性各指标（主要包括表面粗糙度、表面显微硬度和表面残余应力等）对试件疲劳性能的影响规律，为实际 TC4 钛合金结构件的抗疲劳加工提供参考。

1　实验

1.1　实验材料

实验材料为 TC4 钛合金。热处理工艺为固溶时效，具体实施条件如下：在(940±10) ℃条件下保温 0.5~1 h，水冷；之后在(480±10) ℃条件下保温 4 h，空冷。经上述热处理后，TC4 钛合金的室温力学性能如表 1 所示。

表 1　TC4 钛合金室温力学性能
Tab.1 Mechanical properties of TC4 titanium alloy at room temperature

Yield strength/MPa	Tensile strength/MPa	Elongation/%	Section shrinkage/%
934	1005	10	20

1.2　试件准备

在 SMTCL VMC850E 型四轴数控铣床上对测试试件进行铣削加工，如图 1 所示，铣削方式为侧铣、顺铣。试件测试部分的长度为 6 mm，直径为 5 mm。其中，测试试件的一端由三爪卡盘夹紧，另一端由顶尖支撑。铣削加工参数如表 2 所示。为保证实验结果的可靠性，每组铣削参数均加工 4 个测试试件。侧铣加工后，试件的截面并非标准圆形，而是边长 w 为 0.26 mm、邻边夹角 α 为 6°的正六十边形。在疲劳性能测试过程中，这种特殊的结构克服了方形或矩形截面试件加工边缘存在的毛刺产生的不稳定影响[13]。同时，相比于圆形截面试件，该结构更易实现图 1 所示的工艺方案。刀具利用台湾 APP 公司生产的四刃立铣刀（AlTiN 涂层），其直径为 10 mm，螺旋角为 45°。采用水剂切削液进行冷却润滑，它是由 CIMTECH 310 切削液与水按照 1∶20 的比例混合而成的。

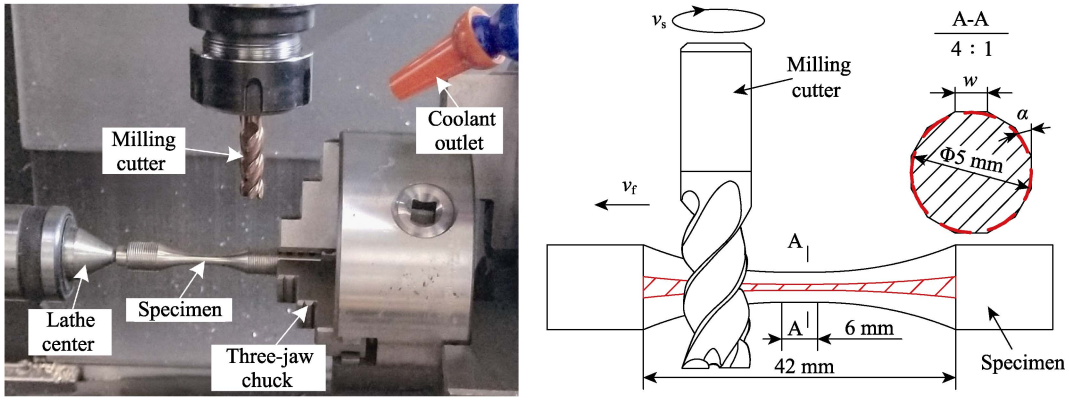


图 1　实验装置及加工示意图

Fig.1 Experimental setup and schematic diagram of side milling process

表 2　TC4 钛合金侧铣加工参数

Tab.2 Side milling parameters of TC4 titanium alloy

Experiment no.	v_c/(m·min^{-1})	f_z/(mm·z^{-1})	a_e/mm
1	20	0.08	0.2
2	40	0.08	0.2
3	80	0.08	0.2
4	20	0.1	0.2
5	20	0.15	0.2
6	20	0.08	0.1
7	20	0.08	0.5

1.3　表面完整性测试

表面粗糙度采用型号为 TIME3220 的触针式表面粗糙度测量仪进行测量，测量时设置取样长度 l 为 0.8 mm，评定长度 L 为 4 mm，测量方向平行于试件轴向；表面显微硬度使用型号为 FM-800 的显微维氏硬度计进行测量，加载载荷为 200 g，保压时间为 10 s；表面残余应力运用 PROTO 公司生产的 iXRD 型 X 射线衍射应力仪测量，管电压为 20 kV，管电流为 4 mA，V 靶辐射，衍射角度为 139.69°，测量方向平行于试件轴向。利用型号为 CS3400 的扫描电子显微镜对试件表层显微组织进行观察。试样的制备过程包括取样、抛光和腐蚀。其中，取样采用线切割的方式，抛光剂采用金刚石，腐蚀液采用 4%的硝酸酒精溶液。

1.4　疲劳性能测试

选用 GPS100 型电磁谐振式高频数字化拉压疲劳试验机对试件的疲劳性能进行测试，其主要指标及参数如表 3 所示。基于室温条件下 TC4 钛合金的力学性能，设置疲劳测试过程中最大加载应力 σ_{max} 为 880 MPa，应力比 R 为 0.1，疲劳试验机及疲劳断裂后的试件如图 2 所示。

表 3　疲劳试验机主要指标

Tab.3 Important indexes of fatigue test machine

Type	Working frequency/Hz	Loading waveform	Tensile load/kN	Maximum alternating load/kN	Load error/%
GPS100	80~250	Sine wave	±100	50	≤±1

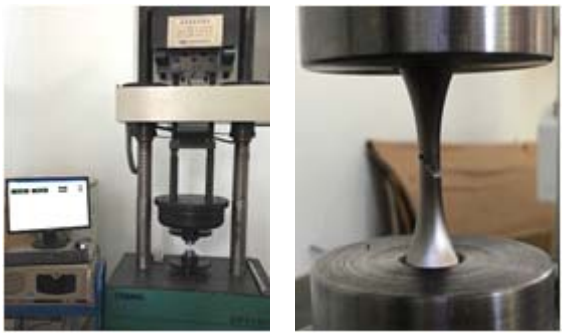


图 2　疲劳试验机及断裂后的试件

Fig.2 Fatigue test machine and specimens after fracture

2　结果与分析

2.1　铣削参数对表面完整性的影响

2.1.1　表面粗糙度

铣削参数对表面粗糙度的影响规律如图 3 所示。其中，Ra 为轮廓算术平均偏差，R_z 为微观不平度十字高度。从图 3a 可以看出，表面粗糙度对 v_c 的变化不敏感。当 v_c 由 20 m/min 增加到 80 m/min 时，加工表面粗糙度 Ra 变化的极值为 0.1 μm，R_z 变化的极值为 0.4 μm。由图 3b 可知，加工表面粗糙度随 f_z 的增加而增大，这主要是因为增大 f_z 会增加已加工表面残余面积高度。在图 3c 中，随着 a_e 的增加，加工表面粗糙度 Ra 和 R_z 均增大，但 Ra 的增幅小，而 R_z 的增幅较大。这是因为在实际加工过程中，a_e 的增加会导致切削力的增大，加之机床并非理想的刚体，因此切削力的增大必然会造成刀量的增加，具体表现为已加工表面残余面积高度的不规律变化。相较于经统计方法计算后的 Ra，R_z 对这种变化更敏感，进而导致 R_z 的大幅度增加。

不同铣削参数下，沿进给方向的表面粗糙度曲线如图 4 所示。由图 4 可以看出，加工表面沿进给方向呈现出周期性波纹状，这与侧铣加工表面形貌的形成机理有关[14]。

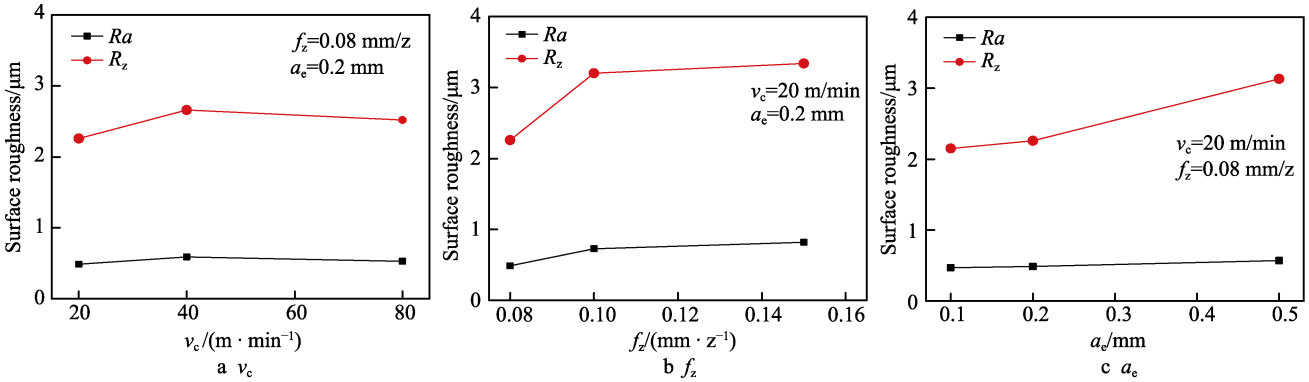


图 3　铣削参数对表面粗糙度的影响

Fig.3 Influence of machining parameters on surface roughness

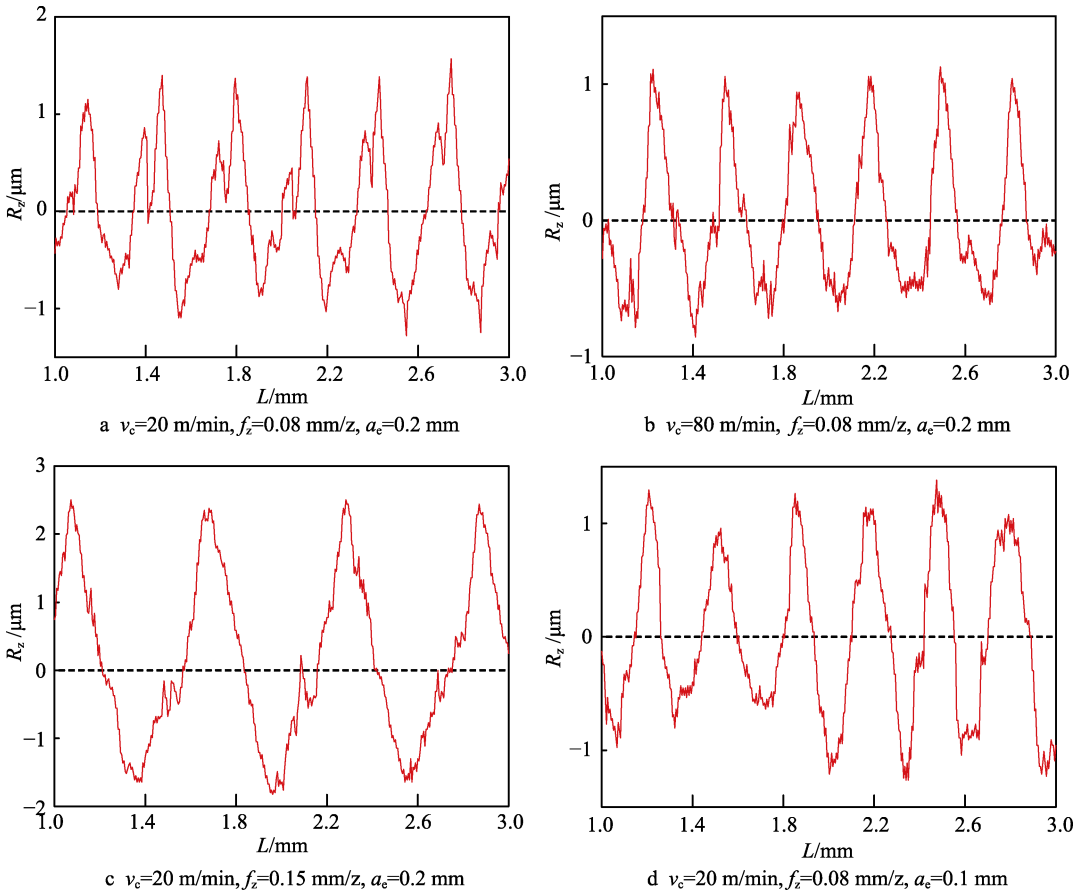


图 4　沿进给方向的表面粗糙度曲线

Fig.4 Curves of surface roughness along feed direction

Li[15]采用分频滤波的方式，将实际表面粗糙度曲线解耦成理论表面粗糙度曲线和随机表面粗糙度曲线，来研究表面粗糙度对试件疲劳性能的影响。其中，理论表面粗糙度 R_z'只与加工参数及刀具几何参数有关，对试件疲劳性能的影响较小；而随机表面粗糙度 R_z''与加工表面因刀具磨损、加工鳞刺及表面颤振等随机因素造成的微小划痕有关，对试件疲劳性能的影响较大。

利用该方法对第 1 组试件已加工表面粗糙度曲线进行解耦，结果如图 5 所示。通过解耦，可得不同铣削参数下的理论表面粗糙度 R_z'与随机表面粗糙度 R_z''，如表 4 所示。由表 4 可知，即使铣削加工表面粗糙度较大，但经解耦后，对试件疲劳性能产生影响的随机表面粗糙度较小，R_z''在 0.32~0.46 μm 之间。

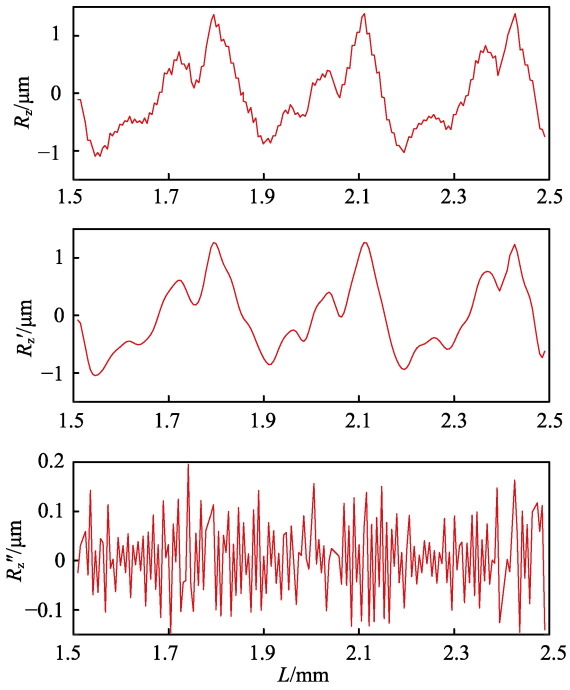


图 5　侧铣表面粗糙度曲线解耦结果

Fig.5 Decoupled results of surface roughness curves after side milling

2.1.2　表面显微硬度

铣削参数对表面显微硬度的影响规律如图 6 所示。对 TC4 钛合金而言，其表面显微硬度由塑性变形产生的强化作用及切削区温度上升导致的热软化作用共同决定。由图 6a 可以发现，随着 v_c 的增加，加工表面显微硬度逐渐降低。这是因为当 v_c 增加时，切削区温度逐渐上升，热软化作用在已加工表面形成过程中占主导作用，从而造成已加工表面显微硬度的下降。从图 6b 可以看出，试件表面显微硬度随 f_z 的增加而增大，且增大趋势逐渐升高。这是因为随着 f_z 的增加，铣削力逐渐增大，加工表面塑性变形造成的表面强化作用逐渐占据主导地位，加工表面显微硬度也随之升高。在图 6c 中，试件表面显微硬度随 a_e 的增加而减小。具体原因如下：由于铣削力会随着 a_e 的增加而增大，因而塑性变形产生的强化作用会随之增强；同时，随着 a_e 的增加，刀齿与试件材料的接触线长度逐渐增加，试件已加工表面与后刀面的划擦、挤压作用逐渐增强，导致切削温度上升，热软化作用也随之增加。在所选的参数范围内，随着 a_e 的增加，热软化作用明显强于塑性变形产生的强化作用，从而导致加工表面显微硬度的降低。

表 4　表面完整性及疲劳性能测试结果

Tab.4 Results of surface integrity measurements and fatigue tests

Experiment no.	Ra/μm	R_z/μm	R_z'/μm	R_z''/μm	Surface micro-hardness(HV)	Surface residual stress/MPa	Cycles to failure N_f/(×10^6)
1	0.49	2.26	1.91	0.35	288.0	−227.3	3.07
2	0.59	2.66	2.34	0.32	285.6	−194.3	1.90
3	0.53	2.52	2.11	0.41	260.2	−61.6	0.34
4	0.73	3.20	2.81	0.39	287.6	−218.3	3.59
5	0.82	3.34	2.91	0.43	308.5	−205.5	4.54
6	0.47	2.15	1.82	0.33	322.4	−105.8	4.71
7	0.57	3.13	2.67	0.46	266.1	−99.9	1.22

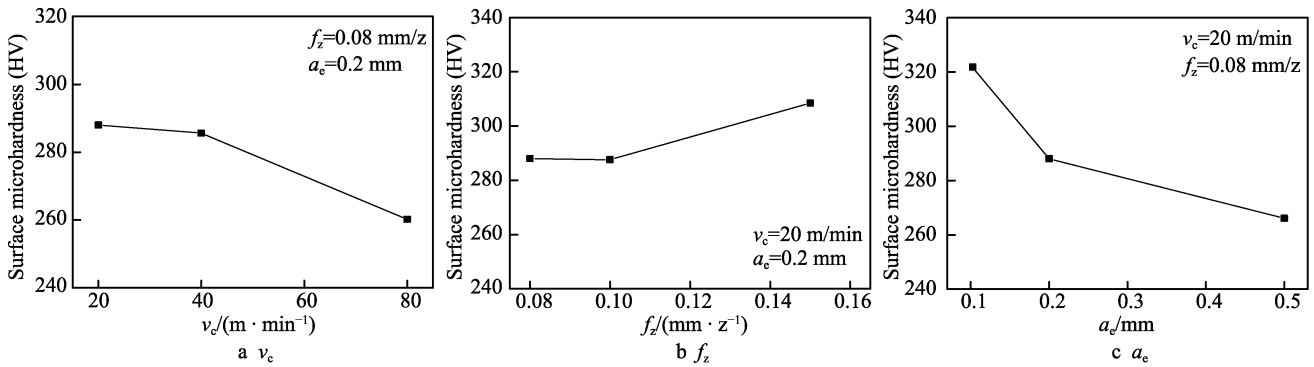


图 6　铣削参数对表面显微硬度的影响

Fig.6 Influence of machining parameters on surface microhardness

2.1.3　表面残余应力

铣削参数对加工表面残余应力的影响规律如图 7 所示。从图 7 中可以看出，侧铣加工后，试件表面均呈现残余压应力。它也是由表层金属的塑性变形及切削温度共同决定的。由图 7a 可以发现，表面残余压应力随 v_c 的增加而减小。这是因为随着 v_c 的增加，切削区温度逐渐升高，热软化作用削弱了塑性变形对残余应力的影响，使得表面残余压应力逐渐降低。从

图 7b 可以看出，在实验参数范围内，试件表面残余应力在−227.3~ −205.5 MPa 之间，说明 f_z 对表面残余压应力的影响不明显。在图 7c 中，随着 a_e 的增加，加工表面残余压应力先增大后减小。具体原因如下：在 a_e 较小时，随着 a_e 的增加，铣削力逐渐增大，加工表面塑性变形程度逐渐增大，表面残余压应力逐渐增加；而当 a_e 进一步增加时，切削区温度逐渐上升，切削热对残余应力的影响逐渐占据主导地位，使得加工表面残余压应力逐渐减小。

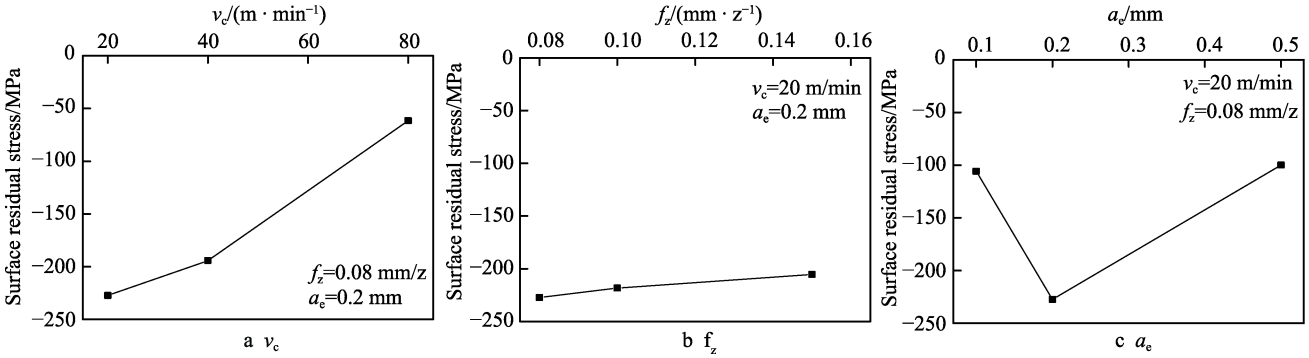


图 7　铣削参数对表面残余应力的影响

Fig.7 Influence of machining parameters on surface residual stress

2.1.4　表层显微组织

选取 4 组铣削参数，对已加工表层显微组织进行观察，如图 8 所示。可以看出，TC4 钛合金基体组织为网篮状，在近表层可观察到明显的塑性变形层。为了便于测量塑性变形层的厚度，以材料组织晶粒纤维化方向与机加工表面法向是否存在夹角 θ 为依据，来界定塑性变形层与基体的边界。在塑性变形层内，晶粒组织纤维化方向与机加工表面法向存在夹角 θ，而材料基体为夹角 θ 近似为 0°的区域。当 v_c 由 20 m/min 增加到 80 m/min 时，试件表层塑性变形层的厚度由 6.0 μm 减小至 3.4 μm，如图 8a、b 所示；通过对比图 8a、8c、8d 可知，随着 f_z 由 0.08 mm/z 增加到 0.15 mm/z 或 a_e 由 0.2 mm 增大到 0.5 mm，试件表层塑性变形层依次增厚了 45%和 27.7%。

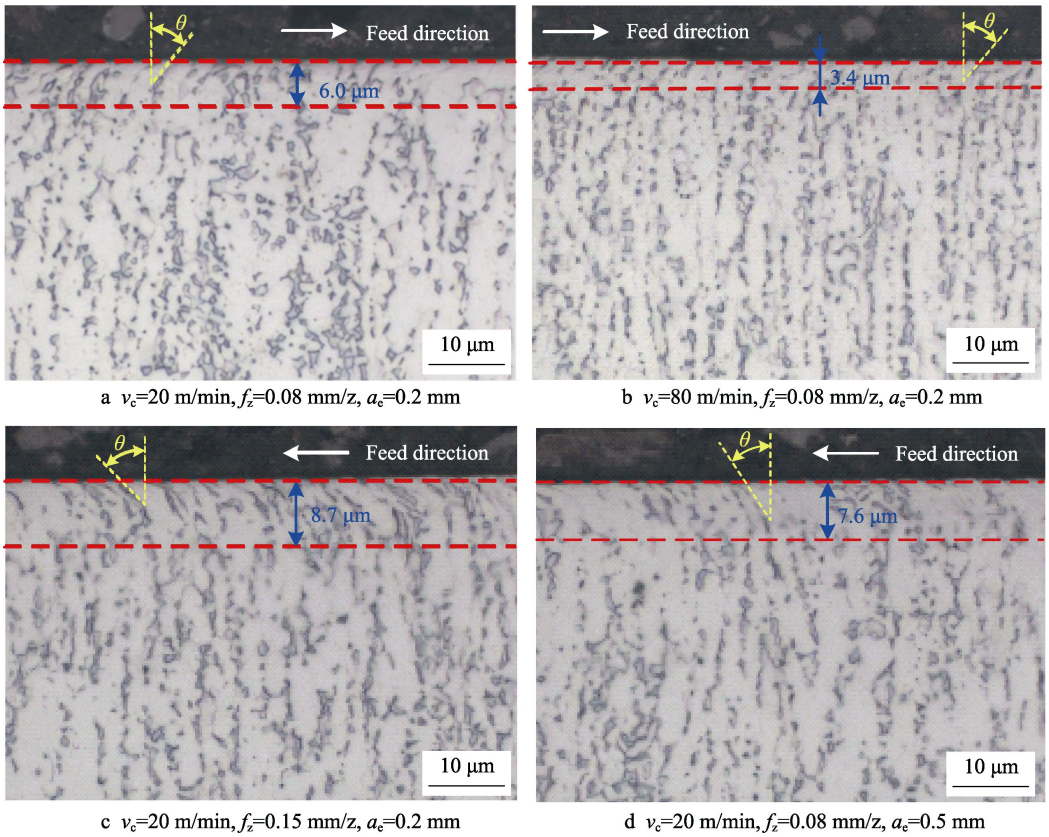


图 8　不同铣削参数下加工表层显微组织

Fig.8 Microstructure of machined surface under different machining parameters

2.2　表面完整性对试件疲劳性能的影响

基于表 4 中表面完整性及疲劳性能的测试结果，采用线性回归方法，建立表面完整性重要指标（随机表面粗糙度、表面显微硬度及表面残余应力）影响疲劳寿命（N_f）的分析模型如下：

$$N_f=6.21\times10^{-19}R_z''^{1.0896}H^{9.4603}|\sigma_H|^{0.7950} \quad (1)$$

式中，H 为表面显微硬度，σ_H 为表面残余应力。从式（1）可以看出，表面显微硬度对应的回归系数最大，且依次是随机表面粗糙度和表面残余应力幅值对应回归系数的 8.68 和 11.90 倍。结合图 9 所示的表面完整性各指标单独影响 N_f 的曲线可以看出，在实验参数范围内，随机表面粗糙度始终较小，在 R_z''为 0.32~0.46 μm 时，试件的疲劳性能对其不敏感；对试件疲劳性能影响最大的表面完整性指标为表面显微硬度，且随表面显微硬度的增加，N_f 显著增大；试件加工表面残余应力在−227.3~ −61.6 MPa 之间，加之在零件服役环境下，加工表面残余应力会在较短时间内释放绝大部分[16-18]，其对侧铣加工后 TC4 钛合金试件的疲劳性能影响不显著。

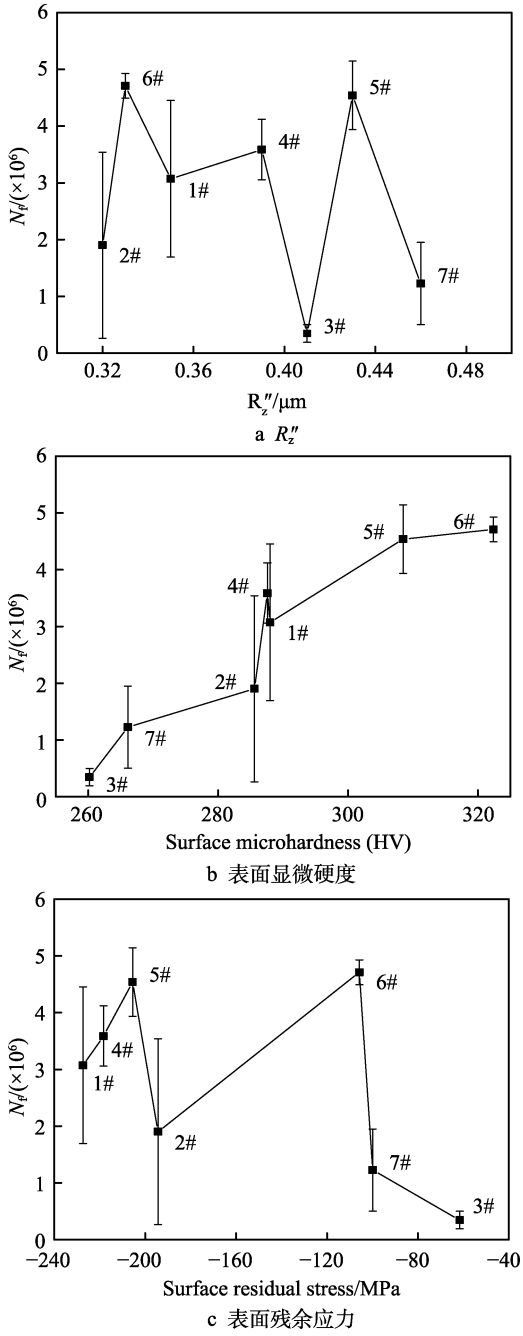


图 9　表面完整性各指标对 N_f 的影响

Fig.9 Influence of surface integrity on N_f of specimens: a) R_z''; b) surface microhardness; c) surface residual stress

图 10 为表面完整性关键指标对 N_f 的综合影响趋势图。当采用第 3 组铣削参数时，即 v_c=80 m/min、f_z=0.08 mm/z 和 a_e=0.2 mm，试件表面显微硬度最低，为 260.2HV；随机表面粗糙度 R_z''为 0.41 μm；表面残余应力为−61.6 MPa；N_f 最低，为 0.34×10^6。而采用第 6 组铣削参数，即 v_c=20 m/min、f_z=0.08 mm/z 和 a_e=0.1 mm 时，试件表面显微硬度最高，为 322.4HV；随机表面粗糙度为 R_z''0.33 μm；表面残余应力为 −105.8 MPa；N_f 最高，为 4.71×10^6。

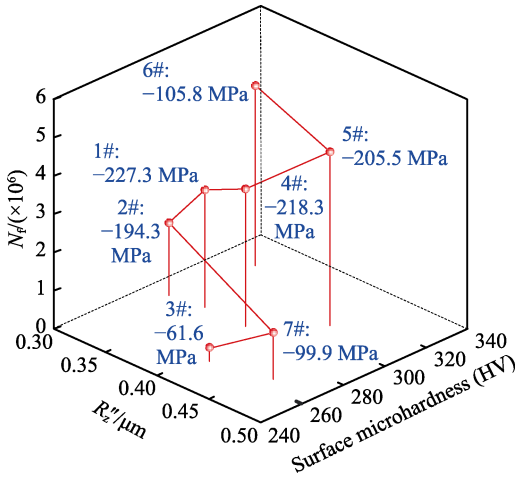
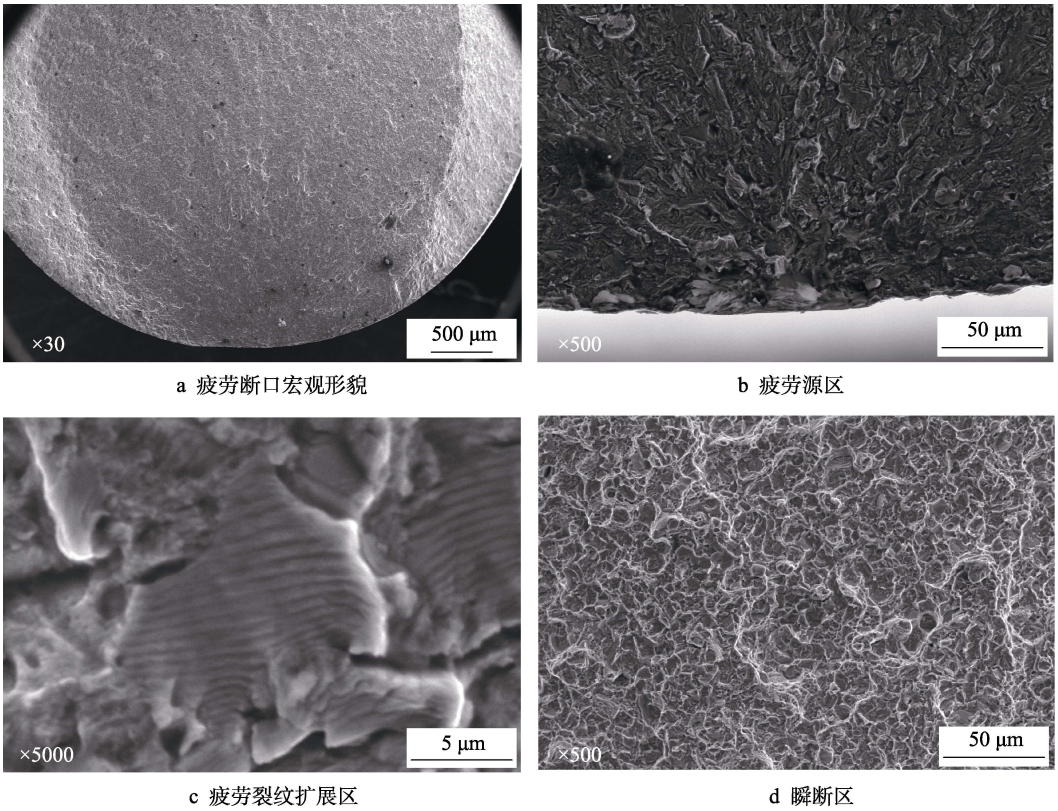


图 10　表面完整性关键指标对 N_f 的综合影响

Fig.10 Combined influence of key indicators of surface integrity on N_f of specimens

2.3　疲劳断口分析

利用 CS3400 型扫描电子显微镜，对经第 6 组铣削参数加工后，N_f 为 4.86×10^6 的试件断口进行观察，结果如图 11 所示。依据疲劳断口的宏观形貌，可将其分为以下 3 个区域：疲劳源区、疲劳裂纹扩展区和瞬断区。由图 11a、b 可以发现，该试件的疲劳源为单源特征，且位于试件亚表面。同时，疲劳源与试件表面之间的材料存在较为剧烈的塑性变形。可见，在该参数下，侧铣加工引起的表层材料的塑性变形会阻碍疲劳裂纹在其表面的萌生，对试件的疲劳性能具有强化的效果。在图 11c 中可以观察到大量明显的疲劳辉纹，它们之间近似平行且垂直于疲劳裂纹扩展方向。在图 11d 所示的瞬断区遍布大量韧窝。



a 疲劳断口宏观形貌　　b 疲劳源区

c 疲劳裂纹扩展区　　d 瞬断区

图 11　N_f为 4.86×10^6 的试件疲劳断口

Fig.11 Fatigue fracture of specimen with N_f=4.86×10^6: a) fatigue fracture; b) initiation area of fatigue crack; c) propagation area of fatigue crack; d) instantaneous break area

3　结论

1）对于侧铣 TC4 钛合金来说，表面粗糙度随 f_z 和 a_e 的增加而增大，随 v_c 的变化不显著；表面显微硬度随 f_z 的增加而增大，随 v_c 和 a_e 的增加而降低；加工表面均呈现残余压应力状态，且残余应力值随 v_c 的增加而降低，随 a_e 的增加先增大后减小，随 f_z 的变化不明显。

2）表面显微硬度是影响侧铣 TC4 钛合金试件疲劳性能的主要因素。在实验条件下，随着表面显微硬度的增加，试件的疲劳性能逐渐提升。

3）表面粗糙度对 TC4 钛合金试件疲劳性能的影响不明显。表面粗糙度曲线经解耦后，对试件疲劳性能影响较大的随机表面粗糙度始终较小。在 R_z''为 0.32~0.46 μm 时，加工表面残余应力在−227.3~−61.6 MPa 之间，对试件疲劳性能的影响不显著。

4）在铣削参数为 v_c=20 m/min、f_z=0.08 mm/z 和 a_e=0.1 mm 的条件下，试件加工表面随机粗糙度 R_z''为 0.33 μm；表面显微硬度为 322.4HV；表面残余应力为−105.8 MPa；N_f最高，为 4.71×10^6。

参考文献：

[1] ULUTAN D, OZEL T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2011, 51(3): 250-280.

[2] EZUGWU E O, WANG Z M. Titanium alloys and their machinability—a review[J]. Journal of materials processing technology, 1997, 68(3): 262-274.

[3] 杨勇进, 张晓云, 孙志华, 等. TC4 钛合金厚板电偶腐蚀与防护研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(4): 149-156.
YANG Yong-jin, ZHANG Xiao-yun, SUN Zhi-hua, et al. Galvanic corrosion and protection of TC4 titanium alloy thick plate[J]. Equipment environmental engineering, 2016, 13(4): 149-156.

[4] 高玉魁. 表面完整性理论与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014: 4-5.
GAO Yu-kui. Surface integrity theory and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014: 4-5.

[5] 史兴宽, 陈明. 钛合金 TC4 高速铣削表面完整性的研究[J]. 航空制造技术, 2001(1): 30-31.
SHI Xing-kuan, CHEN Ming. Study on high speed milling surface integrity of Ti alloy TC4[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2001(1): 30-31.

[6] CHE-HARON C H, JAWAID A. The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6%Al-4%V[J]. Journal of materials processing technology, 2005, 166(2): 188-192.

[7] HUGHES J I, SHARMAN A R C, RIDGWAY K. The effect of cutting tool material and edge geometry on tool life and workpiece surface integrity[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part B: Journal of engineering manufacture, 2006, 220(2): 93-107.

[8] YANG D, LIU Z Q, REN X, et al. Hybrid modeling with finite element and statistical methods for residual stress prediction in peripheral milling of titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. International journal of mechanical sciences, 2016, 108: 29-38.

[9] GINTING A, NOUARI M. Surface integrity of dry machined titanium alloys[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2009, 49(3-4): 325-332.

[10] 穆志韬, 曾本银. 直升机结构疲劳[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 14-15.
MU Zhi-tao, ZENG Ben-yin. Fatigue of helicopter structures[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 14-15.

[11] 陶春虎, 钟培道, 王仁智, 等. 航空发动机转动部件的失效与预防[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 6-7.
TAO Chun-hu, ZHONG Pei-dao, WANG Ren-zhi, et al. Failure analysis and prevention for rotor in aero-engine[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 6-7.

[12] JAVIDI A, RIEGER U, EICHLAEDER W. The effect of machining on the surface integrity and fatigue life[J]. International journal of fatigue, 2008, 30(10-11): 2050-2055.

[13] STANDARD A. Standard practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials[J]. West conshohocken, PA: ASTM international, 2015.

[14] LI X, ZHAO P, NIU Y S, et al. Influence of finish milling parameters on machined surface integrity and fatigue behavior of Ti1023 workpiece[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2017, 91(1-4): 1297-1307.

[15] LI X, GUAN C M, ZHAO P. Influences of milling and grinding on machined surface roughness and fatigue behavior of GH4169 superalloy workpieces[J]. Chinese journal of aeronautics, 2018, 31(6): 1399-1405.

[16] ROSS A S, MORROW J D. Cycle-dependent stress relaxation of A-286 alloy[J]. Journal of basic engineering, 1960, 82(3): 654-658.

[17] HOLZAPFEL H, SCHULZE V, VÖHRINGER O, et al. Residual stress relaxation in an AISI 4140 steel due to quasistatic and cyclic loading at higher temperatures[J]. Materials science and engineering: A, 1998, 248(1-2): 9-18.

[18] KIM J C, CHEONG S K, NOGUCHI H. Residual stress relaxation and low-and high-cycle fatigue behavior of shot-peened medium-carbon steel[J]. International journal of fatigue, 2013, 56: 114-122.

（上接第 371 页）

[10] 刘光明, 刘康生, 毛晓飞, 等. T91 钢在 KCl+Na_2SO_4+K_2SO_4 熔融盐中的热腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2017, 37(1): 23-28.
LIU Guang-ming, LIU Kang-sheng, MAO Xiao-fei, et al. Hot corrosion of T91 steel in molten mixture of KCl+Na_2SO_4+K_2SO_4[J]. Journal of Chinese society for corrosion and protection, 2017, 37(1): 23-28.

[11] STEIN Brzozowska G, NORLING R, VIKLUND P, et al. Fireside corrosion during oxyfuel combustion considering various SO_2 contents[J]. Energy procedia, 2014, 51: 135-147.

[12] 汪元奎, 黄丽琴, 刘光明, 等. S30432 钢在含 1.5%SO_2 模拟烟气中的腐蚀行为研究[J]. 表面技术, 2017, 46(12): 199-205.
WANG Yuan-kui, HUANG Li-qin, LIU Guang-ming, et al. Corrosion behavior of S30432 steel in 1.5% SO_2 simulated fuel gas[J]. Surface technology, 2017, 46(12): 199-205.

[13] 李萍, 秦鹏, 赵杰, 等. 涂覆 Na_2SO_4-25%NaCl 盐膜的 S30432 的热腐蚀行为[J]. 材料工程, 2016, 44(2): 69-74.
LI Ping, QIN Peng, ZHAO Jie, et al. Hot Corrosion behavior of S30432 coated Na_2SO_4-25%NaCl film[J]. Journal of materials engineering, 2016, 44(2): 69-74.

[14] SUN J, LIU S B, LI W, et al. Hot corrosion behaviour of Pt modified aluminized NiCrAlYSi coating on a Ni-based single crystal superalloy[J]. Corrosion science, 2019, 149(1): 207-217.

[15] 李萍, 李安娜, 庞胜娇, 等. HR3C 抗高温硫酸盐腐蚀行为研究[J]. 大连理工大学学报, 2013, 53(5): 685-688.
LI Ping, LI An-na, PANG Sheng-jiao, et al. Research on behavior of HR3C to resist high temperature sulfate corrosion[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013, 53(5): 685-688.