

钛合金切削加工技术 研究进展

Research Development of Cutting Technology for Titanium Alloy

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 陈五一 袁跃峰



陈五一

1994年在英国伯明翰大学获博士学位,现任北京航空航天大学机械工程及自动化学院教授,研究领域是机械制造工艺及装备,已发表论文200余篇。

钛及钛合金对一个国家的国防、经济和科技发展具有重要的战略意义,被称为21世纪的战略金属,也被称为新崛起的第三代金属^[1-2]。

目前,航空航天工业是钛合金的主要消费领域。应用于此领域的钛合金产品虽然具有优异的性能,但价格普遍比较昂贵。造成钛合金零件

钛合金是典型的难加工材料,加工时刀-屑接触面积小、应力大、温度高,刀具粘结磨损、扩散磨损严重。刀具材料的合理选择是应对钛合金加工的首要问题,含钛刀具在高速下可以用于切削钛合金。在一定条件下刀具表面形成稳定的钛合金粘接层,可以起到抑制磨损的作用。随着数值计算理论和软件工具的不断发展,切削过程仿真和预测必将在钛合金切削加工理论和技术的研究中起到越来越重要的作用。

价格较高的原因是多方面的,其中加工成本高是重要原因之一。钛合金切削加工成本高主要是由切削钛合金时摩擦力大、温度高、刀具磨损严重造成的。加工钛合金的速度比加工钢的速度低50%,因此其制造成本比钢要高得多^[3],而且需要采用高性能刀具,刀具费用也大幅提高。作为地球并不稀缺的资源,钛多年来并未得到广泛应用,主要原因在于应用成本较高。

因此钛合金在航空航天领域中能否广泛应用,在一定程度上取决于它的制造成本。深入、系统地研究钛合金的加工技术具有重要意义。

钛合金的类型及 机械物理性能

钛合金从组织上可分为 α 相钛合金(用TA表示)、 β 相钛合金(用TB表示)及 $\alpha+\beta$ 相钛合金(用TC表示)。3种钛合金中 α 钛合金的切削加工性最好; $\alpha+\beta$ 钛合金次之; β 钛合金最差。在物理机械性能方面, α 钛合金强韧性一般,焊接性能好,抗氧化强,蠕变强度较高; β 钛合金热处理强化能力强,可锻性及冷成型性能好; $\alpha+\beta$ 钛合金强韧性要好于 α 钛合金,可热处理强化、可焊接,疲劳性能也较好^[4]。

钛的外观近似于钢,呈银灰色,具有光泽,钛合金主要特点如下。

(1) 比强度(强度/密度)高。

常用的 $\alpha+\beta$ 型钛合金强度 $\sigma_b=1010\sim 1177\text{MPa}$,密度为 4.5g/cm^3 ,而合金钢的强度 σ_b 可达到 $1275\sim 1569\text{MPa}$,密度为 7.9g/cm^3 。

钛合金的比强度远大于其他金属结构材料,可制造出单位强度高、刚性好、质量轻的零部件。

(2) 热强度高。

钛合金的热稳定性好,高温强度高,在 $300\sim 500^\circ\text{C}$ 下,其强度约比铝合金高10倍,工作温度可达 500°C 。常用的Ti6Al4V钛合金能在 350°C 下长期工作。

(3) 抗蚀性好。

钛合金在潮湿大气和海水介质中工作,其抗蚀性优于不锈钢,对点蚀、酸蚀、应力腐蚀的抵抗力很强;对碱、氯化物、氯的有机物品、硝酸、硫酸等有优越的抗腐蚀能力,是普通不锈钢的15倍。

(4) 导热性差。

钛的导热系数很低($\lambda=15.24\text{W/(m}\cdot\text{K)}$),约为镍的 $1/4$,Fe的 $1/5$,铝的 $1/14$ 。

各种钛合金的导热系数更低,一般约为钛的50%。

(5) 弹性模量小。

如钛合金TC4的弹性模量为 110GPa ,约为钢的 $1/2$,故钛合金容易产生弹性变形。

此外,钛合金材料具有硬度高、熔点高(达 1672°C)、无毒、无磁性等特性^[4-5]。除前述比强度高、耐热性、耐蚀性好等优点外,钛合金还能与碳纤维增强复合材料(CFRP材料)相容。钛与复合材料的强度、刚度匹配较好,能获得很好的减重效果,同时由于二者的电位比较接近,不易产生电偶腐蚀^[2,6]。

钛合金切削加工性特点

钛合金是典型的难加工材料,其

主要切削加工特点如下^[7-9]。

(1) 切屑与前刀面接触面积小、刀尖应力大、温度高。

与45#钢相比,钛合金的切削力虽然只有其 $2/3\sim 3/4$,但由于钛合金切屑与刀具前刀面的接触面积更小,只有45#钢的 $1/2\sim 2/3$,导致刀具承受的应力反而更大,是45#钢的 $1.3\sim 1.5$ 倍,温度可为45#钢的2倍,从而使得刀尖和切削刃容易磨损。

(2) 摩擦系数大。

在相同条件下,钛合金材料与普通碳钢相比,其摩擦系数大,切屑流经前刀面时所做的摩擦功大,导致摩擦界面温度更高,使刀具易于磨损。

(3) 化学活性高。

钛合金高温时化学活性很高,能与空气中的氧、氮和水蒸气等发生化学反应,在钛合金表面生成硬化层,导致工件硬度大幅度提高,同时降低了工件塑性并且使切屑与前刀面的接触长度进一步减少,导致刀具磨损加快。

(4) 热传导率低。

钛合金的导热系数分别只有铁的 $1/5$ 、铝的 $1/14$,加之刀具与切屑的接触长度短,使得切削热积聚于切削刃附近的小面积内而不易散发,导致刀具温度过高,加快了刀具的磨损。

(5) 弹性模量小。

由于钛合金弹性模量小、屈强比大,使得工件的已加工表面在切削过程中极易产生回弹,容易造成刀具的后刀面磨损加剧和工件变形。

钛合金切削加工的研究

早在20世纪五六十年代,美国、英国、日本等发达国家就开始围绕钛合金加工中的刀具寿命、切屑形成、切削温度、切削力等开展了大量的研究工作^[10-20]。Lockheed公司早在1951年就进行了钛合金铣削试验^[10]。Komanduri^[12]最早系统地研究了正交切削钛合金时的切屑变形,并提出了锯齿状切屑的突变剪切失

稳理论。Jawaid等^[15]研究了钛合金Ti-6246的刀具磨损试验,研究表明细晶粒刀具和经过研磨的刀具具有较好的耐磨性能。Hong和Markus等^[16]用液氮来加工钛合金,对液氮浇注方法进行了研究,采用微型喷嘴并直接安装在刀具表面和断屑台之间,液氮直接喷在了刀尖部位,避免了浪费,有效地延长了刀具耐用度。Nouari和Iordanoff^[18]用离散元法分析了钛合金切削的刀具磨损,研究表明运用离散元法可有效帮助控制刀屑接触。由于世界主要发达国家都有自己的切削数据库(如美国的Cutdata、德国的Infos、瑞典的Coromant切削数据库),所以对钛合金的切削加工性研究都比较系统。

我国对钛合金的研究起始于1954年北京有色金属研究总院。50多年来,我国不少单位和科研院校对钛合金的切削加工性进行了大量研究,取得了一定成果^[2,21-26]。耿国盛^[22]通过对铣刀磨损的正交试验和对铣削力的测量,完成了对 $\beta 21s$ 钛合金的铣削加工性的考察评估,并通过试验获得了经过优化的铣削加工参数。齐德新^[23]对铣削钛合金BT20时的切屑形态、切削力、刀具磨损、破损形态及机理进行了研究,对刀具材料、合理几何参数、最佳切削用量进行优选,在此基础上研制出适用该材料的新型端面铣削刀具。满忠雷、何宁等^[24]基于绿色切削的理念,用硬质合金刀具进行了高速铣削钛合金的单因素试验,得出了径向切深、轴向切深、每齿进给量和铣削速度对铣削力的影响规律;并比较分析了干铣削、氮气油雾和空气油雾介质下铣削力的变化特点。石磊^[2]从化学、物理和力学性能3个方面对刀具材料与钛合金性能匹配进行了研究,建立了钛合金切削刀具选择系统模型。总体来讲,我国对钛合金切削加工性的研究与欧美发达国家相比仍有不小的差距,制约钛合金应用和发展的加

工质量、效率、刀具磨损等问题仍有待进一步的研究。

钛合金切削研究进展

1 刀具磨损

钛合金加工时,切削刃附近有很高的切削温度和应力,给刀具耐用度带来了严重的影响,常有前刀面月牙洼磨损、后刀面磨损、边界磨损、微崩刃甚至破损等发生,不同的刀具材料其磨损机理也不尽相同^[12]。Jawaid等^[15]在进行钛合金的切削试验研究(钛合金 Ti-6246,切削速度 60m/min、75m/min、100m/min)时发现,车削(尤其是高速切削)钛合金时,WC 硬质合金刀具后刀面磨损主要以扩散磨损为主。Nabhani^[17]指出 PCBN 刀具与硬质合金刀具的主要磨损形式均为塑性变形。Wang 等^[27]指出 CBN 刀具切削钛合金的主要磨损形式为粘结磨损。Nouari^[28]分别用含 Ti 硬质合金刀具和含 Ti 涂层(TiN、TiC、TiCN)刀具干铣钛合金 Ti-6242S,研究表明 2 种刀具的主要磨损形态均为后刀面磨损,且当刀具后刀面磨损 VB 接近 0.3mm 时,2 种刀具材料均有崩刃和塑性变形发生,此外还出现涂层脱落。2 种刀具材料的主要磨损形式均为粘结磨损和扩散磨损。Deng 等^[29]研究表明,用 WC-Co 硬质合金刀具切削钛合金时,温度超过 800°C 后,刀具发生扩散磨损。袁跃峰^[30]研究表明,WC-Co 硬质合金刀具切削钛合金的主要磨损形式为粘结磨损和扩散磨损,且随着切削速度的提高刀具的扩散磨损逐渐加重。

目前,刀具磨损严重是钛合金实际生产中所面临的主要问题(图 1)。Nabhani^[17]研究表明,涂层硬质合金刀具(KC850)切削钛合金 TA48 时($v=75\text{m/min}$, $f=0.25\text{mm/r}$, $a_p=1\text{mm}$),刀具耐用度在 10min 左右。Arrazola 等^[19]通过用 K15 细晶粒硬质合金刀具切削 Ti6Al4V,得到了该刀具的最高切削速度为 80m/min(浇注常规

切削液)。在该切削速度下,刀具切削 15min 时的 VB 值接近 0.2mm;当切削速度超过该速度时刀具磨损急剧加快,刀具耐用度不超过 15min。Abdel-Aal 等^[20]分别用 WC-Co 硬质合金刀具和涂层刀具(TiC/ TiN/ TiCN)来铣削钛合金 Ti6Al4V,试验表明二者的切削速度均不宜高于 100m/min,当 $v=75\text{m/min}$, $f_z=0.15\text{mm/z}$ 时(浇注常规切削液),硬质合金刀具铣削 20min 后,后刀面磨损值达到 0.2mm;当切削速度超过该速度时刀具磨损急剧加快,刀具耐用度不超过 15min。

实际生产中大都采用硬质合金刀具来加工钛合金。据了解,目前我国企业在加工固溶时效热处理 TC4 钛合金时,硬质合金刀具的寿命大约为 30min(浇注乳化液),切削速度一般都低于刀具厂商所提供的推荐值,如何有效提高刀具耐用度已成为眼下钛合金加工中亟待解决的问题之一。

2 刀具-工件粘结现象

一般切削塑性金属时都会发生刀具-工件粘结现象,钛合金加工时更容易发生粘结。钛合金在切削加工时的刀具-工件粘接有如下特点。

(1)在一定的切削条件下产生薄而均匀的粘结层,而且粘接状态稳定。这种条件下的切削运动实际是工件/切屑材料内部的剪切滑移,稳定的粘结层可保护刀具切削刃,延长刀具寿命。其原因是:

- 由于粘接层不轻易脱落,减轻了粘接磨损;
- 稳定的工件粘结层消除了刀具-工件界面的相对滑移,没有滑动,自然各种磨损都大大减小。

(2)当切削条件使得粘接层频繁脱落时,粘结层脱落可能发生在:

- 刀具-工件接触面上;
- 工件粘结层内;
- 刀具缺陷部位。

粘结层是经过强烈塑性变形的组织,晶格严重畸变,硬度高于工件母材,因此脱落的粘结层会对刀具造成磨料磨损。第三种情况更是直接造成了刀具的粘结磨损。而且此时脱落的粘结层上带有刀具材料,会对刀具造成更强烈的磨料磨损。

Nouari 等^[28]在含 Ti 硬质合金刀具和含 Ti 涂层刀具上均发现了工件粘结层(图 2)。Wang 等^[27]在 CBN 刀具上也发现了工件粘结层。一般认为中等速度下刀具-工件粘接严重,刀具与工件亲和性较小时不易粘接,而袁跃峰^[30]用 WC-Co 硬质合金刀具切削钛合金时发现,当切削速度达到 153m/min 时,刀具上仍发现有 10 多 μm 厚的工件粘结层(图 3),钛合金表现出与刀具极强的粘接倾向。

应尽量避免钛合金切削加工中不稳定的工件粘结层,而稳定的工件粘结层则非常有益于刀具寿命的延长。

3 切削仿真技术进展

随着计算机软硬件技术的飞速发展,金属切削过程的有限元仿真正扮演着越来越重要的角色。通过切

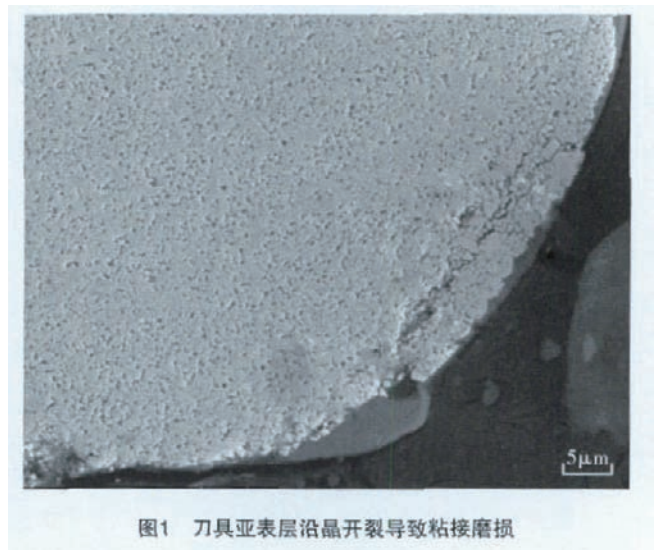


图1 刀具亚表层沿晶开裂导致粘接磨损

钛合金切削加工应用技术进展

1 刀具材料研究进展

目前,钛合金的切削加工主要以硬质合金刀具为主,但铰刀、拉刀等形状复杂的刀具及成形刀具可采用高温性能好的高速钢。

对钛合金的切削加工,通常认为含 Ti 硬质合金及含 Ti 涂层刀具会与钛合金产生剧烈的亲和作用,加剧刀具的粘结磨损,不宜用来切削钛合金^[7, 32-33]。但 Ezugwu 等^[34]指出一种含 Ti 刀具材料在切削钛合金时具有很好的切削性能。刘东^[35]也用含 Ti 的硬质合金刀具 YS8 切削钛合金,得到了不错的效果。此外,目前许多刀具厂商所推荐的用来加工钛合金的刀具材料大都含有 Ti 涂层(如表 1 所示)。

袁跃峰^[30]采用典型 YG、YT 类硬质合金刀具 YG8、YT14 对钛合金 TC4 进行了刀具磨损试验,发现在 75m/min、83m/min 的切削速度下, YT14 抵抗磨损的能力要优于 YG8。进一步的扫描电镜及能谱分析表明,切削钛合金时, YT 类硬质合金刀具

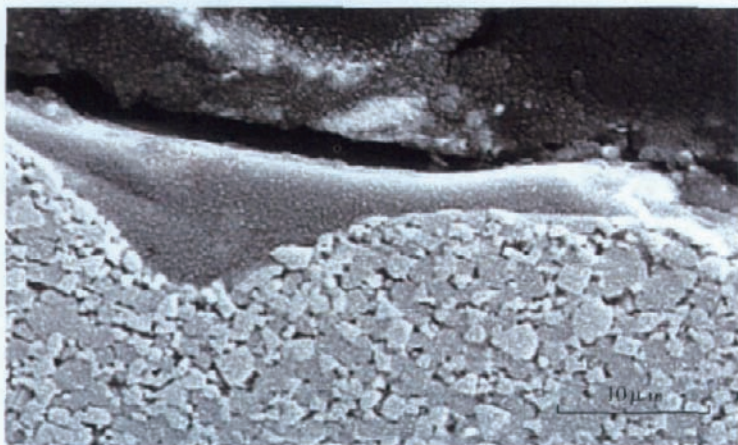


图2 刀具剖面扫描电镜形貌图^[28]

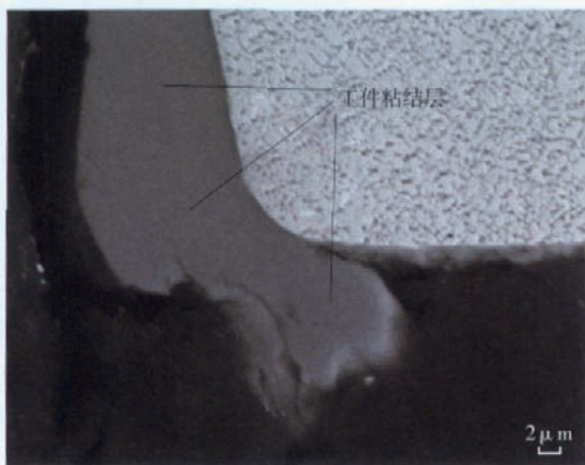


图3 WC-Co硬质合金刀具剖面扫描电镜形貌图^[30]

削仿真不仅可以预报切削力,分析切削过程中应变、应变率、应力、温度等状态变量的分布,同时还可以预报刀具磨损、工件残余应力,并进一步优化切削参数。有限元法的引入丰富了钛合金切削机理的研究手段。Umbrello^[31]运用有限元法对钛合金 Ti-6Al-4V 常规铣削和高速铣削下的切削力和切削形貌进行了仿真分析。袁跃峰^[30]针对钛合金加工中的刀具磨损仿真预测进行了研究,建立了综合考虑磨料磨损、粘接磨损、扩散磨损的仿真模型,可在一定程度上实现刀具磨损的仿真预测。随着数值计算理论和软件工具不断发展,切削过程仿真和预测必将在切削加工理论和技术的研究中起到越来越重要的作用。

表1 钛合金加工刀具的涂层信息^[36]

刀具厂商	刀具材料	涂层成分
山特维克可乐满	GC1105	TiAlN
肯纳	KC5010	TiAlN
	KC9225	TiN+ TiCN+ Al ₂ O ₃
斯特拉姆	SP0864	TiAlN
瓦尔特	WSM30	TiCN+Al ₂ O ₃ (ZrCN)
	WSM20	TiAlN+Al ₂ O ₃ (ZrCN)
	WAM20	TiCN+Al ₂ O ₃ +HfN
山高	CP200	(Ti, Al) N + TiN
	CP500	(Ti, Al) N + TiN
伊斯卡	IC907	TiAlN
泰珂洛	AH120	(Ti, Al) N
株洲钻石	YBG302	nc-TiAlN
三菱	VP10RT	(Al, Ti) N

虽然更容易发生粘结磨损,但同时它抵抗扩散磨损的能力也优于 YG 类硬质合金刀具,扩散磨损是造成 YG8 刀具在较高速度范围内磨损快的主要原因。

此外,有报道称采用金刚石和立方氮化硼刀具切削加工钛合金可取得显著效果。Nabhani 等^[17]分别用 PCBN、PCD 和硬质合金刀具来加工钛合金,研究表明 PCD 刀具具有较好的刀具耐用度,且工件表面质量更好。Wang 等^[27]对 CBN 刀具高速槽铣钛合金 Ti-6Al-4V 进行了研究,内容涉及切削力、刀具磨损及磨损机理。刘鹏等^[36]进行了 PCD 刀具高速铣削钛合金 TA15 的切削力试验,对高速加工过程中的动态铣削力进行了频谱分析,分析了高频振动对切削力波形的影响。

世界各大刀具生产厂商针对刀具材料的研究不遗余力,几乎每年都有专用于钛合金的新型刀具投向市场。新型刀具的切削性能不断提高,直接提高了钛合金的加工效率。山特维克可乐满新推出了适合于钛合金铣削的 GC1030 刀片,其独特的复合涂层技术保证了该材质既有很高的耐磨性,也有很好的韧性。肯纳新推出的硬质合金刀具材料 KC5010,采用 TiAlN 涂层(PVD),其特点为硬质合金刀具的抗变形性能很强,据称可使切削速度提高 50% 甚至 100%,适合于高速加工钛合金。山高推出的 CP200 是一种高硬度超细颗粒的刀片材质,涂层成分为(Ti, Al)N+TiN,涂层方法为 PVD,适合加工钛合金。随着高性能刀具材料的不断涌现,钛合金零件的加工也正趋于采用高速切削。

我国在刀具材料方面的研发与欧美发达国家相比仍有不小的差距,只有株洲、自贡、勉县等少数刀具厂家有能力研发适合于加工钛合金的刀具材料,其性能与国际先进水平相比尚有差距。

据统计,航空工业所使用的刀具 80% 依赖进口,而对钛合金等难加工材料,进口刀具的应用比例更高。同时国外刀具中仍有少量高端产品在国内很难买到,因此国内加工钛合金用的刀具材料并不能保证是目前世界上最好的刀具材料。推动国产高档刀具的开发,是从根本上解决上述问题的唯一途径。

2 钛合金的高效切削

近年来,高效切削技术在生产中逐渐得以广泛应用,钛合金零件的加工也正趋于采用高效切削。发达国家已开始采用数控超高速精密铣削技术加工飞机钛合金零件,切削速度可以达到 200~400m/min^[2,15,37-38]。目前,我国大部分航空制造企业都配备先进的进口机床,但加工效率与发达国家相比还有不小差距。近年来,国防工业系统开展的“千台数控机床增效工程”已经为铝合金高效数控加工探索出一条有效的道路,但钛合金等难加工材料的加工效率还有待于进一步提高。

当前钛合金高效切削加工存在的主要问题包括以下方面。

(1) 刀具材料的合理选择问题。

解决难加工材料高效加工的首要问题是合理选择刀具材料,当前生产中选择刀具一般根据类比和厂商推荐,选择范围有限。采用标准的耐用度试验方法大范围地选择刀具时,工件材料和时间的消耗极大,技术上难以实施。

最近 Yuan 等^[39]根据上百条磨损曲线的统计分析,提出一种基于刀具初期磨损的刀具快速筛选技术,可以在几天之内消耗几 kg 工件材料,从 20 多种厂家推荐的刀具中筛分出适用刀具、备选刀具、淘汰刀具,筛选的置信度达 90% 以上。

(2) 切削参数的选择问题。

钛合金切削加工性方面的研究成果推广应用不足,生产中缺乏合理的切削参数,切削参数的选择凭经

验、凭类比,而很少以科学、系统的试验结果为依据。

国外刀具供应商推荐的参数虽然可能经过较系统的试验,但由于试验条件与国内生产环境的差异,所推荐的切削参数未必适用。

(3) 加工成本的构成问题。

加工成本构成的差异也是造成我国钛合金切削速度普遍偏低的主要原因之一。

发达国家工人的工资在加工成本中所占比例较高,因此更希望采用尽可能高的切削速度以提高效率,充分发挥工人的劳动价值,降低其成本比例,因此其加工效率一般比较高。而在我国企业的加工成本中,工资所占比例较少,使得我国企业更倾向于选择比较保守的切削速度,牺牲效率,延长刀具耐用度。

结束语

钛合金是典型的难加工材料,加工时刀-屑接触面积小、应力大、温升高,刀具粘结磨损、扩散磨损严重。刀具材料的合理选择是应对钛合金加工的首要问题,含钛刀具在高速下可以用于切削钛合金。在一定条件下刀具表面形成稳定的钛合金粘接层,可以起到抑制磨损的作用。随着数值计算理论和软件工具不断发展,切削过程仿真和预测必将在钛合金切削加工理论和技术的研究中起到越来越重要的作用。

在生产中,钛合金加工参数的选择应该基于国内的材料、机床、管理、成本等条件进行合理优化,逐渐摒弃只凭经验、类比选择参数的粗放型生产方式,推动针对钛合金加工的国产高档刀具的开发,逐步改变航空工业对进口刀具全面依赖的局面。

本文共有参考文献 39 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)