

低散热发动机译文集

周贻荃 主编



兵器工业出版社

低散热发动机译文集

周贻荃 主编

序 言

70年代中期，低散热发动机以绝热发动机名称问世。此后至今，正在世界范围内广泛研制的所谓绝热(Adiabatic)发动机应正确地称为低散热(Low Heat Rejection)发动机或隔热(Heat Insulated)发动机。因为在实际发动机工作过程中，缸内燃气和缸壁之间不可能没有热交换，隔热件的导热率再小也不会等于零。然而，由于历史和习惯原因，现在对于低散热发动机往往还沿用绝热发动机这个约定俗成的称呼。

低散热发动机是指那些采用隔热措施减少热量散失，让更多热量转化为有效功的发动机。在现阶段，它可以是局部减少或取消冷却的隔热发动机，也可以是完全取消冷却系统的隔热发动机。最初发展低散热发动机的主要着眼点似乎是提高燃油经济性，但现在看来，它的潜在优点，特别是对军用车而言，还在于简化或取消冷却系统。此外，低散热发动机还能提高多种燃料性能、降低噪声、减少排放、提高冷启动能力等。

十几年来，低散热发动机在全世界得到很大发展。从研究的国家来看，除美、英、日等国外，还有联邦德国、澳大利亚、法国、瑞典、印度、挪威等；从研究机构类型看，已经从工业企业扩大到政府、研究所、高等院校，而且已有了不同类型机构间和国际合作研究的发展趋势；从技术发展阶段看，当前的低散热技术已经从技术论证阶段发展到深入分析研究阶段；从应用的研究范围来看，已经涉及二冲程和四冲程柴油机、转子发动机、燃气轮机、自由活塞发动机等；

从已取得的研究成果来看，美国寇明斯公司研制的采用低散热技术的XAV-28柴油机，已确定为美国第四代主战坦克动力装置的候选动力，与燃气轮机相对抗，从而已成为美国先进整体式推进系统（AIPS）规划的主要组成部分。还有日本的小松制作所、三菱重工、日野、五十铃、NGK等公司都先后研制低功率民用低散热发动机，有些已进行试用，有些陶瓷部件已经商品化。

低散热发动机正如国外有人对它作出的评价那样：其性能效果是很好的，但存在的问题是很多的。我想用奇伟寓于险远来比喻它的优点和难度，恐怕也不算过分夸张。的确，这种具有重大革新意义的新型动力的发展道路并不是平坦的，因为它的发展主要取决于高温摩擦学和高温结构陶瓷等新技术新材料的发展，并与燃烧、传热、废热利用、加工工艺等技术有密切关系。从结构上讲，低散热发动机的三大关键技术是隔热技术（涉及整体陶瓷结构、陶瓷涂层和各种隔热部件结构）、摩擦磨损技术（涉及高温润滑方法和润滑剂）和排气能量回收技术（涉及涡轮复合装置、布雷顿和朗肯循环等各种底部循环装置）。经过多年的研究，一些国家对这些关键问题已经有了进一步的认识并取得了一定的经验和研究成果。

采用低散热技术是我国军民用柴油机发展的重要途径之一，我国有关部门已经对此开展了研究工作。我们根据低散热发动机涉及的关键技术和国内发展现状，从国外最近发表的论文中选择了12篇论文编译成《低散热发动机译文集》，奉献给我国从事柴油机研究、设计、生产和科技管理人员，希望这本译文集在我国低散热发动机的发展过程中能起到借鉴和参考作用。“他山之石，可以攻玉”，这就是我们的目的。

参加本书翻译的有：

叶伟（第 1 篇）

胡星光（第 2、10 篇）

张志云（第 3、11、12 篇）

程志红（第 4、8 篇）

胡骧代（第 5 篇）

阎向前（第 6 篇）

周贻荃（第 7、9 篇）

除第 7 篇由胡骧代，第 9 篇由蔡阳生审校外，其余各篇由周贻荃审校。

最后谨向大力支持本译文集出版的机电部兵器科学研究院致以由衷的感谢。

周贻荃

1988、12

目 录

序 言

第一篇	世界绝热发动机发展趋势·····	(1)
第二篇	日本的陶瓷发动机部件·····	(26)
第三篇	高温柴油机气缸内部件·····	(35)
第四篇	气隙隔热活塞的发展·····	(56)
第五篇	内燃机零件先进涂层的发展·····	(75)
第六篇	柴油机摩擦表面和隔热涂层的发展·····	(92)
第七篇	燃烧室隔热对寇明斯V-903低散热发动机性能的影响·····	(112)
第八篇	高温柴油机的摩擦系统·····	(135)
第九篇	用催化作用形成的碳膜润滑金属和陶瓷·····	(163)
第十篇	轻负荷低散热复合式柴油机的部件选择·····	(176)
第十一篇	评定陶瓷用发动机试验台的初步经验·····	(213)
第十二篇	对轿车用低散热柴油机燃油经济性的评定·····	(229)

第一篇 世界绝热发动机发展趋势

绝热技术公司

罗伊·卡莫 (Roy Kamo)

美国陆军坦克机动车辆局

沃尔特·布赖津克 (Walter Bryzik)

概念分析公司

波尔·格兰斯 (Paul Glance)

摘 要

绝热柴油机自从1974年问世以来,由于全世界对它进行了多方面的研究工作,因此已经取得了明显进展。至今,尽管陶瓷在生产型热机上的应用还受到限制,但是应用的趋势正在发展。现在用于生产型热机的陶瓷已涉及如下部件:预燃式燃烧室、涡轮增压器、排气道衬套、活塞第一环镶嵌环槽、点火塞、氧气探测器 and 高温下的摩擦与磨损件。绝热发动机的潜在优点随其具体用途(即民用与军用相比,固定设备与车用相比,等等)不同而差别甚大,因此,必须较好地了解与材料、摩擦学、成本、性能指标有关的先进绝热方案的优缺点(以及有关的风险)。例如,车用低散热(即“绝热”)发动机,其燃油经济性至少可以改善10~20%以上,具体改善多少取决于发动机的结构及使用情况。

在美国,绝热发动机领域的主要研究项目有:高温摩擦学、脆性材料断裂分析、随机有限无应力分析、瞬态传热学和具有陶瓷-金属接合面的发动机零件的设计方法。此外,陶

瓷材料的精确特性和低成本的机械加工工艺以及无损检测也正在进行研究。在日本，已在大力研究整体式陶瓷发动机。在大功率情况下，就可靠性和成本而论，现在的整体式陶瓷发动机尚未达到人们所期望的水平。在美国和欧洲，陶瓷涂层由于其成本低和可靠性高的潜力，正在引起人们极大的兴趣。陶瓷厂商和发动机厂商在世界范围内合作的趋势似乎在日益增长。通过对共同目标所进行的那些研究工作，将来很有可能取得成功的。

前 言

高性能的结构陶瓷的最新发展对热机的发展已经给予了新的推动。通过提高工作温度，减少废热损失和改善排气能量的利用，奥托 (Otto)、狄塞尔 (Diesel)、布雷顿 (Brayton) 和斯特林 (Stirling) 循环的热效率可以得到提高，隔热涡轮复合柴油机已显示出是未来运输用和军用较理想的发动机方案之一。这种先进的发动机方案利用陶瓷材料作燃烧室。整体式陶瓷隔热材料的性能已经得到较大改善，但是，在加工、质量控制和成本等方面存在的问题将推迟它的应用。因此，作为一种替代的方法，人们希望热障涂层在整体陶瓷绝热应用之前，用于大多数燃烧室表面。具有较高热效率和多种燃料性能的绝热柴油机可能成为一种节能发动机，提供良好的技术经济性能。

绝热发动机的潜在优点随其具体用途和结构不同差别很大，而有关具体性能要求的问题将总是存在的。此外，就具体发动机和具体使用限制而言，我们必须对绝热发动机在改善紧凑性、减轻重量、提高多种燃料性能、减少维护保养、降

低噪声和烟度以及许多其他方面的优点进行估价。

在过去10年期间，用于发动机的高温材料领域的工作已经有了进展，高温材料在发动机的预燃室、涡轮增压器、排气道衬套、活塞第一环镶嵌环槽、点火塞、氧气探测器以及其他高温摩擦和磨损领域得到了一定的生产应用。同时在全世界一些实验室中，论证了有关研究方面的进展。然而，对于一般先进发动机的应用而言，陶瓷仍然具有显著的缺陷，特别是在强度和成本方面。整体陶瓷尚未达到人们所期望的水平，尤其在大功率发动机燃烧室的瞬态工况下。陶瓷涂层在高强度和低成本方面似乎提供了越来越大的希望，因此，陶瓷涂层比整体陶瓷更有可能在近期内广泛应用于燃烧室表面。

在材料和应用方面作更多的研究是非常必要的。研究人员和研究机构为克服绝热柴油机当今遇到的问题正在努力工作。本文提出了当今正在继续开展研究的克服绝热柴油机发展障碍的问题和总的研究方向。

当今绝热发动机的实际优点必须在一个已证实费效比的设计中加以充分发展和补充。

绝热发动机综述

绝热发动机是这样的一种发动机，即在其热力过程中不增加热量或减少热量。显然，无热损失（绝热度100%）的真正绝热发动机是不可能存在的，但是，采用先进的陶瓷材料，50~60%的绝热度是可能达到的。

过去，为了得到绝热柴油机，人们将现有发动机使其隔热化。隔热发动机的零件由陶瓷制成，但是设计时没有考虑陶瓷的特性，这些按金属设计的陶瓷零件最终往往失效，使

绝热柴油机的优点不能全部体现出来。一种先进的陶瓷绝热柴油机结构，没有水冷系统，当然这种柴油机会比当今水冷发动机轻而且还便宜，但企图发展这样的结构，会出现许多工艺问题。

陶瓷材料的强度和成本仍然是存在的极其重要的问题。在发动机负荷和转速范围内工作的陶瓷和金属结合面的设计也还是难于解决的问题。包括摩擦、磨损和润滑技术的高温摩擦学仍旧是成功实现绝热发动机方案的障碍。高温发动机容积效率的损失必须通过高效率的涡轮机械和创新的设计来将其减至最小。

在优点方面，绝热发动机具有明显减小发动机冷却系统和发展为单一冷却液结构的潜力(也就是说，无水冷系统，只有油冷系统)。由于改善了活塞膨胀特性和增加了废气能量回收的可能性，燃油经济性的改善是可能的。此外，在实际装用条件下，由于附加损失(即风扇、泵、格栅等损失)减少，燃油经济性的收益会增加，特别在部分负荷下也许会更大。

另外，从军用系统的观点来看，通过采用这种技术，军用战斗车辆推进系统的体积可以减小40%以上。取消传统的发动机冷却系统，其中包括风扇、散热器、管路和护罩等会显著地增加可靠性和可维护性。相对于大多数传统冷却系统和极端的环境条件，这种发动机是不易损坏的。燃油经济性改善转化为车辆行程增加和减少后勤供应。比重量减小可改善车辆的敏捷性，而较小的车辆体积可以减小装甲覆盖面，使减轻车重和提高生存力的革新性设计成为可能。这种发动机也减少了排烟和噪声信号，从而提高了战斗车辆的生存力，而且高温工作还提供了一个较宽的许用燃料范围。采用这种型式的发动机，使战斗车辆设计的总准则所受的限制小得多。

了。有关冷却格栅、空气通道和一些设备的合理布置问题就可不予考虑。绝热发动机在民用方面的应用也有上述类似优点，而且在下列各方面更得到了改善，即排放、简易性、车辆动力学、使用成本以及维修等方面。必须注意到，民用和军用方面的故障，其中50%是与冷却系统有关的。

美国能源部与底特律柴油机阿利逊 (Allison) 公司已经将未来的绝热发动机结构分成3类，那就是：(a) 有适当风险的结构；(b) 有较大风险的结构；(c) 有高风险的结构，见表1-1。

表1-1 未来的绝热发动机结构分类

有适当风险的结构	薄涂层
	液体润滑
	常规摩擦
有较大风险的结构	金属气隙隔热
	液体润滑
	严重的(液体)摩擦
有高风险的结构	陶瓷气隙隔热
	固体润滑与摩擦

已得到验证的绝热发动机优点

燃油经济性

由于结构和应用的不同，不冷却绝热发动机的燃油经济性是不同的。小松 (Komatsu) 在 6 缸125mm缸径的涡轮增压柴油机上验证了高的热效率。最初在此方案中采用陶瓷涂层作为隔热和保护发动机零件的一种方法。在这种情况下比散热量仅减少了35%。在此应用中，相对于基型金属零件的情况，包括隔热效果、减少风扇驱动功率和涡轮复合等总

的燃油经济性改进为11.2%。所研究的发动机以其最后确定的结构，示范的热效率为48%。按小松设想，进一步减少比散热量，燃油经济性还可提高约2%。小松没有报道车辆试验的情况，但是，根据美国陆军坦克机动车辆局（USATA COM）所进行的工作及以下进一步讨论，在装车的情况下，燃油经济性可望还会有所提高（这主要是由于低的负荷和附加功率以及瞬态性能现象所造成的）。

早期绝热发动机是安装在一辆军用5 t卡车上。该发动机的全部燃烧表面都敷以陶瓷涂层，同时还取消了水冷却。这种型式的绝热发动机比其基型常规冷却的寇明斯（Cummins）NHC-250发动机的比散热量减少了38%。测功器数据表明，在绝热发动机的转速范围（在全负荷下）内，燃油经济性的增益为5~10%。安装在车辆内，绝热发动机对下列这些因素的影响看来是很大的：（a）在不同负荷和转速下的风扇和水泵附加功率；（b）隔热效果；（c）增高滑油温度；（d）构成新的空气动力学特性和减轻重量；（e）其他瞬态和稳态性能因素（尤其在公路的低负荷功率要求范围内，在这种工况下，附加功率损失对燃油经济性有较大影响）。当按照国内公路的瞬时负荷和转速循环运行时，采用绝热发动机结构的车辆试验数据似乎可说明，以上各种因素对燃油经济性的有利影响为20%以上。这种绝热发动机卡车至今已累积运行了约12000英里^①，未发生故障。现在陆军部正在按TACOM的技术方向进行投资，进一步从性能和可靠性观点鉴定该卡车，以便更好地了解低散热发动机的装车效果。陆军部还正在进行高功率战斗车辆应用的绝热发动机研

① 英、美长度单位，1英里=1.609344km。——编者

究,在这种应用中,绝热发动机装车后的燃油经济性似乎较通过单独测功器数据所预测的要好得多。

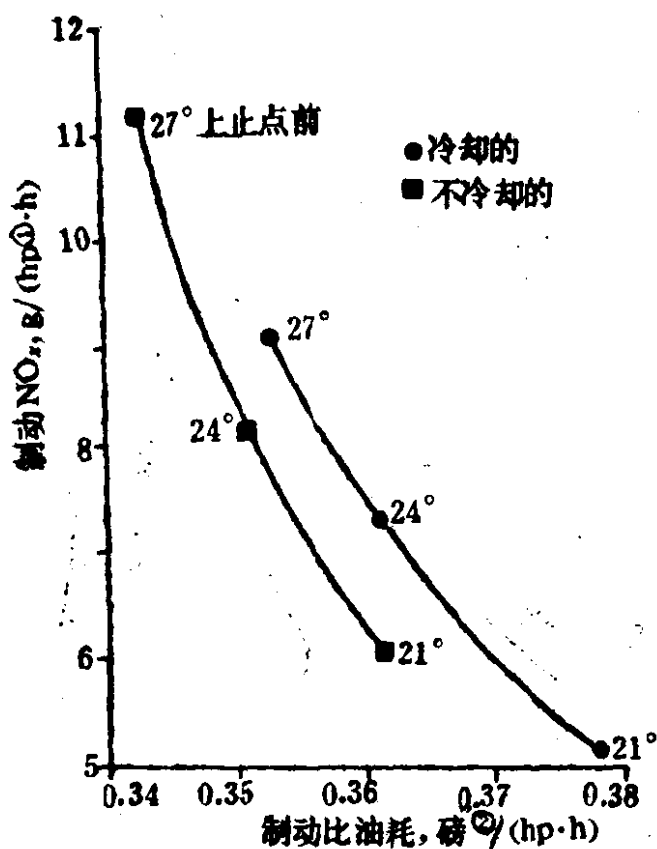
在轻型客车应用方面,福特(Ford)公司已经进行了有趣的试验,并对不冷却的直接喷射式柴油机进行了分析。一个实验的不冷却直喷式柴油机,在轻型车辆EPA CVS典型驱动循环的部分负荷工况下,其燃油消耗量较基型水冷柴油机约降低4~7%。该发动机的结构采用了陶瓷涂层的缸盖和气阀,隔热的钢顶活塞,在活塞环区以上的缸套是部分稳定氧化锆短缸套。该研究工作预测,对于全部隔热不冷却工作而言,在CVS驱动循环的转速和负荷工作范围内,油耗约降低3~12%,并提出,实际安装的发动机可能有附加的燃油经济性效益,但是这种示范装置还未见报道。

在世界范围内已经报道了有关绝热发动机燃油经济性方面的进一步成果,与以上所讨论的那些情况相比,有些结果要好,有些则差些。然而,作为结论性的意见是,对绝热发动机实际燃油经济性作出判断往往是很困难的,因为这要取决于诸如发动机结构、发动机样机的最佳状况以及具体应用等各种因素。为了更好地了解绝热发动机技术和所安装的车辆特性之间的协同效果,有必要进行更全面的调查研究。

排放

在排放方面,绝热发动机热燃烧室内着火延迟期缩短,从而可得到所要求的制动比 NO_x 排放和制动比油耗关系,见图1-1所示。

由于在较高温度的氧化环境中,HC和CO排放也减少了。在有关排放的调查研究中,业已注意到烟度和颗粒排放也减少了。在另外一些发动机研究人员的论文中已报道颗粒排放减少了60~80%。然而,另外一些研究人员却提出了一



① 1 hp (马力) = 0.7355 kW
 ② 1 磅 = 4.53592×10^{-1} kg

图1-1 冷却和不冷却发动机的制动NOx和
 制动比油耗关系(用 2 号柴油)

些与之相矛盾的数据。现在美国航空和航天局(NASA)正在进行一个全面的研究规划，以确定绝热发动机的排放特性。

多种燃料

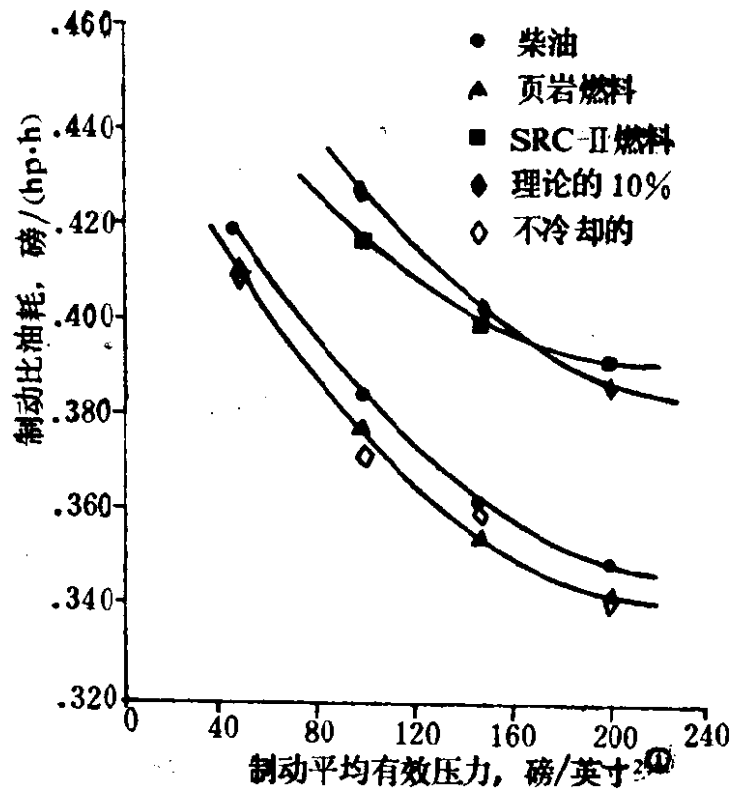
在此石油短缺的世界上还有许多其它的能源，这些重要的替代能源是矿物燃料、生物质、油页岩等。柴油机是迄今为止人所共知的效率最高的动力装置之一，同时，十分需要压燃式发动机能燃烧范围更广的各种替代燃料。

但是，很遗憾，这些替代燃料中有许多燃料是低十六烷值的，从而不适用于大多数柴油机。例如，高压压缩比预燃室

柴油机是很可能使用低级柴油燃料的，但是燃烧由煤衍生的燃油SRC-Ⅰ或煤粉（精选的）却完全不适合。

多种燃料研究的一个例子是在绝热发动机上直接点燃煤进行燃烧。直接点燃煤的燃烧问题过去一直存在机械和燃烧效率方面的困难。用硬陶瓷表面制造的绝热发动机能够克服早期研究中遇到的许多机械问题，这是自然合理的。而且，热的绝热燃烧室有可能缩短着火延迟期和增加放热率，从而达到更完全的燃烧和更高的热效率。

在多种燃料发动机中，为了消除燃烧室敲缸和控制压力升高率，十分需要缩短着火延迟期。现在普遍采用下列一种或两种方法来缩短柴油机的着火延迟期：



①1 磅/英寸² = 6894.76 Pa

图1-2 普通品种燃料和合成燃料的效率比较(1900r/min, 0.085固定定时)

(1) 预处理燃料;

(2) 改进发动机结构。

燃烧室壁温会相当地增高, 超过良好的多种燃料条件所需要的温度。热表面促使燃烧室具有良好的多种燃料能力。

图 1-2 表示用多种燃料所达到的最佳燃油经济性。

根据以上的基本说明, 许多研究人员正在研究在绝热发动机中用煤浆、煤粉、低级柴油燃料、甲醇和植物油的燃烧特性。

材料要求

关于陶瓷的评述

为了充分发挥绝热涡轮复合发动机的潜力, 必需发展新的隔热材料。可供选择的典型材料有: 超级合金、碳复合物和结构陶瓷。结构陶瓷在满足所要求的发动机特性方面具有极大的潜力, 而且还能保持合理的成本, 然而, 如果要达到成功的生产水平, 则还有许多工作有待进行。

在绝热发动机中, 工作压力、温度、可靠性和持久性的要求是十分严格的。为了使这些要求相适应, 必须研究陶瓷材料使之能在工作持续时间内经得住绝热发动机较高的压力和温度。

图 1-3 表示当前用于绝热发动机陶瓷材料的 4 点弯曲强度和温度的函数关系。最近, 实验室的烧结氮化硅显示了极好的强度-温度关系。然而, 氮化硅存在的一个问题是隔热性能差。对发动机瞬态热通量发生作用的陶瓷关键性能是导热性、密度和比热, 因此, 就绝热发动机应用而言, 氮化硅的基本缺点是很明显的。

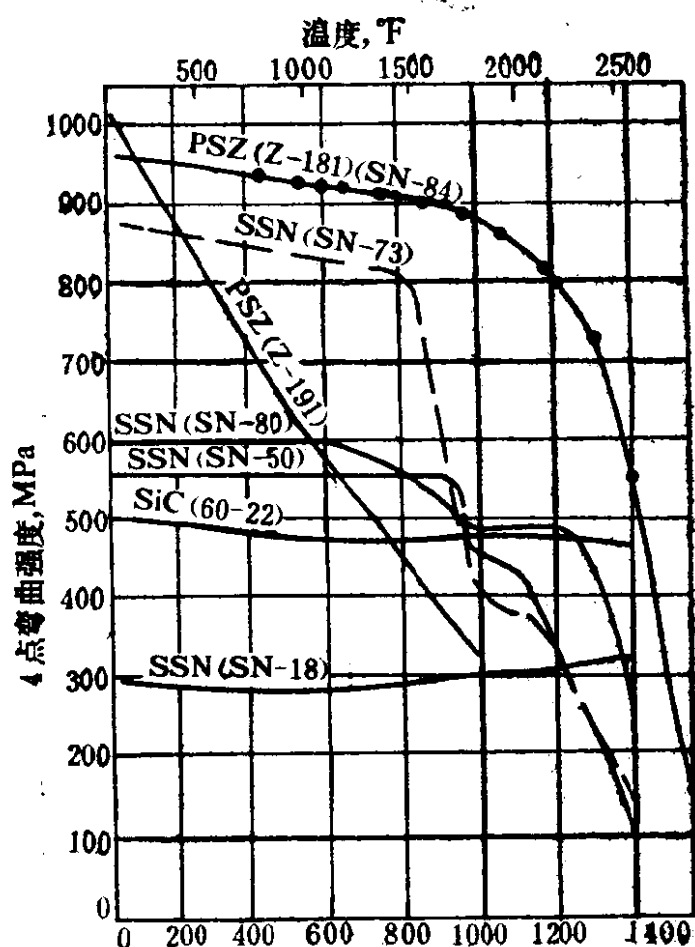


图 1-3 烧结SiE、PSZ和反应粘结Si₃O₄的4点弯曲强度与温度曲线

部分稳定氧化锆 (PSZ)的优点是有良好的韧性 K_{I-c} 、较高的膨胀系数、高隔热系数和绝热发动机要求的其它特点,但其缺点是高温强度差。此外,PSZ从四方晶相到单斜晶相的迅速相变是不合乎要求的,而且在目前工艺水平条件下,PSZ的长期工作持久性还不能令人满意。

碳化硅在高温下显示出有高强度的优点,但是一般讲来,在600~1000℃发动机工作温度下,它的强度却不如氮化硅。再者,碳化硅的热冲击性能较氮化硅要低得多,这可见表1-2所示的各种陶瓷和金属性能比较。